DERIVADORES RASTREADOS POR SATÉLITE APLICADOS A AMBIENTES FLUVIAIS: APLICAÇÃO PARA ESTUDOS ACERCA DA RECUPERAÇÃO DO RIO DOCE

João Vitor Pimenta [1], Marlon Mendes de Oliveira [1,3], Nathan Oliveira Barros [2], Arcilan Trevenzoli Assireu [1]

[1]Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), jvpjoaopimenta@gmail.com; oliveira.m.marlon@gmail.com; arcilan@unifei.edu.br; [2]Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), nathan.barros@ufjf.br; [3]Instituto Federal Fluminense (IFF).

RESUMO

Este artigo é uma contribuição do Projeto "Derivadores Rastreados por Satélite e Monitoramento Automático de Parâmetros Ambientais Aplicados ao Entendimento da Contribuição dos Afluentes para o Restabelecimento do Rio Doce", que consiste num esforço multi-instrumental e multi-institucional para estudar a influência da hidrodinâmica na região de confluências para o reestabelecimento do Rio Doce. Um sistema flutuante adaptado das condições marinhas para a fluvial que rastreia o escoamento é apresentado. Este sistema baseia-se em derivadores equipados com receptores GPS e sistemas de enlace via celular, o qual é conduzido pelo escoamento e transmite, em tempo real, suas sucessivas posições ao longo do tempo. A descrição deste sistema, bem como os resultados de sua aplicação em um setor do Rio Doce marcado por hidrodinâmica complexa, é apresentada. Comparações entre os resultados obtidos por estes derivadores com os do Acoustic Doppler Current Profile (ADCP) (comparação dinâmica) e com ponto de referência fixo (comparação estática) são discutidos. A partir destes experimentos, pôde-se verificar que a acurácia para a localização e velocidade foram, respectivamente, 2,30 m e 6,71 cm/s. A precisão, respectivamente, para as componentes zonal e meridional de localização foram: 1,38 m e 2,29m. Devido à simplicidade e robustez e baixos custos envolvidos, além da fácil utilização em campo, estes derivadores despontam-se como solução atrativa para estudos de processos relacionados a hidrodinâmica em sistemas aquáticos, particularmente rios.

***Palavras-chave* —** derivadores rastreados por satélite, GPS, telemetria, convergência do escoamento, Rio Doce.

ABSTRACT

This paper represents a contribution of the Project "Satellite Tracked Drifters and Automatic Monitoring of Environmental Parameters Applied to Understanding the Role of Doce River Tributaries to its Restoration", a multi-institutional and multi-instrumented experiment carried out to estimate the role of the hydrodynamic process in confluence regions to Doce River restoration. A newly developed free-floating system that track flows in aquatic system is presented. This system is based on drifters equipped with GPS receivers and communications capabilities which move with the flow and report their position at every time step. This paper describes this drifter system and reports a pilot experiment in a complex hydrodynamic sector of the Doce River, which was subjected to one of the largest ever reported failure of a tailing dam. Field experience with these drifters is described, including comparisons with Acoustic Doppler Current Profile (ADCP) (dynamic comparisons) and with a reference fixed point (static comparisons). From these experiments it was estimated that the speed (position) is accurate to approximately 6,71 cm/s (2,30 m) with a precision of 1,38 m and 2,29 m, for zonal and meridional components, respectively. Due its simple and low-cost technology and ease of field use, these drifters are an attractive instrument for studying river near-surface phenomena.

***Key words* —** *Satellite tracked drifters, GPS, telemetry, flow convergence, Doce River.*

1. INTRODUÇÃO

As zonas de confluência de rios são tipicamente caracterizadas por elevada heterogeneidade no regime de escoamento, de qualidade de água, de transporte e características sedimentológicas [1,2]. Por isso, são locais estratégicos em relação à ecologia, morfologia, ações de prevenção à inundação e qualidade de água [3,4]. Isso tem impulsionado o interesse por medições das condições hidrodinâmicas em rios. O uso de novas tecnologias tem possibilitado medidas sinóticas de correntes em rios, com resolução temporal e espacial nunca visto antes. Estas medidas são realizadas por instrumentos fixos (p.ex., ADCP, Correntômetros) ou Lagrangianos (derivadores). Medidas Lagrangianas são propriedades do escoamento obtidas continuamente ao longo do rio, enquanto medidas Eulerianas são adquiridas para pontos fixos ao longo do rio. Os derivadores utilizados aqui são do tipo Lagrangiano, pois são transportados pelo escoamento e reportam suas sucessivas posições no tempo, podendo ainda medir outros parâmetros como temperatura, OD e turbidez. Amplamente empregados em oceanografia [5,6], mais recentemente estes derivadores vêm sendo amplamente utilizados também para estudos em rios [7]. Estes derivadores são equipados com receptores GPS

