

## IV-033 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO EM UM CORPO HÍDRICO URBANIZADO

**Rafles Anselmo da Mata<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Faculdade de Desenvolvimento das Ciências e Tecnologias. Mestrando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa - UFV.

**Renato de Carli Almeida Couto**

Engenheiro Ambiental pela Faculdade de Desenvolvimento das Ciências e Tecnologias. Pós-Graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho pela FUMEC. Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

**Paulo de Castro Vieira**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental. Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

**Astrid Carolina Bustos Valencia**

Administradora Ambiental e dos Recursos Naturais pela Universidad Santo Tomas De Colômbia. Mestranda em Saneamento Meio ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Sítio Quenta-Sol, Zona rural – Santa Maria de Itabira – MG – CEP: 35910-000 – Brasil – Tel.: (31) 8516-6016 – e-mail: [rafles.mata@ufv.br](mailto:rafles.mata@ufv.br).

### RESUMO

Este estudo objetivou-se caracterizar e modelar o trecho do Rio do Peixe sob os aspectos hidráulicos, em períodos, chuvoso e seco, além da influência da vazão de escoamento superficial associada a diferentes períodos de retorno. Neste estudo foi adotada uma abordagem quantitativa por empregar a mensuração dos dados obtidos em campo, e em resultado da modelagem matemática do comportamento sob os aspectos hidráulicos do rio. O método utilizado foi o de pesquisa de campo, sendo os dados amostrados por meio de um monitoramento mensal, de forma pontual e simples, no período de 2009 a 2010. Foram realizadas nas seções transversais, a mensuração da vazão e a obtenção das variáveis topográficas. As técnicas de coleta de dados utilizadas foram a da observação, com auxílio de equipamentos topobatimétrico. A determinação da vazão no período seco e chuvoso obteve-se, respectivamente, a mínima vazão de 1,5m<sup>3</sup>/s e máxima de 8,87m<sup>3</sup>/s. Também foi realizado um estudo das vazões de escoamento superficial pelo método racional. A vazão de contribuição para diferentes períodos de retorno variou entre 8,08m<sup>3</sup>/s a 12,42m<sup>3</sup>/s. A modelagem do comportamento hidráulico do trecho do rio foi realizada por meio do aplicativo computacional “HEC-RAS 4.0”, o qual descreveu as variáveis geométricas e hidráulicas envolvidas no processo, mediante o componente dos perfis hidráulicos a cada seção, para as diferentes condições de vazão. A descrição do regime se deu por meio do cálculo do numero de Froude, que variou entre 0,3 a 1,03 levando a compreender o regime de subcrítico a supercrítico. Quanto à velocidade, que descreve a variação do fluxo, verificou-se para o período seco transições de mudanças gradualmente variadas, e para as demais condições de vazão, observou-se que o rio comporta de forma gradual no inicio do trecho e bruscamente variado nas seções a jusante. Contudo, o método utilizado (HEC-RAS) mostrou-se eficiente para a caracterização hidráulica do rio, apesar de suas limitações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidráulica de canais, Modelagem computacional, HEC-RAS, Microbacia Rio do Peixe.

### INTRODUÇÃO

Os rios são canais de escoamento com fluxo livre, em que suas condições geométricas e hidráulicas (modificadoras do regime de escoamento) variam no espaço e no tempo, e são definidas naturalmente, estando também sujeitos a modificações provocadas por intervenções ao meio do qual fazem parte.

Os escoamentos em condutos livres também chamados de canais apresentam a superfície d'água em contato com a atmosfera. Com isso, o estudo do escoamento nestes tipos de condutos é mais complexo por causa da grande variedade de condições que eles podem apresentar devido à variação da superfície livre, no espaço e no

tempo, em consequência da declividade, e dos parâmetros geométricos do canal, também variáveis (SILVESTRE, 1983).

Os rios adjacentes e ou incorporados à área urbana são penalizado por diversos fatores, entre eles, obras de infraestruturas ainda mal planejadas ou de insuficiente adequação. Tal fator pode influenciar diretamente nos volumes de água que escoa sobre a superfície do terreno e chega até o rio, e estas podem ocorrer com grande variabilidade, proporcionalmente com os períodos sazonais.

