

INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA NO TRANSPORTE DE MASSA

Cynara L. N. Cunha¹, Ada C. Scudelari² e José A. M. Carrer³

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPGEA - UFPR, Brasil. Telefone: +5541 3320-2027;

²Departamento de Engenharia Civil - UFRN; Brasil. Telefone: +55 84 33422518;

³Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia - PPGMNE, Brasil. Telefone +55 41 33613439
E-mail: cynara@ufpr.br, ada@ct.ufrn.br, carrer@ufrj.br

Introdução

Um dos principais objetivos da modelagem ambiental relacionada aos problemas de qualidade da água é a determinação de quais controles ambientais que devem ser instituídos para melhorar aspectos relacionados ao planejamento e o uso de um corpo d'água. Entender o sistema hídrico de forma global e, conseqüentemente, conhecer as possíveis áreas de estagnação é essencial para criar alternativas sustentáveis de gerenciamento, principalmente em lagos e reservatórios. Nestes corpos d'água, o principal problema ambiental normalmente está relacionado ao excesso da carga poluidora, doméstica, agrícola ou industrial, lançada de forma pontual ou difusa, contínua ou não. Neste sentido, o desenvolvimento de metodologias eficientes para quantificar corretamente onde os nutrientes advindos das cargas irão depositar é essencial para entender melhor os impactos e, então, atuar no sentido de minimizar os efeitos da poluição.

O conhecimento da circulação hidrodinâmica é necessário no estudo da distribuição de nutrientes nos corpos d'água, determinando o modo como ocorre o transporte e a dispersão de poluentes, podendo indicar áreas mais ou menos adequadas ao lançamento de efluentes. A partir dos padrões de circulação é possível estabelecer regiões do corpo d'água com características homogêneas quanto ao comportamento hidrodinâmico e, conseqüentemente, em relação ao transporte de poluentes.

A identificação de regiões estagnadas pode ser feita a partir da caracterização hidrodinâmica; o entendimento dos processos de renovação das águas permite conhecer aspectos da mistura. Existem vários parâmetros que são utilizados para descrever esses processos de renovação, como por exemplo, o tempo de residência, a taxa de renovação e a idade da água (Li *et al.*, 2015).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a renovação das águas em corpos d'água, usando a modelagem computacional, definindo as áreas de estagnação e seus diferentes segmentos, tendo como base a circulação hidrodinâmica.

Metodologia

As definições e as diferentes escalas temporais e espaciais que relacionam a capacidade de renovação e a mistura de massas d'água podem ser expressas pelo tempo de residência, pela taxa de renovação e a pela idade da água, auxiliando na avaliação e caracterização da dinâmica da circulação e da distribuição dos poluentes no corpo d'água (Grifoll *et al.*, 2013). Neste trabalho, o tempo de residência é definido como o tempo gasto para que um volume determinado de água saia do estuário; a taxa de renovação é definida como a porcentagem das águas que, para um determinado volume de controle, foi substituída, ou seja, seriam águas novas que entram no domínio. O complemento da taxa de renovação seria a porcentagem da água não renovada. A idade da água pode ser é definida como o tempo decorrido desde que uma partícula de água entrou no sistema. Trata-se, de fato, do cálculo do tempo de decaimento de uma substância passiva marcadora de idade presente na água. Os modelos utilizados neste trabalho fazem parte do SisBaHiA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, desenvolvido pela COPPE/UF RJ. O SisBaHiA[®] é constituído por um conjunto de

modelos, entre quais destaca-se o de circulação hidrodinâmica para corpos de água rasos, o de transporte euleriano e o de transporte Lagrangeano (Rosman, 2017). Neste trabalho foram usados os modelos de circulação hidrodinâmica bidimensional para a definição do padrão de circulação, de transporte Lagrangeano para o cálculo do tempo de residência e o de transporte euleriano obtenção da taxa de renovação e a da idade da água. O SisBaHiA[®] usa diferenças finitas e elementos finitos nas discretizações temporal e espacial, respectivamente.

Usualmente, o tempo de residência (TR) é calculado pela razão entre o volume (m³) do compartimento e o fluxo residual (m³/s) através do compartimento. Tal conceito é muito útil e adequado quando a massa fluida no compartimento é bem misturada. Entretanto, em compartimentos de corpos de água naturais há grande heterogeneidade espacial, com variadas condições de fluxos no espaço. Portanto, faz pouco ou nenhum sentido prático determinar um valor agregado definido como o “tempo de residência do compartimento”, por exemplo, no caso de um reservatório. Por conta da grande variação espacial e temporal, em corpos de água naturais faz mais sentido definir uma função tempo de residência (TR) variável espacialmente, para condições de fluxos característicos de diferentes forçantes hidro-meteorológicos (Rosman, 2017).