e transmitem sua posição, em tempo real, via enlace com sistema GRPS e, diferentemente dos utilizados em oceanografia, são resgatados ao final do experimento. O objetivo deste trabalho é descrever o desempenho do derivador quando comparado a medidas simultâneas realizadas com ADCP além de apresentar potenciais aplicações.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O derivador (Fig. 1b) possui forma esférica com diâmetro de 40 cm, construído em fibra de vidro, dentro do qual vai a carga útil: bateria de Lithium 3.7V/3600 mA, com carregador externo; microcontrolador STM32F103 32-bit, Cortex-M3 core, 72 MHz, 256 Kbyte e memória serial de 8Mbytes com armazenamento de 30 K mensagens. Módulo de recepção GNSS, uBlox SAM-M8Q, 3 GNSS (GPS, Galileo, GLONASS). Módulo GSM/GPRS Modem 2G quadband SARA-G350 com comunicação UDP com o servidor, podendo ser pré-configurado com opções UDP, TCP e DNS. As mensagens são criptografadas. Há opções disponíveis para o Módulo GSM/GPRS em 3G e 4G. Quanto aos experimentos, no dia 03 de setembro de 2022 foram realizados lançamentos de 08 derivadores num setor do Rio Doce correspondente ao encontro do Rio Manhuaçu e o vertedouro da UHE de Aimorés (Fig. 1a), entre os municípios de Aimorés (MG) e Baixo-Guandu (ES). O experimento durou cerca de 01 hora e foi concomitante a medidas com ADCP (Fig. 1c).

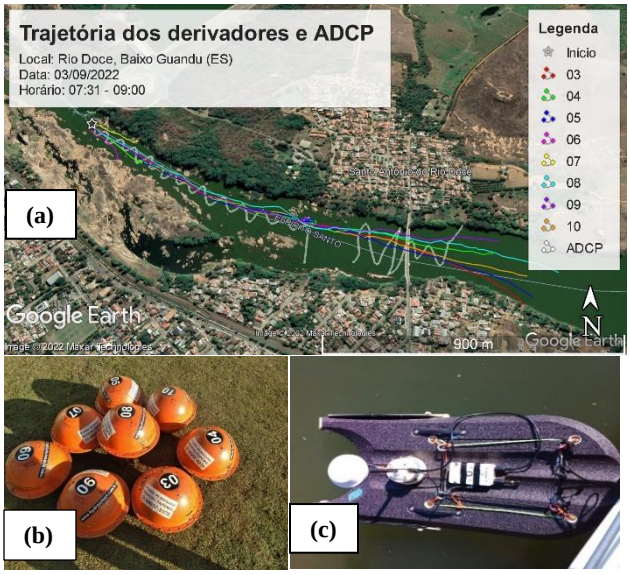

Figura 1 – Trajetórias dos 08 derivadores lançados no Rio Doce e os transectos realizados para levantamento batimétrico e de velocidade (a). Derivadores utilizados (b) e ADCP (c).

A fim de avaliar o impacto dos erros randômicos do posicionamento a partir do sistema GPS para a velocidade medida pelos derivadores, dois procedimentos foram adotados, seguindo [8]: 1) análise estática, que consistiu em posicionar o derivador junto a um ponto de referência usado na UNIFEI para referências em estudos de geoprocessamento e; 2) análise dinâmica, que consistiu em comparar medidas de velocidade simultâneas entre derivador e ADCP. A partir do experimento (1), foi estimada a acurácia e a precisão das medidas, conforme estimadas pelos autores supracitados, em que acurácia representa o erro médio das posições medidas pelo derivador em relação ao ponto de referência (convertido após para velocidade, sendo igual a zero para o ponto de referência). A precisão foi estimada como a área (correspondente ao intervalos de latitude e longitude, e consequentes velocidades) dentro da qual 95% (+/- 2 desvios padrão) das medidas são encontradas. Para as análises dinâmicas, foram utilizadas métricas estatísticas de ajuste de dados. A Tabela 1 traz os parâmetros estatísticos calculados a partir dos dados dos derivadores e ADCP. A regressão linear foi aplicada para investigar a relação entre T1 (medidas de velocidade a partir do derivador) e T2 (medidas de velocidade a partir do ADCP), quantificada pelo Coeficiente de Pearson. O erro médio quadrático (RMSE) e o viés (Bias) entre os dois instrumentos também foram avaliados.

