

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Pós-Graduação em Ecologia

Felipe Siqueira Pacheco

MOVIMENTOS DE MASSAS D'ÁGUA ATRAVÉS DE DERIVADORES  
LAGRANGIANOS E IMPLICAÇÕES PARA O ENTENDIMENTO DE PROCESSOS  
ECOLÓGICOS

JUIZ DE FORA  
2009

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Pós-Graduação em Ecologia

Felipe Siqueira Pacheco

MOVIMENTOS DE MASSAS D'ÁGUA ATRAVÉS DE DERIVADORES  
LAGRANGIANOS E IMPLICAÇÕES PARA O ENTENDIMENTO DE PROCESSOS  
ECOLÓGICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ecologia Aplicada a Conservação e Manejo de Recursos Naturais.

Orientadores: Prof. Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu  
Prof. Dr. Fabio Roland

JUIZ DE FORA  
2009

Pacheco, Felipe Siqueira.

Movimentos de massas d'água através de derivadores lagrangianos e implicações para o entendimento de processos ecológicos / Felipe Siqueira Pacheco. – 2009.

87 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ecologia )—Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

1. Ecologia aquática. 2. Reservatórios. I. Título.

CDU 574.4/.5

FELIPE SIQUEIRA PACHECO

MOVIMENTOS DE MASSAS D'ÁGUA ATRAVÉS DE DERIVADORES  
LAGRANGIANOS E IMPLICAÇÕES PARA O ENTENDIMENTO DE PROCESSOS  
ECOLÓGICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ecologia Aplicada a Conservação e Manejo de Recursos Naturais.

Defendido em 3 de julho de 2009.

---

Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu  
Instituto nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

---

Dr. Fabio Roland  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Dr. José Luiz Stech  
Instituto nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

---

Dr. Cássio Botelho Pereira Soares  
FURNAS Centrais Elétricas S.A.

JUIZ DE FORA  
2009

*Ao meu melhor amigo, meu maior exemplo de superação*  
*Dedico este trabalho ao meu irmão Bruno*

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Fabio Roland pelas infinitas oportunidades de crescimento profissional. Agradeço pelas conversas, pois delas retiro o incentivo de aprender mais e continuar adiante; pelos conselhos, que me nortearam em minha caminhada pelo caminho mágico da ciência e do conhecimento; e pelas discussões sadias, que me ensinaram a entender melhor os meus defeitos e as minhas virtudes. Muito obrigado pela orientação durante todos esses anos.

Ao Prof. Dr. Arcilan Assireu que, com a paciência de um relojoeiro e a grandeza de um cientista, me apresentou a limnologia física e contribuiu com seus conhecimentos para a realização deste trabalho. Obrigado pela amizade e pelo respeito. Agradeço pela orientação, pela disponibilidade e pelo incentivo ao trabalho. A sua amizade foi, é e sempre será muito importante para mim.

Aos Doutores Cássio Botelho Pereira Soares e José Luiz Stech que, além de aceitaram o convite para participarem da banca examinadora, participaram e contribuíram para minha formação profissional.

Ao pessoal da COPPE: Marco Aurélio dos Santos, Carlos Henrique Eça D'Almeida Rocha, Ednaldo Oliveira dos Santos, por nos fornecerem a estação meteorológica que auxiliou nos trabalhos de campo e por terem nos atendido atenciosamente e auxiliado na configuração da estação.

À FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., CAPES (projeto nº 586/2006) e CNPq (projeto nº 482488/2007-7) pelo apoio financeiro e infra-estrutura concedida para a realização desse projeto.

À Natalia, que durante quatro anos compartilhei todo meu carinho, respeito e atenção. Obrigado por ter estado presente em tudo que me proporcionou chegar até aqui. Agradeço por me escutar quando menos podia ouvir, por me encorajar quando me sentia derrotado e por ter participado dos meus sonhos durante todo esse tempo.

Agradeço aos meus amigos do Laboratório Alessandro, Anderson, Caique, Eliese, Emílio, Fernanda, Gladson, Guilherme Alfenas, Guilherme Andrade, Luciana, Lúcia, Maria Carolina, Maíra, Mariana, Marina, Michele, Nathan, Priscila, Rafael Almeida, Rafael Paiva, Raphaela, Raquel e Simone. Vocês fazem parte de tudo isso e sempre que precisarem de mim ficarei muito feliz em ajudar.

Pelo trabalho de campo, agradeço em especial ao Anderson, Amaury, Arcilan, Michele, Rafael e Simone que se empenharam muito durante todos os experimentos e que ajudaram, com paciência e tranquilidade, na hora dos imprevistos.

Aos meus familiares e em especial à minha mãe, Creusa; pai, João; irmão, Bruno e irmã, Ana Carolina, que mesmo de longe me observaram e me apoiaram nas minhas decisões. Obrigado por terem acreditado em mim e por compreenderem a minha ausência durante muitos momentos. Penso em vocês em todos os lugares que vou. Em cada viagem e em cada lugar bonito que conheço, penso um dia ter a oportunidade de levá-los lá. Obrigado por tudo, amo todos vocês.

Ao Carlos Roberto, que sempre me tratou como filho e me aconselhou durante todos esses anos. Obrigado pelas idéias, preocupações e pelas ajudas.

Agradeço especialmente ao Tio Luiz, Tia Deta, Marcelo, Junior e Du que, durante todos os meus estudos em Juiz de Fora, me receberam em sua casa. Considero vocês como pai, mãe e irmãos e sempre serão lembrados como exemplo de amor e família. Obrigado por tudo!

À Marcela, que nesse último ano ocupou um lugar especial em minha vida. Obrigado pela paciência e companheirismo nos momentos difíceis e nos últimos passos para a realização desse trabalho. Agradeço a dedicação, a atenção e os cuidados. Amo muito você!

Por fim, obrigado a DEUS por ter iluminado meu caminho e ter me dado serenidade para seguir em frente. Obrigado pela proteção e paz.



## RESUMO

Os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos ambientes aquáticos estão fortemente acoplados aos processos hidrodinâmicos. O conhecimento dos processos responsáveis pela dispersão horizontal e vertical são pontos importantes para a compreensão da ciclagem de nutriente, dispersão de substâncias, produtividade primária e outros processos ecológicos. Apesar da importância, poucos estudos desta natureza são realizados em sistemas aquáticos continentais brasileiros, embora estes já tenham sido realizados em outros países. Durante anos, os derivadores lagrangianos vem sendo utilizado na área da oceanografia, a fim de entender as correntes de águas marítimas. Este trabalho propôs: (1) o desenvolvimento de um derivador lagrangiano adaptado às condições de ecossistemas continentais; (2) desenvolvimento da cadeia de termistores, tendo em vista a aquisição de dados sobre a estrutura termal vertical, auxiliares para o presente estudo; (3) fazer uso do derivador para entender processos biogeoquímicos e; (4) entender o comportamento das correntes de densidades e a influencia da operação da usina para o padrão de circulação dos reservatórios. O trabalho foi realizado no reservatório APM Manso, localizado próximo a cidade de Cuiabá, Mato Grosso. Nossos estudos mostraram: (1) o vento determinou grande parte dos movimentos ocorridos nos primeiros metros da coluna d'água. (2) as turbinas influenciaram no padrão das correntes tanto diretamente (sucção pela turbina), quanto indiretamente (pela corrente de retorno). (3) movimentos advectivos foram predominantes na região intermediária do reservatório, indicando que pequenas variações temporais na condição inicial da dinâmica podem ser igualmente importantes a pequenas variações espaciais. (4) a diminuição da velocidade do rio ao entrar no reservatório pode causar mistura de águas profundas com águas superficiais, regida pela instabilidade de Kelvin-Helmholtz, proporcionando aumento da densidade fitoplanctônica.

Palavras-chave: reservatório. processos hidrodinâmicos. derivadores lagrangianos

## ABSTRACT

Physical, chemical and biological processes that occur in aquatic ecosystems are strongly dependent of hydrodynamic. Process responsible for horizontal and vertical dispersion are important points for the comprehension of nutrient cycle, substances dispersion, primary productivity and others ecological process. In despite of many studies have been done in others country, few studies were made in continental Brazilian aquatic ecosystems. During many years, lagrangian drifters have been used in oceanography to understand ocean water current. The purpose of this work was: (1) development of the lagrangian drifters adapted to continental ecosystems; (2) development of termistor chain to understand the vertical thermal structure; (3) use of drifters to understand biochemical process and; (4) understand the density currents and the influence of the dam to the water circulation in the reservoir. Experiments were carried out in APM Manso reservoir, located near Cuiaba city, Mato Grosso. Our studies showed: (1) most of movements in the surface layer were wind induced; (2) current was influenced by turbines suction (direct influence) and by return current from the dam (indirect influence); (3) advective movements were predominant in intermediary region of the reservoir. It indicates that small temporal variation in the initial condition could be as important as small spatial variation; (4) the interaction among river and reservoir water engendered the Kelvin-Helmholtz instability. It causes vertical mixing of deep water that can increase phytoplankton density.

Key-words: reservoirs. hydrodynamic process. lagragian drifts

## Lista de Ilustrações

Mapa 1 – Mapa representativo do reservatório APM Manso. Os círculos em preto correspondem aos pontos de coletas de dados para análise da hidrologia do reservatório. O círculo em vermelho corresponde ao local onde foi instalada a estação meteorológica.....	23
Esquema 1 – Esquema ilustrativo do Derivador com aplicações em ambientes lacustres.....	25
Fotografia 1 – Imagem da estrutura emersa evidenciando o espaço interno para a alocação das partes eletrônicas.....	25
Fotografia 2 –Estrutura emersa constituída de fibra de vidro.....	25
Fotografia 3 – Vela de arrasto montada e acoplada a parte emersa do derivador.....	26
Fotografia 4 – Parte imersa (vela de arrasto) desmontada.....	26
Esquema 2 – Esquema dos circuitos eletrônicos encontrados no interior da esfera de superfície. (Fonte: IMPLÉ – Sistemas Eletrônicos Embarcados).....	27
Esquema 3 – Esquema da estrutura da cadeia de tremistor instalados no reservatório APM Manso.....	28
Fotografia 5 – Foto da estação meteorológica WeatherHawk Weather Station.....	30
Mapa 2 – Dados SRTM sem tratamento de imagem (a). Representação do fundo do reservatório a partir de dados SRTM corrigido com dados de campo (b).....	32
Gráfico 1 – Componentes posicionais antes (a) e após (b) a aplicação da matriz de transformação.....	37
Gráfico 2 – Reapresentação das componentes sobre o reservatório APM Manso antes (a) após (b) a aplicação da matriz de transformação.....	37

Esquema 4 – Exemplo de matrizes representativas de campos vetoriais assimétricos. (a): seis vetores assimétricos, (b) e (c): todos os vetores são assimétricos (Fonte: Rosa <i>et al.</i> (1999)).....	39
Esquema 5 – Campo de triangulação para as matrizes (b) e (c) do Esquema 4 (Fonte: Rosa <i>et al.</i> (1999)).....	40
Esquema 6 – (a) um típico padrão de variabilidade extraído de uma série relativa a uma variável genérica $V(t)$ , (b) sua correspondente matriz; (c) correspondente campo gradiente (nove vetores assimétricos) e (d) campo de triangulação com 20 linhas conectoras (Fonte: Assireu <i>et al.</i> (2002)).....	41
Mapa 3 – Mapa da posição de lançamento dos derivadores nos experimentos realizados no período de 13 a 17 de janeiro de 2009. Na tabela estão as datas, lat/long, tempo de duração total dos experimentos, número de derivadores lançados e profundidade das velas de arrasto.....	42
Gráfico 3 – Parâmetros meteorológicos durante os experimentos. (a) Temperatura do ar e superfície da água. (b) Umidade relativa. (c) radiação de onda curta e (d) intensidade do vento.....	45
Gráfico 4 – Evolução temporal da estrutura termal durante os experimentos. Os dados apresentados correspondem ao da cadeia 5.....	45
Gráfico 5 – Gráfico das trajetórias dos derivadores lançados no dia 13 de janeiro de 2009....	46
Gráfico 6 – Gráfico das velocidades componentes e resultantes dos derivadores lançados a 1, 10, 20 e 30 metros no dia 13 de janeiro de 2009.....	49
Gráfico 7 – Temperatura na vela dos derivadores no experimento do dia 13 de janeiro de 2009. (a) variação da temperatura nas profundidades das velas de arrasto durante o período do experimento. (b-f) Temperatura de cada profundidade, evidenciando a variação da temperatura durante o experimento.....	52

Gráfico 8 – Gráfico das trajetórias dos derivadores lançados no dia 14 de janeiro de 2009....	53
Gráfico 9 – Gráfico das velocidades componentes e resultantes dos derivadores lançados a 1, 10 e 30 metros no dia 14 de janeiro de 2009.....	55
Gráfico 10 – Temperatura na vela dos derivadores no experimento do dia 14 de janeiro de 2009. (a) variação da temperatura nas profundidades das velas de arrasto durante o período do experimento. (b-e) Temperatura de cada profundidade, evidenciando a variação da temperatura durante o experimento.....	57
Gráfico 11 – FA local aplicado ao longo da trajetória de escoamento do derivador com a vela posicionada a 1 metro de profundidade.....	59
Gráfico 12 – FA local aplicado ao longo da trajetória de escoamento do derivador com a vela posicionada a 10 metro de profundidade.....	60
Gráfico 13 – FA local aplicado ao longo da trajetória de escoamento do derivador com a vela posicionada a 30 metros de profundidade.....	61
Gráfico 14 – Gráfico da velocidade da corrente a um metro de profundidade. A linha contínua representa os dados observado pelo derivador 1 no dia 13 de janeiro de 2009, e a linha tracejada representa os valores estimados a partir dos dados de vento para o mesmo período de tempo. As séries foram filtradas e foram removidos os sinais com frequência maiores do que $\frac{1}{15 \times 60} \text{ s}^{-1}$ . Os valores estão avançados no tempo por um fator de 2,5 horas.....	62
Gráfico 15 – (a) área do polígono formada pelos derivadores lançados no dia 13 de janeiro. (b) Desvio padrão $\sigma_x$ e $\sigma_y$ ao longo das direções x e y e desvio padrão em duas dimensões $\sigma_{xy} = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2}$ . (c) Coeficiente de dispersão $K = 0.5 \text{ d}\sigma_{xy}^2/\text{dt}$ . Tempo dado em horas a partir do lançamento.....	66

Gráfico 16 – Gráfico das trajetórias dos derivadores lançados no dia 16 de janeiro de 2009. A seta indica a situação em que as trajetórias de dois derivadores se cruzam pela primeira vez.....	67
Gráfico 17 – (a) área do polígono formada pelos derivadores lançados no dia 16 de janeiro. (b) Desvio padrão $\sigma_x$ e $\sigma_y$ ao longo das direções x e y e desvio padrão em duas dimensões $\sigma_{xy} = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2}$ . (c) Coeficiente de dispersão $K = 0.5 d\sigma_{xy}^2/dt$ . Tempo dado em horas a partir do lançamento. A linha tracejada corresponde ao início do período quando as estimativas tornam-se não confiáveis.....	68
Mapa 4 – Trajetória dos derivadores. (a) derivadores posicionados no rio e transição rio-reservatório. (b) derivador posicionado no interior do reservatório, com a vela de arrasto posicionada na calha do Rio Manso.....	69
Esquema 7 – Modelo da evolução de um rio em um ambiente estratificado (fonte: Özgökmen <i>et al.</i> (2006).....	71
Gráfico 18 – Comparação entre a densidade fitoplanctônica no ponto de entrada do rio no reservatório e a média do reservatório APM Manso.....	71

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Coordenadas Lat/Long dos pontos de hidrologia. ....	23
Tabela 2 – Descrição das cadeias de termistores e indicação de quais profundidades foram instaladas as cadeias de termistores. ....	29
Tabela 3 – Valores médios e desvios padrão das velocidades e dos FAs dos dados observados e estimados para o derivador 1 do dia 13 de janeiro de 2009. ....	63

## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>16</b>
<b>2. Objetivo Geral .....</b>	<b>21</b>
<b>3. Área de Estudo.....</b>	<b>22</b>
<b>4. Materiais e Métodos .....</b>	<b>24</b>
4.1. Descrição do Derivador de Baixo Custo (DBC).....	24
4.2. Sistema de Posicionamento Global (GPS).....	27
4.3. Sistema de termistores em série (cadeia de termistores) .....	28
4.4. Estação meteorológica .....	29
4.5. Batimetria.....	30
4.6. Cálculo da corrente média .....	33
4.7. Séries de tempo de velocidade instantânea.....	34
4.8. Matriz de transformação dos dados de posicionamento dos derivadores. ....	35
4.9. O método da Análise do Padrão de Gradientes (APG).....	37
4.10. Datas dos Experimentos com os derivadores.....	42
<b>5. Resultados e discussão .....</b>	<b>44</b>
5.1. Condições ambientais durante os experimentos .....	44
5.2. Descrição das correntes medidas a partir das trajetórias dos derivadores. ....	46
5.3. Análise via Fator de Assimetria (FA) e influencia do vento .....	58
5.4. Resultados do experimento de dispersão .....	65
5.5. Análise dos resultados do experimento influência do rio. ....	69
<b>6. Conclusões finais e perspectivas.....</b>	<b>74</b>
<b>7. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>77</b>



## 1. Introdução

O estudo do movimento de massas d'água em lagos e reservatórios fornece subsídios para o entendimento de processos físicos, químicos e biológicos. O funcionamento dos sistemas aquáticos, frequentemente caracterizados como reatores biológicos e químicos, é, em grande extensão, dependente dos processos hidrodinâmicos. Os processos hidrodinâmicos determinam as condições ambientais que afetam a biogeoquímica e influenciam o tempo em que a água e seus constituintes permanecem no sistema (Rueda & Cowen, 2005). Vários processos de circulação de massas d'água ocorrem frequentemente em ambientes aquáticos, como resposta a forçantes externas tais como vento e incidência de radiação solar. A atuação do vento sobre a superfície de lagos e reservatórios, por exemplo, induz a formação de correntes e ondas. Assumindo um lago hipotético sem contornos (e infinitamente grande), autores têm mostrado que ação do vento produziria uma corrente aproximadamente alinhada no mesmo sentido da forçante climática, no entanto, mais intensa na superfície e decaindo com a profundidade (Laval *et al.*, 2003; Spigel and Imberger, 1980). Em uma situação real, a corrente induzida pela ação do vento interage com o entorno do lago, influenciando fortemente o padrão de circulação média (Kalf, 2001). A presença do entorno induz correntes de retorno e ondas (Csanady, 1982). Efeitos bastante complexos podem surgir quando o corpo d'água é estratificado termicamente. Neste caso, o vento pode transportar água de um lado para o outro do lago, causando uma depressão da termoclina no lado do “empilhamento” da água. Quando o vento cessa, a termoclina retorna a posição anterior, o que desencadeia um movimento interno chamado de seiches. De acordo com Korgen 1995, este evento consiste da oscilação vertical da termoclina, o que induz movimentos verticais ascendentes e descendentes. Estas ondas internas podem induzir e controlar muitos processos físicos, químicos e biológicos em lagos e reservatórios estratificados, exercendo desta maneira,

função importante como fonte de energia para os processos de dispersão vertical e horizontal (Mortimer, 1974). A diferença entre a densidade das águas é outro fator que deve ser considerado no estudo do movimento das massas d'água. As águas do rio, que pode possuir temperatura diferente do corpo do reservatório, ao alcançarem o reservatório mergulham e passam a fluir ao longo da camada superficial, intermediária ou profunda (Martin & McCutcheon, 1999) em função desta diferença como uma corrente de densidade (Ford, 1990). Esta variação na densidade pode ser causada por temperatura, sólidos totais dissolvidos e sólidos em suspensão. Assim, após “mergulhar” no reservatório, o rio pode seguir o seu antigo canal como uma corrente profunda.

Correntes superficiais (overflow) podem ser induzidas quando águas das regiões mais rasas acumulam mais calor do que as de regiões profundas (aquecimento diferenciado), quando a turbidez varia horizontalmente, e quando a profundidade de exposição à mistura promovida pelo vento varia horizontalmente (Imberger & Parker, 1985; Monismith *et al.*, 1990). MacIntyre *et al.* (2002) mostrou que Correntes profundas (underflow) podem surgir quando a perda de calor é maior em áreas menos profundas do corpo d'água. Assireu *et al.* (2009) estudaram a evolução do rio ao longo do reservatório como uma circulação profunda (underflow). Os autores mostraram que esta circulação esteve associada ao efeito combinado das menores temperaturas e maior concentração de sólidos dissolvidos na água do rio em relação a do reservatório e da indução promovida pela saída de água nas turbinas.

Em ambientes aquáticos continentais, associados ao efeito da borda (forma e tamanho) e ao encontro de massas de águas diferentes, os movimentos naturais de massas de água podem gerar regiões conhecidas como vórtices. Essas regiões apresentam escoamento giratório onde as correntes apresentam movimentos em espiral. Essas regiões são amplamente estudadas nos oceanos e pouco é relatado na literatura nos ambientes aquáticos continentais. Considerando aspectos ecológicos, esse fenômeno proporciona turbulência suficiente para

oxigenação da água e transporte para as camadas mais profundas. Além disso, pode proporcionar o transporte de nutrientes acumulados nas camadas mais profundas para as camadas superficiais proporcionando um aumento na produtividade primária nas regiões de entorno.

A maior parte da produção primária ocorre nas camadas superficiais em ambientes aquáticos estratificados, (Stocker & Imberger, 2003). Portanto, o conhecimento de processos responsáveis pela dispersão horizontal é ponto importante para a compreensão da dinâmica biológica de um lago. A advecção horizontal causada pelas correntes de superfície induzidas pelo vento exerce importante função no transporte do fitoplâncton. Isto indica que o fitoplâncton é distribuído em manchas ao longo do reservatório, provavelmente devido às variabilidades horizontais na condição do habitat. (Serra *et al.* 2007). Apesar disso, estudos desta natureza em sistemas aquáticos continentais brasileiros são oriundos dessa dissertação (Pacheco *et al.* 2009), embora estes já tenham sido realizados por vários pesquisadores em outros países: Quay *et al.* 1979; Peeters 1994; Lawrence *et al.* 1995; Peeters *et al.* 1996; Antenucci & Imberger 2001 e Stocker & Imberger 2003. Os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos ambientes aquáticos estão fortemente acoplados aos processos hidro-termodinâmicos. As misturas verticais que ocorrem no metalímnio quebram a barreira natural imposta pela estratificação. Isto facilita, por exemplo, a produção primária na camada superficial pela incorporação, nas camadas superficiais, de águas ricas em nutrientes provenientes do hipolímnio (Ostrovsky *et al.*, 1996) levando a redistribuição ou mudança das comunidades fitoplanctônicas próximas das margens (Heufelder *et al.* 1982, Haffner *et al.* 1984, Dunstall *et al.* 1990, Megard *et al.* 1997).

