

Estudo da dispersão de partículas em reservatórios a partir de derivadores rastreados por satélite

Arcilan Trevenzolli Assireu¹
Felipe Siqueira Pacheco²
Rafael dos Reis Pereira¹

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI/IRN
Av. BPS, 1303 – B. Pinheirinho, Itajubá – MG, Brasil
{assireu, fael.reis89}@gmail.com

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/DSA
Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos – SP, Brasil
fpacheco@gmail.com

Abstract. Satellite tracked drifters were deployed in order to study the horizontal transport and dispersion in the epilimnion of a large hydroelectric reservoir. Our study was motivated by the dispersion implications on the reservoir surface process, such as larval dispersion, turbulent mixing, point-source fertilizer, dispersion of pollutants, and many others. Our results have demonstrated the effectiveness of the drifter in estimating differential kinematic properties and horizontal dispersion. A discussion of how these parameters can be useful for the safe and efficient management of the waterway is carried out. The diffusivity observed in this study was comparable with those observed in others lakes. The average value of diffusivity coefficient ($K = 2 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) was very close to the mean value observed by Stocker and Imberger (2003) ($K = 2.5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) in the Lake Kinneret. Comparing the diffusivity coefficient for the identical releases of drifters at the same time but from two slightly different locations a pronounced difference is observed. This indicates that the dispersion is sensitive to the location of the release.

Palavras-chave: Satellite tracked drifters, particle dispersion, horizontal transport, derivadores rastreados por satélite, dispersão de partículas, transporte horizontal.

1. Introdução

O uso de novas tecnologias tem possibilitado medidas sinóticas de correntes em lagos e reservatórios, com resolução temporal e espacial nunca visto antes. O Sensoriamento Remoto de propriedades da superfície do mar tornou-se ferramenta rotineira para obtenção de informações sobre correntes, ondas, turbulência, dispersão de óleo, dentre outros.

O conhecimento de processos relacionados à dispersão horizontal é muito importante para a compreensão de processos biogeoquímicos em sistemas aquáticos. Derivadores rastreados por satélite é uma ferramenta essencial para a compreensão e diagnósticos de movimentos no oceano, grandes lagos e reservatórios. Isto vem possibilitando a obtenção de informações sobre transporte e dispersão e, conseqüentemente, sobre o destino de traçadores na superfície dos sistemas aquáticos. Estas informações são relevantes para estimativas de trajetórias e taxa de espalhamento de manchas de óleo (Soomer *et al.*, (2010)), dispersão de larvas e de outros organismos (Corell *et al.*, 2011), e para planejamento de operações de resgate ou de busca de objetos.

Apesar disso, constam muito poucos estudos sobre a dispersão horizontal em lagos e reservatórios (Lawrence *et al.* (1995); Stocker and Imberger (2003); Pacheco *et al.* (2011)). Assim, o uso de técnicas de Sensoriamento Remoto para avaliar correntes em lagos e reservatórios é algo relativamente novo.

2. METODOLOGIA DE TRABALHO

Os derivadores utilizados neste trabalho amostraram a circulação até 1m de profundidade, já que o foco do trabalho foram os processos relacionados a mistura horizontal. A frequência amostral foi de 0,1 Hz e a precisão foi em torno de 10m. Para assegurar o acoplamento com as correntes, os derivadores são conectados a uma vela submersa (Niiler *et al.* (1995)). Estes autores mostraram que, para uma razão de 40:1 entre a área da vela e a do flutuante, as incertezas devido a arrastos diretos do vento sobre o derivador é menor do que 1 cm s^{-1} para ventos de 10 m s^{-1} . Para maiores detalhes vide Johnson *et al.* (2003). O rastreo pode ser feito via sistema ARGOS ou Sistema Iridium. Os derivadores utilizados aqui fizeram uso deste último.

O coeficiente de dispersão para a direção x é definido, por exemplo, como (Stocker and Imberger, 2003):

$$k_x = 0.5 \frac{d\sigma_x^2}{dt}, \quad (1)$$

E pode ser calculado de forma similar para k_{yx} and k_y . σ_x e σ_y são o desvio padrão na direção x e y, respectivamente, enquanto $\sigma_{xy} = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2}$.