Estatística	**Equação**
Viés:	$\text{Bias} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T2_i - T1_i)$
Erro médio quadrático:	$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{n=1}^{i}(T2_i - T1_i)^2}$
Coeficiente de Pearson (r):	$r = \frac{\sum_{n=1}^{i}(T1_i - \overline{T1_i})(T2_i - \overline{T2_i})}{\sqrt{\sum_{n=1}^{i}(T2_i - \overline{T2_i})^2}\cdot\sqrt{\sum_{n=1}^{i}(T1_i - \overline{T1_i})^2}}$

Tabela 1 – Estatísticas usadas na comparação entre as medidas de velocidade a partir do derivador (T1) e aquelas a partir do ADCP (T2). Os índices *n* e *i* representam, respectivamente, o número de dados avaliados e a indexação temporal. A barra horizontal representa valores médios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, serão apresentados os resultados das análises da acurácia e precisão esperadas para as velocidades dos derivadores para os dois experimentos realizados: caso estático e dinâmico. Na sequência, será ilustrada uma das potenciais aplicações desta ferramenta para estudos acerca da recuperação do Rio Doce.

3.1. Análise Estática

A Figura 2a traz os resultados da dispersão da distância, em metros, entre as medidas realizadas pelos derivadores comparado à "posição verdadeira". Os resultados apontaram para acurácia de 2,27 m e precisão de 1,38 m e 2,29 m para as componentes zonal e meridional, respectivamente. As incertezas no posicionamento, indicadas acima, introduzem erros na velocidade. Para o cálculo desta estimativa, deve-se lembrar que os dados de posição são gerados em incrementos de 3s e que a velocidade é obtida a partir de médias de 1 min sobre estes dados. Como as velocidades foram calculadas pelo método da regressão simples, é válida a relação [9]: $V = 1/n \sum(\Delta X \mp \Delta E) / \Delta t$, onde n=núm. de posições consideradas; ΔX =distância entre sucessivas posições; ΔE = erro de posicionamento (~2m) e Δt o intervalo entre sucessivas posições (3s). Admitindo-se ΔE = 2 x 2m = 4 m, pois tanto a posição final quanto a inicial possuem a incerteza de 2 m, tem-se que o erro na velocidade E_v = (400cm/ 20 x 3s) ~ 6,7 cm/s, já com filtragem para o intervalo de 1 min (Fig. 2b).

3.2. Análise Dinâmica

Essa análise, que consistiu na comparação entre as medidas de velocidade para o derivador e a partir do ADCP considerando um critério de máxima vizinhança com limite de 3m, apontou que os valores de viés, coeficiente de Pearson e RMSE foram de -0,81 cm/s, 0,91, e 8,72 cm/s, respectivamente. Ambos os instrumentos detectaram a diminuição do escoamento à montante do ponto inicial (Fig. 3), indicando que, mesmo para setores curtos do rio (~1,3 km), pode se ter acentuada heterogeneidade do escoamento, com valores variando entre 90 cm/s e 10 cm/s (Fig. 3). A razão dessa acentuada desaceleração do escoamento está relacionado ao fato de que a posição de lançamento ocorre próximo a confluência entre o Rio Manhuaçu e o vertedouro da UHE de Aimorés, constituindo-se pois em região de aceleração do escoamento. Soma-se a isto o fato do trecho inicial de estudo ser mais estreito do que o correspondente à jusante. À medida que o escoamento evolui à jusante, percebe-se o crescente sinal da UHE de Mascarenhas, à jusante da área de estudo. Portanto, este valor de velocidades da ordem de 10 cm/s é a velocidade típica esperada em regiões da transição rio-reservatório, conforme demonstrado por Assireu et al. (2011) [10] para a UHE de Itumbiara.

3.3. Exemplo de aplicação para estudos acerca da recuperação do Rio Doce

O derivador, que vem sendo amplamente aplicado em oceanografia para o mapeamento de regiões de convergência e suas implicações para a dispersão de óleo, larvas de peixes, operações de resgate dentre outras aplicações, se mostrou promissor também para indicar *hotspots* de sedimentação no rio. O lançamento de um grupo de 08 derivadores realizado no Rio Doce indicou uma região de convergência (Fig. 4a), que por serem regiões associadas a subsidência, são esperadas serem regiões de sedimentação. Isso foi confirmado a partir de imagens que demonstram nessa região o afloramento de banco de areia no período da seca (Fig. 4b).

