

## IX-005 - AVALIAÇÃO DA EROSÃO E ASSOREAMENTO DO RIO VERDE/PR

**Amanda Domingues Schafhauser<sup>(1)</sup>**

Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Paraná. Participa do grupo de pesquisa Gemma -- Grupo de Estudos Avançados em Monitoramento e Modelagem Ambiental. Bolsista de Iniciação Científica do Lemma (Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental)

**Jessica Michalak**

Engenheira Ambiental formada na Universidade Católica do Paraná, em 2014. Participa do grupo de pesquisa Gemma -- Grupo de Estudos Avançados em Monitoramento e Modelagem Ambiental.

**Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil formada na Universidade Estadual do Estado do Rio de Janeiro, em 1992, Mestra em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ na área de Recursos Hídricos, em 1995 e Doutora em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ na área de Recursos Hídricos, em 2000. Professora Associada do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná e Pesquisadora do Lemma (Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Universidade Federal do Paraná - Centro Politécnico, Bloco III, Sala 5.11, - Jardim das Américas Bairro - Curitiba - Paraná - CEP: 81531-990 - Brasil - Tel: +55 (41) 3320-2027 - e-mail: [amandadomingues93@yahoo.com.br](mailto:amandadomingues93@yahoo.com.br)

### RESUMO

O conhecimento da quantidade de sedimentos transportada pelos rios e o local onde este sedimento poderá depositar têm grande relevância para o planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos, uma vez que os processos de erosão e sedimentação são os responsáveis por significativas alterações nas características morfológicas dos rios. Neste contexto, a modelagem do transporte de sedimentos tem se destacado como uma ferramenta muito útil e seus resultados podem servir de base para tomadas de decisão sobre o melhor local para instalações de sistemas de captação de água, por exemplo. O presente trabalho mostra um estudo sobre os processos erosivos e de deposição de sedimentos ao longo do rio Verde, localizado na Região Metropolitana de Curitiba, visando otimizar a escolha do melhor local para instalação de um sistema de captação de água subsuperficial, que deve acontecer preferencialmente em áreas onde não ocorre deposição de sedimentos, prevenindo o seu mau funcionamento. Por meio de um modelo unidimensional de domínio público, HEC-RAS, simulou-se um regime de escoamento quasi-transitório, aproximando um hidrograma de vazão por uma série de perfis de escoamento permanente associados a uma duração de vazão correspondente. Para esta simulação foram utilizados dados de geometria do rio, vazões médias para cada sub-bacia de contribuição e a características dos sedimentos do leito. O rio Verde apresenta a areia como sedimento de fundo predominante e, a partir do diagrama de *Hjulström*, foi possível definir que velocidades acima de 0,2 m/s facilitam o deslocamento do sedimento e que acima de 0,6 m/s, a erosão é facilitada. Os resultados mostram que no rio Verde, as seções, onde pode ocorrer erosão, estão localizadas próximas da seção de jusante do trecho, demonstrando que o trecho do rio estudado não se encontra completamente desenvolvido, ou seja, corresponde ao trecho superior do rio. Nas demais seções do rio o processo predominante é a transição entre a deposição e erosão, comprovado pelas velocidades inferiores a 0,6 m/s.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rio Verde, Transporte de Sedimentos, Erosão, Assoreamento.

### INTRODUÇÃO

Os termos erosão, deposição ou assoreamento envolvem os processos de erosão, transporte e deposição de partículas sólidas ao longo de um curso d'água. Esses processos são naturais e se dão de forma lenta e contínua. Os problemas surgem quando o homem acelera esses processos ao ocupar desordenadamente as áreas próximas aos rios (SCAPIN, 2005).

O assoreamento em corpos d'água está intimamente relacionado aos processos erosivos, uma vez que estes processos fornecem os materiais que darão origem ao processo de deposição de sedimentos. Quando não há

mais energia suficiente para transportar o material erodido, este material é depositado, ocasionando o acúmulo permanente de sedimentos no leito dos cursos d'água (GUERRA, 1995).

O conhecimento da quantidade de sedimentos transportada pelos rios e o local onde este sedimento tenderá a depositar são de fundamental importância para o planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos. Dentre os problemas causados pela erosão e deposição dos sedimentos, pode-se destacar o assoreamento de rios e reservatórios e a inviabilidade, em alguns casos, do aproveitamento do rio para abastecimento (SCAPIN; PAIVA, 2005).