Os experimentos com os derivadores foram realizados em um setor do reservatório de Furnas ($21^\circ 25' \text{S}$, $46^\circ 08' \text{W}$), onde existem projetos de criação de peixe em tanque rede e a possibilidade de construção de uma hidrovía (Figura 1).



Figura 1. Área de estudo no reservatório de Furnas

3. Resultados e Discussão

Os valores de temperatura do ar, umidade relativa e vento, na área de estudo, apresentaram pronunciada variabilidade diurna (Figura 2). A temperatura máxima foi 29°C enquanto a mínima foi 20°C . Condições de calmaria normalmente ocorreram durante a noite e persistiram até 09:00 h. Durante a tarde a velocidade média do vento atingiu 5 ms^{-1} . A umidade relativa foi menor durante a tarde e foi $> 60\%$ no restante do tempo.

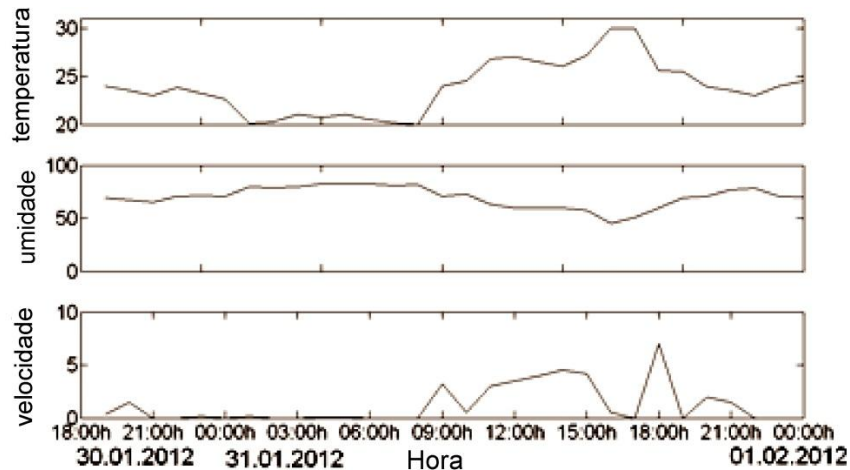


Figura 2. Temperatura do ar (a), umidade relativa (b), e vento (c) durante o experimento 3 (Vide Tabela 1).

Exceto para um breve período no final da tarde, a temperatura do ar foi geralmente maior em 2°C do que a água. Consequentemente, a camada limite acima da interface ar-água estava instável. O ciclo diurno de aquecimento e resfriamento e a estratificação estão ilustrados na Figura 3. Aquecimento diurnos intensos, com temperaturas em superfície que alcançaram 29°C (Figura 3a), ocorreu entre 12:00 h e 15:00 h. Durante a tarde, com a intensificação do vento, a coluna de água começou a perder calor e o intenso processo de mistura erodiu a estratificação.