Em corpos de água naturais, o cálculo da função TR variável no espaço, efetivamente, só é viável através de modelagem computacional. Para calcular a distribuição espacial de tempos de residência, adotou-se a seguinte metodologia, desenvolvida através do SisBaHiA[®]: no instante inicial do período em consideração, o domínio é preenchido com milhares de partículas neutras. É importante ressaltar que a posição de cada partícula e o instante de seu lançamento no reservatório ficam registrados. As partículas não ocupam espaço, representam centros de pequenas massas de água e são passivamente transportadas pelas correntes onde se encontram. Após o lançamento inicial para preenchimento do reservatório, inicia-se o transporte Lagrangeano das partículas, *i.e.*, a trajetória de cada partícula é acompanhada passo a passo ao longo do tempo. A cada passo de tempo a posição da partícula muda, seu tempo de vida aumenta e é contabilizado (Rosman, 2017).

Quando uma partícula sai do domínio passando pela fronteira aberta, o seu tempo de vida ao sair será o seu TR. Assim, o tempo de vida que a partícula tiver ao sair do compartimento passa a ser o valor da função TR na posição inicial de lançamento da partícula dentro do reservatório.

Neste trabalho, dois experimentos foram desenvolvidos. O primeiro é um canal alinhado com o eixo *x*, com comprimento total de 2400m e 180 m de largura, com uma reentrância que favorece a formação de região de recirculação, com velocidades reduzidas (Figura 1). A malha usada é formada por 496 elementos quadriláteros e 2089 nós, igualmente espaçados com $\Delta x = 37,5$ m e $\Delta y = 5,25$ m, caracterizando um escoamento unidimensional.

No segundo experimento, uma região com algumas reentrâncias e estrangulamentos é testada, caracterizando um escoamento bidimensional em planta, simulando um reservatório hipotético. A malha usada é formada por 330 elementos quadriláteros e 1416 nós (Figura 2).

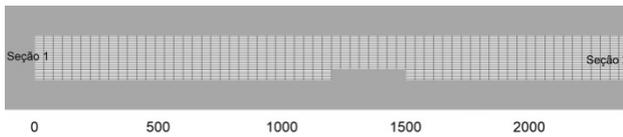


Figura 1.- Malha usada na discretização do canal; 496 elementos e 2089 nós, com $\Delta x = 37,50$ m e $\Delta y = 5,25$ m.

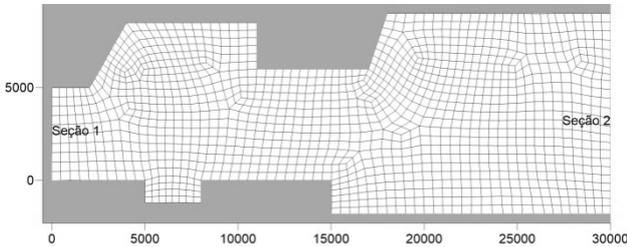


Figura 2.- Malha usada na discretização do reservatório hipotético com 330 elementos e 1416 nós.

Nos dois experimentos, as fontes que entram no sistema são provenientes da seção 1 e a fronteira aberta, seção 2, é responsável pela saída da substância e/ou partícula. No canal alinhado com o eixo x , um perfil parabólico simétrico foi definido na seção 1, com a maior velocidade, 2,7 m/s, no centro do canal (Figura 3), gerando um escoamento permanente, com a formação de um vórtice após a reentrância. No cálculo do tempo de residência, foram lançadas 112138 partículas, com espaçamento de 2,0 m.

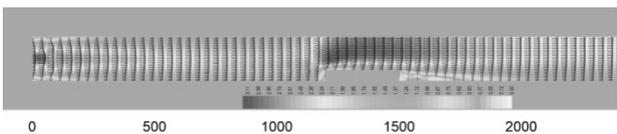


Figura 3.- Padrão de circulação usado para canal alinhado com o eixo x . A escala de corresponde ao módulo de velocidade, em m/s.

No segundo experimento, um campo de velocidades uniforme de 0,1 m/s foi definido na seção 1 do reservatório hipotético. A Figura 4 mostra o padrão permanente obtido no domínio. É possível observar as regiões com baixas velocidades nas reentrâncias; na região estrangulada, devido à diminuição da área, as velocidades são maiores. No cálculo do tempo de residência, foram lançadas 84480 partículas, com espaçamento de 20,0 m.

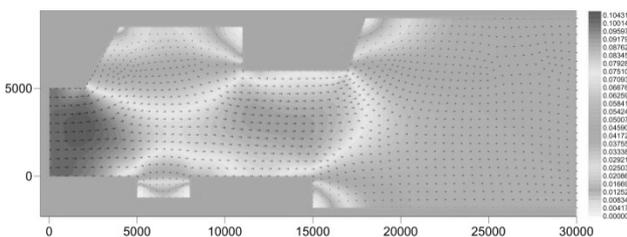


Figura 4.- Detalhe do padrão de circulação reservatório hipotético. A escala de corresponde ao módulo de velocidade, em m/s.

