

MODELAGEM MATEMÁTICA DOS NÍVEIS D'ÁGUA NO RIO ARAGUAIA

Rone Antônio de Azevedo¹

Resumo - Este trabalho é pioneiro para a região Centro-Oeste do Brasil e visa ao aprofundamento da problemática do aproveitamento do Rio Araguaia como via navegável para transportar as safras de grãos das regiões Centro-Norte. O Programa de Desenvolvimento da Hidrovia Tocantins-Araguaia é uma iniciativa do Ministério dos Transportes para estabelecer a navegação fluvial confiável e segura em 2 242 km de extensão. Serão realizadas intervenções no leito do Rio Araguaia como dragagens e derrocamentos. Há a preocupação de que estas obras previstas possam perturbar sensivelmente o seu regime hidráulico.

Essas questões motivaram esta pesquisa em Hidráulica Fluvial com o consagrado Sistema de Análise de Rios do Hydrologic Engineering Center (HEC-RAS), US Army Corps of Engineers. Os níveis d'água foram simulados na condição de projeto a partir da base de dados existente (1998) num trecho de 373 km do Rio Araguaia (Santa Maria das Barreiras a Xambioá). A calibração dos coeficientes de rugosidade de Manning foi executada num subtrecho de 15 km, à montante de Conceição do Araguaia, por ajustamento da superfície d'água gerada pelo modelo à observada. Determinou-se os volumes de escavação no leito desse subtrecho, verificando a variação dos níveis d'água. Avaliou-se a precisão e confiabilidade dos coeficientes de Manning encontrados.

Abstract - This work is pioneer to Brazil's Center-West region and seeks to deepen the relative discussions to the Rio Araguaia as waterway for the transport of the harvests of grains of the Center-North regions. The Tocantins-Araguaia Waterway's Development Program is an initiative of the federal government to establish the reliable and safe traffic in 2,242 km of extension. Interventions will be accomplished at Rio Araguaia's bed as dredgings and dismount of rocky banks. There is the concern that these foreseen works can disturb his hydraulic regime sensibly.

Those subjects motivated this research in Open Channel Hydraulics with the renowned Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS), US Army Corps of Engineers. The water surface profiles were simulated in the project condition from the existent base of data (1998) in a reach of Rio Araguaia with 373 km (Santa Maria das Barreiras to Xambioá). The calibration of the

¹ Consultoria em Recursos Hídricos e Projetos em Engenharia; Rua 7 n.º 201, ap. 401, Setor Oeste; CEP 74110-090; Goiânia; GO; Brasil; (62)224-3178; rone2001@terra.com.br

Manning's roughness coefficients was executed in a reach of 15 km, upstream of Conceição do Araguaia, for adjustment of the water surface generated by the model to the observed surface. The excavation volumes in the bed of the minor reach were determined, verifying the variation of the water levels. The precision and reliability of the Manning coefficients obtained were evaluated.

Palavras-chave - Modelagem hidráulica; Rio Araguaia; Coeficientes de rugosidade de Manning

Introdução

A navegação fluvial sempre foi considerada vital para o progresso e fortalecimento da economia das nações. Destaca-se por apresentar baixo dispêndio energético e gerar menor ruído do que os demais modais de transporte. A hidrovía é uma eficiente “estrada líquida” com elevada capacidade de escoamento a custos reduzidos. O atual nível de desenvolvimento das regiões banhadas pelos rios Tietê-Paraná (Brasil), Tennessee (EUA) e Reno (Alemanha) comprova que a hidrovía é decisiva para a prosperidade econômica regional e nacional.

O Brasil apresenta uma das maiores redes fluviais navegáveis do mundo com mais de 40 mil km de extensão (Rusteberg, 2000). Entretanto, o transporte de carga no país ainda está muito concentrado nas rodovias (63%) e nas ferrovias (21%). Apenas 12% da carga são transportados pelas vias marítima e fluvial e 4% em dutos. Em 1998 o Brasil movimentou cerca de 17 milhões de toneladas de carga (2,7% do total de transporte de carga no país) através de hidrovias.

O Governo Federal brasileiro vem realizando esforços crescentes para melhorar a infraestrutura hidroviária nacional. O Programa de Desenvolvimento da Hidrovía Tocantins-Araguaia é uma iniciativa do Ministério dos Transportes para estabelecer, numa primeira fase, a navegação fluvial confiável e segura em 2.242 km de extensão nos rios:

- Araguaia desde Aruanã (GO) até Xambioá (TO), trecho com 1.230 km de extensão;
- Tocantins de Miracema do Tocantins (TO) até Estreito (MA), extensão de 420 km; e
- Rio das Mortes de Nova Xavantina (MT) até São Félix do Araguaia (MT), com 592 km.

Este programa pretende, através da multimodalidade, integrar e otimizar o sistema de transportes com a estrutura portuária, tornando mais competitivos os produtos brasileiros a serem exportados. A hidrovía, combinada adequadamente aos modais rodoviário e ferroviário, reduzirá o custo final do transporte de insumos e produtos com baixo valor unitário e grandes volumes.

Conforme a AHITAR (2000), a área de influência da Hidrovía Araguaia-Tocantins e do corredor de transporte multimodal Centro-Norte estende-se por sete estados brasileiros: Mato

Grosso do Sul, Goiás, Mato Grosso, Tocantins, Pará, Maranhão e Piauí. Esta região apresenta grande capacidade produtiva de grãos para exportação, especialmente a soja. O aproveitamento do seu potencial produtivo depende, em boa parte, da eficiência dos meios de transporte utilizados.

Para disponibilizar a navegação fluvial nos rios Tocantins, Araguaia e das Mortes é preciso analisar o comportamento hidráulico desses cursos d'água. O traçado do ótimo canal de navegação deve oferecer condições satisfatórias para o tráfego do comboio-tipo, associado a custos minimizados das obras necessárias à sua implantação. A escolha do canal de navegação fluvial é fundamentada através da modelagem matemática para previsão dos níveis d'água.

No caso do Rio Araguaia há a preocupação de que os melhoramentos previstos no canal de navegação, tais como a dragagem e o derrocamento, possam alterar o regime hidráulico do rio, diminuindo os níveis d'água no rio, rebaixando os lençóis freáticos na região e agravando as cheias à jusante. Esse aspecto também pode ser analisado através de um modelo de simulação.

Sistemas fluviais de grande porte como o Rio Araguaia apresentam certas singularidades que dificultam sua modelagem. Os principais desafios associados à adaptação, calibração e validação de um modelo matemático para simular o regime hidráulico do Rio Araguaia são: a complexidade da geometria do rio evidenciada por estreitamentos, fossas profundas, bancos de areias móveis, diversas ilhas fluviais; obstáculos hidráulicos como travessões rochosos, pedrais e cachoeiras; contribuições laterais da bacia hidrográfica; escassez de informações hidrológicas e geométricas (estações fluviométricas, curvas chave, levantamentos batimétricos do leito do rio)²;

Este trabalho (Azevedo, 2001) aplica o modelo **HEC-RAS (Hydrological Engineering Center - River Analysis System)**, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, para a modelagem hidráulica do Rio Araguaia. A análise dos resultados gerados pelo modelo proporcionará um suporte adicional para a implantação da hidrovía no Rio Araguaia.

Desse modo simula-se o escoamento em um trecho exemplar no Rio Araguaia visando à:

- 1) Determinar os valores do coeficiente de rugosidade hidráulica nas seções transversais através de calibração sistemática;
- 2) Verificar a distribuição de velocidades nas seções transversais;
- 3) Analisar a influência das obras de dragagem e derrocamento no perfil da linha d'água;
- 4) Estimar os volumes de material a ser escavado no leito do rio (dragagem e derrocamento);
- 5) Avaliar a sensibilidade do modelo quanto às modificações da rugosidade hidráulica.