Os movimentos horizontais, que é o foco deste trabalho, influenciam e são influenciados pelos movimentos verticais, e para entender a complexidade das circulações é preciso conhecer como ocorrem algumas dessas interferências. A ressurgência induzida pelo

vento é um processo que pode ocorrer em lagos e reservatórios estratificados, resultado do balanço entre o cisalhamento do vento na superfície e o gradiente horizontal de pressão da superfície do lago. Em outras palavras, a corrente horizontal provocada pelo vento empilha a água na margem para a qual sopra o vento gerando uma pressão maior nessa região. Este fato induz, na região do lago oposta ao empilhamento, um movimento vertical caracterizado pela subida de águas do fundo para a superfície (Monismith, 1985, 1986; Stevens & Imberger, 1996; Farrow & Stevens, 2003). A ressurgência é considerada parcial quando águas intermediárias (metalímnio) alcançam a superfície e total, quando águas do fundo (hipolímnio) alcançam a superfície (Monismith, 1986).

A distribuição de alguns gases e o padrão de mistura vertical também exercem papel fundamental nos ciclos biogeoquímicos dos sistemas aquáticos, em especial para a interface ar-água (Warnninkhof, 2002; Cole & Caraco, 2001). Diversos estudos indicam que a maioria dos lagos distribuídos pelo mundo é supersaturado em dióxido de carbono (Jonsson *et al.*, 2003; Cole & Coraco, 2001; Roland & Vidal, 2001; Cole & Coraco, 1998; del Giorgio *et al.*, 1997) resultando na exportação de CO<sub>2</sub> do lago para a atmosfera em função da respiração do carbono de origem alóctone (Sobek *et al.* 2005; Hanson *et al.*, 2004; Sobek *et al.*, 2003; Jonsson *et al.*, 2003; Hanson *et al.*, 2003; Jonsson *et al.*, 2001; Cole *et al.*, 2000; Jansson *et al.*, 2000; Prairie *et al.*, 2002; del Giorgio *et al.*, 1999; Cole *et al.*, 1994). Sendo assim, sistemas aquáticos estratificados tendem a acumular tanto CO<sub>2</sub> quanto CH<sub>4</sub> no hipolímnio os quais podem contribuir para o estoque de carbono inorgânico nas camadas superficiais do sistema em função da movimentação das camadas d'água. A identificação da origem do CO<sub>2</sub>, se proveniente da respiração planctônica ou proveniente do hipolímnio, é um aspecto que deve ser abordado no estudo da emissão dos níveis de CO<sub>2</sub>.

Para o entendimento dos processos de circulação que influenciam nos fenômenos mencionados anteriormente existem dois métodos diretos de medidas: método Lagrangiano e

Euleriano. Medidas Lagrangianas do escoamento são assim chamadas quando o instrumento de medida segue as parcelas do escoamento. Portanto, as trajetórias (ou os caminhos seguidos pelos instrumentos) resultantes deste processo representam a circulação existente no ambiente em estudo, tendo-se como referencial um sistema de coordenadas. Ao contrário, medidas Eulerianas do escoamento são aquelas em que o instrumento de medida permanece fixo e mede a velocidade das parcelas do escoamento que passam no ponto onde este instrumento está fixado. Um exemplo de medidas Eulerianas são os correntômetros ancorados.

O método de medidas lagrangeanas, ao contrário do método Euleriano que mede temporalmente correntes em locais fixos no espaço, tem a vantagem de oferecer, com menor quantidade de instrumentos, uma maior cobertura em um espaço bidimensional (eixos  $x,y$ ). Esta metodologia é muito útil na descrição em meso e grande escala das correntes do mar. Outra desvantagem do Método Euleriano em relação ao Lagrangiano é que o correntômetro fundeado é altamente sensível a variações em velocidade e direção da corrente com o tempo. (Stevenson, 1996).

## **2. Objetivo Geral**

- Fazer uso dos derivadores lagrangianos posicionados via satélite para estudar aspectos da circulação no reservatório APM Manso e suas implicações para processos ecológicos como distribuição de fitoplâncton, dispersão de substâncias e ciclagem de nutrientes.

### **Objetivos específicos**

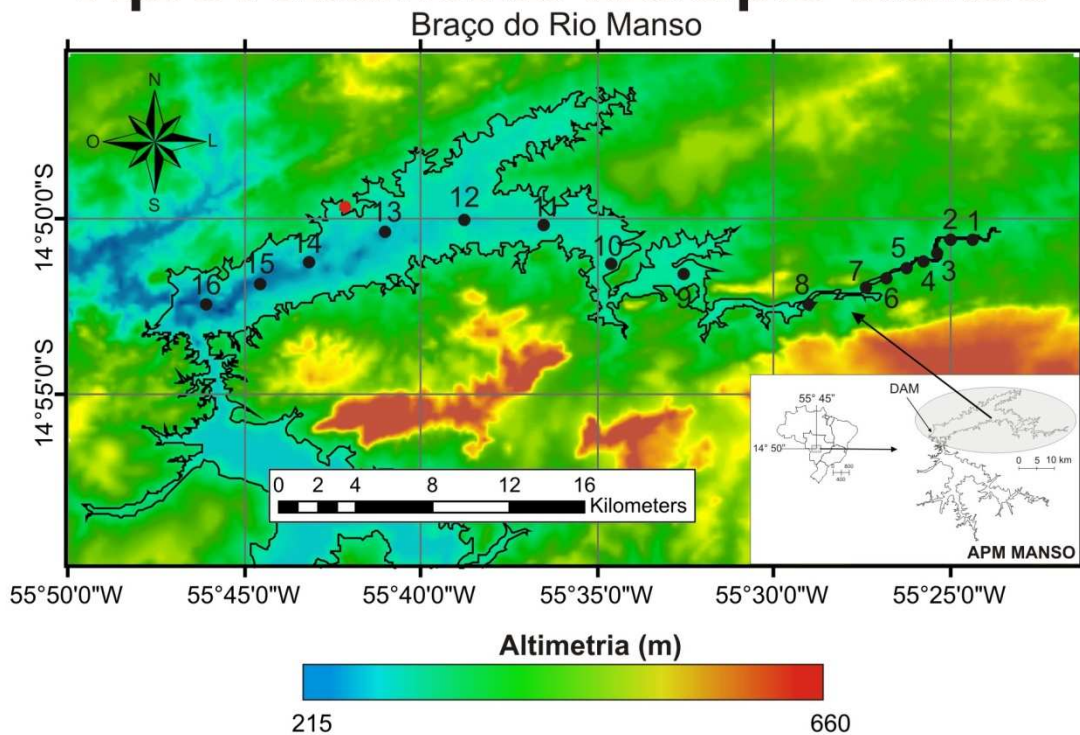
- Desenvolvimento do equipamento: derivador lagrangiano de baixo custo adaptado a partir dos derivadores utilizados na oceanografia.
- Desenvolvimento da cadeia de termistores bem como do adequado sistema de fundeio, tendo em vista a aquisição de dados sobre a estrutura termal vertical, auxiliares para o presente estudo.
- Fazer uso da capacidade do derivador em amostrar diferentes profundidades do escoamento, para estudar o comportamento das correntes de densidade e a influência da operação da usina para o padrão de circulação dos reservatórios;

### 3. Área de Estudo

O reservatório de APM Manso (14° 52'S; 55°40'W) (mapa 1) está localizado na região de cerrado brasileiro, onde prevalece o clima tropical úmido com uma estação chuvosa durante o verão (dezembro a fevereiro) e um período seco durante o inverno (Junho a Agosto). A construção do APM Manso foi concluída em novembro de 1999 quando ocorreu o fechamento da comportas e início do novo regime hidrológico da bacia do Rio Cuiabá. O reservatório tinha previsão de enchimento para dezembro de 2000, fato que não ocorreu devido à baixa pluviosidade em 2001, período em que se teve grande racionamento energético no país. O enchimento do reservatório só foi concluído em março de 2002, quando atingiu o nível mínimo de operação, cota 287, período em que houve intensas precipitações. O reservatório ocupa uma área de 357 Km<sup>2</sup> e um volume de 6.5 Km<sup>3</sup>. A área da bacia de drenagem de todo o reservatório é de 9365 km<sup>2</sup>. O tempo de residência da água neste reservatório é de aproximadamente 2,47 anos e a coluna d'água possui uma profundidade média de 18 metros e máxima de 60 metros. A temperatura média anual é 26°C. Quanto à pluviosidade, a taxa anual fica em torno de 1300 mm e a umidade relativa média nos meses de novembro a abril é inferior a 80%, e nos meses secos, inferior a 60%. A temperatura média da superfície da água ao logo do reservatório durante o período de amostragem é de 29°C. O pH da água é ligeiramente alcalino variando entre 7,1 a 7.9.

O presente estudo foi realizado no braço do Rio Manso que corresponde ao principal afluente do reservatório.

# Aproveitamento Múltiplo Manso



Mapa 1 – Mapa representativo do reservatório APM Manso. Os círculos em preto correspondem aos pontos de coletas de dados para análise da hidrologia do reservatório. O círculo em vermelho corresponde ao local onde foi instalada a estação meteorológica.

Tabela 1 – Coordenadas Lat/Long dos pontos de hidrologia.

Pontos	Coordenadas	
	Lat	Long
1	S 14, 84264	O 55,40898
2	S 14, 84325	O 55,41870
3	S 14, 84925	O 55,42180
4	S 14, 85260	O 55,43085
5	S 14, 85712	O 55,43959
6	S 14, 86162	O 55,44860
7	S 14, 86632	O 55,45744
8	S 14, 87259	O 55,48498
9	S 14, 86056	O 55,54419
10	S 14, 85564	O 55,57829
11	S 14, 83830	O 55,61012
12	S 14, 83620	O 55,64807
13	S 14, 84098	O 55,68504
14	S 14, 85387	O 55,72108
15	S 14, 86529	O 55,74276
16	S 14, 87464	O 55,76904



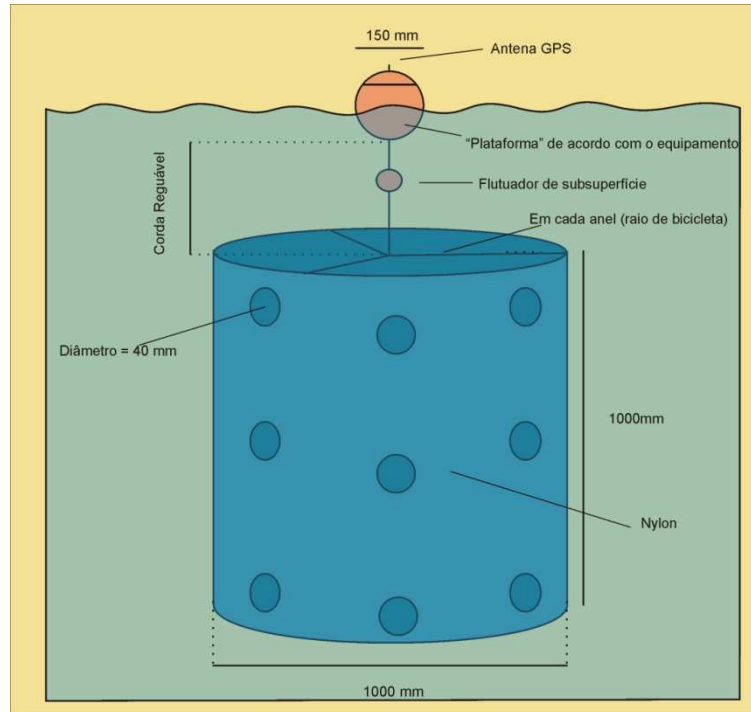
## 4. Materiais e Métodos

### 4.1. Descrição do Derivador de Baixo Custo (DBC)

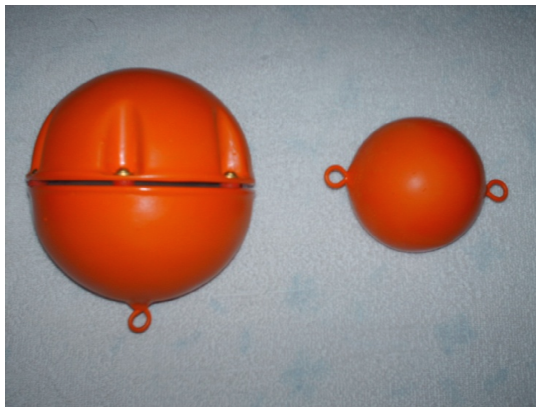
Os derivadores de baixo custo são assim chamados por apresentarem preço máximo de cinco mil reais, o que corresponde a 15% do valor dos equipamentos utilizados atualmente para estudos de correntes em ecossistemas aquáticos continentais. Derivadores similares ao utilizado neste trabalho são largamente utilizados em estudos oceânicos. Porém, dadas as dimensões dos oceanos, os Derivadores utilizados são descartados ao final do estudo, já que os custos logísticos envolvidos para seu resgate são muito elevados. No mar, bóias oceanográficas vêm sendo eficientemente utilizadas como bases para plataformas de coletas de dados (PCDs), coletando e transmitindo a determinados satélites parâmetros físicos medidos *in situ*. Os derivadores oceânicos utilizam sistemas de coletas de dados sendo que o mais utilizado é o sistema ARGOS. O segmento espacial ARGOS (<http://www.argos-system.org/>) constitui-se de dois satélites operacionais NOAA e cada satélite é equipado com o Sistema de Localização e Coleta de Dados (SLCD), o qual recebe e grava todas as transmissões das plataformas que estiverem dentro de seu “campo de visada” durante cada passagem. Porém o erro existente no posicionamento no Sistema de Localização do sistema ARGOS pode chegar a 300m, o que comprometeria a utilização desse sistema em ambientes límnicos, já que as dimensões dos sistemas são muito menores do que as dimensões oceânicas. O Derivador para estudos lacustres tem como diferenças em relação ao “Derivador Oceânico” o fato de ser recuperado ao final do estudo e de armazenar internamente as sucessivas posições obtidas via GPS.

O Esquema 1 ilustra o derivador desenvolvido e utilizado nesse trabalho. A parte emersa (fotografia 1 e 2) do derivador constitui-se de uma esfera feita em fibra de vidro,

com 15 cm de diâmetro, dentro da qual são instaladas baterias, GPS, memórias digitais, placas eletrônicas e demais cargas úteis do sistema.



Esquema 1 – Esquema ilustrativo do Derivador com aplicações em ambientes lacustres.



Fotografia 1 –Estrutura emersa constituída de fibra de vidro.



Fotografia 2 – Imagem da estrutura emersa evidenciando o espaço interno para a alocação das partes eletrônicas.

A estrutura cilíndrica (fotografia 3 e 4), chamada vela de arrasto, tem por finalidade acoplar o derivador às correntes em estudo o que assegura o monitoramento de correntes por minimizar os deslocamentos causados, por exemplo, pela ação do vento diretamente sobre o flutuador de superfície. Esta vela é construída em nylon suportado por estrutura cilíndrica construída com raios semelhantes aos de bicicleta e anéis constituídos de aço inoxidável.

Conhecida na literatura como meia furada (holey sock), esta vela possui vários pequenos orifícios por onde a água pode entrar e sair, o que tende a melhorar a sua hidrodinâmica. O cabo que liga o Derivador à vela tem comprimento regulável, o que capacita o derivador amostrar o escoamento em diferentes níveis e profundidades. Isto permite estudos sobre variabilidades verticais no escoamento, influências das correntes de densidade e da operação da usina para o padrão de circulação. A proporção vela/flutuador de superfície mantém a proporção de 40 pra 1 de acordo com a literatura (Sybrandy & Niiler, 1991). A determinação das dimensões dos derivadores depende do ambiente em que será utilizado. No oceano, as dimensões da esfera chegam a 40 cm de diâmetro e 7 m de comprimento da vela. Neste trabalho, propomos o menor tamanho possível para o derivador considerando a necessidade de um espaço interno para a instalação do sistema de localização. O flutuador de superfície (vide Esquema 1) constitui-se em uma pequena esfera oca feita em fibra de vidro que tem por finalidade dar maior estabilidade ao conjunto. Seu diâmetro é calculado pela relação entre empuxo e o peso da vela dentro d'água.



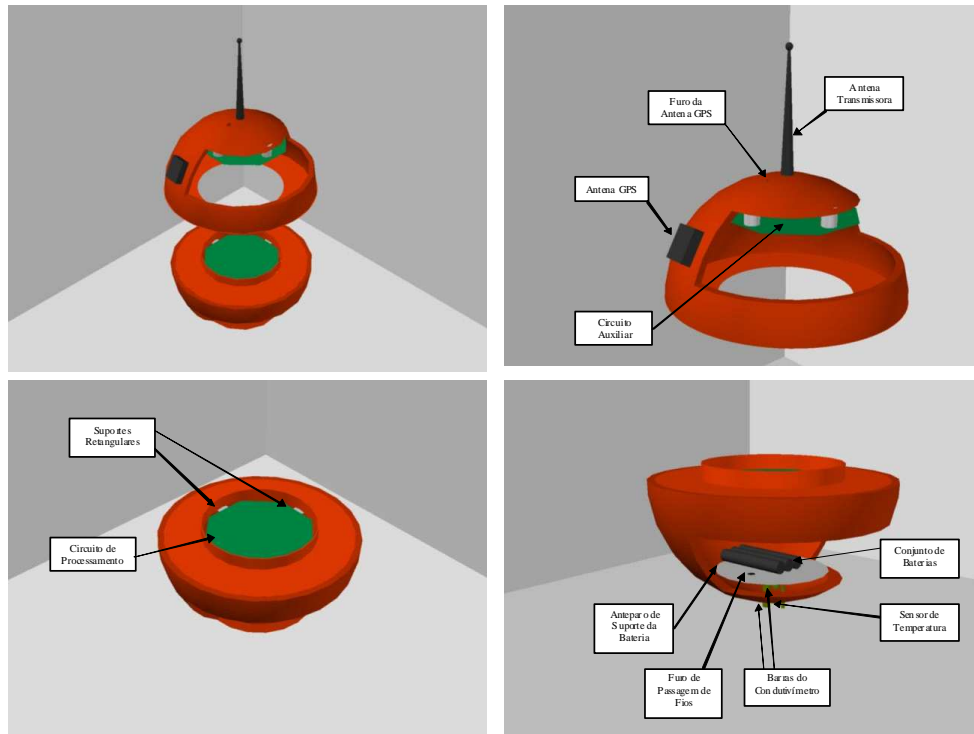
Fotografia 3 – Parte imersa (vela de arrasto) desmontada.



Fotografia 4 – Vela de arrasto montada e acoplada a parte emersa do derivador

No Esquema 2 estão indicados alguns componentes eletrônicos básicos. As sucessivas posições do derivador são obtidas a partir de um GPS e os dados são gravados internamente.

Preso à vela foram instalados termistores de modelo U22-001 - WATER TEMP PRO v2 da HOBO os quais permitiram a medição da temperatura da água ao longo de seu percurso. Os dados são armazenados na memória interna do termistor e foram retirados após o resgate do derivador.



Esquema 2 – Esquema dos circuitos eletrônicos encontrados no interior da esfera de superfície. (Fonte: IMPLÉ – Sistemas Eletrônicos Embarcados)

#### 4.2. Sistema de Posicionamento Global (GPS)

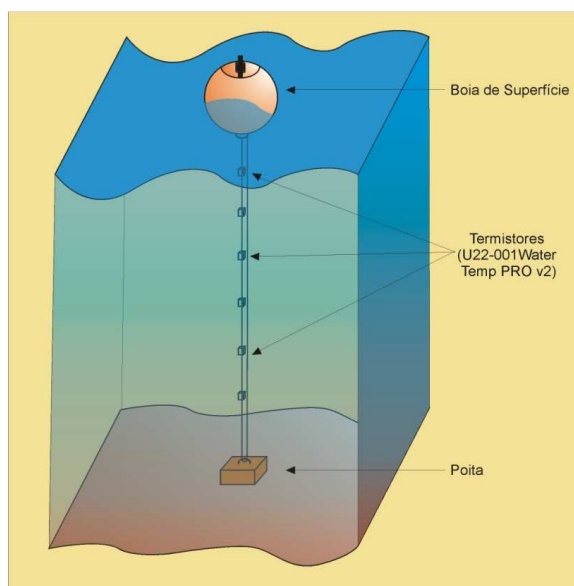
O posicionamento dos derivadores para estudos lacustres, desenvolvido a partir da iniciativa desse trabalho vinculado ao Laboratório de Ecologia Aquática da UFJF, é realizado através do Sistema de Posicionamento Global (GPS). Isto resulta em uma resolução espacial (~ 10 m) e resolução temporal adaptável às necessidades (a partir de 1 segundo) fundamentais para o bom desempenho dos derivadores em lagos, rios e reservatórios.

O sistema de posicionamento global é um sistema mundial de radio-navegação que utiliza uma constelação de 24 satélites. Destes, pelo menos 8 estão no ângulo de visada do

posicionador e, portanto, permitem a determinação da posição. Até maio de 2000, o posicionamento era deliberadamente degradado a fim de evitar a utilização com finalidades militares, o que limitava a precisão para aproximadamente 100 metros. Isto efetivamente restringia as escalas dos movimentos que poderiam ser resolvidas. A remoção deste ruído nos tempos atuais permite que feição do escoamento ou do movimento da água na ordem de 10 metros seja resolvida.

#### 4.3. Sistema de termistores em série (cadeia de termistores)

O monitoramento da evolução espaço-temporal da termoclina e as oscilações verticais associadas, foi feito a partir do fundeio de cadeias de termistores. O Esquema 3 ilustra o fundeio do equipamento.



Esquema 3 – Esquema da estrutura da cadeia de termistor instalados no reservatório APM Manso.

A cadeia de termistores consiste de uma esfera flutuante feita em fibra de vidro que tem duas funções: assegurar flutuabilidade ao sistema e alojar as fontes de alimentação (pilhas) e a eletrônica envolvida com a gravação dos dados, quando necessário. O sistema fica preso ao fundo através de uma poita que é unida ao flutuador através de uma linha de fundeio.