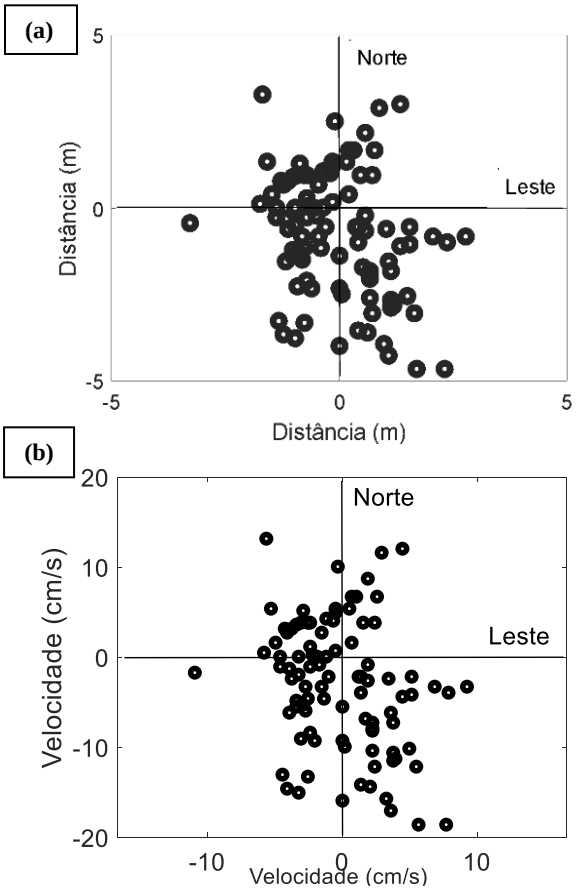

Figura 2 – Localização dos derivadores em relação a um ponto de referência (a) e respectivas "pseudo velocidades" (b).

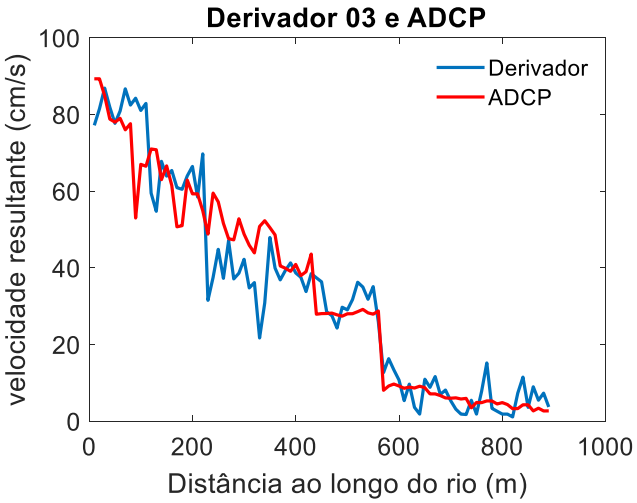

Figura 3 – Variação longitudinal da velocidade registrada pelo derivador e pelo ADCP.