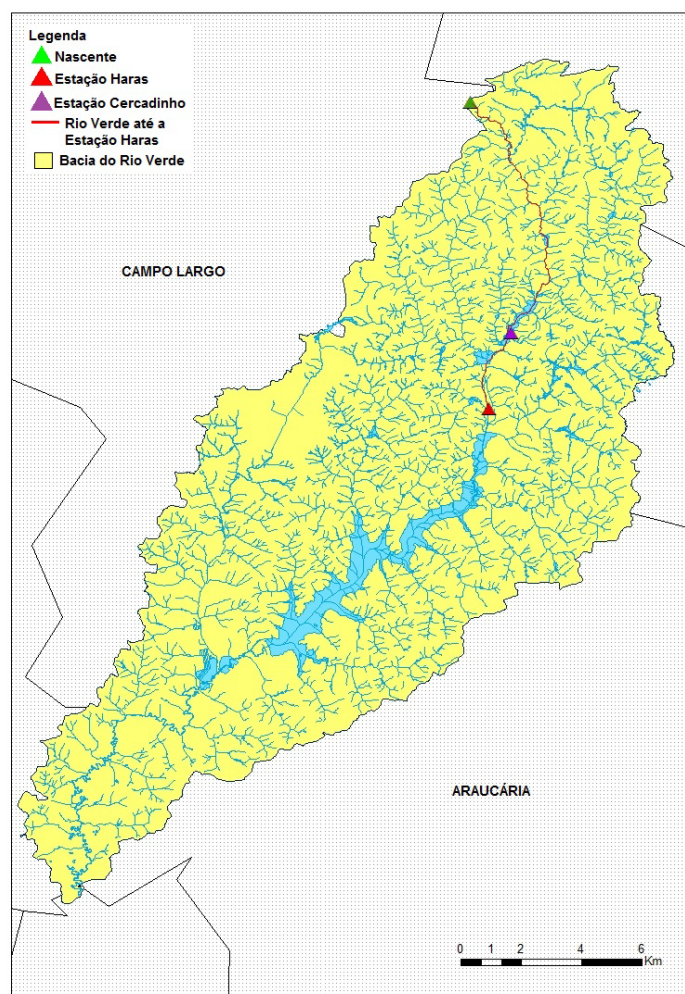
A modelagem do transporte de sedimentos é complexa, uma vez que os dados utilizados para prever as mudanças no leito do rio são fortemente não permanentes e a teoria empregada é empírica e altamente sensível a uma ampla gama de variáveis físicas (USACE, 2010a). De fato, de acordo com Dolvitsch (2013), o transporte de sedimentos em rios depende de diversos parâmetros, relacionados diretamente aos sedimentos, como o seu diâmetro, quanto às características físicas do rio estudado.

No entanto, com uma boa coleta de dados, pode-se utilizar um modelo de sedimentação calibrado para prever tendências de longo prazo que subsidiem decisões de planejamento e possam ser utilizados para avaliar alternativas em projetos (USACE, 2010a).

O objetivo deste artigo é avaliar as regiões de erosão e assoreamento ao longo do rio Verde, localizado na Região Metropolitana de Curitiba, a fim de escolher o melhor local para instalação do sistema de captação de água subsuperficial, utilizando um modelo de evolução morfológica. Esta avaliação é feita a partir do conhecimento do padrão de circulação das diversas seções transversais, obtidas com uso de um modelo hidrodinâmico unidimensional.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A Bacia Hidrográfica do rio Verde situa-se no Estado do Paraná, na Região Metropolitana de Curitiba e integra a bacia do Alto Iguaçu, com área de drenagem de 242 km<sup>2</sup>, representando 9% da área de drenagem total da Bacia do Alto Iguaçu. Nesta bacia, entre 1974 e 1976, foi construída a barragem do rio Verde, com objetivo de abastecer a refinaria Presidente Getúlio Vargas, da Petrobras. A região de interesse deste trabalho, a montante da Barragem, constitui 68% da área total da bacia. Nesta região, o rio Verde apresenta os melhores níveis de integridade ambiental com reservado padrão de biodiversidade dentre os rios que compõem a hidrografia da Região Metropolitana de Curitiba. Em relação à cobertura vegetal, 49% da bacia são ocupadas por atividades agropecuárias, 41% por florestas (com predomínio de capoeirão); as áreas urbanas totalizam 7% e 3% correspondem aos corpos d'água, incluído o reservatório do rio Verde (Andreoli *et al.*, 2011). O trecho do rio Verde, compreendido entre a nascente (coordenadas 25°21'55"S e 49°27'00"O) e a estação fluviométrica Haras Rio Verde (coordenadas 25°27'23"S e 49°27'43"O), livre da influência de remanso do reservatório do Rio Verde, como pode ser observado na Figura 1, foi definido como o trecho a ser estudado neste trabalho.