Os termistores utilizados são do modelo HOBO® U22-001 - Water Temp Pro v2. A acurácia dos termistores é de 0,2°C com resolução de 0,02°C a 25°C. Os termistores apresentam a autonomia de 6 anos de uso contínuo com intervalo de aquisição de dados de 1 minuto podendo ter durabilidade maior com período de amostragem maior. Para determinar as profundidades de instalação dos termistores, foram feitas, antes da ancoragem, análises da hidrologia do reservatório nos pontos representados no Mapa 1. Nesses pontos foram coletados dados de temperatura, condutividade, pH, turbidez e oxigênio dissolvido utilizando uma sonda limnológica YSI-6920. As profundidades dos termistores estão representadas na tabela 2.

Tabela 2 – Descrição das cadeias de termistores e indicação de quais profundidades foram instaladas as cadeias de termistores. Os resultados das cadeias 1, 2, 3, 4 não estão apresentados nesse trabalho.

Profundades dos termistores das cadeias		
	Descrição	Profundidades (m)
Cadeia 1	Instalada no ponto 1, região que apresenta características de rio.	0,1,2,7,12
Cadeia 2	Instalada no ponto 6, região identificada como mergulho do rio Manso no reservatório.	0,1,2,3,6,9,12,15
Cadeia 3	Instalada no ponto 9, região de transição rio-reservatório	0,1,2,3,6,9,12,15,18,21,24
Cadeia 4	Instalada no ponto 12, região próxima a transição porém com característica de reservatório	0,1,2,3,6,9,12,15,18,21
Cadeia 5	Instalada no ponto 16, região de barragem.	0,1,2,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23,25,27,29,31,33,35,37,39,41,44,47,50

As cadeias foram fundeadas no dia 10 de janeiro de 2009 e foram retiradas no dia 17 e 18 de janeiro de 2009. O intervalo de tempo de aquisição de dados foi de 15 minutos.

#### 4.4. Estação meteorológica

Os dados meteorológicos foram adquiridos a partir de uma estação meteorológica WeatherHawk Weather Station (fotografia 5), fornecida pela COPPE/UFRJ. Os dados foram coletados nos dias 10 a 16 de janeiro de 2009 em intervalos de 2 minutos. Os parâmetros medidos foram: temperatura e umidade do ar, radiação solar, direção e intensidade do vento,

pressão barométrica e precipitação. A estação foi instalada na margem do reservatório APM Manso em uma região plana sem influencia de árvores e montanhas para uma melhor representação das condições meteorológicas do interior do lago.



Fotografia 5 – Foto da estação meteorológica WeatherHawk Weather Station.

#### **4.5. Batimetria**

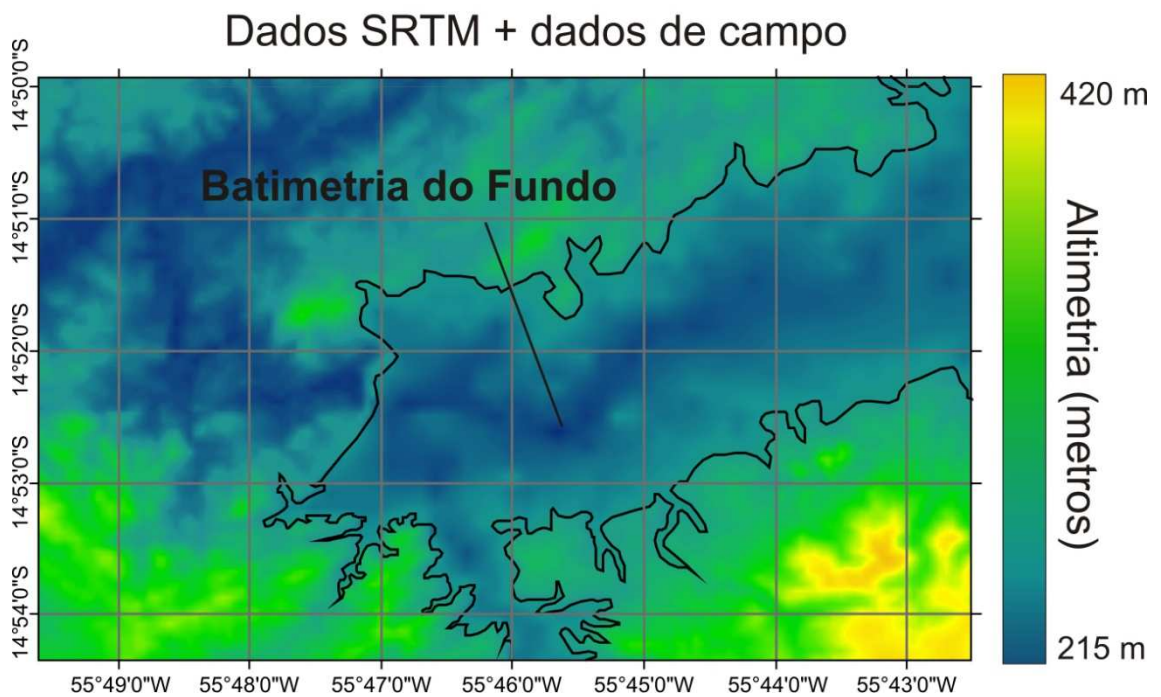
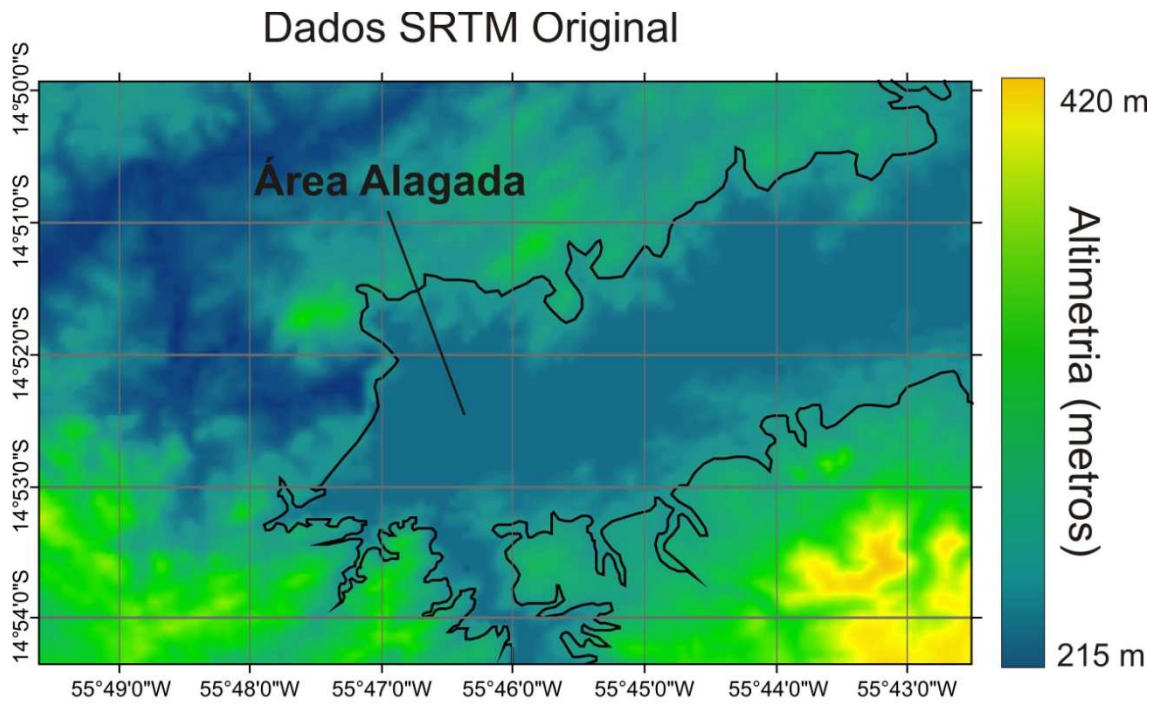
Para o cálculo da batimetria foram utilizados curvas de níveis geradas a partir de dados da Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) juntamente com dados de profundidade adquiridos em campo. A aquisição de dados em campo foi feita nos períodos de 2 a 5 de março de 2008 e de 9 a 15 de janeiro de 2009. Utilizou-se um sonar-ecobatímetro modelo GPSMAP 520s Garmin com aquisição automática de posição e profundidade.

A *Shuttle Radar Topographic Mission* é um projeto internacional realizado em fevereiro de 2000, coordenado pela *National Geospatial-Intelligence Agency* e NASA com o objetivo de obter o mais completo banco de dados de alta resolução da topografia da superfície da Terra. As imagens estão disponíveis nos formatos ArcInfo ASCII e GeoTiff no site <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

Como o início do enchimento do reservatório teve início em novembro de 1999 e o projeto SRTM foi realizado em 2000, as informações da topografia do reservatório não são compatíveis com a realidade nas partes mais profundas do reservatório, onde já havia água. Para corrigir esses valores, dados coletados em campo foram utilizados para criar a representação real da batimetria do reservatório (Mapa 2).

Para a interpolação das curvas de níveis e pontos de amostragem foi utilizado o modelo de superfície TIN (Triangulated Irregular Network). TIN consistem em uma estrutura digital de dados usada em sistema de informação geográfica (SIG) para a representação de uma superfície. O programa SIG utilizado para o geoprocessamento foi ArcGIS 9.2 ESRI.





Mapa 2 – Dados SRTM sem tratamento de imagem (a). Representação do fundo do reservatório a partir de dados SRTM corrigido com dados de campo (b).

#### 4.6. Cálculo da corrente média

Para o cálculo das velocidades médias das correntes, assim como das direções destas, foi utilizado o método estatístico de regressão linear simples sobre as séries de tempo zonal e meridional dos dados brutos de posição da bóia. O tempo(t) foi considerado como sendo a variável independente, e as componentes zonal (X) e meridional (Y) da posição, como sendo as variáveis dependentes. Desta forma:

$$\begin{aligned} Y &= \alpha_1 \cdot t + b_1 \\ X &= \alpha_2 \cdot t + b_2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

onde:

$b_1, b_2$  = coeficiente linear da reta de regressão (posição onde a reta de regressão intercepta o eixo da variável dependente).

$\alpha_1, \alpha_2$  = coeficiente de inclinação da reta de regressão.

O coeficiente de inclinação ( $\alpha$ ) da reta de regressão representa o intervalo de distância (latitude ou longitude) pelo tempo (dia juliano decimal), o que equivale a deslocamento por tempo, que fisicamente é a velocidade média. Assim tem-se:

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \alpha_1 = dy/dt \\ \bar{u} &= \alpha_2 = dx/dt \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde  $\bar{v}$  e  $\bar{u}$  são as componentes meridional e zonal respectivamente, da velocidade média de corrente ( $\bar{V}$ ).

A partir de princípios básicos de trigonometria chega-se que a velocidade média da corrente resultante é dada por:

$$\bar{V} = (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (4.3)$$

As posições de latitude (y) e longitude (x) foram dadas em graus geográficos, logo  $\bar{v}$  e  $\bar{u}$  foram obtidos em unidades de graus/dia. Lembrando que 1' de grau corresponde a 1 milha náutica, que por sua vez corresponde a 1852 m, logo cada grau de latitude corresponde a  $1,111 \times 10^5$  metros. Devido à convergência meridional, esta relação varia, para a longitude, com o Cosseno da latitude média. Assim, 1 grau de longitude corresponde a  $1,078 \times 10^5$  metros na latitude média de  $14^\circ$ . Aplicando os valores acima, e lembrando que 1 dia equivale a 86400 segundos,  $\bar{v}$  e  $\bar{u}$  foram transformados em unidades de  $m s^{-1}$ . Buscou-se seguir, neste trabalho, as recomendações da comunidade oceanográfica, publicadas pela UNESCO em 1981, com as unidades sendo expressas no sistema MKS. Porém, a fim de facilitar comparações com resultados de outros trabalhos, algumas unidades poderão estar expressas em unidades comumente utilizadas na literatura.

A direção da corrente média ( $\theta$ ), dada em graus trigonométricos, foi obtida por:

$$\theta = \text{arc tang} (\bar{v}/\bar{u}) \quad (4.4)$$

Por convenção, ( $\theta$ ) é determinado a partir do sinal de  $\bar{v}$  e  $\bar{u}$  em relação ao círculo trigonométrico. Posteriormente, será efetuada a conversão de ângulo trigonométrico (referencial o círculo trigonométrico) para ângulo geográfico (referencial os pontos cardiais).

#### 4.7. Séries de tempo de velocidade instantânea

As velocidades instantâneas, para as séries de tempo de posição após passarem pela matriz de transformação, foram calculadas da seguinte forma:

$$u_i = (x_{i+1} - x_{i-1}) / (t_{i+1} - t_{i-1})$$

$$(i = 2,3,4,\dots,n-1) \quad (4.5)$$

$$v_i = (y_{i+1} - y_{i-1}) / (t_{i+1} - t_{i-1})$$

onde:

u = velocidade instantânea ortogonal à linha da costa;

v = velocidade instantânea ao longo da costa;

x = posição do derivador no eixo x (cm);

y = posição do derivador no eixo y (cm);

t = tempo (dias julianos decimais), correspondentes à posição dos derivadores.

Os valores de velocidade instantânea foram portanto obtidos em cm/dia juliano e convertidos para cm/s. As séries foram filtradas e foram removidos os sinais de frequência maiores do que  $\frac{1}{15 \times 60} \text{ s}^{-1}$ .

#### **4.8. Matriz de transformação dos dados de posicionamento dos derivadores.**

A metodologia de tratamento dos dados utilizados aqui são baseados nos métodos apresentados em Assireu (1998, 2003) e Assireu *et al.* (2001, 2003).

As séries temporais de posição passaram por processos de controle de qualidade e interpolação baseadas em Hansen & Poulain (1995). Outro procedimento que foi adotado, e que visou dar maior representatividade às análises dos dados, consistiu em se assumir o eixo principal do reservatório como sendo o referencial. Foi aplicada uma matriz de rotação sobre as séries de posição, para que os dados ficassem ajustados a este novo referencial. É a seguinte a matriz de rotação:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

onde:

$x'$  = os valores de posição ortogonais à costa (cm)

$y'$  = os valores de posição ao longo da costa (cm)

$\theta = -48^\circ$ , o que corresponde a girar os eixos em  $48^\circ$  no sentido horário

$x$  = valores de posição originais da série (cm)

$y$  = valores de posição originais da série (cm)

Antes de aplicar os dados à matriz de transformação, estes foram convertidos para o plano cartesiano(cm) através das seguintes equações:

$$\Delta X \text{ (cm)} = (\pi \cdot 6400 \times 10^5 / 180) \cdot [(\cos(\text{lat}_f) \cdot \cos(\text{lat}_i) \cdot (\text{long}_f - \text{long}_i)^2)]^{1/2} \cdot \text{Sinal}(\text{long}_f - \text{long}_i) \quad (4.7)$$

$$\Delta Y \text{ (cm)} = (\pi \cdot 6400 \times 10^5 / 180) \cdot [(\text{lat}_f - \text{lat}_i)^2]^{1/2} \cdot \text{Sinal}(\text{lat}_f - \text{lat}_i) \quad (4.8)$$

Estas equações fornecem, em centímetros, os sucessivos deslocamentos dos derivadores;

- feito isso, obteve-se as posições em centímetro, a partir das seguintes equações:

$$X_f = X_i + \Delta X \quad (4.9)$$

$$Y_f = Y_i + \Delta Y$$

onde:

$X_i, X_f, Y_i, Y_f$  = sucessivas posições.

Assim, os resultados estão representados em função do paralelismo ou ortogonalidade em relação ao eixo principal do reservatório, que apresenta inclinação média, para as latitudes em questão, de  $48^\circ$ . O Gráfico 1 traz as componentes de velocidade em  $\text{cm s}^{-1}$ . O primeiro gráfico traz estes valores antes de ser aplicada a matriz de transformação, e o segundo após ter sido aplicada a matriz. Pela análise da figura percebe-se que ao se considerar o eixo principal do reservatório como referencial, as componentes apresentam um comportamento mais coerente entre si, evidenciando a tendência destas trajetórias em fluírem paralelamente ao

eixo. O Gráfico 2 mostra um esquema que representa a rotação do eixo sobre o reservatório APM Manso.

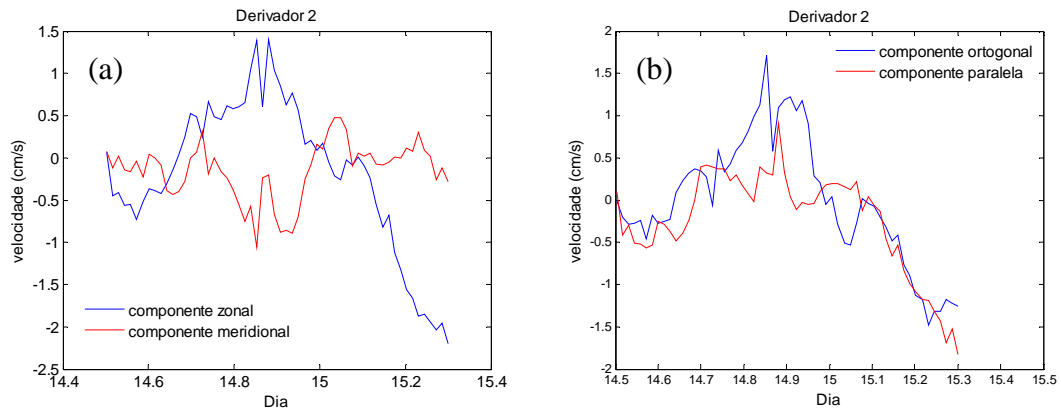


Gráfico 1 – Componentes posicionais antes (a) e após (b) a aplicação da matriz de transformação.

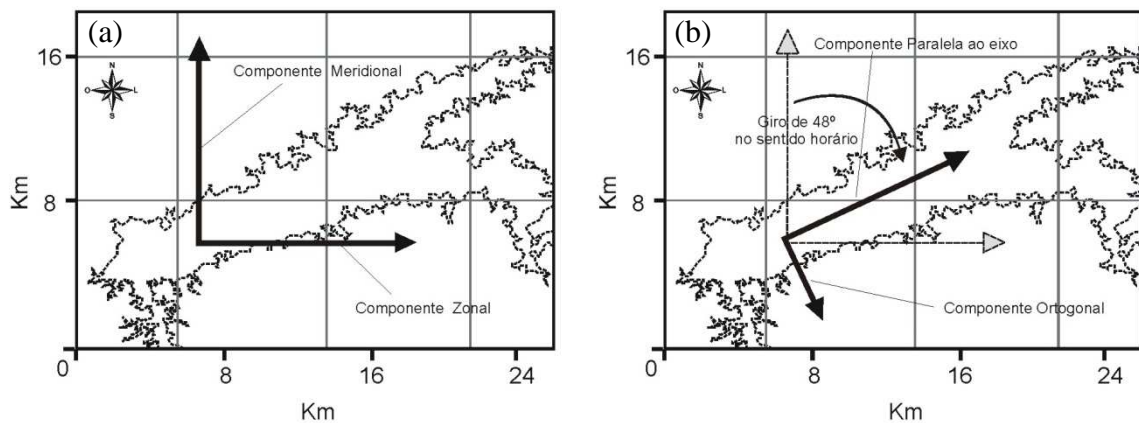


Gráfico 2 – Reapresentação das componentes sobre o reservatório APM Manso antes (a) após (b) a aplicação da matriz de transformação.

#### 4.9. O método da Análise do Padrão de Gradientes (APG)

O método a ser discutido a seguir já foi exaustivamente discutido em publicações em áreas de Ciências Exatas. Por ser um método que apresenta um grande potencial de aplicação nas ciências ecológicas e limnológicas, que por apresentarem períodos de amostragem geralmente curtos, muitas das vezes a estatística convencional não permite análises robustas. Ainda poucos trabalhos de conteúdo limnológico fizeram uso dessa técnica, ex. Assireu *et al.*

2007, que investigaram a relação da complexidade do entorno do reservatório e dos parâmetros limnológicos e Valério 2009, que mostrou, através dessa análise, relação entre a persistência do vento e concentração de clorofila, fato que não pode ser determinado com técnicas convencionais como Wavelets. Assim, com o intuito de introduzir o potencial deste método em estudos limnológicos, optou-se pelo detalhamento desta técnica no texto que segue.

Segundo Mandelbrot (1991), um número útil para caracterizar fractais é a dimensão fractal. Esse número quantifica o grau de irregularidade ou de fragmentação de um conjunto geométrico, de uma figura ou de um objeto natural. Neste contexto nós aplicamos um operador baseado em Análises de Padrões Gradientes (APG) introduzido por Rosa *et al.* (1998). Este operador propicia uma investigação da complexidade espaço-temporal contida na série temporal. A Técnica APG foi originalmente desenvolvida para operar com matrizes. Assireu *et al.* (2002) apresentaram uma adaptação que possibilitou a aplicação desta técnica a séries temporais unidimensionais. Por não se basear em propriedades estatísticas da série, mas somente nas propriedades locais das simetrias do padrão gradiente, o método apresenta a importante propriedade de ser menos dependente do comprimento da série. Alguns detalhes sobre este método serão agora apresentados e maiores detalhes podem ser obtidos em Assireu *et al.* (2002).

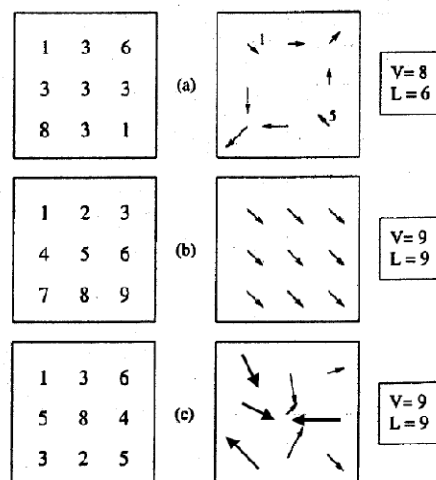
A análise baseada no Fator de Assimetria (FA) do padrão de gradientes consiste em gerar campos vetoriais, a partir de matrizes numéricas (Esquema 4). Por conveniência metodológica aplicada às estruturas complexas, os vetores simétricos são removidos e portanto apenas os vetores assimétricos são mantidos. Pela análise do Esquema 4 percebe-se que, embora a matriz relativa ao Esquema 4c corresponda a um processo mais complexo (mais irregular) quando comparado ao apresentado no Esquema 4b, a simples comparação entre o número de vetores oriundos do campo gradiente (V) e o número de vetores

assimétricos (L) não permitiria uma separabilidade dos diferentes processos representados por estas matrizes. Devido a isto, há necessidade de uma segunda operação que permita distinguir entre estes campos gradientes.