No último século verificou-se um intenso progresso na modelagem de canais abertos naturais. Darcy e Bazin realizaram em 1857 as primeiras experiências hidráulicas para determinar a rugosidade hidráulica no canal de Bourgogne, França. Desde aquela época inúmeras pesquisas

² Como exemplo, há trechos com seções distanciadas de 19 km uma da outra, sem nenhuma informação complementar.

realizadas em conceituados laboratórios de hidráulica, contribuíram de maneira decisiva para a comprovação e o estabelecimento de novas teorias. O progresso científico alcançado na modelagem hidráulica de canais abertos é notável. Contudo, paradoxalmente, a expressão para o cálculo de velocidades em canais abertos desenvolvida em 1889 pelo engenheiro irlandês Robert Manning (1816-1897) ainda hoje é aplicada, praticamente inalterada. Os grandes sistemas fluviais da Terra precisam ser intensivamente pesquisados para melhor aproveitar seu potencial de usos múltiplos.

Com o propósito de estudar o comportamento dos sistemas fluviais foram desenvolvidos nas duas últimas décadas poderosos programas de computador para modelagem hidráulica. As equações relativas ao escoamento superficial em rios e canais são resolvidas por estes programas e os resultados podem ser visualizados em gráficos ou tabelas. Conforme a finalidade do estudo, são empregados modelos que simulam o escoamento em uma ou mais dimensões, em regime permanente ou não, considerando o transporte de sedimentos e outras capacidades.

Os conhecimentos exigidos para modelagem computacional variam do elementar até um elevado nível de sofisticação, não eximindo o engenheiro da obrigação de dominar a teoria. O modelo HEC-RAS 2.2 devido a sua facilidade de operação, menor custo e reconhecimento internacional foi selecionado para este trabalho de pesquisa.

A metodologia científica aqui adotada consiste em:

- Simulação dos níveis d'água no trecho de 373 km de extensão compreendido entre as cidades de Santa Maria das Barreiras (PA) e Xambioá (TO) utilizando a base de dados dos estudos da empresa privada INTERNAVE Engenharia (1998). Os níveis d'água simulados com o modelo HEC-RAS foram analisados e comparados aos obtidos por essa empresa;
- Primeira calibração de um subtrecho experimental de 15 km de extensão, localizado à montante da cidade de Conceição do Araguaia, a partir dos dados originais introduzidos;
- Segunda calibração do subtrecho experimental após a introdução de dezessete novas seções transversais e distâncias medidas no eixo do rio;
- Comparação e avaliação dos coeficientes de rugosidade obtidos nestas duas calibrações;
- Simulação do efeito da introdução do canal navegável nos níveis d'água, considerando os valores do coeficiente de rugosidade de Manning provenientes da segunda calibração;
- Avaliação da sensibilidade do modelo quanto a modificações controladas da rugosidade hidráulica, sendo este o parâmetro hidráulico chave monitorado na pesquisa.

Este trabalho é pioneiro para a região Centro-Oeste pois representa uma nova perspectiva de desenvolvimento econômico. Visa ao aprofundamento das discussões relativas ao aproveitamento do Rio Araguaia como via navegável. Espera-se que este trabalho contribua na realização de novos estudos de modelagem para o melhor aproveitamento do potencial de navegação dos rios do Brasil.

2 O Modelo HEC RAS 2.2

Desenvolvido pelo **HEC (Hydrologic Engineering Center)**³ do Corpo de Engenheiros do Exército norte-americano, o software **RAS (River Analysis System)** foi concebido para efetuar cálculos hidráulicos em um sistema completo de canais naturais ou construídos. O software trabalha com uma rede inteira de canais, sistemas dendríticos ou um único rio.

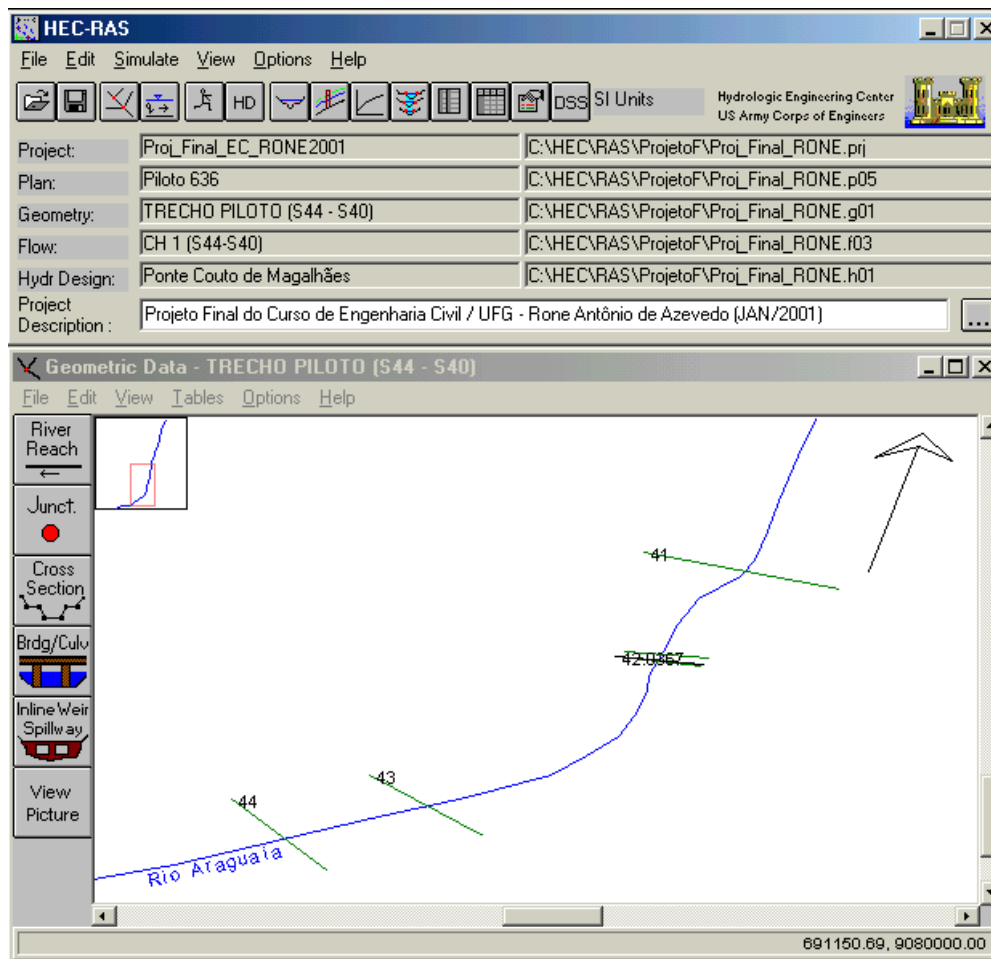


Figura 1 Visão da Tela do Editor Geométrico do HEC-RAS

O HEC-RAS, assim como qualquer outro modelo, é uma sofisticada ferramenta a ser utilizada somente por pessoas capacitadas que possuem bons conhecimentos em modelagem hidráulica. Seu uso por leigos é fortemente desaconselhado, especialmente em estudos que envolvem vidas humanas e consideráveis recursos financeiros. É importante entender que serão obtidos resultados imprecisos se não houver rigorosos procedimentos de controle de qualidade.