**Figura 1: Área de estudo – Bacia hidrográfica do Rio Verde, Região Metropolitana de Curitiba.**

A escolha desta área de estudo deve-se a disponibilidade de dados de outros estudos realizados na região e a possibilidade de validar o modelo ao confrontar os resultados obtidos com a situação real observada, com a presença de uma Estação de Tratamento de Água, a ETA Cercadinho, que capta água de forma subsuperficial.

Para o trabalho foram selecionados três pontos amostrais distribuídos ao longo do rio Verde. Para a seleção desses pontos, o perfil longitudinal do rio foi caracterizado em trechos de 500 metros. Observando a declividade e as características da bacia, o rio foi então dividido em três grandes trechos com características homogêneas e, dentro desses trechos, foram selecionados os pontos de amostragem considerando os locais onde há maior probabilidade de depósito de sedimentos.

Para seleção dos parâmetros a serem analisados, foram considerados aqueles requeridos pelo modelo HEC-RAS 4.1. O HEC-RAS é um modelo unidimensional de domínio público, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e largamente utilizado na modelagem hídrica. O modelo é capaz de simular tendências de longo prazo de erosão e deposição em cursos d'água, com base em dados de geometria, escoamento e sedimentos.

Para determinar o transporte de sedimentos, o HEC-RAS adota, por simplificação, um regime de escoamento quasi-transitório, que aproxima um hidrograma de vazão por uma série de perfis de escoamento permanente associados a uma duração de vazão correspondente (USACE, 2010b). Os dados de precipitação adotados no modelo são aqueles disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) no portal *hidroweb*, considerando as estações pluviométricas próximas à área de estudo. Usando redes neurais, e calibrando para o conjunto de dados disponível, foi possível gerar uma série de vazões médias, sendo possível extrapolar para a área de interesse.

A escolha do ponto da exultória da bacia foi realizada através da utilização de sub-bacias de contribuição, decidindo que a exultória seria a estação Haras. Na sequência, foi calculada a área total da bacia do rio Verde e também a área de cada sub-bacia de contribuição, correlacionando-as com suas respectivas precipitações médias, para assim definir, posteriormente, suas vazões específicas.

Os dados geométricos e dos sedimentos foram obtidos por meio de visitas de campo, onde foram mensuradas as características das seções transversais em cada ponto de amostragem e realizadas as coletas de sedimento. Os pontos de coleta estão localizados na seção mais a montante (seção 24), no meio do trecho (seção 11) e na seção próxima ao Haras (seção 2), que correspondem os pontos 1, 2 e 3 respectivamente. As amostras de sedimentos foram então encaminhadas ao laboratório para análise granulométrica e volumétrica.

Dessa forma, foi possível produzir curvas granulométricas para cada ponto de amostragem e, apesar das diferenças, identificou-se que o sedimento de fundo predominante do rio Verde é a areia ( $0,002 < \text{diâmetro} \leq 0,06 \text{ mm}$ ). Sendo que para o ponto 1 e ponto 2 prevalece a areia grossa ( $0,6 < \text{diâmetro} \leq 2 \text{ mm}$ ), e para o ponto 3 foi encontrado uma areia média ( $0,2 < \text{diâmetro} \leq 0,6 \text{ mm}$ ). Para as demais seções transversais foi feita uma interpolação linear das curvas granulométricas.