Dada uma distribuição cartesiana P com p pontos, o processo de união destes pontos através de linhas usando como critério a necessidade dos vértices dos triângulos resultantes estarem sempre em conexão com estes pontos é conhecido como Triangulação de Delaunay (maiores detalhes vide Adelsbrunner, 1993). Também faz parte do critério o não cruzamento das linhas que unem os pontos (Esquema 5). Note que agora é possível distinguir as matrizes, mesmo estas tendo iguais valores de V e L. O número de linhas (I) utilizadas para unir, via triangulação de Delaunay, os centros de cada vetor, são diferentes.

Portanto, com a quantidade I é possível distinguir diferentes matrizes quanto a sua correspondência em termos de complexidade, já que I é diretamente proporcional ao nível de desordem espacial (complexidade) do campo gradiente. O valor numérico utilizado para representar este campo de assimetria é:

$$FA=(I-L)/L, (I \geq L > 0). \quad (4.10)$$

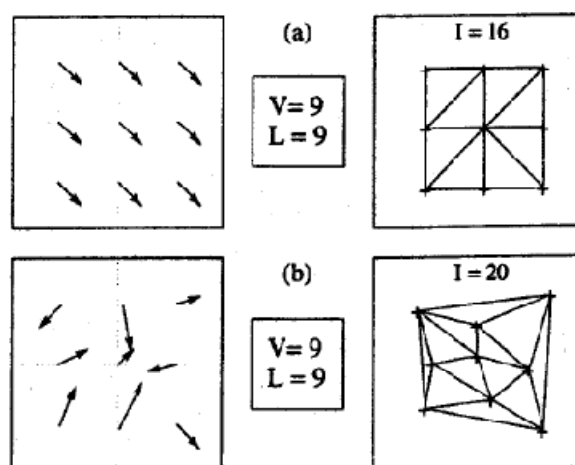


Esquema 4 – Exemplo de matrizes representativas de campos vectoriais assimétricos. (a): seis vetores assimétricos, (b) e (c): todos os vetores são assimétricos (Fonte: Rosa *et al.* (1999)).

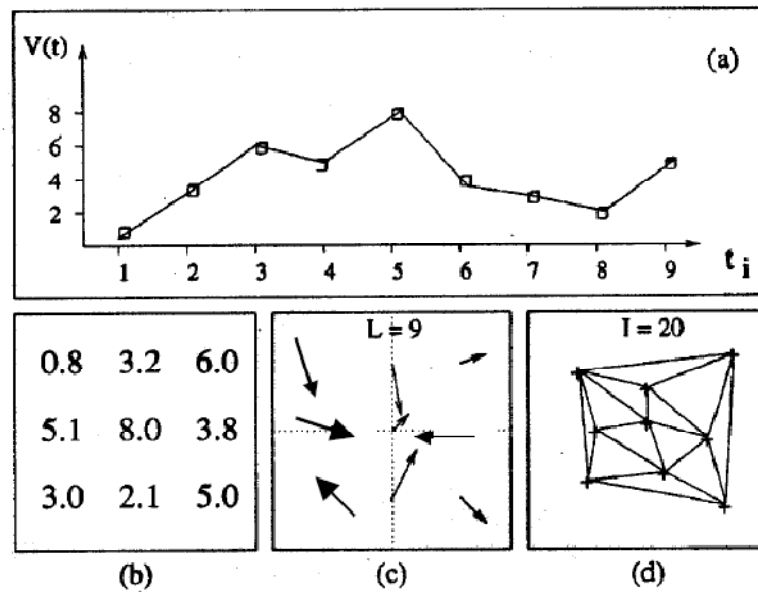


Como já comentado, esta técnica foi originalmente desenvolvida para tratar campos bidimensionais representados através de matrizes numéricas. Com o intuito de estender as aplicações do método para séries unidimensionais, Assireu *et al.* (2002) fizeram a seguinte adaptação:

Cada nove pontos da série são convertidos em uma matriz 3x3 e o método é, desta forma, aplicado ao longo da série. Um valor médio, considerando cada um dos FAs obtidos ao longo da série é gerado. O Esquema 6 exemplifica o método. Um exemplo de uma série temporal com nove pontos (Esquema 6a) que é convertida em uma matriz 3x3 (Esquema 6b) e finalmente os campos de gradiente e de triangulação são gerados (Esquema 6c e 6d respectivamente). A escolha de se utilizar matrizes 3x3 deve-se a possibilidade das análises serem feitas na melhor janela de resolução e sem comprometimento da robustez do método. Assim, para séries com intervalos amostrais de 15min teria-se um valor de FA praticamente a cada 135min.



Esquema 5 – Campo de triangulação para as matrizes (b) e (c) do Esquema 4 (Fonte: Rosa *et al.* (1999)).

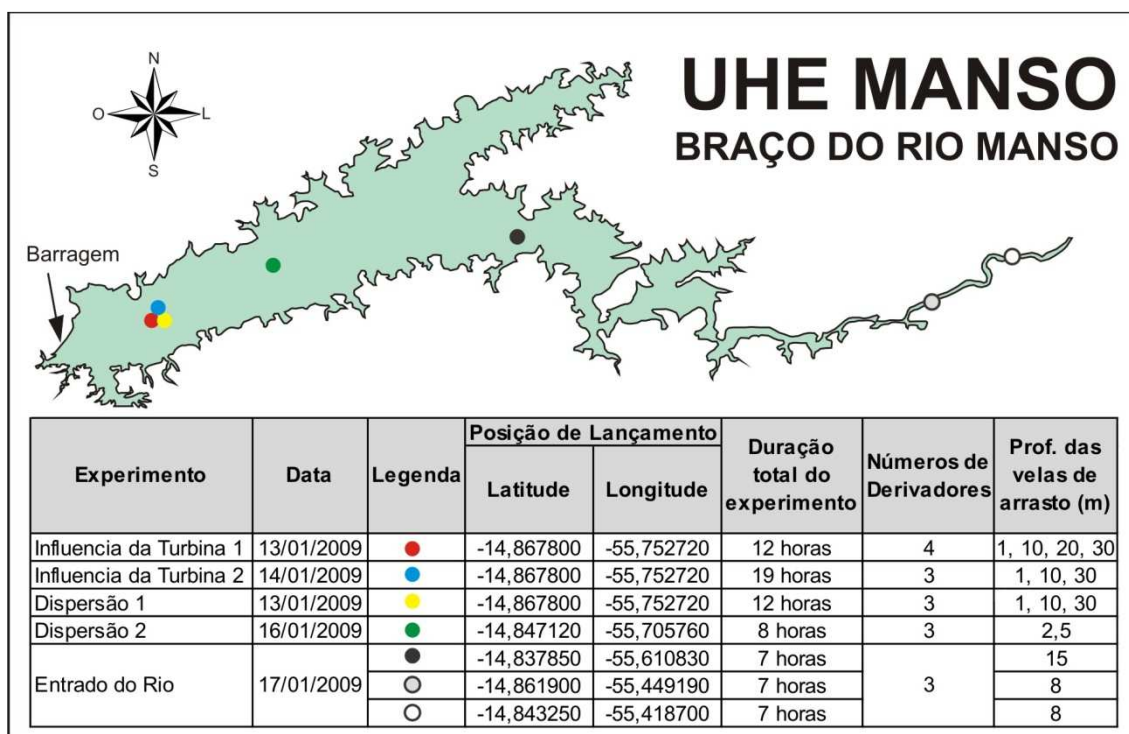


Esquema 6 – (a) um típico padrão de variabilidade extraído de uma série relativa a uma variável genérica  $V(t)$ , (b) sua correspondente matriz; (c) correspondente campo gradiente (nove vetores assimétricos) e (d) campo de triangulação com 20 linhas conectoras (Fonte: Assireu *et al.* (2002)).

Os valores de FA são representados em escala de cores de acordo com a complexidade do escoamento. Para os nossos dados utilizamos um padrão de três cores. Vermelho corresponde a um valor alto de FA que representa alta complexidade ( $FA > 1,13$ ); a cor verde corresponde a valores de FA que representa média complexidade ( $1,13 > FA > 1,00$ ); e a cor azul representa complexidade baixa ( $FA < 1,00$ ).

#### 4.10. Datas dos Experimentos com os derivadores

Os experimentos foram realizados entre os dias 13 e 17 de janeiro de 2009. O Mapa 3 apresenta os posicionamentos de onde foram iniciados os experimentos. Na legenda estão apresentadas as datas, o tempo de duração, número de derivadores e as configurações das profundidades das velas de arrasto de cada derivador nos experimentos realizados.



Mapa 3 – Mapa da posição de lançamento dos derivadores nos experimentos realizados no período de 13 a 17 de janeiro de 2009. Na tabela estão as datas, lat/long, tempo de duração total dos experimentos, número de derivadores lançados e profundidade das velas de arrasto.

Nos experimentos de influencia da turbina, os derivadores foram posicionados, próximos uns dos outros (~10m), a uma distância de 4 km da barragem. As velas de arrasto foram configuradas nas profundidades de 1, 10, 20, 30 metros no dia 13 de janeiro e nas profundidades 1, 10, 30 metros no dia 14 de janeiro de 2009. A finalidade desse experimento foi determinar a influencia da turbina nas diferentes camadas do reservatório.

Foram realizados dois experimentos de dispersão em duas localidades no meio do corpo principal do reservatório. As velas de arrasto foram configuradas em profundidades

iguais a 2,5m. Este experimento permite determinar como ocorre a dispersão de um traçador lançado na superfície do corpo do reservatório. O desenvolvimento de teorias adequadas permite a extração de um amplo espectro de informações a partir de análises sobre trajetórias individuais (Colin de Verdiere 1983; Haynes and Barton 1991), assim como a partir de conjuntos de derivadores (Molinari and Kirwan 1975; Okubo and Ebbesmeyer 1976; Sanderson 1995; Stocker & Imberger 2003), mesmo considerando um número pequeno de derivadores (4 a 10). Informações como gradiente de velocidade e movimentos residuais, usadas em conjunto com modelos simples da literatura, podem proporcionar o entendimento dos mecanismos dominantes que governam o crescimento de uma nuvem de traçadores. (Stocker & Imberger 2003)

No experimento de entrada do rio, os derivadores foram lançados em diferentes localidades ao longo do rio/reservatório com finalidade de entender a evolução do rio principal (Rio Manso) no interior do reservatório de APM Manso. A profundidade da vela de arrasto foi determinada através da análise dos dados de hidrologia coletados no dia 9 de janeiro de 2009 e da profundidade máxima do curso d'água. Três derivadores foram lançados ao longo do rio. (1) lançado bem acima do reservatório onde foi detectada uma característica exclusiva de rio, porém em uma região considerada com zona de transição. A vela foi configurada para 8 metros de profundidade. (2) foi lançado na transição rio-reservatório em uma profundidade onde se tinha características semelhantes à encontrada no rio (8 metros). (3) lançado no corpo do reservatório, porém na calha de onde era encontrado o rio antes do enchimento do reservatório a uma profundidade de 15 metros.

## 5. Resultados e discussão

### 5.1. Condições ambientais durante os experimentos

Pronunciado padrão nictemeral foi observado na temperatura do ar, umidade relativa, radiação de ondas curtas e intensidade do vento (Gráfico 3). Exceto para os períodos entre 12h00min e 18h00min, a temperatura do ar esteve aproximadamente 5°C mais frio que do que a superfície da água (Gráfico 3a). Conseqüentemente, a camada limite acima da interface água-ar estava instável. A amplitude térmica diurna apresentou valores intensos, em torno de 10°C. A umidade relativa caiu consideravelmente durante o período da tarde. Durante a noite e madrugada ultrapassava os valores de 80%. As radiações de onda curta (280-2800nm) apresentaram picos próximos a 1000 Wm<sup>-2</sup>. Flutuações sub-diurnas (alta frequência) nestes valores de irradiância indicam cobertura de nuvens, com maiores cobertura no período da tarde (Gráfico 3c). O aquecimento diferenciado entre terra e água, o que induz brisas, gerou ventos no período da manhã (entre 06h00min e 12h00min) que persistiram por pelos menos quatro horas (Gráfico 3d). Períodos de calmaria foram observados principalmente durante a noite (18h00min e 00h00min). Importantes picos de vento (5 m s<sup>-1</sup>) foram observados no período da manhã do dia 15 de janeiro.

A camada de mistura manteve-se a poucos metros da superfície durante o dia e tornava-se mais profunda durante a noite (Gráfico 4). O ganho de calor durante o dia e a perda durante a noite foram os principais reguladores da profundidade da camada de mistura. Intensos aquecimentos diurnos, com temperaturas superficiais alcançando 33°C (Gráfico 4) foram observados nos dias 13 e 14 de janeiro. Nos dias 11, 12, 16 e 17 de janeiro, durante a noite, a camada de mistura chegou a 8 m enquanto nos demais dias ficou em torno de 4 m.

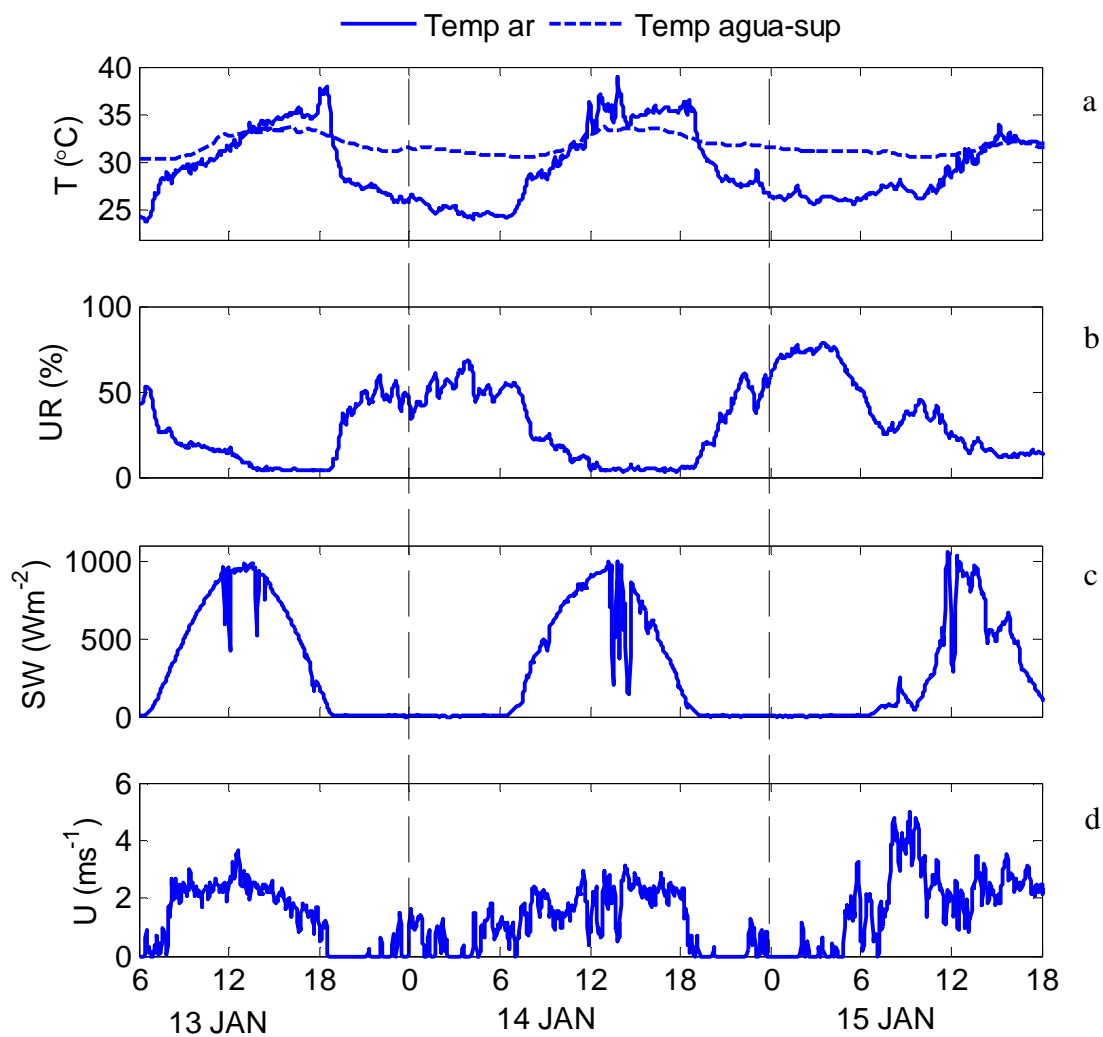


Gráfico 3 – Parâmetros meteorológicos durante os experimentos. (a) Temperatura do ar e superfície da água. (b) Umidade relativa. (c) radiação de onda curta e (d) intensidade do vento.

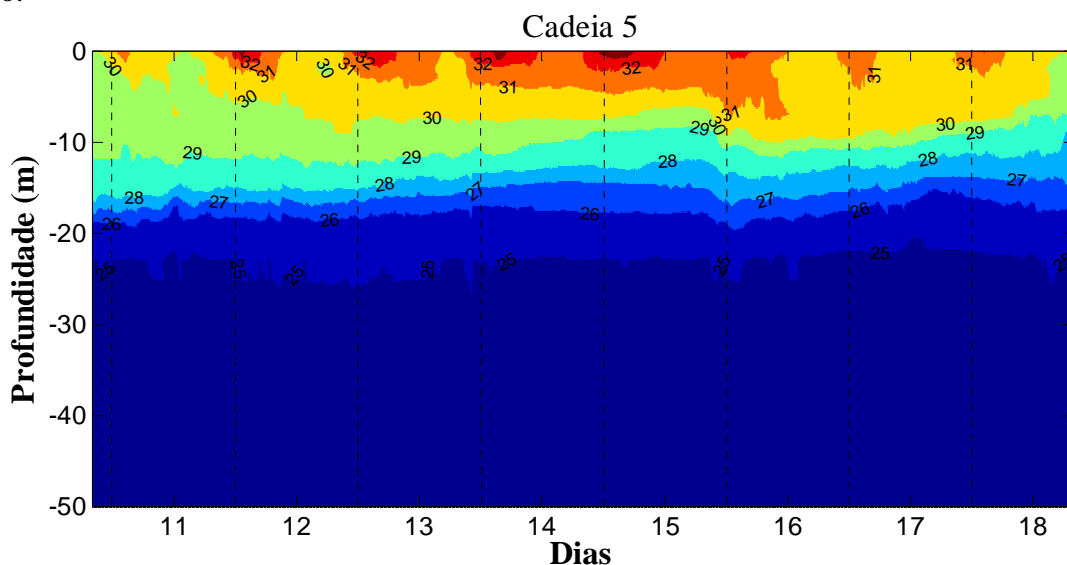


Gráfico 4 – Evolução temporal da estrutura termal durante os experimentos. Os dados apresentados correspondem ao da cadeia 5.

## 5.2. Descrição das correntes medidas a partir das trajetórias dos derivadores.

### Experimento – Influência da turbina 1

A partir desse ponto, para facilitar a identificação dos derivadores, os nomes foram padronizados. O derivador com elemento de arrasto (vela) a 1, 10, 20 e 30 metros serão chamados derivador 1, derivador 10, derivador 20 e derivador 30, respectivamente.

No Gráfico 5 estão representadas as trajetórias e as profundidades das velas dos derivadores lançados no dia 13 de janeiro. As componentes de velocidade (paralela e ortogonal a costa) e as resultantes estão representadas no Gráfico 6.

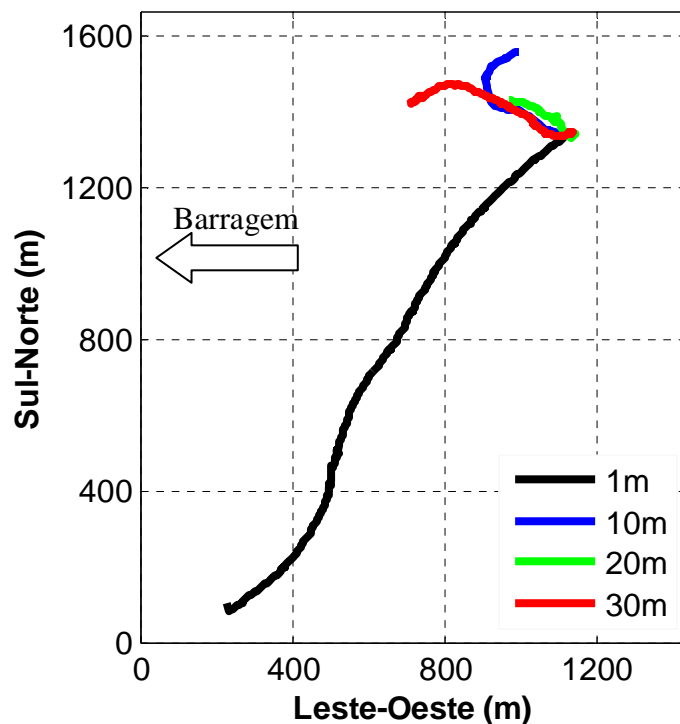


Gráfico 5 – Gráfico das trajetórias dos derivadores lançados no dia 13 de janeiro de 2009.

Os derivadores foram lançados em posições correspondentes ao antigo leito do Rio Manso. No lançamento, os derivadores foram posicionados a uma distância de 10 metros entre eles. O derivador 10 apresenta a vela de arrasto mais próxima à profundidade de influência da turbina. O derivador 1 percorreu a maior distância durante o período, e

apresentou velocidade resultante superior aos demais derivadores durante todo o período de amostragem. Isso pode ser explicado pela persistência do vento na mesma direção e sentido do deslocamento do derivador durante a maior parte do tempo do experimento. Os maiores valores de velocidade resultante para este derivador ( $5 \text{ cm s}^{-1}$ ) foi observado nos primeiros instantes após lançamento, e observou-se decréscimo de velocidade a partir das 15hs00min continuando até o final do experimento (Gráfico 6a e 6b). O deslocamento do derivador 1 está perfeitamente coerente com os dados de vento que até o período de 15hs manteve-se na média de  $3 \text{ m s}^{-2}$ . Esses valores indicam que a velocidade da superfície da água corresponde a 1,6% da velocidade do vento, porcentagem muito semelhante aos 2% que é comumente observado na literatura (McLachlan & Brown 2006). Assim, a movimentação a 1 metros foi induzida pelo vento. O derivador 10 apresentou uma trajetória singular. A partir das 15h00min iniciou-se uma trajetória contrária aos demais derivadores. A velocidade resultante da corrente variou de 0,5 a  $2,25 \text{ cm s}^{-1}$  apresentando oscilações quase periódicas entre esses valores (Gráfico 6c e 6d). O processo intermitente de deslocamento deste derivador poderia estar associado à divergência e convergência promovidas pelas ondas internas, a exemplo do que foi observado por Stocker & Imberger 2003 no lago Kinneret.