As aplicações notáveis do HEC-RAS estão em: (1) estudos para determinação da área de

³ Os softwares do HEC são mundialmente reconhecidos como os melhores nas áreas de Hidrologia e Engenharia Hidráulica (HEC-1, HEC-2). O HEC-RAS pertence à nova geração de softwares para modelagem hidráulica substituindo gradualmente a versão anterior HEC-2.

inundação dos rios e de proteção contra as enchentes; (2) efeitos dos diversos obstáculos hidráulicos como pontes, bueiros, vertedores de barragens, diques e outras estruturas hidráulicas; (3) análise das alterações nos perfis da superfície d'água devido à modificações da geometria do canal; (4) múltiplos perfis de superfície d'água (modelagem de cenários para diferentes condições hidráulicas e hidrológicas), erosão em pontes e operação de barragens em seqüência.

O HEC-RAS é um sistema integrado, projetado para uso interativo multitarefa em ambiente de rede. Este sistema é composto de uma poderosa interface gráfica (visualização tridimensional da simulação computacional), componentes independentes para análise hidráulica, capacidade de armazenagem e gerenciamento de dados, facilidades gráficas e geração de relatórios.

A versão 2.2 do HEC-RAS, setembro de 1998, permite calcular somente no regime de escoamento permanente unidimensional. As equações de escoamento são baseadas unicamente na fórmula da resistência de Manning, dispensando a aplicação de teorias mais complexas.

O programa é capaz de modelar perfis de superfície d'água no regime subcrítico, supercrítico e misto. O procedimento básico de computação é baseado na solução da equação de energia unidimensional. São avaliadas as perdas de energia por fricção (equação de Manning) e contração ou expansão das seções transversais (coeficiente multiplicado pela velocidade principal). A equação de momento é utilizada nas situações de cálculo de escoamento no regime misto em ressaltos hidráulicos, pontes e na determinação dos níveis d'água nas confluências de rios.

As seguintes suposições estão implícitas nas expressões analíticas usadas pelo HEC RAS 2.2:

1. **Escoamento é permanente.** Não há condições dependentes do tempo na equação de energia;
2. **Escoamento é gradualmente variado.** A equação da energia (Bernoulli) está baseada na premissa da distribuição uniforme de pressões hidrostáticas em cada seção transversal. Nos locais onde o escoamento é rapidamente variado (estruturas hidráulicas como pontes, bueiros e barragens), o programa utiliza a equação de momento ou outras empíricas;
3. **Escoamento é unidimensional.** A energia cinética é a mesma para todos os pontos numa seção transversal. Os componentes da velocidade estão na mesma direção do fluxo;
4. **Canais de rios têm pequenos declives, inferiores a 1:10.** A pressão hidrostática é uma componente somente na direção Y da equação da energia, representada pela profundidade d'água medida verticalmente.

Descrição do Modelo Matemático

Os perfis de superfície d'água de uma seção até a vizinha são obtidos resolvendo-se a equação da energia através de um procedimento denominado método iterativo passo a passo. A equação da

Energia de Bernoulli⁴ que descreve o escoamento é escrita como (termos mostrados no diagrama):

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} + h_e \quad (1)$$

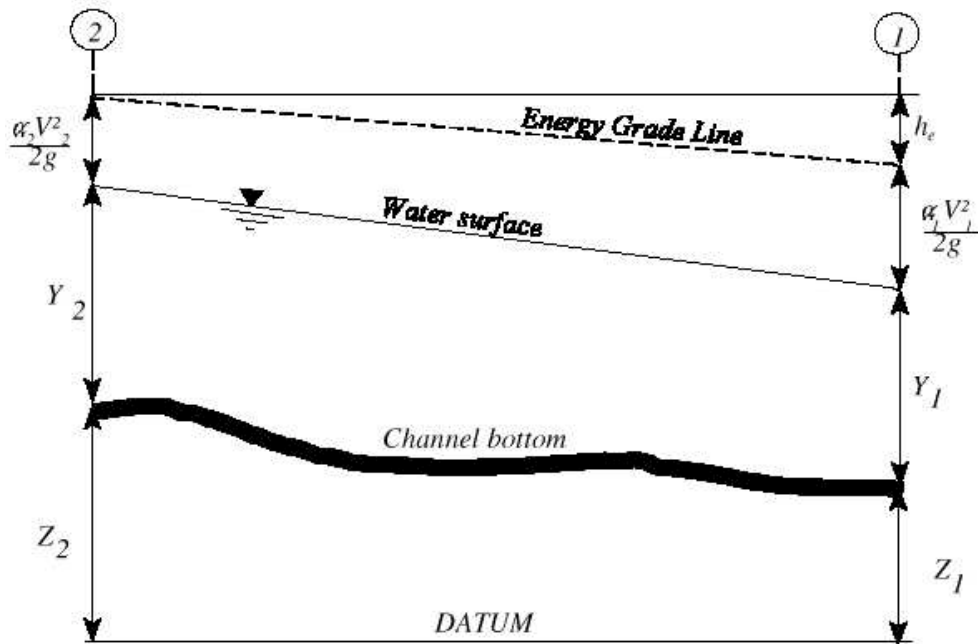


Figura 2 Representação dos Termos da Equação de Energia (HEC, 1998)

Onde:

- Y_1, Y_2 = profundidade da superfície d'água nas seções estudadas
- Z_1, Z_2 = elevação do fundo do canal principal
- V_1, V_2 = velocidades médias (vazão dividida pela área do escoamento em cada seção)
- α_1, α_2 = coeficientes de ponderação da velocidade
- g = aceleração gravitacional

A equação para o cálculo da energia das perdas de carga (h_e) entre duas seções resultante da fricção do fluido com as paredes do canal e por contração ou expansão das seções transversais é:

$$h_e = L \cdot \bar{S}_f + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} \right| \quad (2)$$

O primeiro e segundo termo dessa equação representam, respectivamente, a perda por fricção e a perda por contração ou expansão, onde:

- L = distância ponderada entre duas seções
- S_f = Declividade da linha da perda de carga por fricção entre duas seções
- C = coeficiente de perda por expansão ou contração das seções transversais

⁴ Em homenagem ao eminente matemático suíço Daniel Bernoulli que formulou esta equação em 1738.

A distância ponderada L entre duas seções é calculada através de:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (3)$$

Onde⁵:

- L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} = distância entre as seções específica para o fluxo na margem esquerda, canal principal, e margem direita, respectivamente.
- \bar{Q}_{lob} , \bar{Q}_{ch} , \bar{Q}_{rob} = média aritmética das vazões entre as seções na margem esquerda, canal principal, e margem direita, respectivamente.