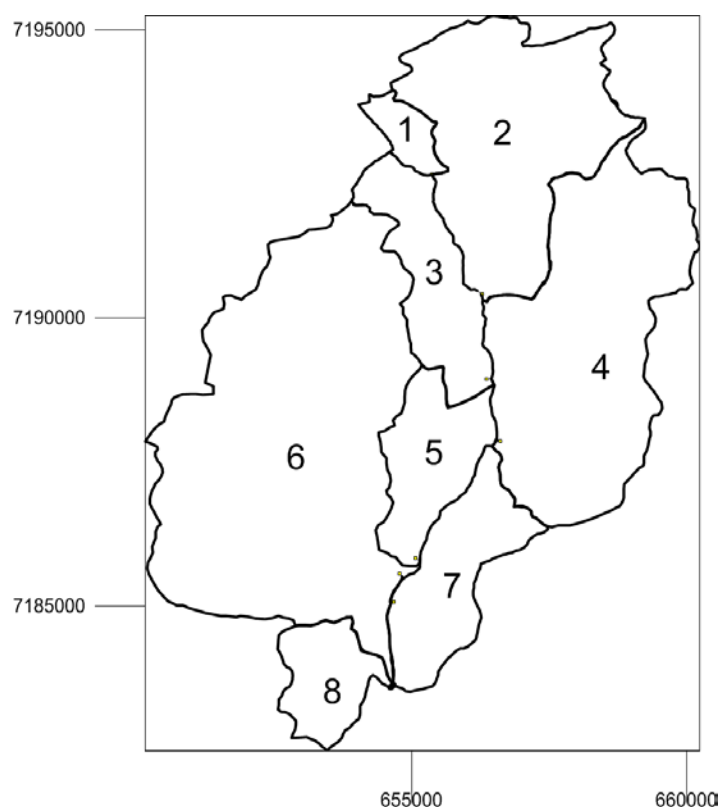
Com os dados, o modelo HEC-RAS foi então simulado. O modelo fornece como resultado os perfis do rio e da linha d'água, velocidades e vazões, após cada período simulado e, para cada seção transversal, indica os balanços sedimentológico. Com bases nessas informações, é possível definir locais onde ocorre erosão e sedimentação e, assim, escolher os melhores locais para instalação do sistema de captação, considerando os trechos de menor deposição.

Com relação aos dados geométricos, a extensão do rio é de 10286,17 km, dividida em 24 seções transversais. O espaçamento entre as seções transversais é variável, determinado a partir das distâncias entre uma seção característica e a próxima seção, a jusante. O HEC-RAS considera uma classificação das seções transversais distinta. O modelo numera as seções de jusante para montante. Assim, a seção transversal 24 é a seção mais a montante. A profundidade do rio foi fixada em 1,0 m, em todas as seções transversais, que corresponde aos valores encontrados nas visitas de campo.

Os coeficientes de perda de carga também foram considerados uniformes. Na simulação realizada pelo HEC-RAS, admitiu-se um coeficiente de rugosidade de *Manning* igual a  $0,04 \text{ s.m}^{-1/3}$  e coeficientes de contração e expansão de 0,1 e 0,3, respectivamente.

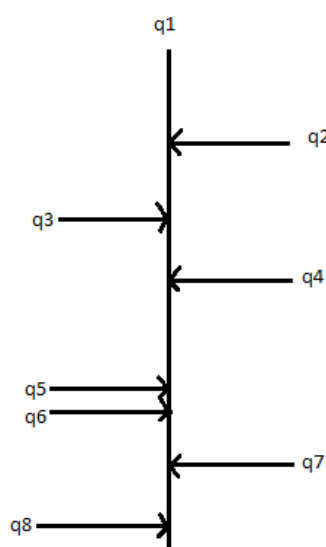
Considerou-se ainda o rio com seção trapezoidal e largura variável. Para a configuração da seção trapezoidal definiu-se que a largura de fundo varia linearmente entre 3,0 m (na primeira seção transversal a montante) e 5 metros (na última seção a jusante) e um ângulo de inclinação de  $45^\circ$  nas margens. Dessa forma, a largura do topo, ao longo do rio, varia entre 4,0 e 6,0 m.

Tanto as vazões de entrada na seção mais a montante (Seção 24) como os valores de cotas de nível d'água na seção mais a jusante (Seção 1) foram assumidas como constantes ao longo do período de simulação e obtidas a partir de uma série de vazões geradas em um período de 10 anos que se estende de 10 de janeiro de 2000 a 10 de janeiro de 2010, usando uma rede neural previamente calibrada. Além disso, introduziram-se como tributários as vazões de sete sub-bacias ao longo da extensão do rio. A localização dessas sub-bacias é mostrada na Figura 2.