A dinâmica dos modos de uso e ocupação no solo provoca modificações constantes sobre as superfícies dos terrenos, assim quando ocorre à incidência de precipitação, a fração pluviométrica que não infiltra no solo é escoada pela superfície, ocorrendo de maneira diferenciada a cada parcela de uso e ocupação do solo. Além disso, é importante ressaltar a relação direta com a capacidade de infiltração e retenção de água, que pode ser alterado de acordo com as práticas exercidas sobre o solo, modificando a dinâmica e o volume do escoamento superficial.

A modificação das características do terreno pode contribuir para a redução do tempo de concentração de uma área de drenagem, o que leva a maior velocidade de escoamento, acarretando maior potencial de dinâmica erosiva, transporte de matéria e energia, e consequintemente contribuindo para a maior vazão de pico no exutório da bacia hidrográfica, quando a precipitação alcança ou excede o tempo de concentração.

A capacidade de suporte de um rio é um aspecto essencial para a análise dos seus parâmetros de qualidade. Destaca-se um fator importante deste aspecto, o comportamento hidráulico do rio, que desenvolve importante papel de contribuição na dispersão, diluição e transporte de matérias e ou substâncias inseridas neste meio.

O presente trabalho buscou descrever do comportamento hidráulico em períodos distintos, seco e chuvoso, além de perfazer um estudo da vazão de escoamento superficial que contribui para o trecho definido. Por meio de modelos empíricos consagrados, variando os períodos de retorno de 1, 5, 10 e 15 anos, descreveu-se matematicamente o comportamento do rio (sob os aspectos hidráulicos) por meio do programa computacional HEC-HAS, pelos cálculos das variáveis geométricas e hidráulicas em cada seção do trecho escolhido.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDO

A microbacia do rio do Peixe está localizada no município de Itabira, na região centro-leste do estado de Minas Gerais, como sub-bacia do rio Piracicaba. O município é pertencente à região de influência do Rio Doce, apresentando um índice de urbanização de 91,2%. Nesta região, predomina-se o clima tropical chuvoso, com inverno seco e verão quente e úmido. O monitoramento do rio do Peixe foi distribuído ao longo de oito pontos, totalizando uma extensão de aproximadamente 630 metros (figura 1).

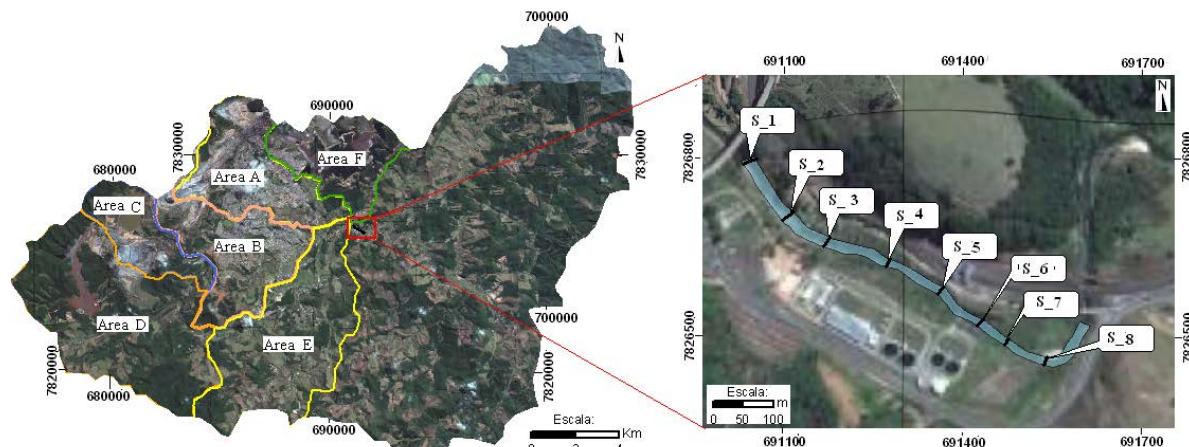


Figura 1: Localização dos pontos no trecho monitorado.