A determinação da vazão total e da velocidade para cada seção transversal requer a subdivisão do escoamento em áreas onde a velocidade seja uniforme. O programa subdivide as áreas laterais nos pontos onde há mudança dos valores n (pontos de quebra) nas seções transversais:

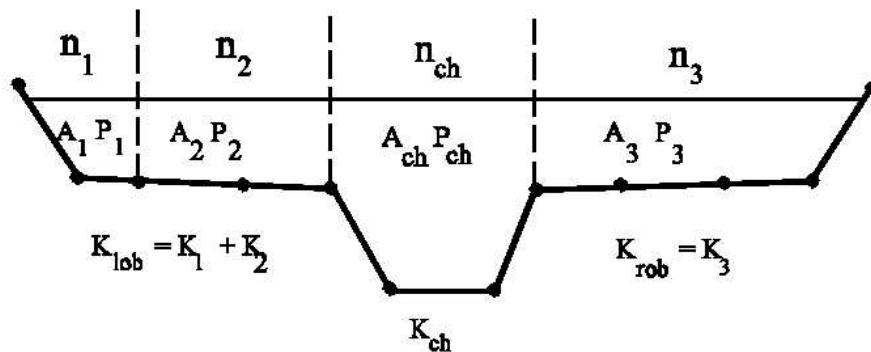


Figura 3 Subdivisão Padrão do HEC-RAS para Cálculos de Vazão (HEC, 1998)

A vazão em cada subdivisão é então calculada através da equação de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \bar{S}_f^{1/2} = K \cdot \bar{S}_f^{1/2} \quad \left\{ K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \right\} \quad (4)$$

Onde:

- K = Capacidade de vazão em cada subdivisão
- n = Coeficiente de rugosidade de Manning para a subdivisão
- A = Área do fluxo na subdivisão
- R = Raio hidráulico para subdivisão (área / perímetro molhado)

O programa soma todos os incrementos de vazões para obter uma vazão nas margens esquerda e direita. A vazão no canal principal é calculada como um único elemento de fluxo. A vazão total na seção transversal é obtida somando-se as vazões nestas três subdivisões.

⁵ A seção transversal pode ser dividida em canal principal e margens. O canal principal de um rio corresponde ao seu leito menor por onde a água escoava durante o período seco. A união do canal principal às margens constitui a seção transversal plena do escoamento, denominada leito maior, delimitada pela ocupação das margens no período de chuvas.

Como o HEC-RAS simula perfis unidimensionais da superfície d'água, somente uma única superfície d'água e consequentemente uma única energia cinética média são calculadas em cada seção transversal. Para uma dada elevação da superfície d'água, a energia cinética média é obtida calculando-se a energia cinética ponderada das três subdivisões da seção transversal.

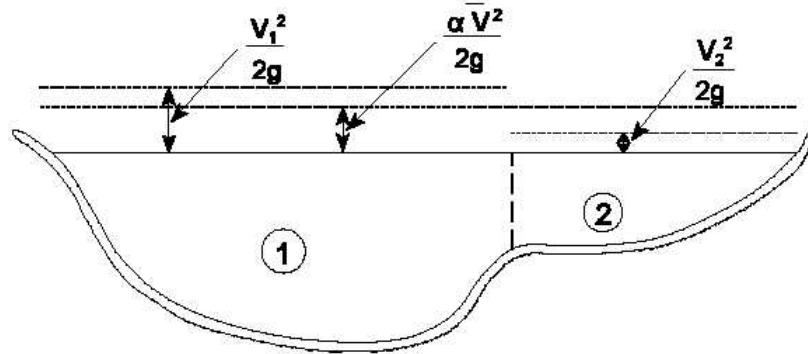


Figura 4 Exemplo de Como a Energia Cinética Média é Obtida (HEC, 1998)

Na Figura 4 somente foram mostradas duas subdivisões, onde:

- V_1 , V_2 = Velocidade Média para a Subárea 1 e Subárea 2, respectivamente

Para computar a energia cinética média deve-se determinar o coeficiente de ponderação (α) da velocidade principal, calculado como segue:

$$\alpha = \frac{Q_1 \cdot V_1^2 + Q_2 \cdot V_2^2 + \dots + Q_N \cdot V_N^2}{Q \cdot \bar{V}^2} \quad (5)$$

O coeficiente de velocidade (α) é calculado a partir dos três elementos de fluxo (margem esquerda, canal principal e margem direita) e também pode ser escrito em termos do fluxo e área.

A perda por fricção é avaliada no HEC-RAS como o produto de S_f e L (ver Equação 2). A fricção (inclinação da linha do gradiente de energia) em cada seção transversal é calculada através da equação de Manning como segue:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad (6)$$

A Equação (6) é automaticamente usada pelo HEC-RAS a menos que outra seja selecionada ⁶.

A perda por contração e expansão do escoamento é avaliada através da seguinte equação:

$$h_{c,e} = C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} \right| \quad (7)$$

O programa assume que uma contração ou expansão ocorre sempre que a velocidade principal à jusante é, correspondentemente, maior ou menor do que a de montante. Quando a mudança na

⁶ Há outras expressões alternativas disponíveis no HEC-RAS que podem ser selecionadas pelo usuário para a avaliação da declividade representativa da fricção (S_f). Ver o Capítulo 4 do Manual de Referência Hidráulica.

seção transversal de um rio é pequena, e o fluxo é subcrítico, os coeficientes de contração e expansão são tipicamente iguais a 0,1 e 0,3, respectivamente. Quando há uma mudança repentina na área efetiva da seção, os coeficientes de contração e expansão tipicamente empregados são iguais a 0,3 e 0,5, respectivamente. Ocasionalmente, os coeficientes de contração e expansão em pontes e bueiros podem ter valores maiores como 0,6 e 0,8, respectivamente.

A elevação da superfície d'água (nível d'água) desconhecida numa seção transversal é determinada por uma solução iterativa das Equações (1) e (2):

1. Assume-se uma elevação da superfície d'água na seção transversal à montante (ou na seção transversal à jusante se um perfil supercrítico está sendo calculado);
2. A partir da elevação da superfície d'água assumida, determina-se a capacidade total de vazão (K) e a velocidade principal (V) correspondente;
3. Com os valores obtidos no passo 2, calcula-se S_f através da Equação (6) e resolve-se a Equação (2) para h_c ;
4. Com os valores dos passos 2 e 3, resolve-se a Equação (1) para o NA_2 (nível d'água na segunda iteração);
5. Compara-se o valor calculado de NA_2 com o valor assumido no passo 1;
6. Repete-se os passos 1 a 5 até os valores convergirem com uma tolerância igual a 3 mm ou a que for definida pelo usuário.

As elevações da superfície d'água no procedimento iterativo variam a cada tentativa. A mudança para a próxima tentativa é limitada a um máximo de $\pm 50\%$ da profundidade assumida na tentativa anterior. O número máximo de iterações para balancear a superfície d'água é limitado a 20 (predefinido). Durante sua execução o programa armazena a superfície d'água que produz o mínimo erro entre os valores assumidos e calculados, denominada superfície d'água com mínimo erro. Se o número máximo de iterações é alcançado antes que uma superfície d'água estável seja fixada, o programa calculará então a profundidade crítica (se já não tiver terminado).

Para um perfil subcrítico, o programa calcula o número de Froude da superfície d'água balanceada para o canal principal e a seção transversal inteira. Se qualquer um destes dois valores for maior do que 0,94, então o programa verificará o regime de escoamento calculando uma estimativa mais precisa da profundidade crítica através do método da energia específica mínima.

O programa HEC-RAS utiliza dois métodos para calcular a profundidade crítica:

- Método parabólico (predefinido pelo programa) e
- Método da secante.

O método parabólico é mais rápido computacionalmente, mas localiza uma única energia mínima. Para a maioria das seções transversais haverá um só mínimo na curva da energia total. Se o método parabólico é aplicado e não converge, então o programa executa o método da secante.

3 Aspectos da Determinação do Coeficiente de Manning

Derivada da equação para o cálculo das vazões (Equação 4), a rugosidade hidráulica no regime crítico ($V_1 = V_2$) entre duas seções pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$n = \frac{A \cdot R^{2/3} \cdot S_f^{1/2}}{Q} = \frac{A \cdot R^{2/3}}{Q} \cdot \left(\frac{NA_2 - NA_1}{L} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Conforme a Equação (8), a tendência para um rio sem confluências ou alterações bruscas na sua geometria é: o nível d'água ($\Delta NA = NA_2 - NA_1$) aumenta com o acréscimo da rugosidade, para uma mesma vazão; e a vazão diminui com o aumento da rugosidade, para um mesmo nível d'água.