**Figura 2: Localização das sub-bacias de do trecho a montante da estação Haras**

Para os valores de vazão definidas para cada tributário, foram utilizadas vazões específicas para cada bacia de contribuição. O diagrama unifilar da bacia do rio Verde até a estação Haras é mostrado na Figura 3, onde é possível observar as vazões de contribuição para cada sub-bacia considerada. Na Tabela 1 é possível observar as vazões médias associadas a cada sub-bacia de contribuições e as seções transversais correspondentes, segundo a numeração indicada pelo modelo.



**Figura 3: Diagrama Unifilar da bacia do rio Verde até a estação Haras.**



Tabela 1: Vazão média para cada sub-bacia de contribuição e a seção transversal correspondente.

SUB-BACIA DE CONTRIBUIÇÃO	SEÇÃO TRANSVERSAL	VAZÃO MÉDIA (m³/s)
1	24	0,0155
2	19	0,1722
3	15	0,0664
4	13	0,2219
5	8	0,0586
6	7	0,3567
7	5	0,0708
8	2	0,0399

Os processos de erosão e deposição estão relacionados aos limites superiores de velocidade de corrente necessários para colocar uma partícula em movimento e limites inferiores de velocidade da corrente, para definir o processo de sedimentação, e ainda o diâmetro médio do sedimento. O diagrama de *Hjulström* mostra curvas experimentais que relacionam a velocidade da corrente e o diâmetro do sedimento e sua relação com os fenômenos de erosão e sedimentação. O rio Verde tem a areia ( $0,06 < \text{diâmetro} \leq 2 \text{ mm}$ ) como sedimento de fundo predominante e a partir do diagrama de *Hjulström* é possível definir, de forma aproximada, que velocidades acima de 0,20 m/s facilitam o deslocamento do sedimento e que acima de 0,6 m/s, a erosão é facilitada.

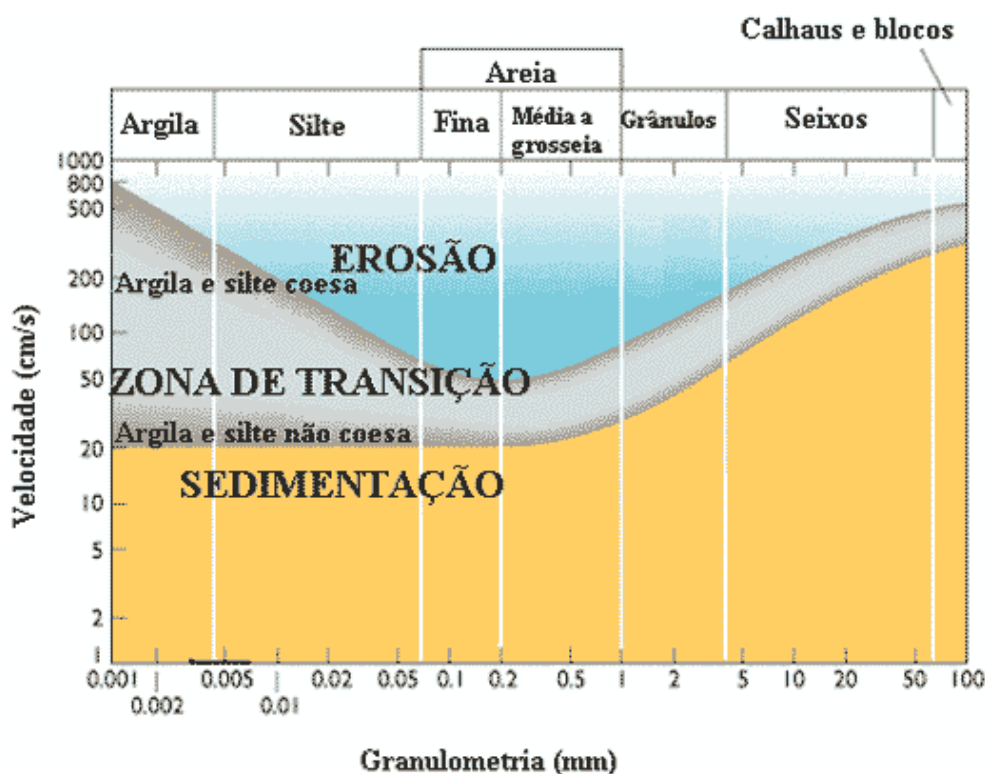


Figura 4: Diagrama de Hjulström (Neves, 2004)