A distribuição da campanha de monitoramento ocorreu de outubro de 2009 a outubro de 2010, período chuvoso e seco, respectivamente, com frequência mensal. Os principais parâmetros quantitativos mensurados neste trecho foram velocidade de escoamento, comprimento das seções transversais e profundidade do canal, por meio de um levantamento topobatimétrico.

### DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS

As medidas de vazão nas seções transversais foram efetuadas com o auxílio de um micromolinete da marca Plano (modelo SP 201), para a medição da velocidade do fluxo do rio nos pontos em estudo. Para a determinação das seções transversais do rio nos pontos monitorados, utilizou-se uma mira graduada e uma trena para a tomada das profundidades e largura do canal, respectivamente.

No trecho do rio de Peixe, foi realizado o levantamento topográfico planialtimétrico para a obtenção da extensão e declividade do canal. Estes dados foram utilizados na composição das características do canal para a sua modelagem.

### DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDROLÓGICOS

O estudo da caracterização morfológica da bacia foi realizado a partir de imagem de satélite, e com auxílio do programa de representação gráfica computacional (ArcGIS 9.3). As áreas foram georeferenciadas e delimitadas, a fim de aprimorar a eficiência do método.

Para determinação da vazão de escoamento superficial, a área de estudo foi delimitada e subdividida em seis subáreas (figura 1). Para cada subárea foi definido um coeficiente de escoamento superficial, de acordo com o uso e ocupação do solo. Na sequência foi realizada a unificação dos coeficientes a cada subárea, e analisada por meio da ponderação dos dados, sendo observada a fração de área que abrange cada coeficiente em relação à área total da subárea em questão.

Outro procedimento realizado foi o cálculo do tempo de concentração relativo a cada subárea de contribuição. Para isso utilizou-se os dados de altimetria e extensão da calha principal da área de drenagem, considerados pelas informações contidas na carta topográfica do município, e determinados por meio dos métodos de Kírpich, Vem Te Chow e Picking conforme equações apresentadas a seguir.

#### Equação de Kírpich

$$tc = 57 (L^2/H)^{0,385} \quad (01)$$

em que:

tc = tempo de concentração, min;

L = comprimento do talvegue, km;

H = diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue, m.

#### Equação de Vem Te Chow

$$tc = 52,64 (L/\sqrt{S_0})^{0,64} \quad (02)$$

em que:

tc = tempo de concentração, min;

L = comprimento horizontal do talvegue, km;

$S_0$  = declividade média do talvegue,  $m/km^{-1}$ .

#### Equação de Picking

$$tc = 51,59 (L^2/S_0)^{\frac{1}{3}} \quad (03)$$

em que:

$t_c$  = tempo de concentração, min;

$L$  = comprimento horizontal do talvegue, km;

$S_0$  = declividade média do talvegue, m/km<sup>-1</sup>.

A partir da determinação pelos três métodos, os resultados utilizados correspondem à média aritmética dos valores encontrados como demonstrado na tabela 1.

**Tabela 1: Tempo de concentração: valores médios.**

Sub-bacia	Tempo de Concentração						
	Parâmetros Físicos			$t_c$ (min)			
	$L$ (km)	$H$ (m)	$S_0$ (m/km)	Kirpich	Chow	Picking	Médio
<b>A</b>	9.63	570	59.190	67.8	60.8	60.2	62.9
<b>B</b>	9.00	570	63.333	62.7	57.0	56.2	58.6
<b>C</b>	8.70	410	47.126	68.4	61.3	60.7	63.4
<b>D</b>	11.75	375	31.915	100.2	84.1	84.4	89.6
<b>E</b>	12.25	320	26.122	111.7	92.1	92.8	98.9
<b>F</b>	5.39	280	51.948	45.6	43.7	42.7	44.0

O índice máximo médio de precipitação foi determinado para o período de retorno de 1, 5, 10 e 15 anos. Os períodos de retorno utilizados levam em consideração a dinâmica da bacia, que recomenda avaliar a variação de escoamento superficial para períodos menores que 20 anos.

Os parâmetros de ajuste relativos à estação pluviográfica estudada (K, a, b, c) correspondem aos dados obtidos no *software* Plúvio 2.1, com informações da estação pluviográfica de Conceição Mato Dentro/MG situada sob as coordenadas 19°37'09" latitude e 43°13'37" longitude.