Segundo Tucci (1998), numa mesma seção a rugosidade decresce com o aumento do nível d'água, variando-se a vazão. Quando ocorre o transbordamento da seção a rugosidade aumenta rapidamente até decrescer novamente. Esta tendência se altera quando há grande mudança nas características do leito ou nas margens devido à vegetação. A vegetação cresce fora dos limites do leito maior definido pela cota de enchente. Quando o rio ultrapassa esses limites a rugosidade volta a aumentar devido à presença da vegetação. Em geral é adotada uma rugosidade média para cada seção, mas quando a variação do nível d'água durante uma cheia é muito grande deve-se considerar diferentes valores da rugosidade na seção transversal.

A correta seleção do coeficiente n de Manning tem influência significativa na precisão dos perfis de superfície d'água computados. Conforme o HEC (1997), o valor do coeficiente n de Manning é altamente variável e depende de vários fatores: aspereza da superfície do leito, vegetação, irregularidades no canal, alinhamento do canal, erosão e deposição de sedimentos, obstruções, tamanho e forma do canal, perfis e vazões, temperatura, material sólido em suspensão.

Chow (1959) apresenta os valores típicos do coeficiente n de Manning para diversos tipos de canais naturais. A referência para condições semelhantes ao Rio Araguaia é a seguinte:

- Limites de n do canal principal para rios em planícies:
 - $0,050 < n < 0,080$ (trechos lentos, vegetação aquática, depressões profundas)
- Limites de n das margens para rios com transbordamento (área de inundação):
 - $0,020 < n < 0,040$ (cultivada, colheitas sazonais)
 - $0,070 < n < 0,160$ (vegetação média a densa no verão)

Tucci (1998) afirma que a maior dificuldade no uso de modelos hidráulicos é a falta de dados batimétricos e o nivelamento das seções. A rugosidade ao longo de um rio pode ser estimada através da leitura de réguas limnimétricas espaçadas entre cem a mil metros. As réguas limnimétricas devem estar niveladas e referenciadas a uma rede de nivelamento de maior ordem de precisão a fim de evitar-se a propagação de erros no nivelamento.

4 Estudos de Simulação no Trecho Santa Maria das Barreiras – Xambioá

O trecho entre as cidades de Santa Maria das Barreiras e Xambioá com 373 km de extensão foi alvo de estudos em 1998⁷. Seu traçado apresenta algumas curvas e desenvolve-se inteiramente na direção sul-norte. As margens esquerda e direita do Rio Araguaia delimitam, respectivamente, os estados Pará e Tocantins (ver Figura 5).

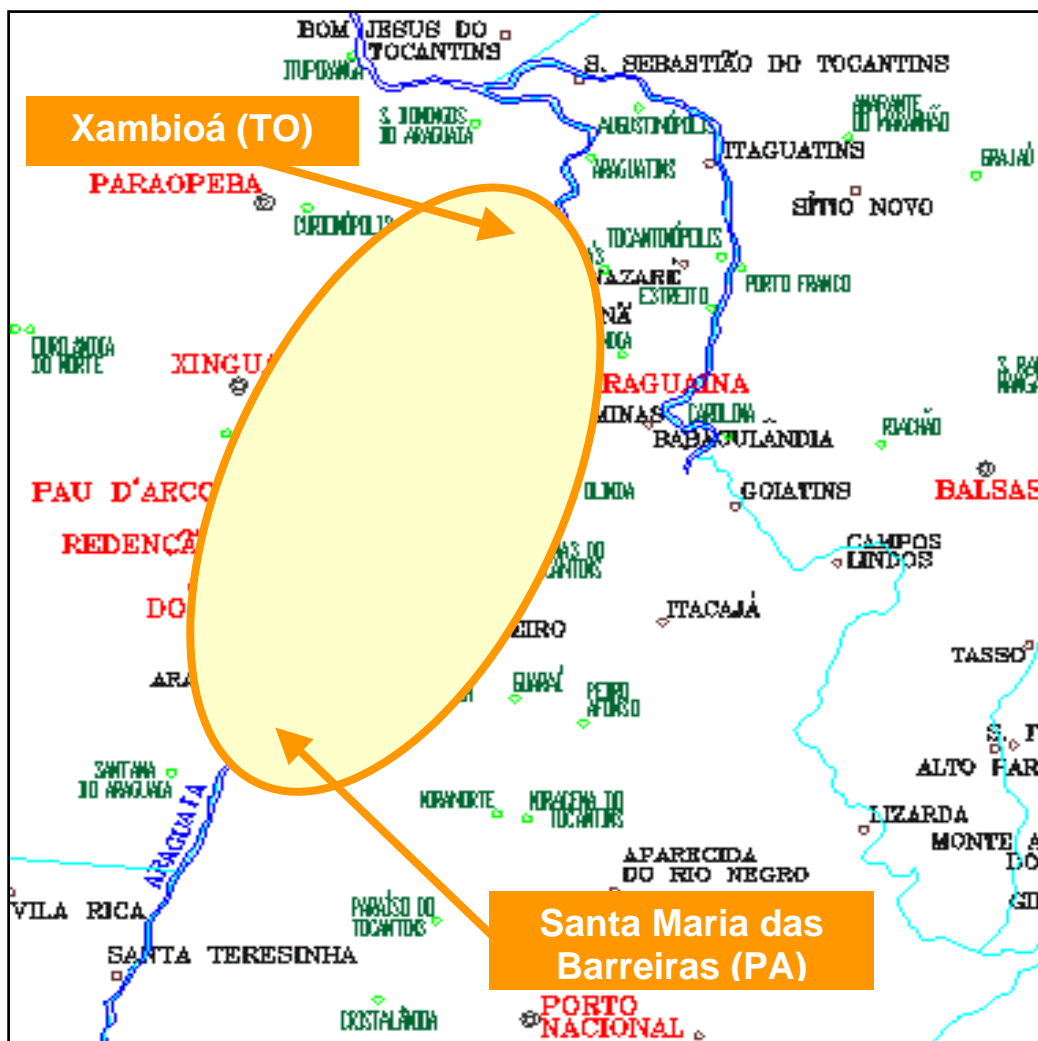


Figura 5 Localização do Trecho de Estudo (INTERNAVE, 1998)

A área de drenagem da bacia do Rio Araguaia em Santa Maria das Barreiras é igual a 298,6 mil km² e em Xambioá é de 364,5 mil km². Assim, o Rio Araguaia drena, no trecho considerado, uma área igual a 65,9 mil quilômetros quadrados. Este trecho tem acentuada predominância do comprimento em relação à largura, 373 km de extensão por 178 km de largura, apresentando poucos afluentes de porte.

O regime de vazões do Rio Araguaia é semelhante ao do Centro-Sul do Brasil, com período

⁷ A Administração das Hidrovias Tocantins-Araguaia (AHITAR) gentilmente cedeu todos os relatórios da empresa INTERNAVE Engenharia (6 volumes) para a realização deste trabalho de pesquisa com o modelo HEC-RAS 2.2 .

de cheias nos meses de dezembro a abril e período de estiagem nos meses de maio a novembro. No hidrograma abaixo verifica-se que as vazões em Xambioá são maiores do que as correspondentes em Conceição do Araguaia. O acréscimo de vazões (excedente hídrico) entre estes dois postos fluviométricos resulta da contribuição lateral da bacia de drenagem, elevação do nível do lençol freático, e vazão afluyente dos tributários.