## RESULTADOS

As regiões de erosão e deposição ao longo do rio Verde podem ser definidas a partir dos valores de velocidade obtidos em cada seção transversal, uma vez que, quando a energia cinética diminui, o material erodido a montante, que se encontra em suspensão, tenderá a depositar, ocasionando o acúmulo permanente de sedimentos no leito do rio.

As velocidades obtidas pelo modelo representam valores médios na seção transversal, mesmo assim, é possível estabelecer uma relação entre esta e a velocidade de atrito do fundo, responsável pelo transporte de fundo. Com relação à velocidade média, o HEC-RAS apresentou valores de velocidades crescendo de montante para jusante, variável durante toda a extensão do trecho do rio estudado, como pode ser observado na Figura 4. A Tabela 2 mostrados os valores de velocidades obtidos para cada seção transversal considerando as vazões médias.

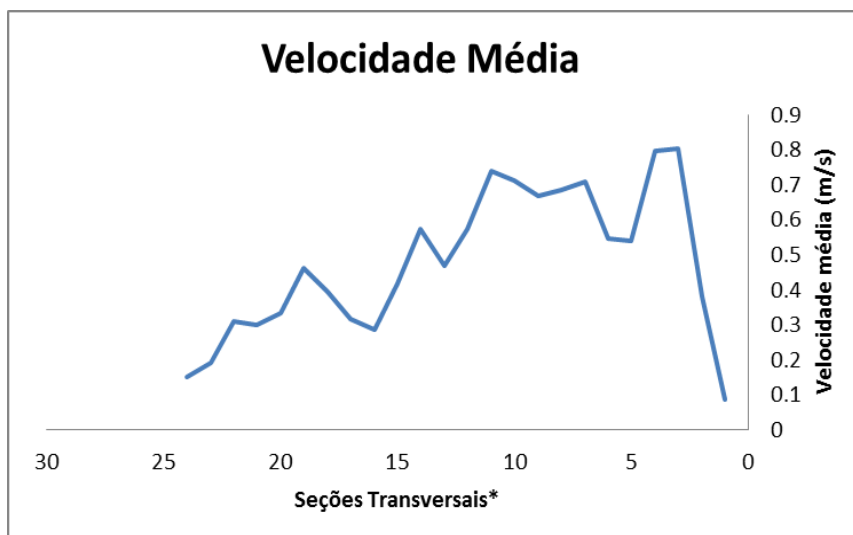


Figura 5 – Valores de velocidade média nas seções transversais do rio. A seção 24 corresponde à seção mais a montante e a seção 01 representa a seção do Haras.

Tabela 2: Resultados de Vazão, Elevação da Superfície Livre e Velocidade da simulação.

SEÇÃO TRANSVERSAL	VAZÃO (m³/s)	ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE (m)	VELOCIDADE MÉDIA (m/s)
24	0,0155	939,8231	0,152
23	0,0155	939,0253	0,191
22	0,0155	936,6759	0,311
21	0,0155	934,0615	0,301
20	0,0155	932,5140	0,335
19	0,1877	925,5222	0,461
18	0,1877	920,0823	0,394
17	0,1877	919,8577	0,315
16	0,1877	919,4037	0,287
15	0,2541	919,1260	0,419
14	0,2541	917,5524	0,573
13	0,4760	912,0675	0,469
12	0,4760	911,7738	0,572
11	0,4760	909,6342	0,740
10	0,4760	907,4499	0,712
09	0,4760	905,9855	0,669
08	0,5346	901,7916	0,686
07	0,8913	900,7686	0,709
06	0,8913	899,4818	0,547
05	0,9621	899,4311	0,539
04	0,9621	898,0190	0,796
03	0,9621	895,3752	0,804
02	1,0021	894,1270	0,381
01	1,0021	894,1259	0,086

Com o limite de 0,2 m/s estabelecido, é possível observar que apenas a seção 01 e 24 tenderiam a sedimentar. No entanto, estas seções correspondem às condições de contorno, e não fazem parte do trecho estudado. Observando o limite de 0,6 m/s para o qual acima deste valor ocorra erosão e observando os resultados obtidos pelo modelo, as seções 11, 10, 09, 08, 07, 04 e 03 deverão ter processos erosivos; estes sedimentos erodidos tenderiam a depositar nas seções 01 e 02. Nas demais seções do rio predominam um processo de transição entre a deposição e erosão, comprovado pelas velocidades inferiores a 0,6 m/s.