A partir destas informações, determinou-se a vazão de escoamento superficial por meio da equação do método racional, sendo então o resultado utilizado como dado de entrada para o modelo.

### MODELAGEM

Para a modelagem foi utilizado o *software* HEC-RAS ("Hydrologic Engineering Center" "River Analysis System") desenvolvido pelo corpo de engenheiros do Instituto de Recursos Hídricos dos Estados Unidos. Este *software* processa as informações de entrada de modo iterativo, baseados nas equações envolvidas na discretização de continuidade, quantidade de movimento e conservação da energia.

Basicamente os dados de entrada no *software* HEC-RAS, consiste no fornecimento de dados que descrevem as características geométricas do canal que se deseja simular. São inseridos os parâmetros referentes às seções transversais da condição de montante e das demais seções localizadas em toda a extensão do trecho. O programa utiliza estas informações para fazer a conversão dos dados de área e o comprimento da linha superficial de nível de água na seção. Também devem ser definidas como parâmetros de entrada as definições das condições iniciais da simulação como vazão na seção de montante, inclinação média do canal, a rugosidade de fundo e de margem (definidas pelo coeficiente "n" de Manning).

O *software* HEC-RAS processa estas informações de modo iterativo, com base no método de cálculo baseados nas equações envolvidas na discretização de continuidade, quantidade de movimento e conservação da energia.

A equação da continuidade, a qual traduz a conservação da massa, é dada segundo Baptista e Coelho (2003) por:

$$Q = A_1 U_1 = A_2 U_2 \quad (04)$$

A equação que corresponde ao teorema de Euler, o qual transcreve a conservação da quantidade de movimento é expressa por:

$$R = \rho Q (\beta_2 U_2 - \beta_1 U_1) \quad (05)$$

E a conservação da energia é descrita conforme prescreve a equação de Bernoulli:

$$Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + \Delta h \quad (06)$$

onde:

$Q$  = vazão, em  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$A$  = área, em  $\text{m}^2$ ;

$U$  = velocidade média, em  $\text{m/s}$ ;

$R$  = força resultante, em  $\text{N}$ ;

$\rho$  = massa específica, em  $\text{Kg/m}^3$ ;

$\beta$  = coeficiente de Boussinesq;

$z$  = cota do fundo, em  $\text{m}$ ;

$y$  = profundidade, em  $\text{m}$ ;

$\alpha$  = coeficiente de coriolis;

$g$  = aceleração da gravidade, em  $\text{m/s}^2$ ;

$\Delta h$  = perda de carga, em  $\text{m}$ .

Na figura abaixo (figura 2) estão representado de forma esquemática os termos da equação 06.

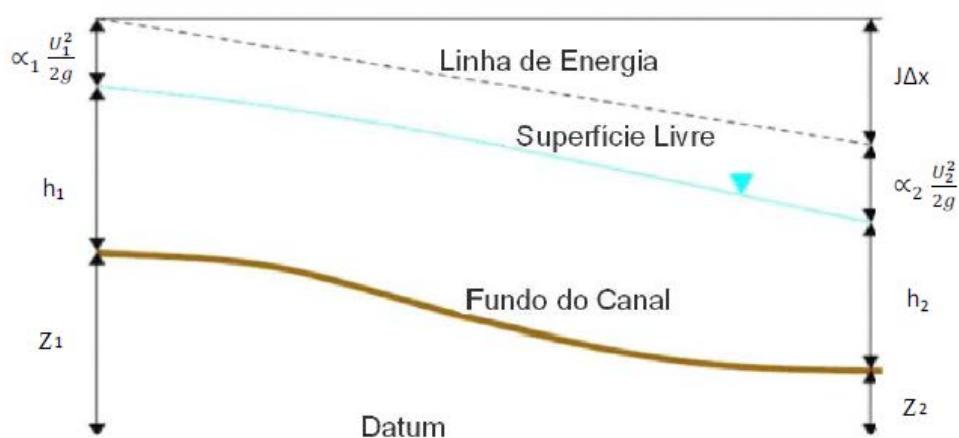


Figura 2: Representação gráfica da linha de energia.