O derivador 20 percorreu o menor trajeto, apresentando velocidade média inferior aos outros derivadores (Gráfico 6e e 6f). O processo intermitente de deslocamento deste derivador poderia estar associado à divergência e convergência provocadas pelas ondas internas. O derivador 30 apresentou uma trajetória em “S”. A velocidade resultante foi maior durante as primeiras 4 horas apresentando velocidade máxima de  $1,9 \text{ cm/s}$  às 13h30min. Após esse período a velocidade decresceu até o final do experimento (Gráfico 6g e 6h). Embora nesse dia de experimento não tenha sido detectada uma trajetória que possa caracterizar como influência direta das turbinas, durante a maior parte do tempo todos os derivadores se deslocaram em direção a jusante.



Com o intuito de verificar se os elementos de arrasto (a vela) mantiveram-se ao longo das isopcnais, foram analisados os dados dos termistores fixados nas velas dos derivadores. O Gráfico 7 mostra a temperatura da água nas profundidades das velas de arrasto. Observa-se que as velas estão posicionadas em massas de águas com temperatura diferentes (Gráfico 7a). Como o lago se encontra estratificado durante o tempo de experimento e ao longo de todo o corpo do reservatório (Gráfico 4), tem-se o derivador 1 posicionado no epilimnio, o derivador 10 no metalimnio e os derivadores 20 e 30 posicionados no hipolimnio.

A média da temperatura na superfície da água foi de  $32,63 \pm 0,56^\circ\text{C}$ . Na superfície, a temperatura da água é muito influenciada pela atmosfera e responde rapidamente ao aumento da temperatura do ar. Enquanto a temperatura atmosférica aumentou de  $29,6$  para  $33^\circ\text{C}$  no período de 10h às 13h (Gráfico 3), a temperatura da água passou de  $31,5$  para  $33^\circ\text{C}$  durante o mesmo período. Por volta das 16h30min a temperatura volta a cair chegando a  $31,8^\circ\text{C}$ . Essa diminuição da temperatura está também associada à mudanças de temperatura atmosférica e diminuição de incidência de radiação solar.

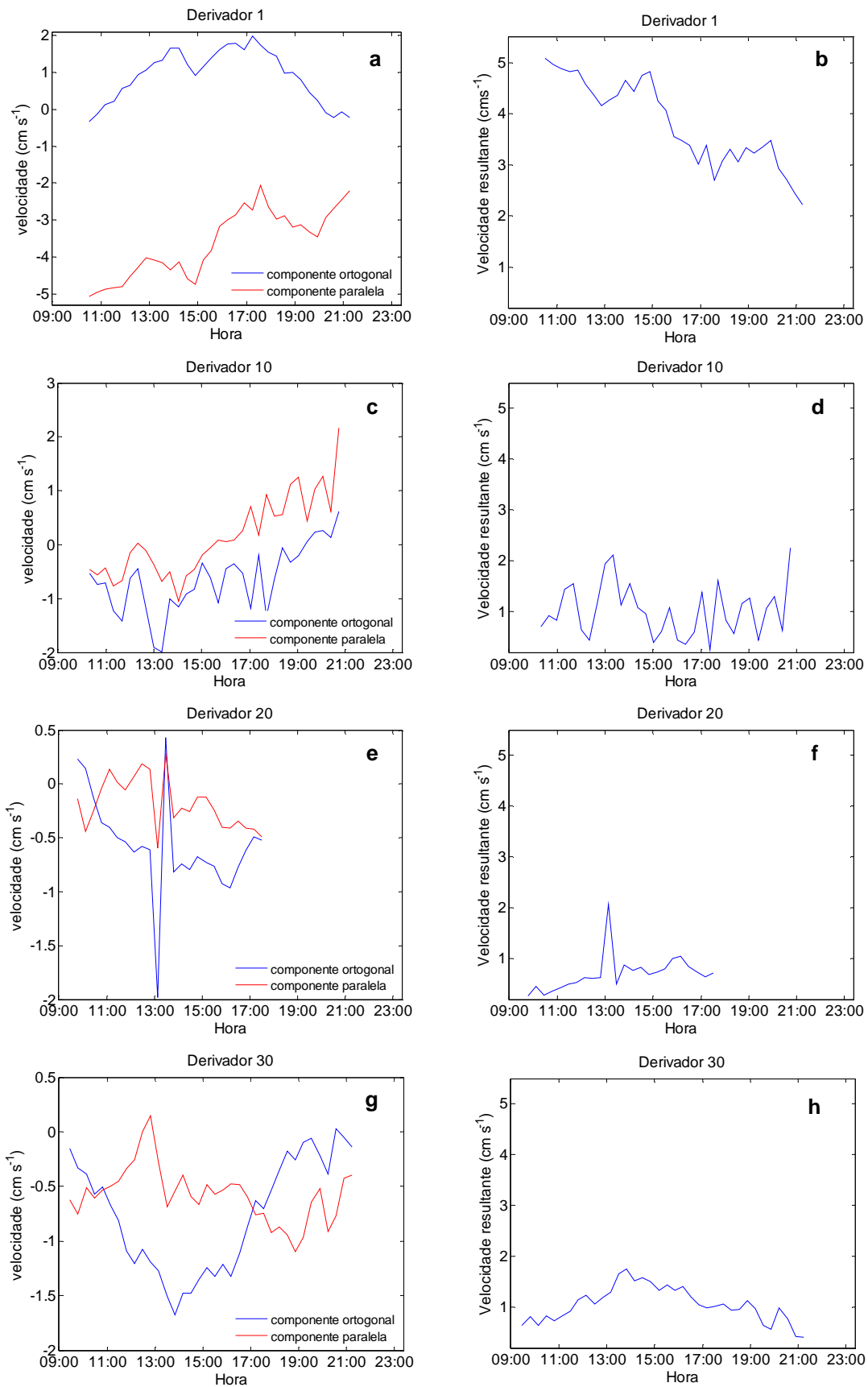


Gráfico 6 – Gráfico das velocidades componentes e resultantes dos derivadores lançados a 1, 10, 20 e 30 metros no dia 13 de janeiro de 2009.

Embora a média da temperatura da massa de água a um metro de profundidade ( $32,3 \pm 0,46$  °C) ser, estatisticamente, semelhante à temperatura média da superfície durante o experimento, podemos observar uma diferença de 1 °C no período entre 12h e 13h, o que indica uma estratificação térmica no primeiro metro da coluna d'água (Gráfico 7a). Na massa de água a um metro, durante as três primeiras horas do experimento, a temperatura se manteve praticamente constante (das 10h30m às 13h30m). Após esse período a temperatura apresentou um aumento de 2°C (Gráfico 7b). Esse aumento é explicado pelo aumento da temperatura atmosférica que às 6 horas estava 25 °C e chegou a 35 °C às 12 horas (Gráfico 3). Durante esse período de aumento da temperatura, o derivador 1 apresentou aumento da velocidade de deslocamento de  $1 \text{ cm s}^{-1}$  (de 4 para  $5 \text{ cm s}^{-1}$ ) (Gráfico 6b). Após esse aumento, a velocidade voltou a cair e a temperatura permaneceu praticamente constante por volta de 33 °C até as 18h. A partir desse horário a temperatura da água volta a cair por consequência da diminuição da temperatura atmosférica e a velocidade do derivador permanece praticamente constante ( $3,25 \text{ m s}^{-1}$ ).

Comparando os dados de temperatura atmosférica adquiridas pela estação meteorológica (Gráfico 3), a temperatura da superfície da cadeia de termistores (Gráfico 4) e as temperaturas da água na superfície e 1 metro de profundidades (Gráfico 7), verificamos que todas as alterações de temperatura superficial da água acompanham as mudanças de temperatura do ar. Isso indica que a mudança de temperatura durante a trajetória dos derivadores não são atribuídas à variação horizontal da temperatura. Assim, conclui-se que as velas dos derivadores mantiveram-se acopladas à mesma massa d'água ao longo do escoamento, tendo-se deslocado ao longo das isopneais, e, portanto, o deslocamento vertical da vela pode ser desprezado nestes estudos.

A média da temperatura da massa de água a dez metros de profundidade foi de  $29,32 \pm 0,04$  °C. Observando o Gráfico 7c podemos perceber que a temperatura varia ao longo do dia, porém bem menos influenciada pelo aquecimento diurno como as camadas superiores.

A média da temperatura na profundidade de vinte metros foi de  $24,99 \pm 0,03$  °C. A essa profundidade a temperatura variou pouco durante a trajetória do derivador (Gráfico 7d). Isso foi observado também para a profundidade de trinta metros que apresentou uma média de  $24,72 \pm 0,01$ . Como a resolução do termistor Water Temp Pro v2 é de 0,02 °C, variações menores do que estas não foram detectadas.

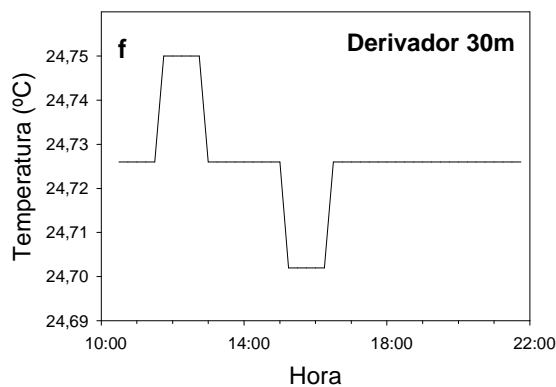
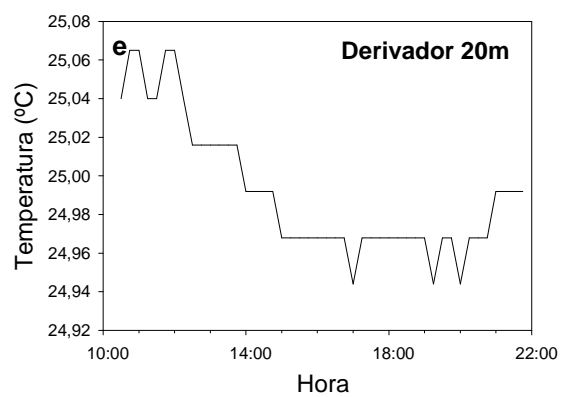
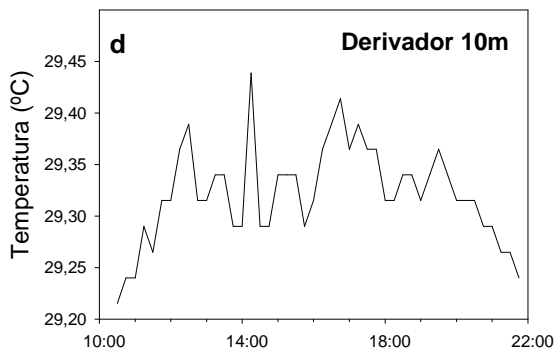
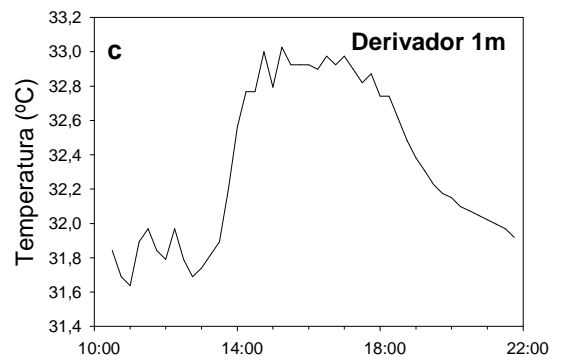
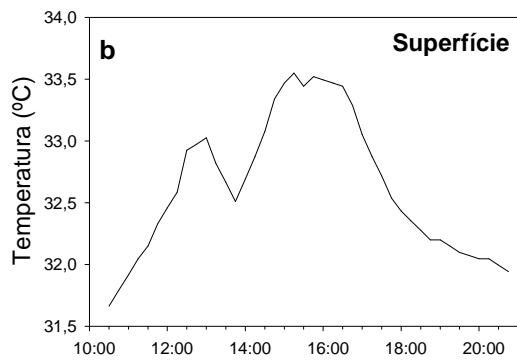
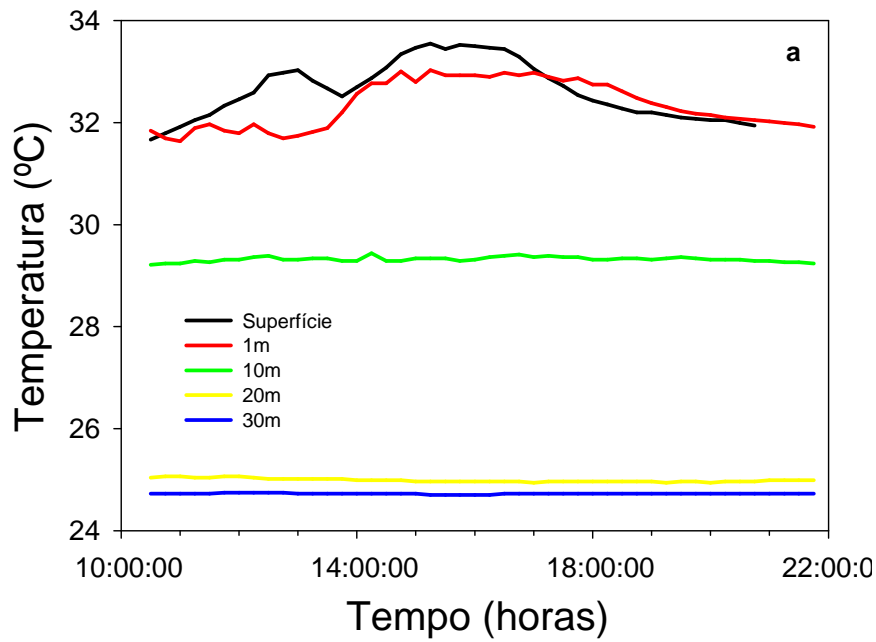


Gráfico 7 – Temperatura na vela dos derivadores no experimento do dia 13 de janeiro de 2009. (a) variação da temperatura nas profundidades das velas de arrasto durante o período do experimento. (b-f) Temperatura de cada profundidade, evidenciando a variação da temperatura durante o experimento.

## Experimento – Influência da turbina 2

O Gráfico 8 representa a trajetória dos derivadores durante o experimento e no Gráfico 9 estão representadas as componentes de velocidades ao longo e ortogonal a costa além dos valores resultantes de velocidade dos derivadores lançados no dia 14 de janeiro.

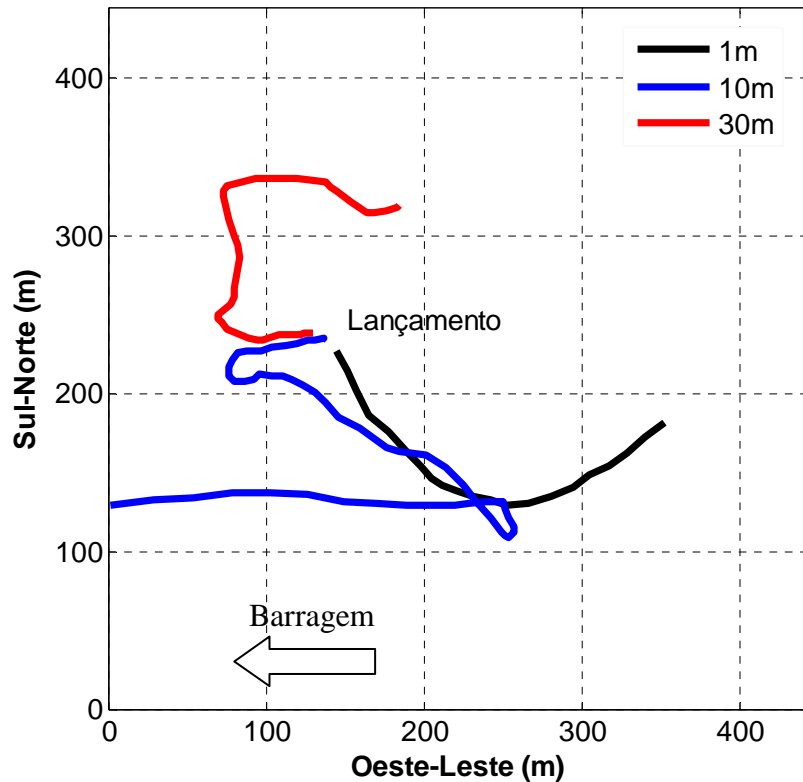


Gráfico 8 – Gráfico das trajetórias dos derivadores lançados no dia 14 de janeiro de 2009.

O ponto de lançamento foi mantido o mesmo do experimento realizado no dia 13 de janeiro. O derivador 1 apresentou uma trajetória para o sentido contrário da barragem durante todo o período do experimento (Gráfico 9a). Este movimento contrário a barragem se encontra na mesma direção e sentido do vento no mesmo período e a velocidade de deslocamento do derivador corresponde a aproximadamente 1% da velocidade do vento (Gráfico 9b). Isso concorda com McLachlan & Brown 2006 que indicaram que a corrente diretamente induzida pelo vento comumente é equivalente a 2% do vento. Podemos assim concluir que o deslocamento do derivador 1 foi induzido pelo vento. O derivador 10

apresentou a trajetória mais extensa. Na primeira hora, se deslocou em direção a barragem com velocidade resultante média de  $0.5 \text{ cm s}^{-1}$ . Por volta das 12h30min o derivador, que antes apresentava velocidade negativa nas componentes ortogonal e paralela, mudou a direção de deslocamento, e as velocidades componentes apresentaram valores positivos até aproximadamente 21h30min do dia 14 de janeiro (Gráfico 9c e 9d). A partir desse momento, o derivador 10 inverteu novamente os valores das velocidades das componentes, seguindo em direção a barragem, e apresentando uma aceleração de  $0,008 \text{ cm s}^{-2}$  até atingir a velocidade resultante máxima durante o experimento de  $2,3 \text{ cm/s}$ . Esta mudança de direção e aumento da velocidade podem estar relacionado a tomada da turbina do reservatório estar localizada a 15 metros de profundidade. O derivador 30 percorreu, inicialmente, uma trajetória semelhante ao do derivador a 10 metros, apresentando valores negativos para as componentes. No mesmo momento em que o derivador 10m inverteu os valores das componentes, a corrente a 30 metros também apresentou mudanças de direção, porém passou a percorrer um trajeto para o sentido contrário (Gráfico 9e e 9f). Por volta das 22h00min o derivador muda novamente de direção e passa a percorrer um trajeto na direção contrária a do início do experimento. Especula-se que este comportamento internamente coerente entre os derivadores 10 e 30 estejam associados a períodos de maior atividade da turbina. A intensa aceleração da corrente em direção a barragem experimentada pelo derivador 10 e a corrente de retorno, em sentido oposto a barragem, experimentada pelo derivador 30 parecem ser uma manifestação clara desta influência.

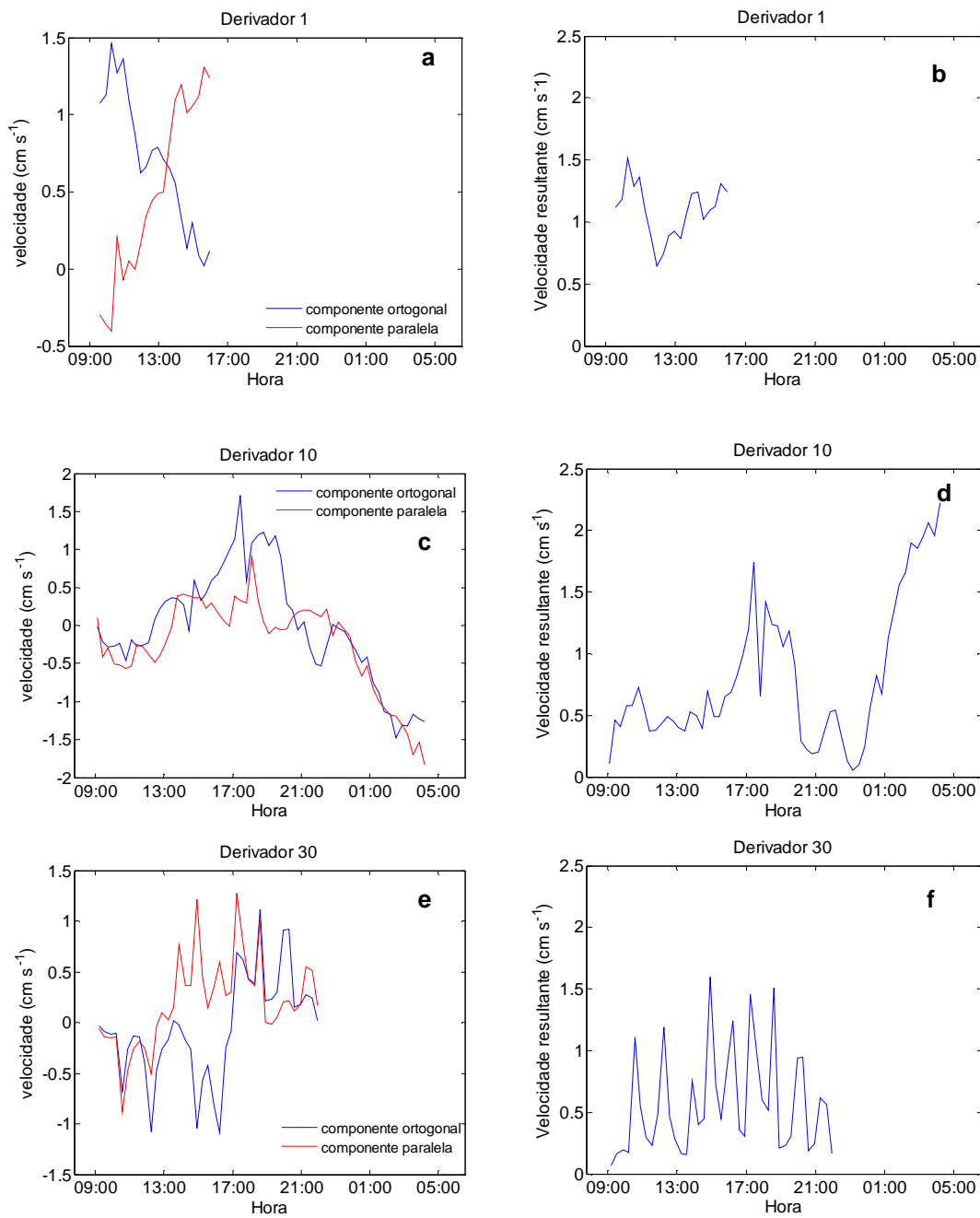


Gráfico 9 – Gráfico das velocidades componentes e resultantes dos derivadores lançados a 1, 10 e 30 metros no dia 14 de janeiro de 2009.