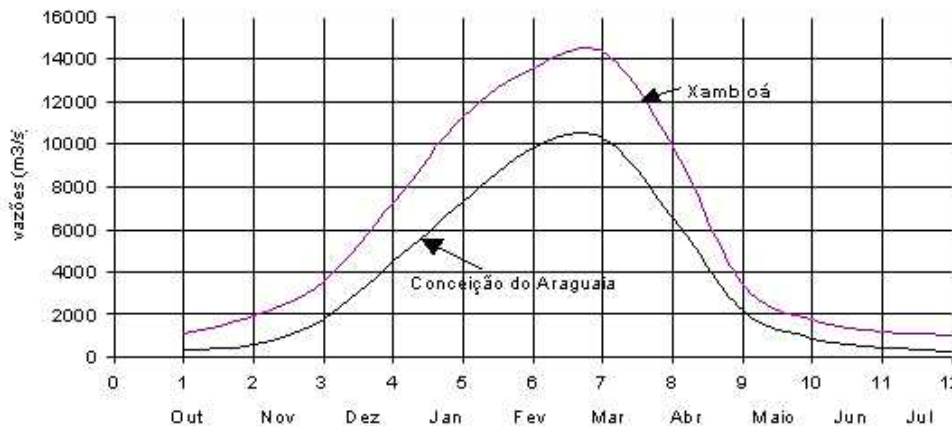


Figura 6 Hidrograma de Vazões Médias de Longo Período (INTERNAVE, 1998)

Consultando os relatórios da empresa INTERNAVE Engenharia foram coletados vários dados geométricos, hidrológicos e hidráulicos:

1. Coordenadas UTM (X,Y) do Eixo do Rio;
2. Coordenadas UTM (X,Y) das extremidades das margens das 59 seções transversais;
3. Levantamentos batimétricos das 59 seções transversais geo-referenciados ao SAD-69;
4. Vazões e Níveis d'Água de Projeto para a Navegação nos postos fluviométricos de Conceição do Araguaia e Xambioá provenientes das séries estatísticas de vazões com frequência anual de 90% do tempo, maior ou igual, para o período de recorrência 10 anos:

Tabela 1 Vazões e Níveis d'Água de Projeto para a Navegação Fluvial

POSTO	VAZÃO DE PROJETO $Q_{90\%/TR=10}$ (m ³ /s)	NÍVEL D'ÁGUA (cm)
Conceição do Araguaia	636	209
Xambioá	779	184

Fonte: INTERNAVE, 1998

5. Níveis d'Água de Projeto para a Navegação nos 57 postos hidrométricos estabelecidos por correlações sucessivas dos níveis d'água coletados na rede hidrométrica no período de junho a outubro de 1998, partindo-se dos postos de Conceição do Araguaia e Xambioá
6. Parâmetros hidráulicos das 59 Seções Transversais (STs), como:
 - Distância entre as STs ($L_{canal} = L_{margens}$)

- Áreas de Drenagem acumuladas para cada ST
- Coeficientes de Manning em cada ST obtidos pela INTERNAVE ($n_{canal} = n_{margens}$)
- Limites do canal principal em cada ST iguais à largura das mesmas;

7. Parâmetros geométricos da Ponte Couto de Magalhães em Conceição do Araguaia (PA);



Figura 7 Ponte Couto de Magalhães sobre o Rio Araguaia (AHITAR, 2000)

8. Curva Chave em Xambioá (TO) como condição de contorno à jusante do trecho;

Efetuiu-se a transferência linear de vazões entre Santa Maria das Barreiras e Xambioá em função da área de drenagem. Na ausência de informações hidrológicas linearizou-se o excesso hídrico no trecho de estudo. Conhecendo-se as vazões e áreas de drenagem medidas nestes dois postos fluviométricos estabeleceu-se a equação da reta que correlaciona vazões e áreas de drenagem (ver a Figura 8 abaixo). Substituindo-se o valor das áreas de drenagem determinadas pela INTERNAVE para as demais seções calcula-se as vazões correspondentes.

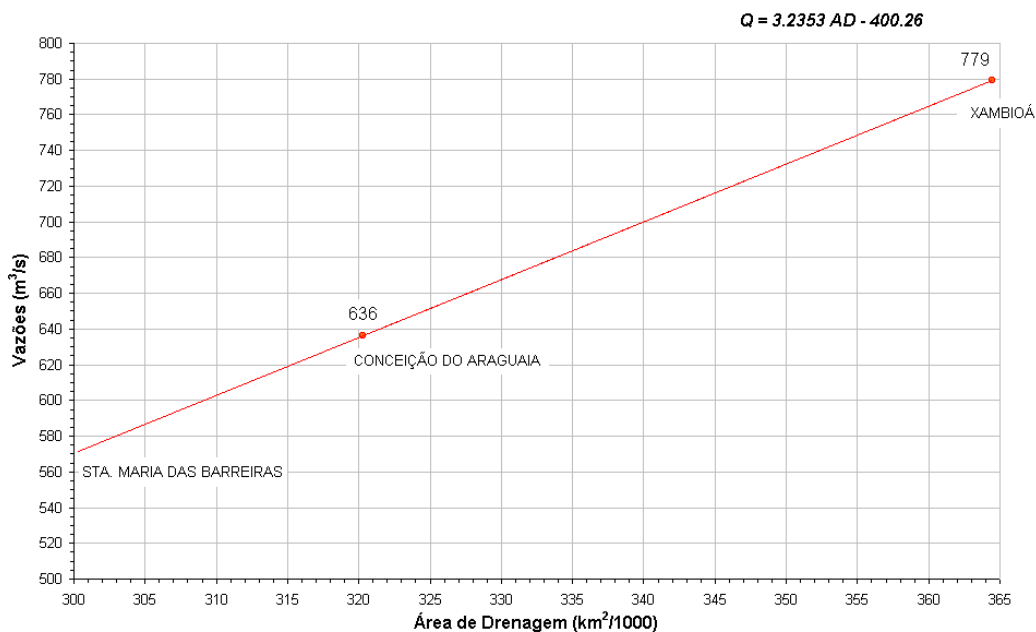


Figura 8 Transferência Linear de Vazões (Santa Maria das Barreiras a Xambioá)

Todos os dados coletados foram testados e verificados quanto a sua consistência através do cruzamento das informações existentes nos diversos relatórios. Os parâmetros gerais de modelagem especificados no modelo HEC-RAS 2.2 para simulação de todo o trecho são mostrados abaixo:

Tabela 2 Parâmetros Gerais de Modelagem do HEC-RAS 2.2⁸

PARÂMETROS DO MODELO	CÁLCULO
Regime	Subcrítico
Capacidade de Vazão	Somente nas mudanças dos valores de n
Gradiente Hidráulico (perdas por fricção)	Programa seleciona o método apropriado
Tolerância para cálculo da superfície d'água	0,001 m
Tolerância no cálculo da profundidade crítica	0,01 m
Número máximo de iterações	20
Diferença Máxima de tolerância	0,10 m
Fator de tolerância do escoamento	0,001
Opção de cálculo da profundidade crítica	Sempre calculada
Método de cálculo da profundidade crítica	Parabólico (mais rápido)
Checar os dados	Antes de executar o programa
Parâmetros de Modelagem da Ponte Couto Magalhães	
Métodos de Cálculo para Pequenas Vazões	Energia (Método Padrão); Momento e Yarnell (Classe A somente)
Coefficiente de Arraste (Cd)	2,0 (pilar retangular)
Coefficiente de Yarnell da Forma dos Pilares (k)	1,25 (pilar retangular)
Resposta do Programa	Maior Energia