O HEC-RAS é um aplicativo prático de uso público e disponível para *download* de forma gratuita. Tem boa aplicabilidade apesar de usar métodos antigos para efetivar os cálculos. Sua aplicação deve fundamentar uma análise mais crítica dos objetos desta pesquisa, de maneira mais rápida e menos custosa, principalmente quando se aproxima da realidade.

Apesar de ser um software de domínio público, o HEC-RAS exige um conhecimento mínimo para a sua utilização, sendo melhor e mais confiável a operação por profissionais da área com conhecimentos específicos a serem empregados. Além disso, o programa possui uma interface baseada no seu país de origem, portanto apresentada no idioma da língua inglesa.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados utilizados para simulação no HEC-RAS foram compilados por meio de métodos estatísticos e apresentados na figura 3. Foram considerados para a simulação os valores extremos para os períodos chuvoso e seco,  $8,87 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $1,50 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente.

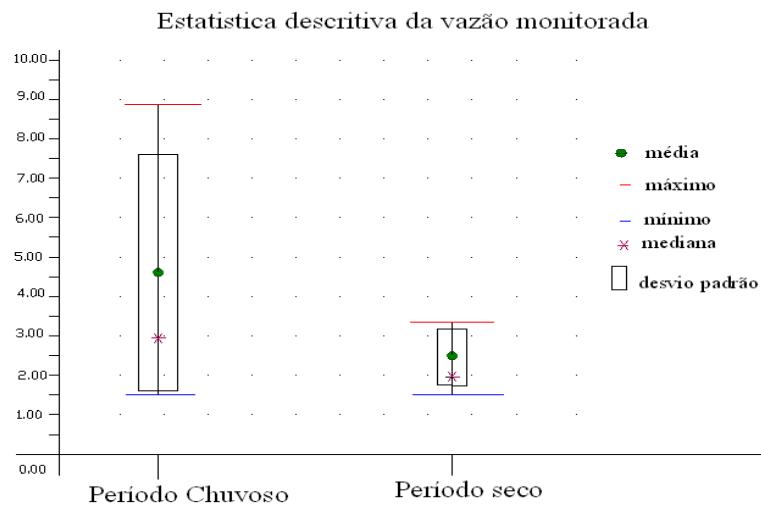


Figura 3: Estatística descritiva das vazões monitoradas durante o um ano hidrológico.

A seguir, na figura 4, são apresentadas as vazões correlacionadas ao índice máximo médio de precipitação aos períodos de retorno.

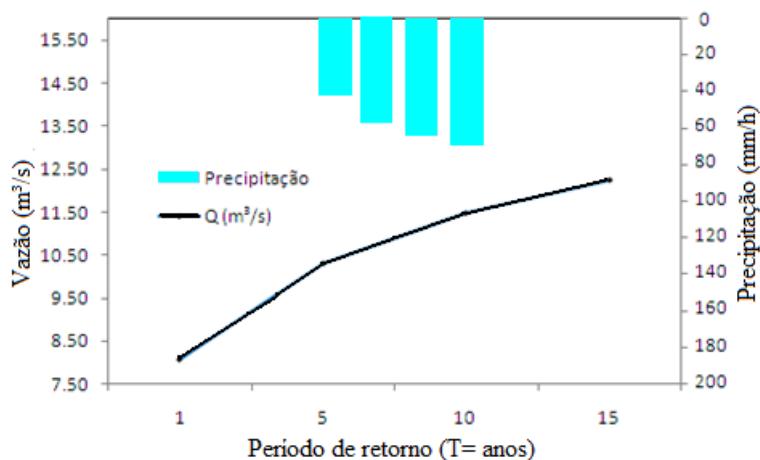


Figura 4: Vazões de pico geradas na seção de controle para os tempos de retorno de 1, 5, 10 e 15 anos com duração média de 69 min.

Os dados de vazão juntamente com as características geométricas, levantadas em campo foram utilizados para realizar as simulações, e então compor os perfis hidráulicos do trecho do rio analisado.