A diferença de padrão apresentado pelos derivadores entre os dias 13 e 14 poderiam estar associados a variações do *outflow* em escalas horárias, porém, como não tivemos acessos a estes dados, apenas temos informações de *outflow* em escala diária, isto, por enquanto, é assumido como uma especulação.

A temperatura da superfície no dia 14 de janeiro permaneceu semelhante à temperatura da profundidade de um metro na maior parte do período de experimento. Foi observado uma estratificação nas camadas superiores da coluna d'água, quando a temperatura atmosférica se encontrava nos valores diários mais altos (Gráfico 10a). A diferença entre as temperaturas foi de 1 °C no período entre 13h e 17h. Durante a noite, a temperatura caiu atingindo o valor mínimo de 31,1 °C às 10h do dia 15 de janeiro. A média da temperatura nessa profundidade foi de  $32,46 \pm 0,98$  °C. A massa de água a 1 metro apresentou uma média de  $32,14 \pm 0,50$  °C.

Igualmente observado no dia 13 de janeiro, verificamos que todas as alterações de temperatura superficial da água acompanham as mudanças de temperatura do ar, indicando que a mudança de temperatura durante a trajetória dos derivadores não são atribuídas à variação horizontal da temperatura.

A temperatura a dez metros de profundidade mostrou-se praticamente constante como observado no experimento do dia anterior. Também não foram observadas diferenças significativas entre as temperaturas durante o dia e a noite. A média da temperatura ficou em  $28,88 \pm 0,12$  °C, 0,44 °C menor que a média do dia anterior para a mesma profundidade (Gráfico 10d).

A trinta metros a temperatura média durante o experimento foi de  $24,72 \pm 0,01$ . Esse valor é estatisticamente semelhante ao observado no dia 13 de janeiro para a mesma profundidade (Gráfico 10e).

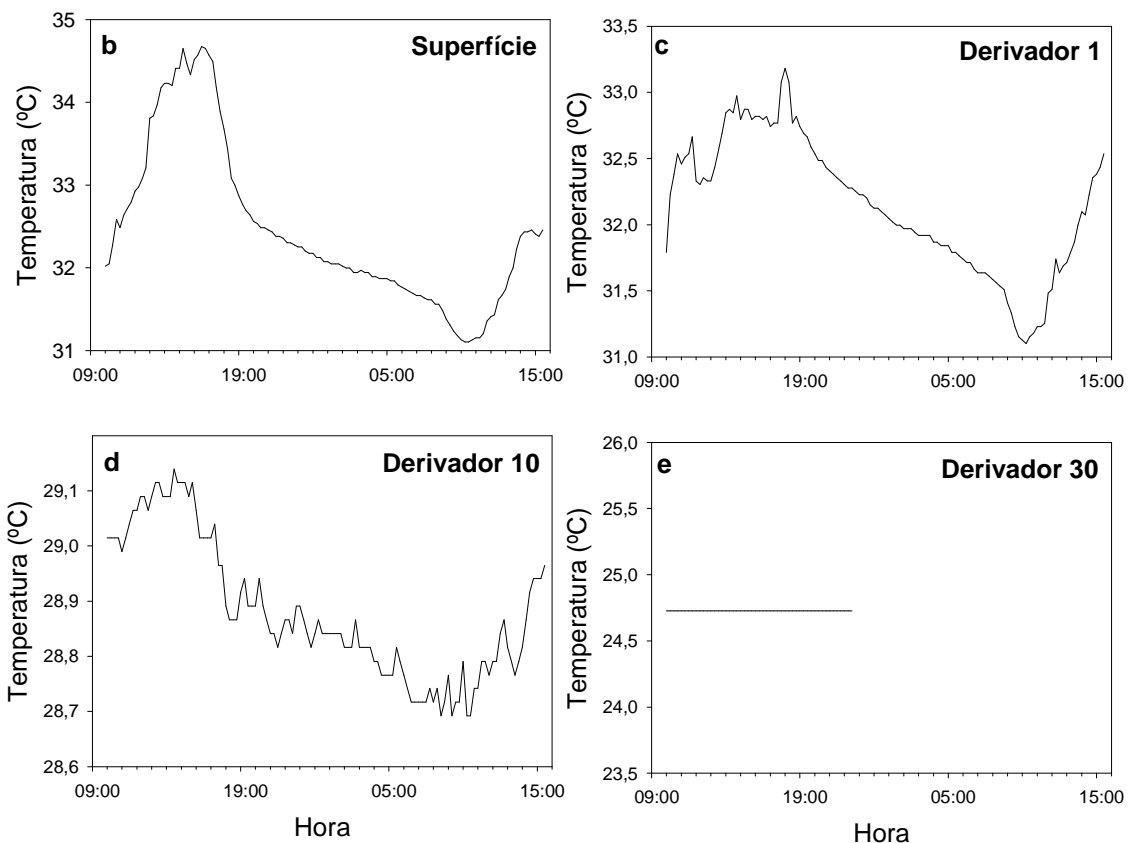
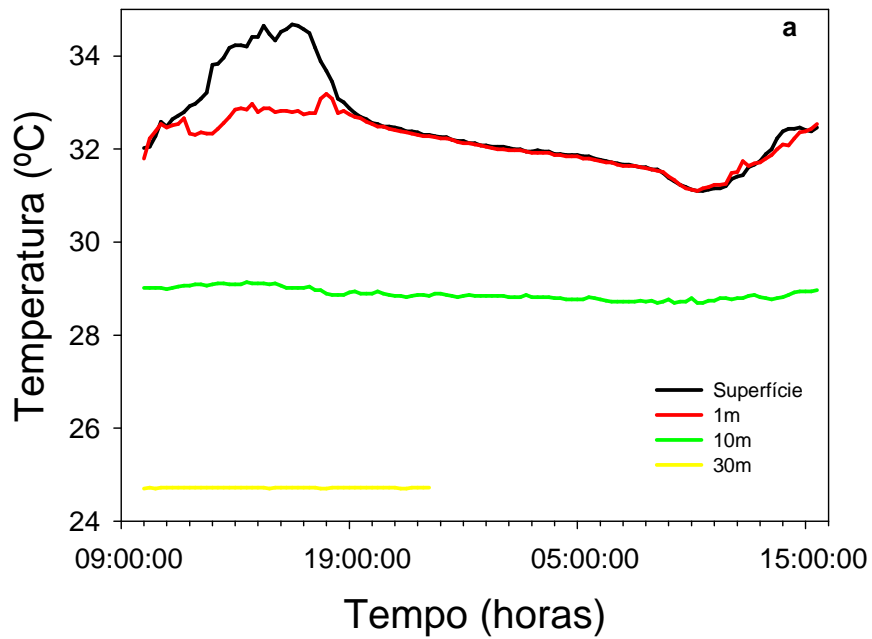


Gráfico 10 – Temperatura na vela dos derivadores no experimento do dia 14 de janeiro de 2009. (a) variação da temperatura nas profundidades das velas de arrasto durante o período do experimento. (b-e) Temperatura de cada profundidade, evidenciando a variação da temperatura durante o experimento.

### 5.3. Análise via Fator de Assimetria (FA) e influencia do vento

A análise baseada no padrão dos gradientes, adaptada por Assireu et al. (2002) e cujas aplicações foram discutidas anteriormente, serão, nesta seção, apresentados para os dados de deslocamento dos derivadores do dia 14 de janeiro. Note que ao contrário das técnicas estatísticas convencionais, o FA local permite identificar como a complexidade varia ao longo da série e conseqüentemente quais as regiões dos dados estão associadas a processos com maior ou menor instabilidade.

Esta análise foi aplicada aos dados a 1, 10 e 30 m a fim de intercomparar estas trajetórias. Conforme discutido anteriormente, o FA permite análises robustas sobre séries curtas enquanto outras técnicas, como correlação cruzada, apresentam sensibilidade ao comprimento da serie.

O Gráfico 11 traz o a trajetória para o derivador a 1 metro. Percebe-se que inicialmente apresenta um padrão pouco complexo no início (trecho em azul) e a partir aproximadamente 120 metros de deslocamento a complexidade começa a aumentar atingindo valor máximo durante as últimas horas de experimento.

A presença de baixa complexidade persistente nos primeiros metros indica uma possível escala espacial lagrangiana de 120 metros, o que em termos práticos indica escalas típicas de variabilidade. Em outras palavras, amostragens realizadas a intervalos menores do que 120 m seriam ambíguas. O que é equivalente a dizer que o tamanho típico das estruturas coerentes seria em torno de 120 metros. Os valores de FA indicaram o início de deslocamento como trajetórias que apresentam baixa complexidade de escoamento, o que a princípio permitiria um bom desempenho de modelos determinísticos para prever os primeiro 120 metros de deslocamento.

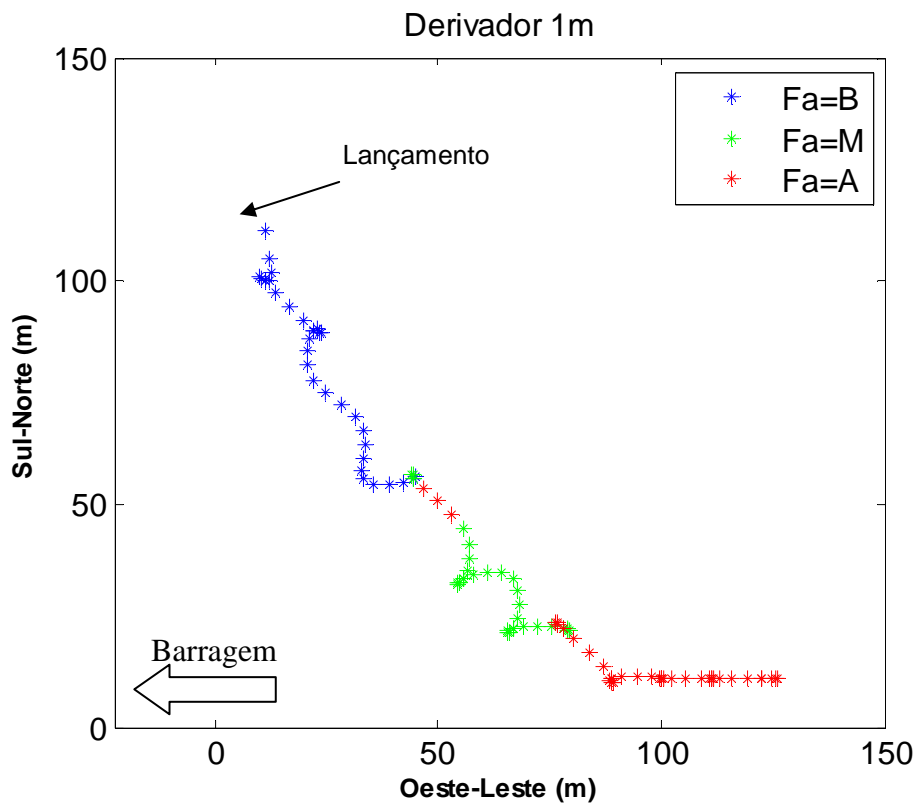


Gráfico 11 – FA local aplicado ao longo da trajetória de escoamento do derivador com a vela posicionada a 1 metro de profundidade.

A trajetória para o derivador a 10 metros (Gráfico 12) mostra que, antes da mudança em direção, o que equivale aos 100 metros iniciais do deslocamento, a complexidade do escoamento estava entre baixa e média. Isso indicaria uma escala espacial de 100 metros, muito semelhante ao observado para o derivador 1 metro. Durante o período de inversão da direção houve um aumento na complexidade. Após a mudança, a complexidade foi diminuindo até atingir baixos níveis de complexidade (em azul). Após sofrer uma nova mudança de direção do deslocamento, a complexidade novamente foi alta e assim permaneceu até o final do experimento.

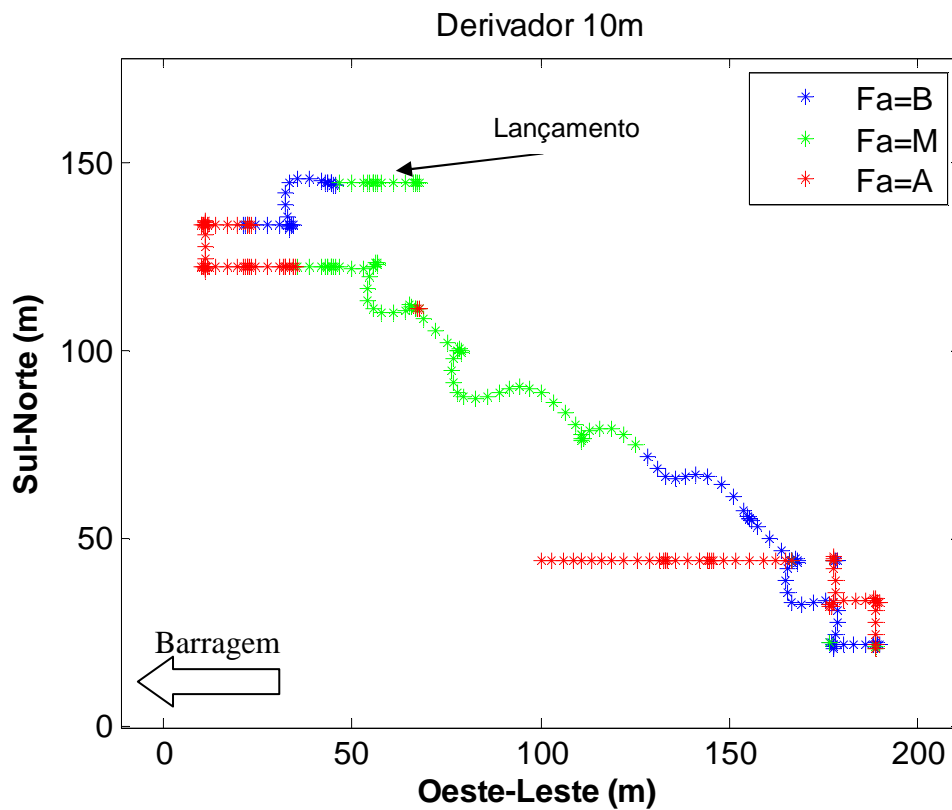


Gráfico 12 – FA local aplicado ao longo da trajetória de escoamento do derivador com a vela posicionada a 10 metro de profundidade.

O derivador a 30 metros de profundidade, diferente dos demais, iniciou a trajetória com uma complexidade alta e foi diminuindo até mudar de direção nas últimas horas de experimento. Logo após a mudança de direção e um aumento da complexidade, houve uma diminuição da complexidade até atingir uma baixa complexidade (azul) no final do experimento (Gráfico 13).

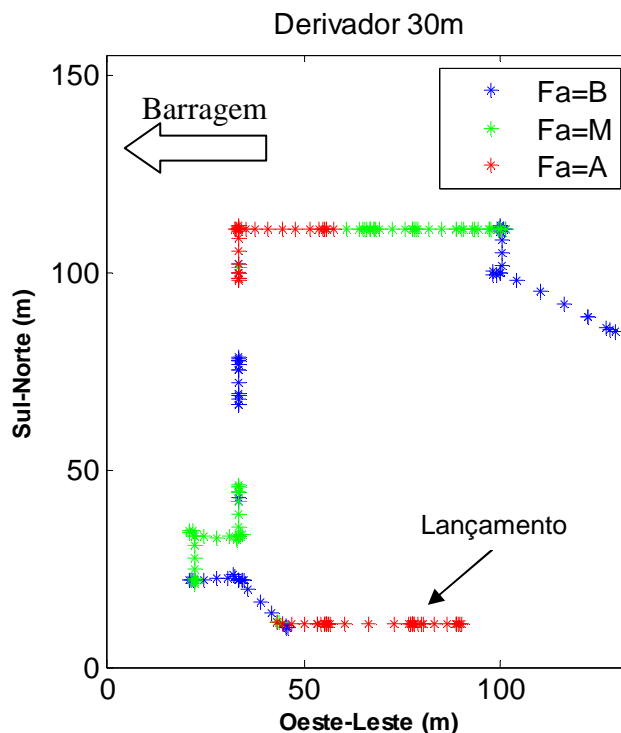


Gráfico 13 – FA local aplicado ao longo da trajetória de escoamento do derivador com a vela posicionada a 30 metros de profundidade.

Comparando os gráficos dos dois primeiros derivadores discutidos anteriormente, apesar de apresentarem regimes de escoamentos distintos, podemos observar que o final de todas as trajetórias foi marcado por um padrão de alta complexidade. Os altos valores de FA (vermelho) encontrados no final das trajetórias sugerem o que a literatura (Davis, 2001) já vinha dizendo: os derivadores tendem a buscar regiões mais energéticas do escoamento.

Os dados indicam que as profundidades amostradas não apresentam padrões semelhantes de complexidade, e que, portanto, existe uma complexidade no regime de escoamento ao longo da profundidade, o que indica que a utilização de modelos unidimensionais seria uma aproximação muito grosseira da realidade.

Como foi discutido na seção anterior, o derivador 1 do dia 13 de janeiro apresentou uma média de velocidade superior a todos os outros derivadores. Esses valores foram atribuídos ao vento, e agora vamos apresentar os dados mais detalhados que comprovam essa afirmação.

Para confirmar a influência do vento sobre o derivador 1 estimamos a corrente a um metro de profundidade a partir dos dados de vento, considerando a velocidade da corrente a um metro como 1,6% da velocidade do vento, valor que produziu o menor rms entre os valores estimados e medidos. O Gráfico 14 apresenta os dados da velocidade medida com o derivador (linha contínua) e a velocidade estimada pelo vento (linha tracejada).

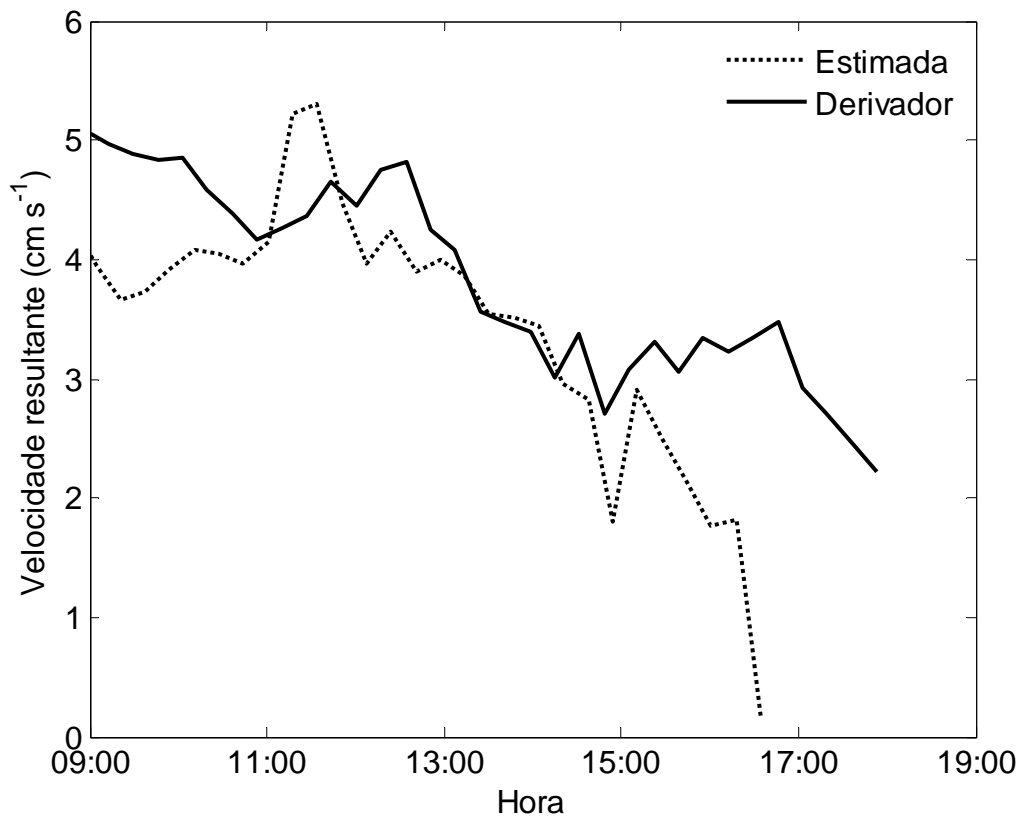


Gráfico 14 – Gráfico da velocidade da corrente a um metro de profundidade. A linha contínua representa os dados observado pelo derivador 1 no dia 13 de janeiro de 2009, e a linha tracejada representa os valores estimados a partir dos dados de vento para o mesmo período de tempo. As séries foram filtradas e foram removidos os sinais com frequência maiores do que  $\frac{1}{15 \times 60} \text{ s}^{-1}$ . Os valores estão avançados no tempo por um fator de 2,5 horas.

Observa-se que a velocidade estimada é muito semelhante à medida pelo derivador, porém com uma defasagem de 2h e 30min. Essa defasagem corresponde ao tempo de resposta do sistema ao vento devido à inércia relacionada ao coeficiente de viscosidade do sistema.

A fim de comparar a complexidade foi aplicado o FA nas duas séries temporais. Na tabela 3 estão apresentados os valores médios e desvio padrão das velocidades e dos FAs dos dados observado e estimado.

Tabela 3 – Valores médios e desvios padrão das velocidades e dos FAs dos dados observados e estimados para o derivador 1 do dia 13 de janeiro de 2009.

	<b>Vel. Média cm s<sup>-1</sup></b>	<b>Desvio padrão cm s-1</b>	<b>Média do FA</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Estimado	3,38	1,52	1,09	0,02
Observado	3,67	0,52	1,01	0,03

Analisando os dados de velocidade, vê-se que os valores são semelhantes estatisticamente, porém têm-se uma considerável diferença entre os desvios padrões. O desvio padrão dos dados observados em campo é menor, o que pode ser explicado pelo atraso de resposta das correntes ao vento e pela a inércia do sistema que impede que variações amplas e repentinas do vento sejam refletidas para as correntes a um metro. Essa afirmação é corroborada a partir dos resultados do FA, os quais mostram que a complexidade das correntes estimadas pelo vento é estatisticamente maior do que o observado em campo.

Considerando o que foi mostrado anteriormente, em caso de modelagem das correntes a um metro a partir de dados de vento, para o reservatório APM Manso, a utilização da porcentagem de 1,6%, parece ser um bom valor para representar os dados a 1 metro de profundidade, lembrando que os valores de 2% a 3% apresentados na literatura (McLachlan & Brown, 2006; Macintyre *et al.*, 2002) são para correntes de superfície, portanto menores que 1 metro de profundidade. Além disso, uma defasagem de duas horas e meia seria o suficiente para se ter uma boa representação do tempo de resposta das correntes em relação a forçante vento. Deve-se considerar também, que a diferença de complexidade e a atenuação indicada pelos dados observados devem ser consideradas nas etapas de modelagem de correntes nessa profundidade.