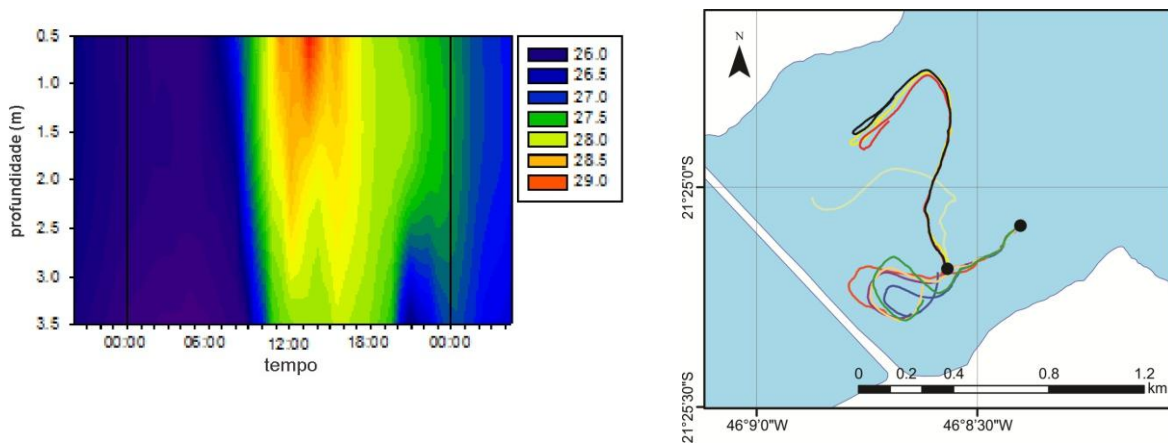


Figura 3. Evolução da estrutura térmica vertical(a). Trajetórias iniciadas ao mesmo tempo mas com posição inicial ligeiramente diferente indicadas pelos pontos pretos(b).

O lançamento de poluentes em sistemas aquáticos pode ter um dramático impacto sobre o ecossistema local (Prahl *et al.*, 1984; Rice *et al.*, 1993; Lekien *et al.*, 2005), principalmente se o poluente recircular em um escoamento aproximadamente confinado, como é o caso de lagos e reservatórios. Tendo em vista testar a dependência do movimento de lagrangiano de partículas em relação às condições iniciais, lançamentos idênticos de dois grupos de derivadores foram realizados no mesmo tempo, mas em posições ligeiramente diferentes (300m de distância) (Figura 3b).

Conceitos de sensibilidade às condições iniciais são relacionados não somente a diferentes posições de lançamento, mas também a diferentes instantes de lançamento, refletidas por alterações nas condições ambientais no momento do lançamento. Uma vez que os reservatórios são usados para o suprimento de eletricidade de acordo com a demanda, estes

são caracterizados por uma grande variabilidade no nível da água, devido a variações no regime de chuvas e na quantidade de água “turbinada”. A fim de avaliar as implicações das variações de nível para os processos difusivos, os derivadores foram lançados em agosto de 2011 (período de nível máximo), em outubro de 2011 (período de vazante) e janeiro de 2011 (período de enchimento), cuja descrição segue a seguir.

Período de nível máximo (Experimento 1) – As direções predominantes foram para sudoeste durante as 10:00h iniciais do experimento, após isto, uma bem definida circulação anticiclônica pôde ser observada para os derivadores 1,2,3,4 e 5 (Figura 4a-1). Curiosamente, o conjunto de derivadores lançados no mesmo instante destes, porém com posição inicial ligeiramente diferente, apresentou trajetórias muito diferentes, com direções predominantemente para nordeste (Figura 4a-2), o que indica a sensibilidade do processo às condições iniciais. O derivador 6 apresentou uma trajetória particular, sem nenhuma relação aparente com as demais. As velocidades médias foram 1,3 e 1,7 cm s^{-1} , respectivamente.

Período de vazante (Experimento 2) – Durante este experimento, as trajetórias foram muito diferentes, quando comparadas com os outros experimentos. A direção predominante foi para leste ao longo das 15 horas iniciais de experimento e, a partir daí, giraram ciclonicamente e iniciaram movimento em direção oeste. (Figure 4b). A velocidade média foi 1.6 cm s^{-1} .

Período de enchimento (Experimento 3) – As direções predominates foram para oeste-noroeste durante as seis horas iniciais, passando a apresentar uma circulação ciclônica para os derivadores 1, 2, 3, and 4 (Figura 4c). A velocidade média foi 2,2 cm s^{-1} . As profundidades e datas de cada experimento são apresentados na Tabela 1.