Resultados

Com os resultados obtidos pelo modelo de transporte lagrangeano, é possível determinar as isolinhas do tempo de residência. A Figura 5 mostra os resultados obtidos para o experimento 1. O tempo que uma partícula deveria gastar para percorrer todo o canal, com uma velocidade média de 2,7 m/s seria de 0,25 horas. É possível observar que, após a reentrância, o tempo de residência é maior, de aproximadamente 0,65 horas; no restante do canal, os valores são baixos, menores que 0,3 horas. Embora apresente valores maiores, a região após a reentrância poderá favorecer o acúmulo de poluentes; no entanto, não deve ser considerada uma região estagnada. Sendo

assim, o canal, que pode ser interpretado como um trecho retilíneo de rio, não apresenta regiões tipicamente estagnadas, sendo possível concluir que este tipo de corpo d'água não deve apresentar problemas relacionados ao acúmulo de poluentes.

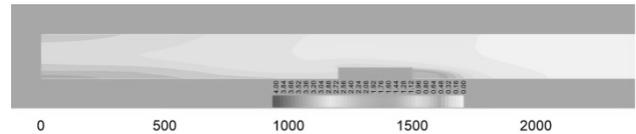


Figura 5.- Isolinhas de tempo de residência, em horas, após 10 dias de simulação.

No entanto, resultados obtidos para o experimento 2 mostram a formação de regiões estagnadas, nas duas reentrâncias. Nestas regiões, o tempo de residência é de aproximadamente de 233 horas. O tempo que uma partícula deveria gastar para percorrer todo o canal, com uma velocidade de 0,1 m/s é 83,33 horas. Sendo assim, qualquer poluente presente nas reentrâncias terá muita dificuldade de "sair" do reservatório; este resultado pode ser interpretado como um favorecimento ao acúmulo de poluentes. Observando também a distribuição das partículas após 10 dias de simulação (Figura 7), é possível observar a formação de duas regiões com características homogêneas em relação ao comportamento hidrodinâmico: a primeira, formada pelas reentrâncias e regiões de recirculação; a segunda, que corresponde ao eixo de escoamento do reservatório hipotético.

Resultados semelhantes foram obtidos para a taxa de renovação e a idade da água. No experimento 1, as taxas de renovação foram elevadas e a idade da água apresentou valores baixos em todo o domínio. No experimento 2, as áreas de reentrâncias e regiões de recirculação apresentaram menores taxas de renovação e maior idade da água quando comparadas com as outras regiões; o eixo de escoamento do reservatório apresentou valores semelhantes ao experimento 1.

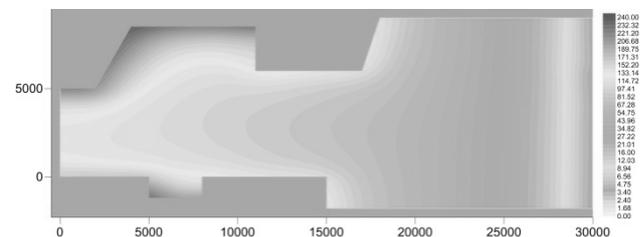


Figura 6.- Isolinhas de tempo de residência, em horas, após 10 dias de simulação.

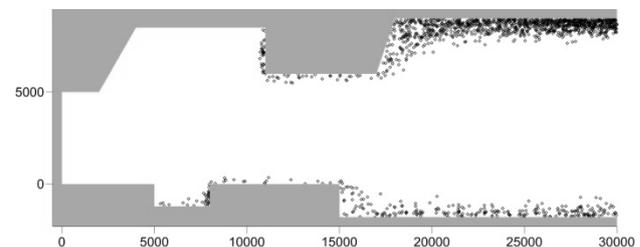


Figura 7.- Distribuição das partículas após 10 dias de simulação.

Referências

- Grifoll, M.; Del Campo, A.; Espino, M.; Mader, J.; González, M.; Borja, A.** (2013) "Water renewal and risk assessment of water pollution in semi-enclosed domains: Application to Bilbao Harbor (Bay of Biscay)" *Journal of Marine Systems*, Vol. 109–110, doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.07.010.
- Li, Y., Wolanski, E., Zhang, H.** (2015) "What processes control the net currents through shallow straits? A review with application to the Bohai Strait, China". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 158, pp. 1–11, doi.org/10.1016/j.ecss.2015.03.013.
- Rosman, P. C. C.** (2017) *Referência Técnica do SisBAHiA®*. COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.