Em termos ecológicos, o entendimento das correntes e a correta modelagem a partir de forçantes como o vento, se torna importante, pois esse tipo de modelagem que representa fielmente as condições reais em campo, auxilia no fácil entendimento de fatores como: processos de mistura durante dia e noite, transporte de fitoplâncton, resuspensão de material sedimentado entre outros. Em lagos rasos, entender as correntes e entender os fatores que as interferem, é ainda muito útil, e como vimos nesta seção, ventos relativamente modestos podem influenciar em toda coluna d'água e determinar condições favoráveis ou críticas ao ambiente. Por exemplo, no Lago Batata, que corresponde a um lago impactado por rejeito de bauxita, utilizada na produção de alumínio, apresenta profundidades de aproximadamente oito metros nos períodos de cheia, nas áreas consideradas impactadas, porém nos períodos de águas baixas essa profundidade pode chegar a 2 metros. Como vimos, ferramentas como as apresentadas anteriormente podem ser de fundamental importância para entender como a ressuspensão desse rejeito causada pelas correntes induzidas pelo vento pode provocar mudanças bruscas que ocorrem durante os períodos de seca. Entender as correntes podem também auxiliar no entendimento da distribuição de microorganismos, distribuição de peixes, do transporte de sementes e do processo de restauração natural desse ecossistema.

## 5.4. Resultados do experimento de dispersão

### Experimento – Dispersão 1

Nessa sessão serão apresentados os efeitos dos movimentos de água para o espalhamento de substâncias no interior do lago. O Gráfico 15 mostra a dispersão dos derivadores lançados no dia 13 de janeiro. A apresentação desses dados do dia 13 é apenas para ilustrar a análise de dados de dispersão que foram aplicados no experimento do dia 16 de janeiro, já que as velas dos derivadores estavam em profundidade diferentes e não na profundidade de 2,5 metros. Depois das nove horas iniciais caracterizadas por um aumento muito pequeno na área do polígono formado pelos derivadores, dois grandes eventos de divergência ocorrem às 12h30min e 15horas do dia 13 de janeiro. No primeiro podemos explicar um maior aumento na área da dispersão devido aos fortes ventos nesse período, que correspondem aos maiores valores encontrados no dia do experimento. Nesse evento a área aumentou 5 vezes em 2 horas e no segundo evento houve uma alta taxa de incremento, 2 vezes em 30 minutos. Esses eventos são caracterizados por altas taxas de crescimento horizontal que corresponde a duas vezes maior que a média do coeficiente de dispersão  $K = 5,25 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Após as seis horas e trinta minutos de experimento os derivadores atingiram uma área que corresponde a um campo de futebol ( $9000 \text{ m}^2$ ). Em termos fenomenológicos, esta taxa de espalhamento permitira dizer que um Bloom de algas, derramamento de algum poluente, um naufrago ou qualquer objeto a deriva, poderia estar, 4 horas após o evento, em qualquer ponto dentro desta área de  $\sim 9000 \text{ m}^2$ . Stocker & Imberger (2003) observou no lago Kinneret um coeficiente médio de aproximadamente  $15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , durante as primeiras 10 horas de experimento, o que corresponde a aproximadamente 3 vezes o observado no APM Manso. Entretanto, os ventos observados no lago Kinneret atingem velocidades de  $12 \text{ m s}^{-1}$  enquanto que em APM Manso, tem-se ventos máximos de  $4,5 \text{ m s}^{-1}$  durante os experimentos. Outro fato que poderia explicar esta diferença é que somente o derivador a 1m estaria mais sujeito a

ação do vento. Assim, a difusão analisada aqui refere-se muito mais a contribuição proveniente do cisalhamento vertical para a dispersão do que a devida ao vento.

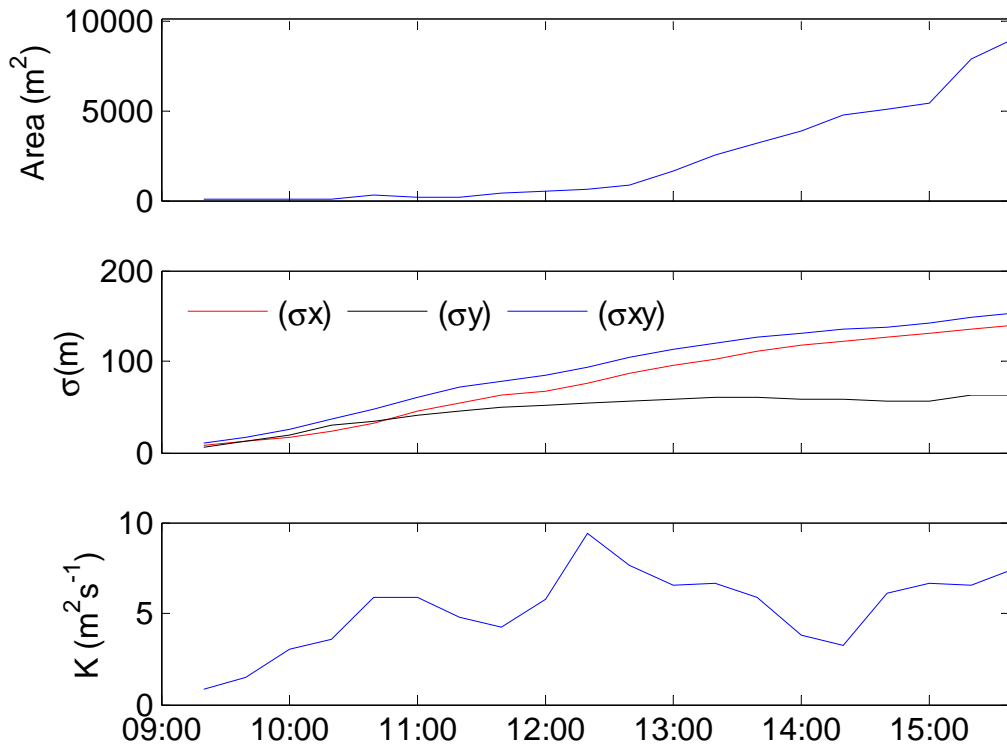


Gráfico 15 – (a) área do polígono formada pelos derivadores lançados no dia 13 de janeiro. (b) Desvio padrão  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  ao longo das direções x e y e desvio padrão em duas dimensões  $\sigma_{xy} = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2}$ . (c) Coeficiente de dispersão  $K = 0.5 d\sigma_{xy}^2/dt$ . Tempo dado em horas a partir do lançamento.

### Experimento – Dispersão 2

A dispersão apresentada pelos derivadores relativos ao experimento realizado no dia 16 de janeiro está apresentada no Gráfico 16. Os derivadores apresentaram deslocamentos intrinsecamente coerentes nas primeiras horas de experimento. A partir de 6 horas e trinta minutos os derivadores apresentaram uma modificação na direção do deslocamento ocorrendo um cruzamento de trajetórias. Kawai (1986) mostrou que as estimativas de difusividade tornam-se não confiáveis em duas situações: quando as trajetórias se cruzam e ou quando um dos derivadores diverge muito dos demais. Note que ambos os casos ocorreram a partir do

período indicado pela seta no Gráfico 16 e pela linha tracejada no Gráfico 17. Por esse motivo consideramos, para efeito de estimativas de dispersão, o tempo de experimento de 6 horas e 30 minutos, que corresponde ao período desde o lançamento até o primeiro cruzamento na trajetória dos derivadores.

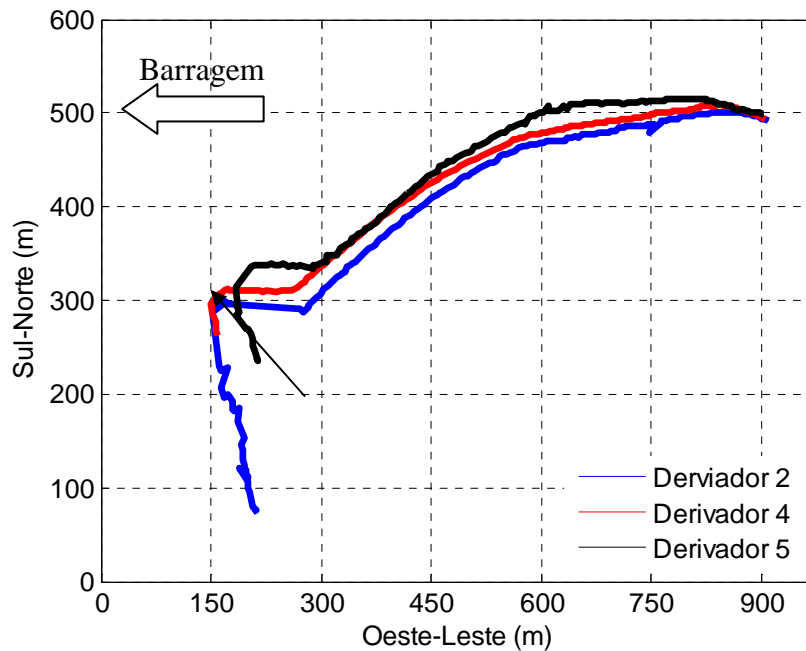


Gráfico 16 – Gráfico das trajetórias dos derivadores lançados no dia 16 de janeiro de 2009. A seta indica a situação em que as trajetórias de dois derivadores se cruzam pela primeira vez.

A área formada pelos derivadores permaneceu pequena e constante durante a maior parte do experimento. A maior área formada foi de  $1800 \text{ m}^2$  alcançado depois de 6 horas de experimento. O coeficiente de dispersão se manteve próximo de zero durante as primeiras horas e obteve uma média no final do experimento de  $0,3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , o que corresponde a uma evolução muito pequena. Assim, durante o período estudado, a advecção dominou o movimento dos derivadores enquanto os processos difusivos foram desprezíveis. Devido à forte dependência às condições iniciais típicos da dinâmica lagrangiana, parcelas idênticas do fluido lançadas ao mesmo tempo, mas com posições ligeiramente diferentes, podem produzir importantes diferenças quanto ao padrão de evolução. É amplamente divulgado que o conceito de sensibilidade às condições iniciais somente se aplica a trajetórias que se iniciam

no mesmo tempo, mas com ligeiras diferenças na posição inicial (Li & Meneveau, 2005). Os experimentos da Gráfico 15 e 17 tiveram a mesma posição inicial, porém tempo inicial diferente. Isto é uma indicação de que pequenas variações temporais na condição inicial da dinâmica podem ser igualmente importantes a pequenas variações espaciais.

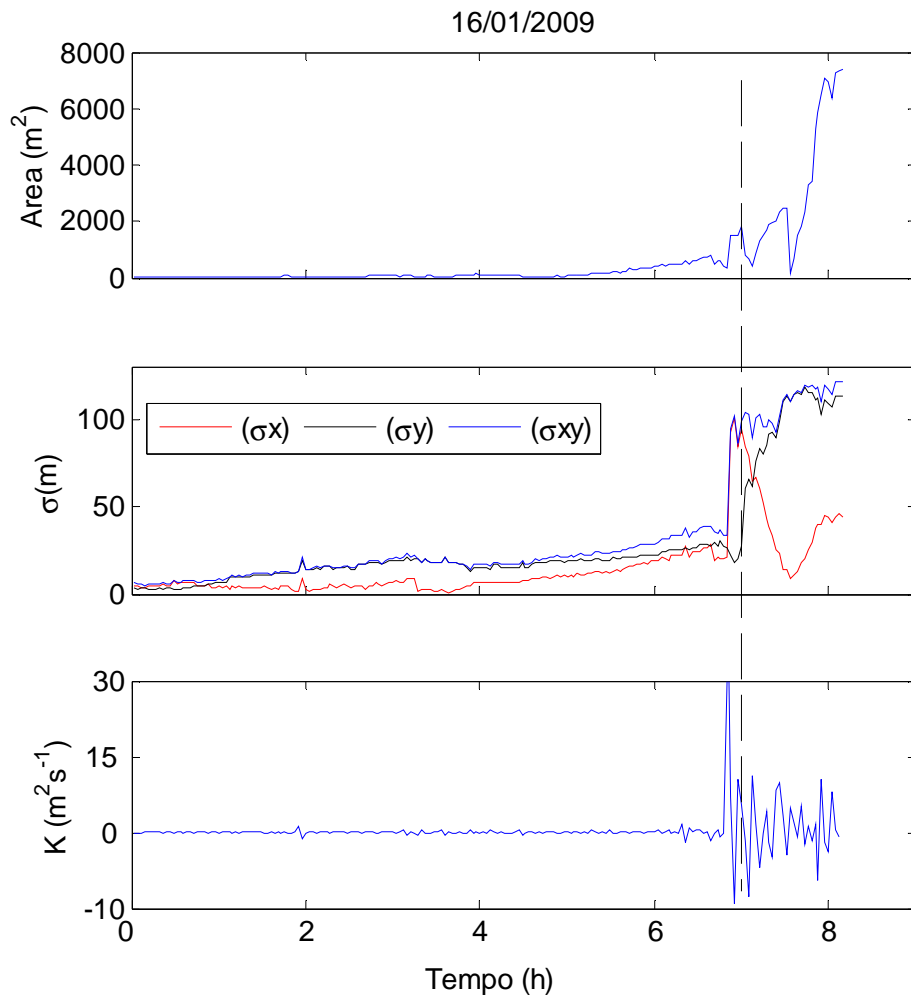
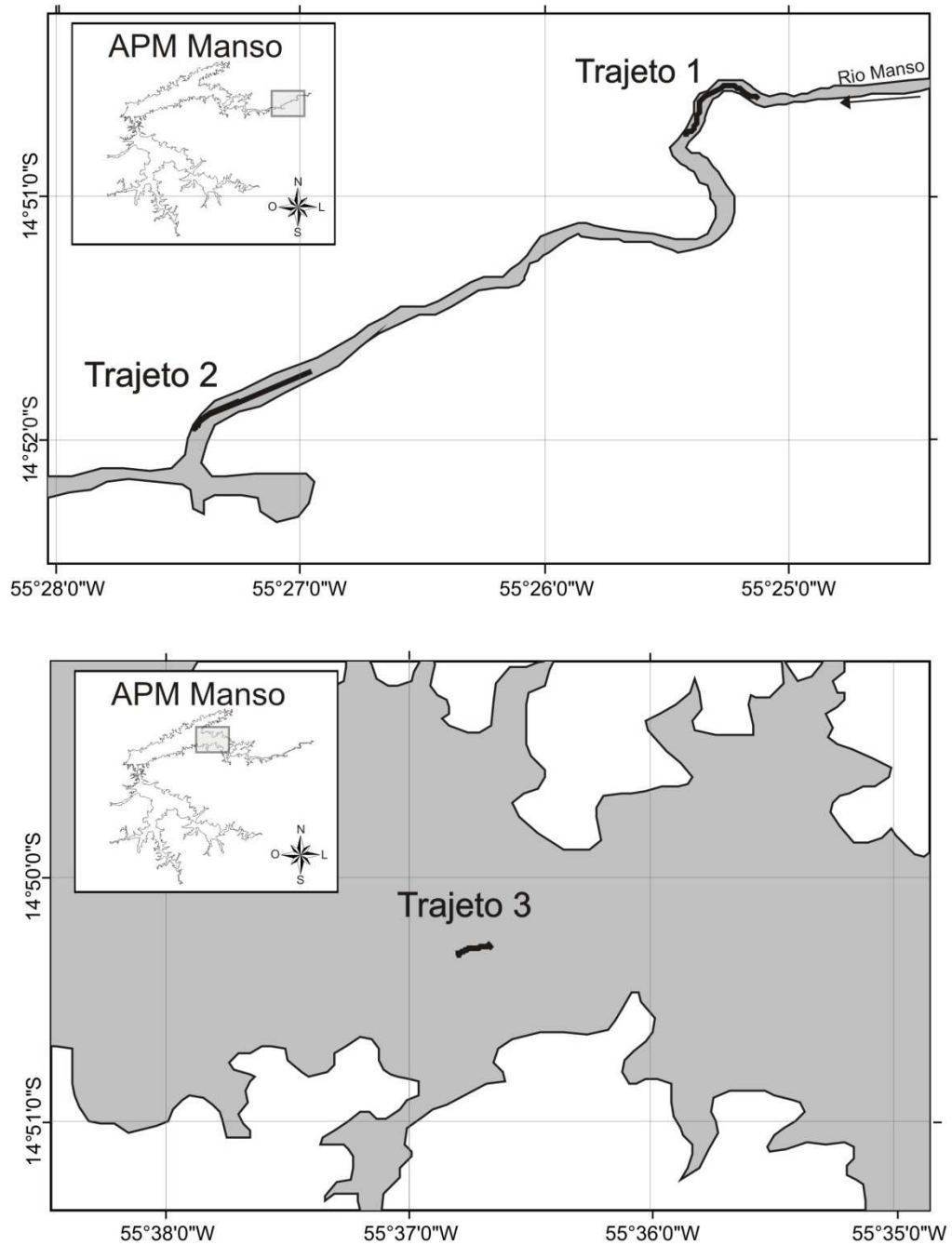


Gráfico 17 – (a) área do polígono formada pelos derivadores lançados no dia 16 de janeiro. (b) Desvio padrão  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  ao longo das direções x e y e desvio padrão em duas dimensões  $\sigma_{xy} = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2}$ . (c) Coeficiente de dispersão  $K = 0.5 d\sigma_{xy}^2/dt$ . Tempo dado em horas a partir do lançamento. A linha tracejada corresponde ao início do período quando as estimativas tornam-se não confiáveis.

### 5.5. Análise dos resultados do experimento influência do rio.

No experimento do rio realizado no dia 17 de janeiro de 2009, foram lançados 3 derivadores para determinar o comportamento do rio ao entrar no reservatório APM Manso. O Mapa 4 mostra a trajetória dos derivadores durante os experimentos.



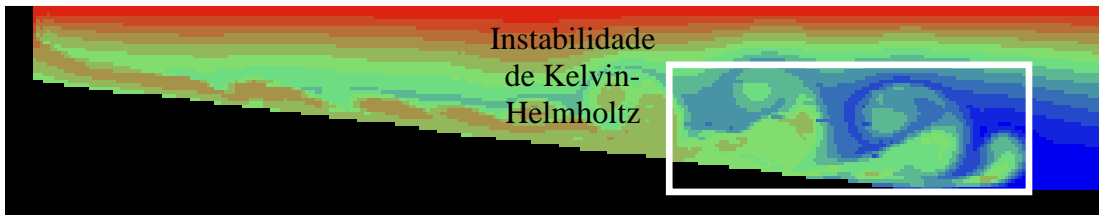
Mapa 4 – Trajetória dos derivadores. (a) derivadores posicionados no rio e transição rio-reservatório. (b) derivador posicionado no interior do reservatório, com a vela de arrasto posicionada na calha do Rio Manso.

O derivador posicionada na transição (trajeto 1) apresentou uma velocidade média durante o percurso de  $11,1 \text{ cm s}^{-1}$ . Embora existam meandros e árvores secas inundadas ao redor do leito do rio Manso, o derivador permaneceu no curso principal do rio. Isso mostra que, embora existam meandros, a água que corre na calha do rio pouco se mistura com a água dos meandros. Esses resultados indicam que existe um eixo principal da corrente que coincide com a calha do rio e que a troca deste com as águas litorâneas ocorrem por cisalhamento lateral.

Considerando os dados do outro derivador posicionado na transição rio-reservatório (trajeto 2), observa-se uma velocidade média de  $6,1 \text{ cm s}^{-1}$ . Já o derivador posicionado no reservatório obteve uma velocidade média de  $3,3 \text{ cm s}^{-1}$ . Isso mostra uma redução gradual de velocidade à medida que o rio entra no reservatório. Isso concorda com Alavian (1992) que indicou que na transição rio reservatório ocorre variação da hidrodinâmica que de, dominada por momentum, passa a ser dominada por ajustes baroclínicos.

A diminuição da velocidade da água pode estar atribuída aos processos de mistura entre a água do rio e o reservatório. De acordo com Arcilan (2009), o principal mecanismo de mistura durante o verão, no reservatório APM Manso, está associada a instabilidade de Kelvin-Helmholtz (Esquema 7).

A instabilidade de Kelvin-Helmholtz interfere no regime de estratificação do lago, provocando o deslocamento do metalimnio para cima. Isso promove um transporte vertical de águas mais profundas para a camada superficial (epilimnio). Como em um ambiente estratificado tem-se um acúmulo de nutrientes e gases nas camadas mais profundas (hipolímnio), o transporte de água para a superfície aumenta a disponibilidade de nutriente no epilimnio e aumenta densidade de organismos fotossintetizantes (Gráfico 18).



Esquema 7 – Modelo da evolução de um rio em um ambiente estratificado (fonte: Özgökmen *et al.* (2006)).

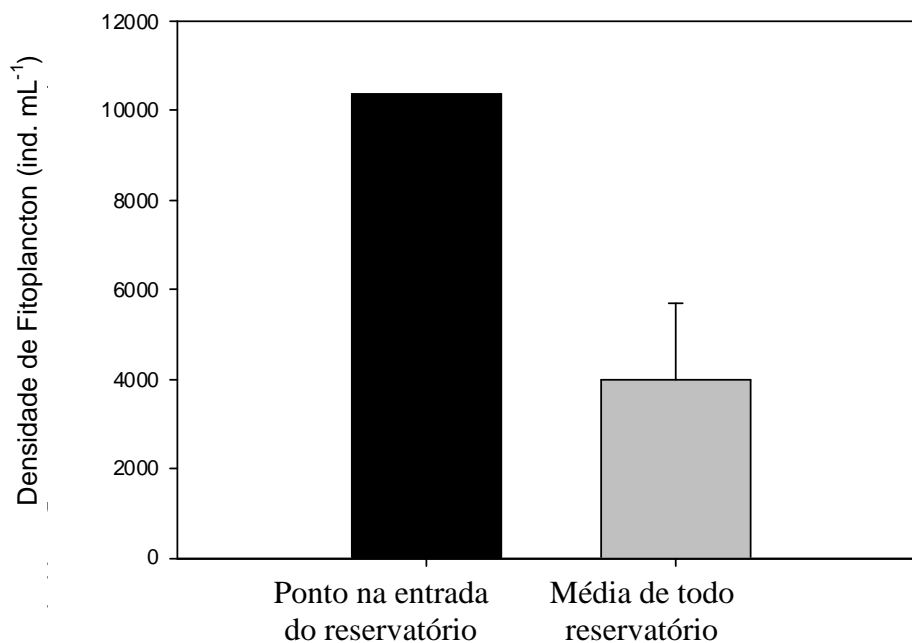


Gráfico 18 – Comparação entre a densidade fitoplanctônica no ponto de entrada do rio no reservatório e a média do reservatório APM Manso.