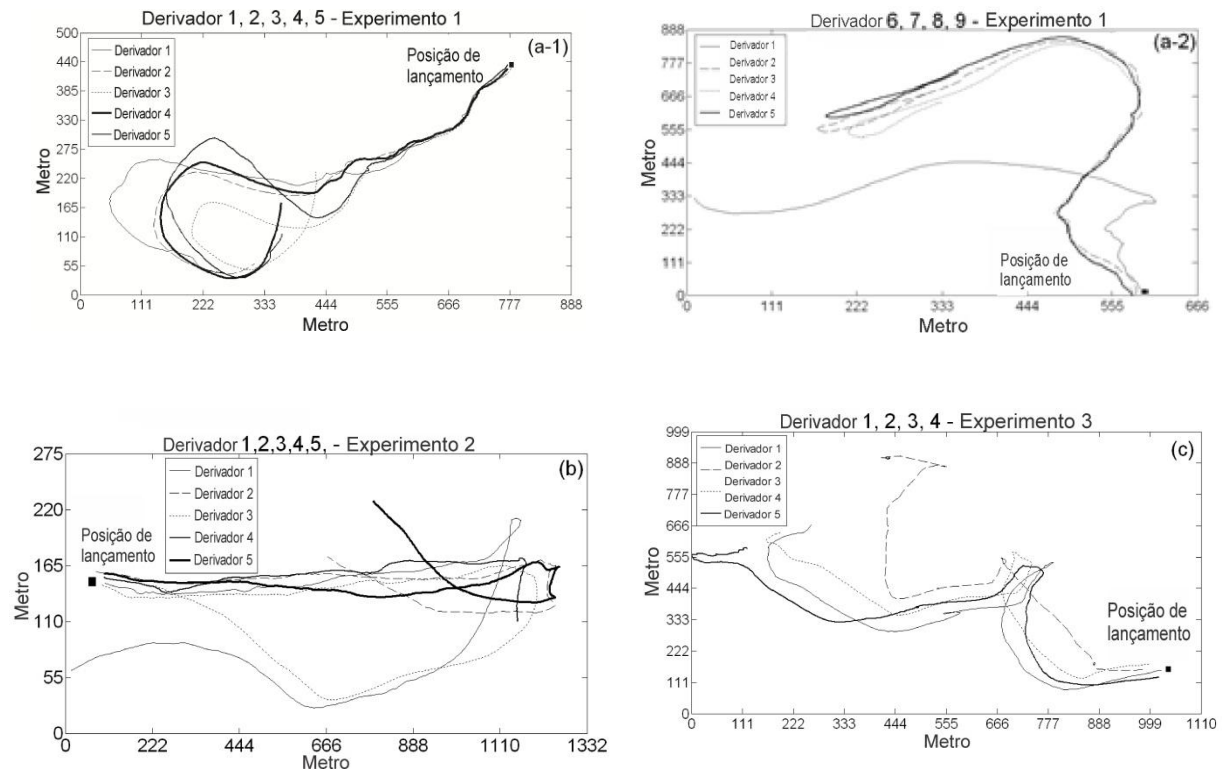


Figura 4. Trajetórias dos derivadores no experimento 1(Nível máximo) (a), 2 (Vazante) (b) and 3 (Enchimento)(c). O quadrado preto indica a posição de lançamento.

Tabela 1. Detalhes dos três experimentos em realizados no reservatório de Furnas.

Experimento	Derivadores	Lançamento	Resgate	T _{experimento} (h)	T _{total} (h)
1	1,2,3,4,5,6,7,8,9	19:00h, 17 agosto	20:00h, 18 outubro	25	212
2	1,2,3,4,5	19:30h, 31 outubro	20:30h, 1 novembro	23	108
3	1,2,3,4,5	19:30h, 2 fevereiro	08:00h, 2 fevereiro	36	96

Os derivadores responderam diretamente a corrente induzida pelo vento. Correntes com intensidade moderada (média $\sim 1 \text{ cm s}^{-1}$) foram observadas entre 20:00 h e 17:00 h (Figura 5 a,b,c,d). Entre 17:00 h e 20:00 h uma forte intensificação na corrente foi observada com velocidades que atingiram 8 cm s^{-1} . Como a velocidade média do vento foi 1 m s^{-1} ao longo deste primeiro período (Figura 2c) e 4 m s^{-1} para o restante do período, estas observações concordam com as encontradas por Hsu (1988) e Curtarelli (2012). Estes autores encontraram valores de corrente em superfície com intensidade igual a aproximadamente 1% da intensidade do vento.