Os resultados da modelagem da circulação hidrodinâmica no rio Verde, apresentados nesta seção, devem ser considerados qualitativamente, visto que não foi possível fazer a calibração e validação do modelo dentro do intervalo de tempo simulado. No entanto, a definição de seções transversais onde os processos erosivos e/ou de deposição são dominantes, a partir do tipo de sedimento de fundo e da velocidade média, pode ser uma importante ferramenta na gestão hídrica, considerando a sua simplicidade. No entanto, é correto lembrar que outros fatores, como a presença de meandros e de outros obstáculos, podem alterar de forma significativa a capacidade de erosão e/ou deposição de um trecho de rio.

## CONCLUSÕES

O modelo utilizado é capaz de avaliar as velocidades médias na seção transversal do rio Verde e, a partir destes resultados, é possível determinar trechos onde erosão ou deposição podem ocorrer. Os resultados mostram que no rio Verde, as seções onde pode ocorrer erosão estão localizadas próximas da seção do Haras (jusante), demonstrando que o trecho do rio estudado não se encontra completamente desenvolvido, ou seja, corresponde ao trecho superior do rio. Os sistemas de captação de água subsuperficial devem ser instalados preferencialmente em áreas onde não ocorra deposição de sedimentos, uma vez que estes podem causar problemas e atrapalhar o bom funcionamento dos sistemas. No rio verde, considerando apenas a correlação entre velocidade média e diâmetro do sedimento, conclui-se que nas seções 02 e 01 não é aconselhável à instalação de sistemas de captação de água subsuperficial, uma vez que nestas seções os valores de velocidades são muito baixos, favorecendo a deposição do sedimento erodido nas seções a montante. Nas seções 22 a 12, apesar das velocidades não serem tão baixas (acima de 0,2 m/s), as vazões são muito pequenas, indicando trechos muito próximos da nascente, o que também inviabiliza a instalação de sistemas de captação de água. A metodologia desenvolvida neste trabalho pode servir de ferramenta para a escolha do melhor local para a captação subsuperficial em rios, a partir do conhecimento da velocidade média e do diâmetro do sedimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C. ; GOBBI, E. ; CUNHA, C. L. N. .Eutrofização e a estrutura dos Estudos. In: Cynara L. N. Cunha; Eduardo F. Gobbi; Cleverson V. Andreoli; Charles Carneiro. (Org.). Eutrofização em Reservatórios: Gestão Preventiva. 1ed. Curitiba: Editora UFPR, 2011, v. 1, p. 29-38
2. DOLVITSCH, Juliane Natália. Simulação do transporte de sedimentos em rios e canais: estudo sobre softwares disponíveis. 2013. 84p. Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dep. de Engenharia Civil, 2013.
3. GUERRA, Antonio José Teixeira. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, Antonio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista (org.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 2 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. 472 p.
4. SCAPIN, Juliana. Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria - RS. 2005. 116p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2005.
5. SCAPIN, Juliana; PAIVA, João Batista Dias de. Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria - RS. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL, 1, 2005, Santa Maria, RS. Anais... Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2005.
6. USACE. HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic reference manual, version 4.1. Davis/CA: U. S. Army Corps of Engineers, 2010a
7. USACE. HEC-RAS River Analysis System: User's manual, version 4.1. Davis/CA: U. S. Army Corps of Engineers, 2010b.
8. NEVES, T. G. G. (2004) GEOLOGIAUMA ABORDAGEM AO GEODINAMISMO EXTERNO E INTERNO DO NOSSO PLANETA, acesso em [geodinamica. no.sapo.pt/html/pagesgex/creditos.htm](http://geodinamica.no.sapo.pt/html/pagesgex/creditos.htm)