Após inserir a base de dados no modelo HEC-RAS 2.2 é realizada a primeira simulação do trecho Santa Maria das Barreiras a Xambioá. A figura abaixo mostra os níveis d'água simulados para a vazão de projeto nas proximidades da ponte Couto Magalhães:

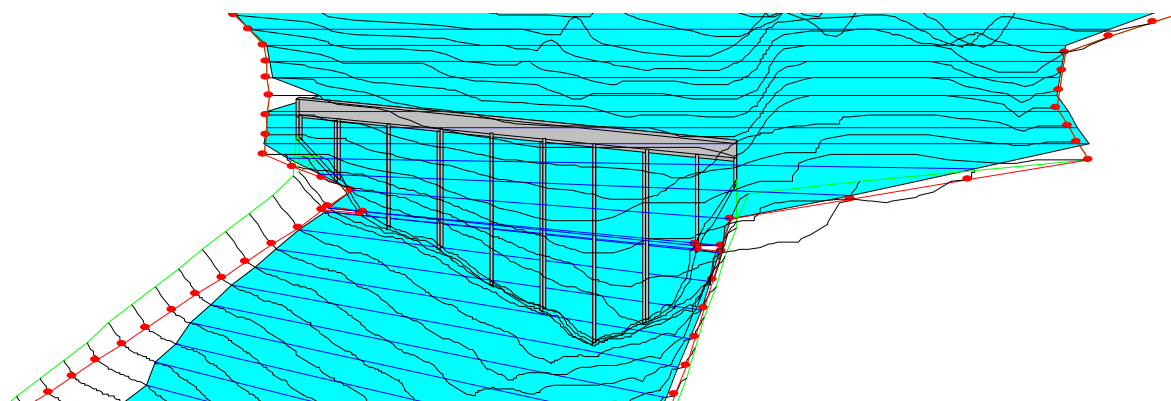


Figura 9 Simulação dos Níveis d'Água com o HEC-RAS 2.2 (Ponte Couto Magalhães)

⁸ Estes parâmetros são especificados no menu **Options** e no menu **Bridge Culvert Data**.

Os níveis d'água simulados com o modelo HEC-RAS 2.2 para o trecho Santa Maria das Barreiras (PA) a Xambioá (TO) podem ser visualizados no gráfico abaixo:

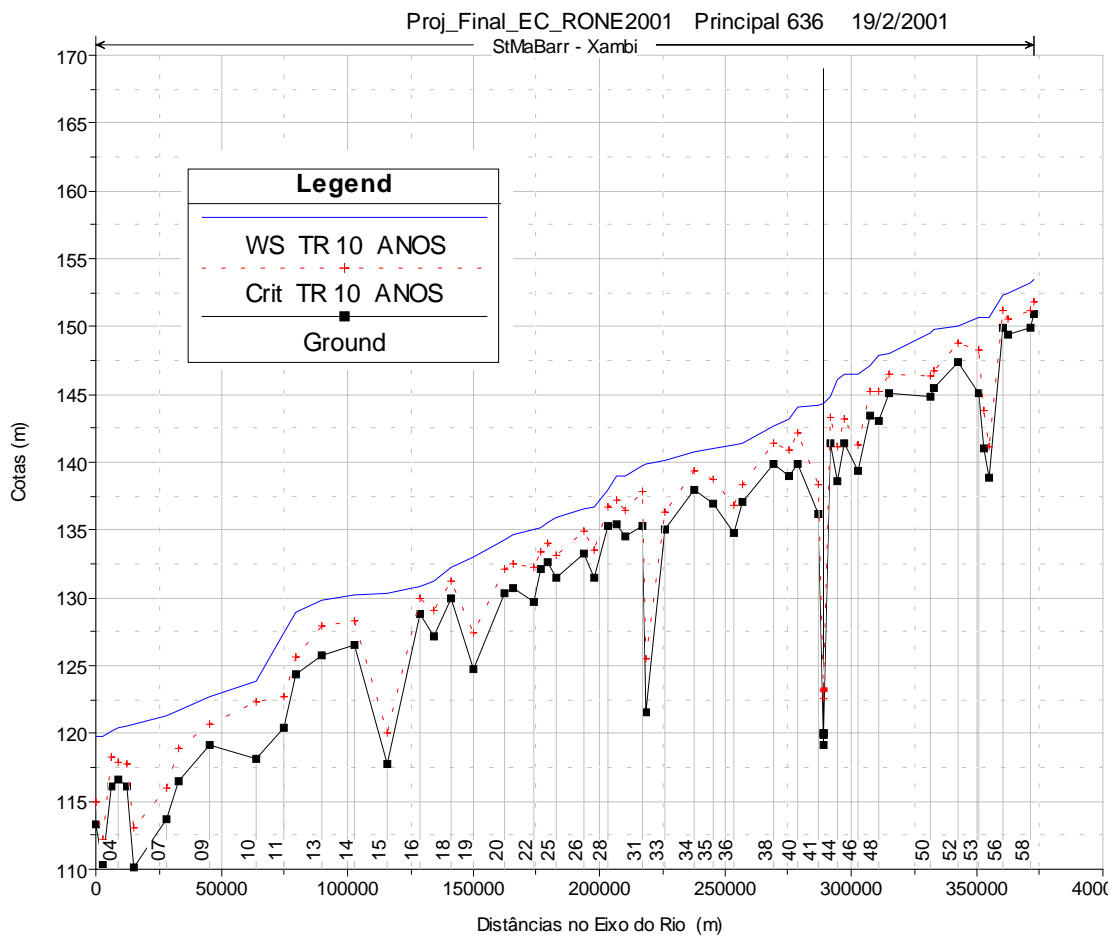


Figura 10 Níveis d'Água Simulados com o Modelo HEC-RAS 2.2

Na figura acima estão representados os perfis dos níveis d'água (cor azul) e a profundidade crítica (cor vermelha). As seções transversais estão numeradas em ordem crescente no sentido da foz para as nascentes (convenção adotada pelo HEC-RAS). A linha vertical entre as seções S41 e S44 corresponde à ponte Couto de Magalhães. Nesta simulação não foram interpoladas seções entre as 59 seções principais. O programa exibiu mensagens alertando sobre a necessidade de introduzir mais seções transversais em praticamente todo o trecho.

O perfil da profundidade crítica simulada encontra-se muito abaixo do perfil dos níveis d'água em todo o trecho de estudo. Verificou-se que o maior Número de Froude obtido é igual a 0,18 (seção S56), muito inferior ao número crítico (1,0). No trecho de estudo a maior velocidade simulada é igual a 0,58 m/s (seções S53 e S3). Isso comprova que o regime de escoamento é realmente subcrítico. Portanto não há impedimento à navegação quanto às velocidades nas seções.

Os níveis d'água simulados com o modelo HEC-RAS 2.2 e os níveis d'água observados são comparados na Figura 11.