A taxa de expansão ou contração da área compreendida pelos derivadores apresentou um sinal oscilatório (Figura 6). Até tipicamente 16 h após o lançamento o crescimento da área foi bastante lento. Eventos de divergência bastante intensos foram observados, com início entre 14 00h e 16 00 h (Figura 6). A área aumentou por um fator de 2 durante o Experimento 1 (Figure 6 a,b), por um fator de 6 durante o Experimento 2, e por um fator de 3 para o Experimento 3. É bastante evidente da Figura 6 (painel de cima) que houve um crescimento líquido no tamanho da área compreendida pelos derivadores.

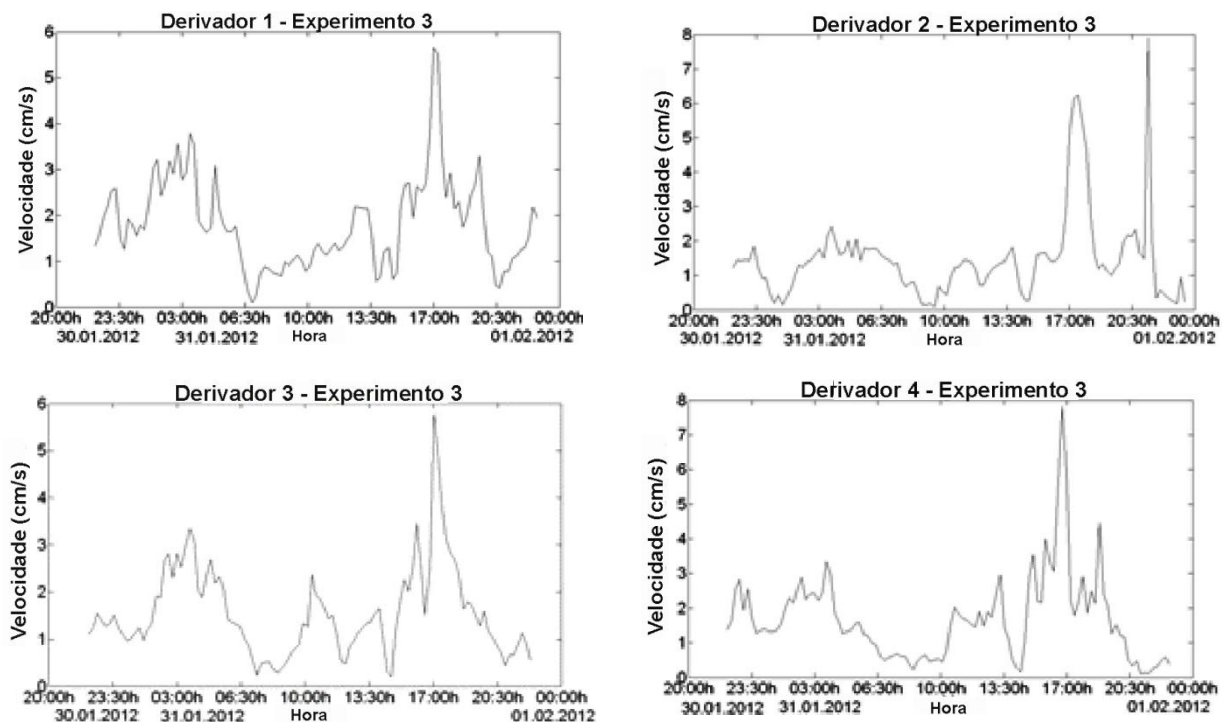


Figura 5. Velocidades resultantes para os derivadores lançados no Experimento 3.