Na tabela 2, é apresentado o número de Froude calculado para cada seção de acordo com cada vazão de entrada no modelo.

**Tabela 2: Número de Froude, calculado pelo HEC-RAS para cada seção e vazão.**

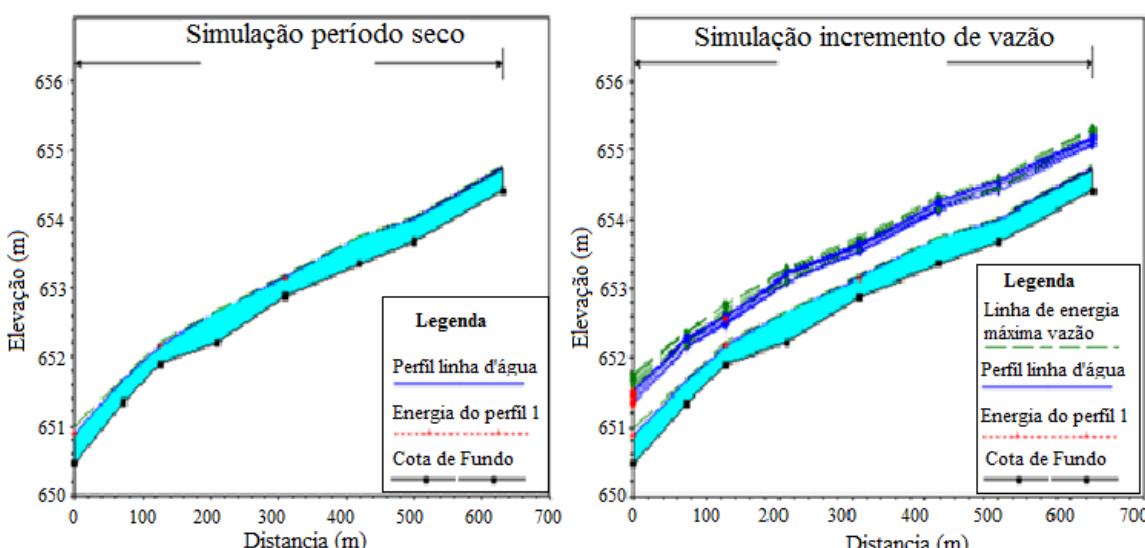
Identificação	Seções do trecho	Período seco	Período chuvoso	Tempo de retorno 1 ano	Tempo de retorno 5 anos	Tempo de retorno 10 anos	Tempo de retorno 15 anos
		Froude	Froude	Froude	Froude	Froude	Froude
Rio do Peixe	Seção 1	0.48	0.69	0.69	0.69	0.70	0.71
Rio do Peixe	Seção 2	0.40	0.37	0.36	0.37	0.38	0.38
Rio do Peixe	Seção 3	0.28	0.41	0.41	0.43	0.44	0.45
Rio do Peixe	Seção 4	0.80	0.59	0.59	0.58	0.58	0.58
Rio do Peixe	Seção 5	0.28	0.35	0.35	0.36	0.37	0.37
Rio do Peixe	Seção 6	0.89	0.88	0.87	0.88	0.88	0.88
Rio do Peixe	Seção 7	0.40	0.42	0.43	0.44	0.44	0.44
Rio do Peixe	Seção 8	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.03

Observou-se que em todas as condições de vazão se obteve o regime subcrítico, com exceção da seção 8, aonde o regime passou para supercrítico, ou seja, com valores de Froude maiores que 1. Este fato pode ter ocorrido devido a variação morfométrica da calha do rio, com zonas de corredeiras entremeio a zonas mais profundas, ocasionando um ganho de energia favorecendo uma maior velocidade com consequente variação do regime de escoamento ao longo do trecho (tabela 3).