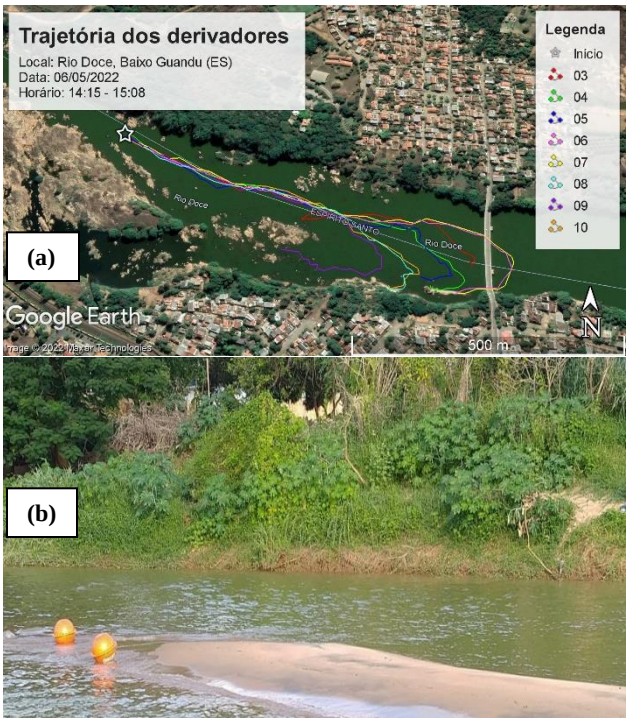

Figura 4 – Trajetórias dos derivadores ao longo de um setor do Rio Doce indicando regiões de convergência (a) e banco de areia correspondente à região indicada pelos derivadores (b).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho visou apresentar e validar os derivadores rastreados por satélite como uma ferramenta útil ao entendimento de processos hidro-sedimentológicos de interesse para a recuperação do Rio Doce. Como principais resultados, pode-se destacar:

1) A acurácia para a localização e velocidade foram, respectivamente, 2,3 m e 6,7 cm/s. A precisão, respectivamente, para as componentes zonal e meridional da localização foram: 1,38 m e 2,29m, respectivamente;
2) A comparação entre os valores de velocidade do derivador com os do ADCP mostraram valores de viés, RMSE e Pearson iguais a -0,65 cm/s, 8,72 cm/s e 0,91, respectivamente. Isto mostra que o derivador, a despeito do baixo custo quando comparado ao ADCP, fornece estimativas de velocidade comparáveis;
3) O derivador conseguiu mapear regiões de convergência no rio coincidentes com região de afloramento de banco de areia, confirmando a capacidade deste equipamento em indicar regiões de *hotspots* de sedimentação;
4) A robustez do equipamento e a facilidade para a realização dos experimentos confere a este instrumento a condição de ser uma alternativa rápida para localização de feições de interesse a fim de nortear escolhas de pontos de coleta, minimizando assim esforço de equipes em campo e possibilitando a seleção de pontos amostrais baseado em critérios objetivos.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a FAPEMIG/RENOVA, pelo apoio ao Projeto “Derivadores Rastreados por Satélite e Monitoramento Automático de Parâmetros Ambientais Aplicados ao Entendimento da Contribuição dos Afluentes para o Restabelecimento do Rio Doce” (APQ-00405-19). Os autores são gratos também ao CNPq.

6. REFERÊNCIAS

[1] Rice, S. P., Rhoads, B. L., and Roy, A. G.: Introduction: River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network, in: River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network, John Wiley & Sons, Ltd, 1-9, 2008.
[2] Yuan, S., Tang, H., Li, K., Xu, L., Xiao, Y., Gualtieri, C., et al. (2021). Hydrodynamics, sediment transport and morphological features at the confluence between the Yangtze River and the Poyang Lake. Water Resources Research, 57, e2020WR028284. https:// doi.org/10.1029/2020WR028284
[3] Roca, M., Martin-Vide, J. P., and Moreta, P. J. M.: Modelling a torrential event in a river confluence. Journal of Hydrology, V. 364, 207–215, 2009.
[4] Gualtieri, C., et al. A field study of the confluence between Negro and Solimões Rivers. Part 1: Hydrodynamics and sediment transport. Comptes Rendus Geoscience, 350 31 – 42, 2018.
[5] Assireu, A., Dauhut, T., Santos, F., and Lorenzzetti, J.: Near-inertial motions in the Brazil Current at 24°S-36°S: Observations by satellite tracked drifters. Continental Shelf Research, V. 45, 1-12, 2017.
[6] Novelli, G; Guigang, C; Technological Advances in Drifters for Oil Transport Studies. Marine Technology Society Journal, 52 (6), 2018.
[7] Iwata, T., Ikeda, Y., Uzawa, R. et al. Lagrangian tracking measurements revealed the temporal dynamics of nitrogen and phosphorus spiralling in a large Japanese river. Limnology 21, 379–391 (2020). https://doi.org/10.1007/s10201-020-00612-4
[8] Hulbert & French. The accuracy of GPS for wildlife telemetry and habitat mapping. Journal of Applied Ecology 2001 38, 869-878.
[9] D’Asaro, E.A. Estimation of velocity from Argos-tracked surface drifters during OCEAN STORMS. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 9, n. 5, p. 680-686, 1992.
[10] ASSIREU, A. T.; Alcântara, E. ; Novo, E. M. L. M. ; Roland, F. ; Pacheco, F. S. ; STECH, J. L. ; LORENZZETTI, J. A. . Hydro-physical processes at the plunge point: an analysis using satellite and in situ data. Hydrology and Earth System Sciences, v. 15, p. 3689-3700, 2011.