Estes resultados são muito úteis em etapas de estimativas da evolução de traçadores, tais como, poluentes químicos, na superfície do ambiente aquático. O valor médio do coeficiente de difusividade ($K = 2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) é muito próximo dos valores médios observados por Stocker and

Imberger (2003) ($K = 2.5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) no Lago Kinneret. A comparação da difusividade entre os grupos de derivadores lançados ao mesmo tempo, mas em posições ligeiramente diferentes (Experimento 1) (Figura 6 a,b) aponta para uma pronunciada diferença. Isto indica que a dispersão é dependente das condições iniciais de lançamento, mesmo quando se considera distâncias pequenas, como 300 m.

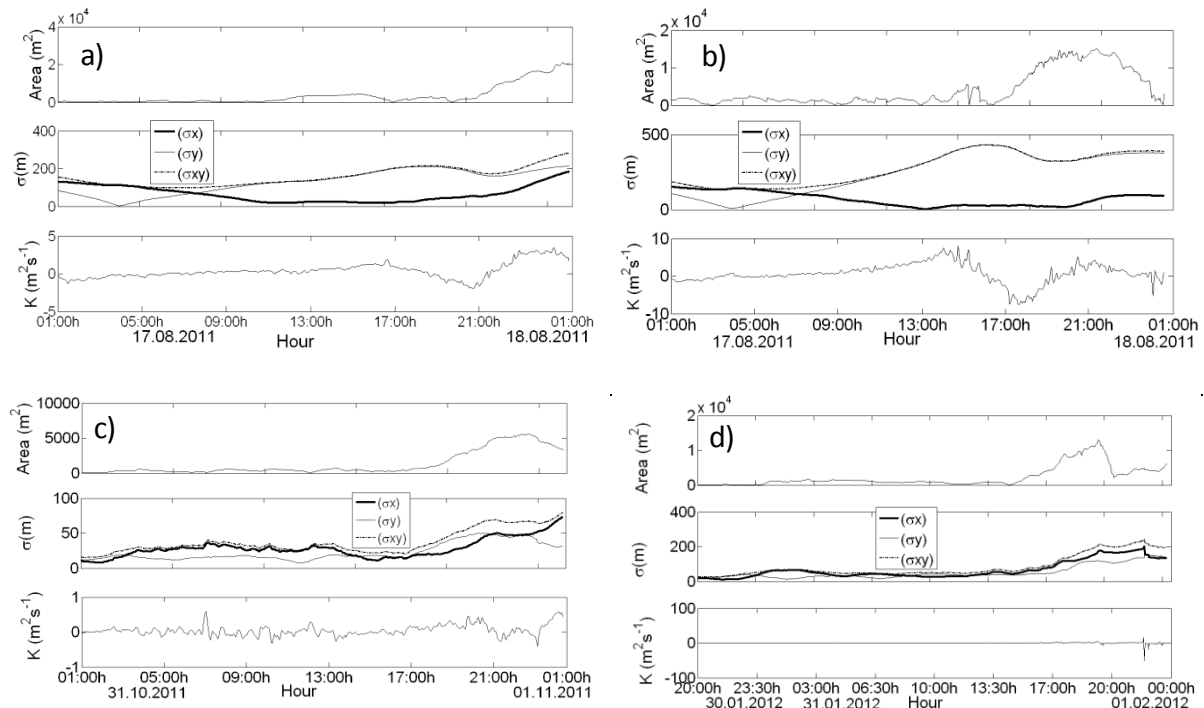


Figura 6. Evolução temporal da área formada pelo conjunto de derivadores no Experimento 1(a,b), Experimento 2 (c) e, Experimento 3 (d) (painel de cima). Desvio padrão σ_x e σ_y ao longo da direção x e y e o desvio padrão bidimensional $\sigma_{xy} = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2}$ (painel intermediário). Taxa de expansão e contração da área composta pelos conjuntos de derivadores num plano horizontal descrito pelo coeficiente de difusividade (K) (painel de baixo).