Os derivadores em oceanografia são amplamente utilizados para calibração e validação de modelos. Um modelo de corrente de gravidade (Stigebrandt 1987) foi usado tendo em vista comparar a velocidade estimada pelo modelo

$V_r = \left(\frac{s}{c_d} g \Delta \rho h\right)^{1/2}$  com a velocidade medida pelo derivador lançado na região de transição.

Essa aplicação e discussão é baseada em Assireu *et al.* (2009). No modelo acima, a inclinação do fundo juntamente com a diferença de densidade entre a água do rio e do reservatório, são as forçantes do escoamento contra a fricção. A inclinação média ao longo da antiga calha do



rio (estimada a partir dos dados de batimetria) é aproximadamente 0,00075 (razão entre o desnível entre a profundidade do rio e a profundidade na barragem ~30m e a distância entre esses dois pontos ~40 km) e o coeficiente de atrito com o fundo ( $C_d$ ) foi estimado em 0,003 como em Arneborg *et al.* (2004). Para as estimativas de densidade foi utilizada a função desenvolvida por Gill (1982):

$$\rho = \rho_{T_w} + \Delta\rho_s \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \rho_{T_w} = & 999,8452594 + 6,793952 \times 10^{-2} T_w - 9,095290 \times 10^{-3} T_w^2 \\ & + 1,001685 \times 10^{-4} T_w^3 - 1,120083 \times 10^{-6} T_w^4 + 6,536332 \times 10^{-9} T_w^5 \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\Delta\rho_s = C_{ss} \left(1 - \frac{1}{sg}\right) \times 10^{-3} = 0,00062 C_{ss} \quad (5.3)$$

Onde  $\rho_{T_w}$  é a densidade da água que é função da temperatura da água ( $T_w$ ),  $\Delta\rho_s$  é o incremento da densidade devido a concentração de sólidos totais em suspensão e  $sg$  é o gradiente específico de sólidos em suspensão (mesmo valor utilizado por Chen *et al.* 2006). Baseado nos valores de sólidos em suspensão medidos no rio, a concentração que chega ao reservatório foi  $15 \text{ mg L}^{-1}$ . Assim, a densidade total estimada do escoamento de entrada incluindo o incremento de densidade devido aos sólidos em suspensão foi  $996,53 \text{ kg m}^{-3}$ . A temperatura média da água do reservatório foi  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ , e a diferença de densidade entre estas duas massas de água ( $\Delta\rho$ ) foi  $0,62 \text{ kg m}^{-3}$ . Aplicando esses valores na equação do modelo de Stigebrandt (1987) e considerando  $h=12\text{m}$  (profundidade de onde ocorre o mergulho do rio) a partir do Mapa 1, tem-se:

$$V_r = \sqrt{\frac{75 \times 10^{-5}}{0,003} \times 9,8 \times \frac{0,62}{996,33} \times 12} = 0,135 \text{ m s}^{-1} = 13,5 \text{ cm s}^{-1} \quad (5.4)$$

O valor medido pelo derivador foi de aproximadamente  $11,1 \text{ cm s}^{-1}$ . Portanto, o valor estimado é muito próximo do efetivamente medido, e o resultado da simulação é consistente com o dado observado.

## 6. Conclusões finais e perspectivas

Em outros países, muito vem sendo feito com derivadores lagrangianos, porém poucos dados em reservatórios tropicais foram encontrados na literatura. No trecho de entrada do rio, nossos dados mostraram uma velocidade média do curso de água de  $11,1 \text{ cm s}^{-1}$  e, comparando este valor com o observado em outro rio de planície, o rio Iguatemi, localizado no Mato Grosso do Sul, apresenta uma velocidade média de  $38 \text{ cm s}^{-1}$  (Súares 2006) (três vezes e meia maior que o observado nesse trabalho). Isso mostra que a zona de transição rio-reservatório pode influenciar na velocidade do rio muitos metros acima do ponto de mergulho no reservatório, devido provavelmente a transição de regime experimentada pelo rio, dinâmica esta que de dominado por momentum, passa a ser determinada por ajustes baroclínicos. No corpo do reservatório observa-se uma velocidade média das correntes nos primeiros metros de  $3 \text{ cm s}^{-1}$ . Esses valores são semelhantes aos  $2,8 \text{ cm s}^{-1}$  observados por MacIntyre 2002 no lago Victoria, também um lago tropical. Esses valores são semelhantes devido ao regime de vento observado durante os período de experimento serem parecidos: média de aproximadamente  $3 \text{ m s}^{-1}$ .

Nossos estudos mostraram: (1) o vento determinou grande parte dos movimentos ocorridos nos primeiros metros da coluna d'água. (2) as turbinas influenciaram no padrão das correntes tanto diretamente (sucção pela turbina), quanto indiretamente (pela corrente de retorno). (3) movimentos advectivos foram predominantes na região intermediária do reservatório, indicando que pequenas variações temporais na condição inicial podem ser igualmente importantes a pequenas variações espaciais para a evolução da dinâmica do escoamento. (4) a diminuição da velocidade do rio ao entrar no reservatório pode causar mistura de águas profundas com águas superficiais, regida pela instabilidade de Kelvin-Helmholtz, proporcionando aumento da densidade fitoplanctônica.

A exemplo do que vem sendo realizado em outros países, aponta-se aqui a necessidade de se divulgar a utilização de derivadores e promover lançamento de derivadores em maior número, e em escala temporal e espacial que forneça dados suficientes para que se possa conhecer de forma mais ampla os processos físicos que regem pontos importantes como ciclagem de nutrientes, transporte de substâncias e organismos, produtividade primária, etc. Existem poucos ou nenhum estudo que fizeram uso de derivadores nas águas continentais brasileiras, e as informações obtidas a partir destes estudos têm importâncias que vão desde auxiliar em planejamentos para irrigação e abastecimento de água até a enriquecer as estimativas de balanço de gases de efeito estufa que são influenciadas pelo transporte de águas mais profundas, ricas em gases, para as camadas superficiais, e para o entendimento dos processos de dispersão de poluentes.

Um dos objetivos do trabalho foi desenvolver o derivador lagrangiano de baixo custo, adaptado as nossas condições de estudo a partir dos derivadores utilizados na oceanografia. Os derivadores oceânicos vêm, há muito tempo, sendo utilizados para o entendimento das correntes marítimas, e até hoje são amplamente utilizados. Vários programas como “*The Global Drifter Program*”, gerenciado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), vêm aprimorando e comparando as tecnologias utilizadas em derivadores lagrangianos desenvolvidas por grandes empresas internacionais como a Clearwater, Technocean, Metocean e Pacific Gyre (Pazos, 2007). Embora exista a possibilidade de aquisição desses equipamentos no mercado internacional, o nosso propósito, além de fazer as necessárias adaptações, foi diminuir a dependência do nosso país à tecnologia estrangeira, e proporcionar a oportunidade de capacitação técnica na área de telemetria, circuitos eletrônicos e engenharia de flutuação voltada para o monitoramento de ecossistemas aquáticos continentais. Considera-se que este propósito foi atingido, já que existe como resultado do fomento associado a esta dissertação, uma empresa que produz os derivadores limnológicos.

Durante os anos de 2007 e 2008, muitos estudos foram feitos no propósito de aperfeiçoamento dos derivadores e atualmente dispõe-se de um sistema de posicionamento via Sistema GLOBALSTAR, que atendem perfeitamente as necessidades.

Além do derivador, o sistema de termistores em série (cadeia de termistores) foi desenvolvido para auxiliar os estudos com os derivadores lagrangianos e para proporcionar o entendimento da estrutura termal vertical. Os termistores da marca HOBO, adquiridos com auxílio financeiro do CNPq, são equipamentos independentes entre si e possuem memórias próprias. Esse sistema já está em ampliação, e está sendo desenvolvido um equipamento totalmente integrado que diminui a independência entre os termistores e possui uma memória central única, que permite o *upload* de informações de forma remota e segura. Essa cadeia está em fase de testes.

Embora tenham ocorrido alguns problemas com os derivadores lagrangianos, foi possível entender o comportamento do rio e as movimentações das massas de água que ocorrem nas diferentes camadas do reservatório APM Manso.

## 7. Referências Bibliográficas

ADELSBRUNNER, H., 1993: “Handbook of Convex Geometry” (eds.) P. M. GRUBER AND J. M. WILLS, Elsevier Science Publishers.

ALAVIAN, V., JIRKA, G.H., DELTON, R.A., JOHNSON, M.C., STEFAN, H.G. 1992. Density currents entering lakes and reservoirs. *J. Hydraul. Eng.* 18: 1464-1489.

ANTENUCCI, J. P., IMBERGER, J. 2001. “Energetics of long interval gravity waves in large lakes”. *Limnol. Oceanogr.* 46: 1760–1773.

ASSIREU, A.T., LIMA, I.B.T., NOVO, E.M.L.M., ALCÂNTARA, E.H, ROLAND, F., PACHECO, F.S., STECH, J.L., LORENZZETTI, J.A., LORENZZETTI. 2009 Submetido. “Monitoring a plunging point underflow using satellite and in situ data in a tropical hydroelectric”.

ASSIREU, A.T. ; ROLAND, F. ; NOVO, E.M.L.M. ; BARROS, N.O. ; STECH, J.L. ; PACHECO, F.S. 2007. “Existe relação entre a complexidade do entorno de reservatórios e a variabilidade espacial dos parâmetros limnológicos?”. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007

ARNEBORG, L., ERLANDSSON, B.L., STIGEBRANDT, A. 2004. “The rate of inflow and mixing during deep-water renewal in sill fjord” *Limnol. Oceanogr.* 49: 768-777

ASSIREU, A. T. ; STEVENSON, M. R. ; STECH, J. L. 2003a. Surface Circulation and Kinetic Energy in the SW Atlantic obtained by Drifters. *Continental Shelf Research*, v. 23, p. 145-157,

ASSIREU, A.T., 2003b. *Estudo das Características Cinemáticas e Dinâmicas das Águas de Superfície do Atlântico Sul Ocidental a partir de Derivadores Rastreados por Satélite*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSIREU, A.T., ROSA, R.R.; LORENZZETTI, J.A; VIJAYKUMAR, N.L.; REMPEL, E.L.; RAMOS, F. M.; SÁ, L.D. ABREU; BOLZAN, M.J.A.; ZANANDREA, A. 2002. “Gradient pattern analysis of short nonstationary time series: an application to Lagrangian data from satellite tracked drifters”. *Physica D*, 168-169: 397-403.

ASSIREU, A. T. ; ROSA, R. R. ; LORENZZETTI, J. A. ; VIJAYKUMAR, N. L. 2001. “Nonlinear Complex Patterns Observed in Velocity Time Series of Satellite Tracked Drifters”. In: *Simpósio de Física Estatística STATPHYS21*, Cocoyoc.

ASSIREU, A.T., 1998. *Análise da Circulação Superficial Oceânica na Costa Sudeste - Sul do Brasil, a Partir da Utilização dos Dados de Derivadores Rastreados por Satélite*. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

CHEN, Y.J., WU, S.C., LEE, B.S., HUNG, C.C. 2006. Behavior of storm-induced suspension interflow in subtropical Feitsui Reservoir, Taiwan. *Limnol. Oceanogr.* 51: 1125-1133.

COLE, J. J., CARACO, N.F. 2001. "Carbon in catchments: connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism". *Marine and Freshwater Research* 52: 101-110.

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>". *Limnol. Oceanogr* 43: 647-656.

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". *Limnol. Oceanogr* 45: 1718-1730.

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.

COLIN DE VERDIERE, A. 1983. "Lagrangian eddy statistics from surface drifters in the eastern North Atlantic". *J. Mar. Res.* 41: 375-398.

CSANADY, G. T. 1982. "On the Structure of Transient Upwelling Events". *J. Phys. Oceanogr.* 12: 84-96.

DAVIS, R.E., SHERMAN, J.T., DUFOUR, J., 2001: Profiling ALACEs and other advances in autonomous subsurface floats. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 982-993.

DEL GIORGIO, P.A., COLE, J.J., CIMBLERES, A. 1997. "Respiration rates in bacteria exceed phytoplankton in unproductive aquatic system". *Nature*, 385: 148-151.



DUNSTALL, T.G., CARTER, J.C.H., MONROE, G.T., WEILER, R.R., HOPKINS, G.J. 1990. "Influence of upwellings, storms, and generation station operation on water chemistry and plankton in the Nanticoke region of Long Point Bay, Lake Erie". *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47:1434–1445.

FARROW, D. E., STEVENS, C.L. 2003. "Numerical modeling of a surface stress driven density-stratified fluid". *J. Engineer. Math.* 47: 1-16.

FORD, D. E. 1990. "Reservoir Transport Processes". In: *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*. John Wiley & Sons, New York, p. 15-41.

GILL, A.E. 1982. Appendix 3: Properties of seawater. In: GILL, A.E. ed. *Atmosphere-ocean dynamics*. Academic press. New York pp. 599-600.

HAFFNER, G.D., YALLOP, M.L., HEBERT, D.N., GRIFFITHS, M. 1984. "Ecological significance of upwelling events in Lake Ontario". *J. Great Lakes. Res.* 10:28–37.

HANSEN, D.V. AND POULAIN, P.M. 1995. "Quality Control and Interpolations of WOCE-TOGA" Drifter Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v.13, p. 900-909

HANSON, P. C., BADE, D.L, CARPENTER, S.R, KRATZ, T.K. 2003. "Lake metabolism: Relationships with dissolved organic carbon and phosphorus". *Limnol. Oceanogr* 48: 1112-1119.

HANSON, P. C., POLLARD, A.I., BADE, D.L., PREDICK, K., CARPENTER, FOLEY, J.A. 2004. "A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes". *Global Change Biology* 10: 1285-1298.

HAYNE, R., BARTON, E.D. 1991. "Lagrangian observations in the Iberian coastal transition zone". *J. Geophys. Res.* **96**: 14731–14741.

HEUFELDER, G.R., JUDE, D.J., TESAR, F.J. 1982. "Effects of upwelling on local abundance and distribution of larval alewife (*Alosa pseudoharengus*) in eastern Lake Michigan". *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **39**:1531–1537.

IMBERGER, J., AND J. C. PATTERSON. 1990. "Physical limnology." *Adv. Appl. Mech.* **27**:303-475.

IMBERGER, J., PARKER, G. 1985. "Mixed layer dynamics in a lake exposed to a spatially variable wind field". *Limnol. Oceanogr.* 39: 473–488.

JANSSON, P., NÄSLUND, J.-O., PETTERSSON, R., RICHARDSON-NÄSLUND, C. & HOLMLUND, P., 2000. "Polythermal structure and debris entrainment in the terminus of Storglaciären". In: NAKAWO, M., RAYMOND, C.F. AND FOUNTAIN, A. (eds.): *Debris-covered glaciers. Proceedings of a workshop held at Seattle, September 2000*. IAHS Publ. No. 264: 143-151.

JONSSON, A., KARLSSON, J., JANSSON, M. 2003. "Sources of carbon dioxide supersaturation in clearwater and humic lakes in northern Sweden". *Ecosystems* 6: 224-235.

JONSSON, A., MEILI, BERGSTROM, M.A.K., JANSSON, M. 2001. "Whole-lake mineralization of allochthonous and autochthonous organic carbon in a large humic lake (Ortrasket, N. Sweden)". *Limnology and Oceanography* 46: 1691-1700.

KALFF, J. 2001. *Limnology*. Ed Prentice Hall.

KORGEN, B. J. 1995. "Seiches". *American Scientist* **83**: 330-341.

LAVAL, B., J. IMBERGER, B. R. HODGES, AND R. STOCKER. 2003. "Modeling circulation in lakes: Spatial and temporal variations". *Limnol. Oceanogr* 48: 983-994.

LAWRENCE, G.A., ASHLEY, K.I., YONEMITSU, N., ELLIS, J.R. 1995. "Natural dispersion in a small lake". *Limnol. Oceanogr.* 40: 1519-1526.

LI, Y., MENEVEAU, C. 2005. "Origin of Non-Gaussian Statistics in Hydrodynamic Turbulence". *Phys. Ver. Lett.* 95, 164502.

MACINTYRE, S., ROMERO, J.R., KLING, G.W. 2002. "Spatial-temporal variability in surface layer deepening and lateral advection in an embayment of Lake Victoria, East Africa". *Limnol. Oceanogr.* 47(3),656-671.

MANDELBROT, B. 1991. *Objetos Fractais*. Lisboa: Gradiva.

MARTIN, J.L., MCCUTHEON, S.C.. 1999. *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. Lewis.

MCLACHLAN, A., BROWN, A.C. 2006. *The ecology of sandy shores*. Academic Press. 373p.

MEGARD, R.O., KUNS, M.M., WHITESIDE, M.C., DOWNING, J.A. 1997. "Spatial distributions of zooplankton during a coastal upwelling in western Lake Superior". *Limnol. Oceanogr.* 42:827–840.

MOLINARI, R., KIRWAN, A.D.J. 1975. "Calculations of differential kinematic properties from Lagrangian observations in the Western Caribbean Sea". *J. Phys. Oceanogr.* **5**: 483–491.

MONISMITH, S. G. 1985. "Wind-forced motions in stratified lakes and their effect on mixedlayer shear". *Limnol. Oceanogr.* 30: 771-783.

MONISMITH, S. G. 1986. "An experimental study of the upwelling response of stratified reservoirs to surface shear stress". *J. Fluid Mech.* 171: 407-439.

MONISMITH, S.G., IMBERGER, J., MORISON, M.L. 1990. "Convective motions in the sidearm of a small reservoir". *Limnol. Oceanogr.* 35: 1676–1702.

MORTIMER, C. H., AND F. M. BOYCE. 1974. "Internal Waves". *Transactions-American Geophysical Union* 55: 241-241.

OKUBO, A., EBBESMEYER, C.C.. 1976. "Determination of vorticity, divergence and deformation rates from analysis of drogue observations". *Deep-Sea Res.* **23**: 345–352.

OSTROVSKY, I., YACOBI, Y.Z., WALLINE, P., KALIKHMAN, I. 1996. "Seiche-induced mixing: Its impact on lake productivity". *Limnol. Oceanogr.* 41: 323–332.

PACHECO, F.S., ASSIREU, A.T., OMETTO, J.P.H, ROLAND, F. Submetido. "Lagos: a água em movimento." *Ciência Hoje*.

PAZOS, 2007. Results after 1 year of the 2006 Atlantic Data Buoy study. Presented at the DBCP-23, Korea, October 15-19, 2007.

PEETERS, F, WUEST, A., PIEPKE, G., IMBODEN, D.M. 1996. "Horizontal mixing in lakes". *J. Geophys. Res.* 101: 18361–18375.

PEETERS, F. 1994. Horizontale Mischung in Seen (Horizontal mixing in lakes). Ph.D. thesis, Eidgenossische Technische Hochschule, Zurich.

PRAIRIE, Y. T., D. F. BIRD, AND J. J. COLE. 2002. "The summer metabolic balance in the epilimnion of southeastern Quebec lakes". *Limnology and Oceanography* **47**: 316-321.

QUAY, P. D., W. S. BROECKER, R. H. HESSLEIN, E. J. FEE, AND D. W. SCHINDLER. 1979. "Whole lake tritium spikes to measure horizontal and vertical mixing rates". In: *Isotopes in lake studies. International Atomic Energy Agency.* p. 175–193.

ROLAND, F., VIDAL, L.O. 2001. "Heterotrophic Bacterial Respiration: A Relevant Measurement For The Understanding Of Plankton Metabolism". pp 97-116. In: FARIA, B.M., FARJALA, V.F. & ESTEVES, F.A. (eds). *Aquatic Microbial Ecology in Brazil*. Series Oecologia Brasiliensis, vol. IX. PPGE-UFRJ. Rio de Janeiro, Brazil

ROSA, R. R., M. R. CAMPOS, F. M. RAMOS AND VIJAYKUMAR, N. L, 1999: "Gradient Pattern Analysis of Structural Dynamics: Application to Molecular System Relaxation". *Braz. J. Phys.*, 33(3), 1-6.

RUEDA, F.J. & E.A. COWEN. 2005. "The residence time of a freshwater embayment connected to a large lake". *Limnol. Oceanogr.* 50(5),1638–1653,

SANDERSON, B. G. 1995. "Structure of an eddy measured with drifters". *J. Geophys. Res.* **100**: 6761–6776.

SERRA, T., VIDAL, J. CASAMITJANA, X., SOLER, M., COLOMER, J. 2007. "The role of surface vertical mixing in phytoplankton distribution in a stratified reservoir". *Limnol. Oceanogr.* 52: 620-634.

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.

SOBEK, S.; TRANVIK, L. J., COLE, J. J. 2005. "Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes". *Global Biogeochemical Cycles*. 19 (2): Art. No. GB2003.

SPIGEL, R. H., AND J. IMBERGER. 1980. "The classification of mixed layer dynamixes the lakes of small-medium size". *J. Phys. Oceanogr.* 10: 1104-1121.

SRTM Digital Elevation Model 90M - e140n40.dem [computer file]. Highlands Ranch, Colorado: LandInfo Worldwide Mapping, 2000.

STEVENS, C., IMBERGER, J. 1996. "The initial response of a stratified lake to a surface shear stress". *J. Fluid Mech.* 312: 39-66.

STEVENSON, M.R., LORENZZETTI, J.A., STECH, J.L., ARLINO, P.R.A. 1993. "SIMA - An Integrated Environmental Monitoring System". In: *VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba*. Anais. Curitiba: INPE. 4: 300-310.

STOCKER, R., IMBERGER, J. 2003. "Horizontal transport and dispersion in the surface layer of a medium size lake". *Limnol. Oceanogr.* **48**: 971-982.

STIGEBRANDT, A. 1987. "A model for the vertical circulation of the Baltic deep water" *J. Phys. Oceanogr.* 17: 1772-1785.

SYBRANDY, A.L., NIILER, P.P., 1991: *WOCE/TOGA Lagrangian drifter-construction manual*. University of California, 92p

SÚARES, Y.R., PETRERE, M.J. 2006. “Gradientes de diversidade nas comunidades de peixes da bacia do rio Iguatemi, Mato Grosso do Sul, Brasil.” *Iheringia, Sér. Zool.*, Porto Alegre, 96(2):197-204

WANNINKHOF, R. 2002. *Gas Transfer at Water Surfaces*, AGU, Washington DC, pp.285-290.