**Tabela 3: Variação de velocidade de escoamento no trecho, calculado pelo HEC-RAS para cada seção de escoamento.**

Identificação	Seções do trecho	Período seco	Período chuvoso	Tempo de retorno 1 ano	Tempo de retorno 5 anos	Tempo de retorno 10 anos	Tempo de retorno 15 anos
		velocidade (m/s)	velocidade (m/s)	velocidade (m/s)	velocidade (m/s)	velocidade (m/s)	velocidade (m/s)
Rio do Peixe	Seção 1	1.29	2.57	2.49	2.69	2.81	2.88
Rio do Peixe	Seção 2	0.98	1.49	1.44	1.57	1.63	1.67
Rio do Peixe	Seção 3	0.83	1.76	1.69	1.88	1.97	2.03
Rio do Peixe	Seção 4	1.70	2.14	2.07	2.24	2.32	2.36
Rio do Peixe	Seção 5	0.83	1.50	1.46	1.61	1.68	1.73
Rio do Peixe	Seção 6	1.92	3.16	3.08	3.31	3.44	3.51
Rio do Peixe	Seção 7	1.11	1.85	1.79	1.96	2.04	2.09
Rio do Peixe	Seção 8	2.76	3.88	3.84	3.93	4.01	4.10

Na figura 5 são ilustrados os perfis hidráulicos calculados pelo HEC-RAS. Ao longo do comprimentos do trecho monitorado.


**Figura 5: Perfil hidráulico gerado pelo HEC-RAS.**

Para o período seco, no qual foi utilizado a mínima vazão monitorada durante o ano hidrológico, o regime de fluxo se apresentou de modo gradual, verificado pela transição de velocidade, sendo a vazão conduzida pela calha do rio de forma que a lâmina d'água não sobrepõe as margens.

Já no período chuvoso, para o qual foi utilizado a máxima vazão monitorada, observou que houve uma brusca variação em função da transição da velocidade do escoamento, de fluvial para turbulento. Notou ainda um ganho de energia no perfil da linha d'água ultrapassando em alguns pontos o limite crítico do sistema. Este fato se repete, e com maior intensidade, a medida em que há o incremento da vazão para os períodos de retorno de 5, 10 e 15 anos.

## CONCLUSÕES

A simulação da capacidade de suporte de escoamento superficial da calha do rio do Peixe apresentou resultados divergentes entre os períodos monitorados, bem como na simulação em que o HEC-RAS descreve o avanço do perfil da linha d'água em função de diferentes períodos de retorno.

No período da seco, sem influência direta da precipitação, a calha do rio do Peixe comporta de forma segura o escoamento fluvial permanente. Já no período chuvoso, com a ocorrência de intensas precipitações com duração média de uma hora, o volume de escoamento superficial gerado pela bacia de contribuição influiu em consideráveis vazões, o que promove um ganho de energia na linha d'água. Com isso, a calha do rio passa a não comportar todo o volume acumulado, resultando em um incômodo da mancha de inundação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAPTISTA, M. B.; LARA, M. M. P. C. Fundamentos de engenharia hidráulica. 2. ed. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2003.
2. BAPTISTA, Márcio; von SPERLING, Marcos. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios, Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2007, 588 p.
3. CADAVID, R.; JUAN, H. Hidráulica de canales: fundamentos. Medellin: Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2008. 390p.
4. CHOW, Ven Te. Hidráulica de canales abiertos. Ed: McGraw Hill. Santa Fé de Bogotá, Colombia, 1994.
5. OLIVEIRA, Luis F. C. de. *et al.* Soluções numéricas para obtenção da linha d'água em canais naturais. Artigo publicado na revista de Pesquisa Agropecuária Tropica (PAT). Universidade federal de Goiás, 1998.
6. PEREIRA, Isabela L. V.. Estudos de revitalização de cursos de água – trecho experimental no rio das velhas. UFMG/DESA. Belo Horizonte, Dissertação mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade federal de Minas Gerais, 2008.
7. PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D. D.. Escoamento superficial. 2. ed. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2004.
8. RCA – Relatório de Controle Ambiental (Construção ETE – Laboreaux) – Oliveira e Marques Engenharia LTDA. Oliveira e Marques Engenharia. Belo Horizonte, MG. 2003.
9. TUCCI, C. E. M. Hidrologia de águas superficiais. Brasília, DF: ABEAS; Viçosa, MG: UFV, Departamento de Engenharia Agrícola, 128 p.
10. U.S.Army Corps of Engineers. HEC-RAS River Analysis System – Hydraulic Reference Manual – Version 4.0. Davis, January 2001.