4. Conclusões

Comparado com traçadores, os derivadores apresentam algumas vantagens, mas também desvantagens, como é o caso da maioria das técnicas de Sensoriamento Remoto. A principal desvantagem é que as concentrações não são medidas diretamente, de forma que o espalhamento devido a cisalhamentos verticais podem introduzir erros. Porém, como indicado por vários autores, a dispersão vertical é muito menor que a horizontal. Assim, as trajetórias dos derivadores são representativas da difusão de substâncias. A principal vantagem dos derivadores é a grande flexibilidade e acurácia devido a melhoria significativa da tecnologia de posicionamento por satélite, verificada nos últimos anos.

A difusividade observada neste estudo é comparada com aquela observada em outros lagos. A comparação entre o coeficiente de difusividade para lançamentos idênticos de derivadores no tempo, mas em condições espaciais ligeiramente diferentes mostrou pronunciadas diferenças nos valores de difusividade. Isto indica que a dispersão é dependente das condições iniciais de lançamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG, (Projeto APQ – 02582-10). Este estudo não teria sido possível sem a participação fundamental do técnico em Meteorologia Daniel Mortl, que faleceu em Fevereiro de 2012.

Referências Bibliográficas

- Soomer e T., Viikmae B., Delpeche N., & Myrberg K. (2010). **Towards identification of areas of reduced risk in the Gulf of Finland, the Baltic Sea**. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences 59, 156-165.
- Corell H., Moksnes P-O., Engqvist A., Döös K. & Jonsson P.R. (2011). **Larval traits determine dispersal distance and optimum size of marine protected areas**. Marine Ecology Progress Series (in press).
- Lawrence, G. A., Shley, K. I. A, Onemitsu, N.Y, Llis, J. R. E. (1995). Natural dispersion in a small lake. **Limnol. Oceanogr.** 40: 1519-1526.
- Pacheco, F.S.; Assireu, A.T.; Roland, F. (2011) Derivadores rastreados por satélite aplicados a ambientes aquáticos continentais: caso do Reservatório de Manso. In: ALCÂNTARA, E.H.; STECH, J.L.; NOVO, E.M.L.M. (orgs.). **Novas Tecnologias para o Monitoramento e Estudo de Reservatórios Hidrelétricos e Grandes Lagos**. Rio de Janeiro: Parêntese Editora, p. 193-218. ISBN 9788560507108.
- Stoker, R.; Imberger, J (2003). Horizontal transport and dispersion in the surface layer of a medium size lake. **Limnology and Oceanography**, v.48, p. 971-982.
- Niiler, P. P., Sybrandy, A. S., Bi, K., Poulain, P-M., Bitterman, D. (1995) Measurements of the water-following characteristics of Tristar and Holey-sock drifters. **Deep Sea Research**, 42, 1951 – 1964.
- Johnson, D., Stocker, R., Head, R., Imberger, J., Pattiaratchi, C. (2003). A compact, low-cost GPS drifter for use in the oceanic nearshore zone, lakes, and estuaries. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 20, 1880 – 1886.
- Lekien, F., Coulliette, C., Mariano, A. J., Ryan, E. H., Shay, L. K., Haller G., Marsden J.(2005) Pollution release tied to invariant manifolds: A case study for the coast of Florida. **Physica D** 210 (1-2), 1–20.
- Prahl, F.G., Crecellus, E., Carpenter, R. (1984) Polycyclic aromatic hydrocarbons in Washington coastal sediments: an evaluation of atmospheric and riverine routes of introduction, **Environ. Sci. Technol.** 18 (1984) 687–693.
- Rice, D.W., Seltnerich, C.P., Spies, R.B., Keller M.L. (1993) Seasonal and annual distribution of organic contaminants in marine sediments from the elkhorn slough, moss landing harbor and near-shore Monterey Bay, California, **Environ. Pollut.** 82 79–91.
- HSU, S. A (1988). **Coastal Meteorology**. San Diego: Academic Press, 260 p.
- Curtarelli, M. P. (2012) **Estudo da influência de frentes frias sobre a circulação e os processos de estratificação e mistura no reservatório de Itumbiara (GO): um enfoque por modelagem hidrodinâmica e sensoriamento remoto**. 108 p. Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.