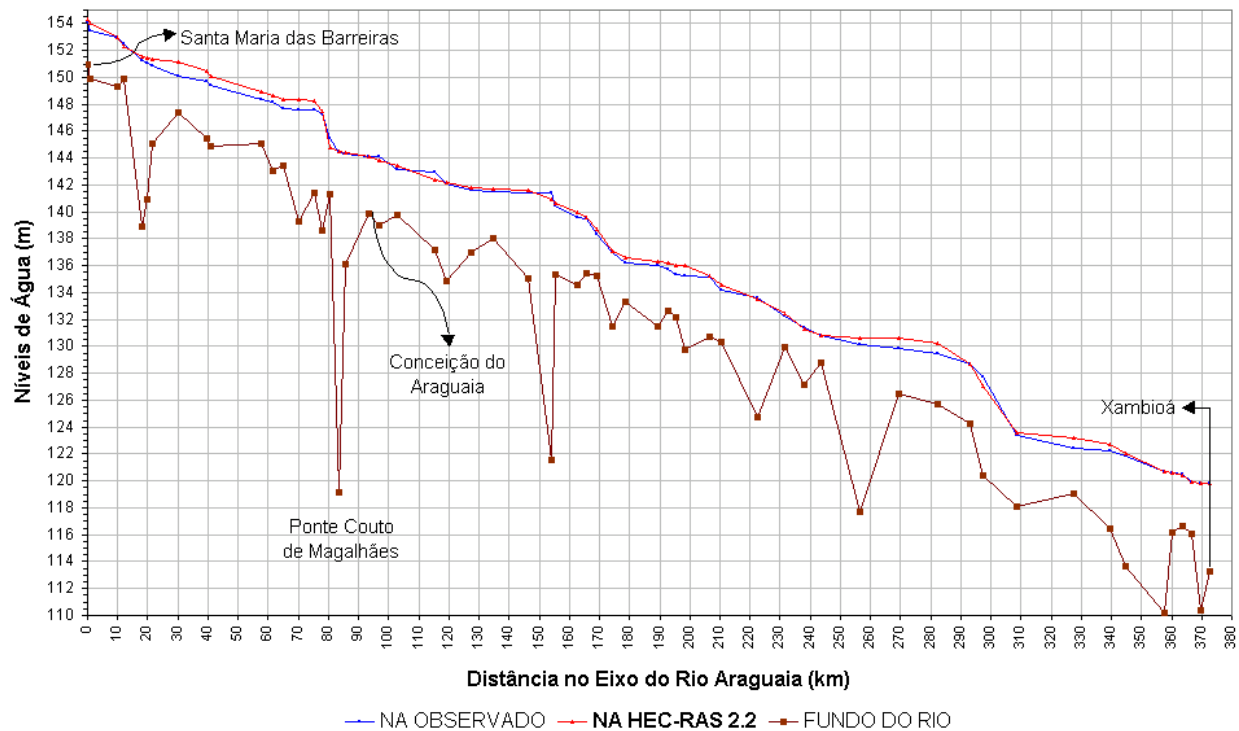


Figura 11 Níveis d'Água simulados com o HEC-RAS 2.2⁹

A INTERNAVE desenvolveu e utilizou um modelo hidrodinâmico unidimensional que resolve as equações de Saint-Venant para o regime de escoamento não permanente. A equação de resistência de Manning utilizada pelo modelo HEC-RAS 2.2 é um caso particular das equações de Saint-Venant, válida somente para o regime permanente ou gradualmente variado. Contudo, na Tabela 3 (ver adiante) verifica-se vinte coeficientes de Manning fora da faixa de valores aceitos internacionalmente como, por exemplo, $0,41 \text{ s/m}^{1/3}$ na seção S32 e $0,01 \text{ s/m}^{1/3}$ na seção S22.

Analisando o gráfico apresentado, nota-se que os níveis d'água simulados com o modelo HEC-RAS 2.2 no trecho Santa Maria das Barreiras (PA) a Xambioá (TO) não se ajustaram bem aos níveis d'água observados. O desvio padrão dos níveis d'água simulados com o HEC-RAS é próximo de 37 cm (ver a Tabela 3), indicando uma elevada dispersão dos resultados. Isto obriga a efetuar uma calibração do modelo com coeficientes de rugosidade diferentes dos determinados pela INTERNAVE. Para esta finalidade selecionou-se um trecho de menor extensão à montante da cidade de Conceição do Araguaia (descrito em seguida).

As operações de calibração efetuadas pela INTERNAVE ajustaram o nível d'água simulado com precisão inferior a um centímetro (1,0 cm). Neste trabalho será determinada uma precisão compatível com a realidade física das medições efetuadas no sistema fluvial estudado.

⁹ Cotas do fundo do rio corrigidas.

Tabela 3 Simulações da INTERNAVE e com o Modelo HEC-RAS 2.2 para a Vazão de Projeto
(Santa Maria das Barreiras - Xambioá)

SEÇÕES HEC RAS	DIST. ACUMUL. (km)	COTA DO FUNDO (m)	NA OBSERV (m)	COTAS DOS NÍVEIS DE ÁGUA SIMULADOS				COEF. DE MANNING ¹ n (s/m ^{1/3})
				INTERNAVE (m)	Δ NA _{OBS-INAVE} (m)	HECRAS (m)	Δ NA _{OBS-HEC} (m)	
59	0.0	150.916	<u>154.156</u>	154.156	0.000	154.355	-0.199	<u>0.183</u>
58	1.0	149.898	<u>153.494</u>	153.493	+0.001	154.047	-0.553	0.039
57	10.0	149.361	<u>152.997</u>	153.002	-0.005	152.940	+0.057	0.074
56	12.0	149.904	<u>152.534</u>	152.551	-0.017	152.313	+0.221	<u>0.022</u>
55	18.0	138.873	<u>151.249</u>	151.251	-0.002	151.554	-0.305	<u>0.225</u>
54	20.0	140.970	<u>151.076</u>	151.079	-0.003	151.430	-0.354	0.074
53	21.5	145.100	<u>150.879</u>	150.867	+0.012	151.383	-0.504	0.033
52	30.0	147.380	<u>150.114</u>	150.111	+0.003	151.190	-1.076	<u>0.013</u>
51	39.5	145.478	<u>149.694</u>	149.693	+0.001	150.436	-0.742	0.112
50	41.0	144.878	<u>149.434</u>	149.429	+0.005	150.133	-0.699	0.080
49	57.5	145.076	<u>148.355</u>	148.353	+0.002	148.904	-0.549	0.034
48	61.5	143.088	<u>148.191</u>	148.193	-0.002	148.628	-0.437	0.068
47	65.0	143.421	<u>147.717</u>	147.715	+0.002	148.380	-0.663	0.062
46	70.0	139.327	<u>147.554</u>	147.556	-0.002	148.311	-0.757	<u>0.010</u>
45	75.5	141.375	<u>147.542</u>	147.541	+0.001	148.230	-0.688	0.108
44	78.0	138.583	<u>147.269</u>	147.268	+0.001	147.495	-0.226	<u>0.298</u>
43	80.5	141.348	<u>145.486</u>	145.481	+0.005	144.781	+0.705	0.078
42	83.5	119.180	<u>144.364</u>	144.370	-0.006	144.452	-0.088	0.143
41	85.5	136.154	<u>144.272</u>	144.285	-0.013	144.437	-0.165	0.078
40	93.5	139.857	<u>144.075</u>	144.093	-0.018	144.076	-0.001	<u>0.024</u>
39	97.0	138.998	<u>144.067</u>	144.067	0.000	143.834	+0.233	0.053
38	103.0	139.818	<u>143.170</u>	143.696	-0.526	143.458	-0.288	0.038
37	115.5	137.133	<u>142.930</u>	142.934	-0.004	142.336	+0.594	<u>0.180</u>
36	119.0	134.813	<u>142.107</u>	142.106	+0.001	142.184	-0.077	0.096
35	127.5	137.005	<u>141.595</u>	141.599	-0.004	141.838	-0.243	0.033
34	134.5	138.020	<u>141.483</u>	141.483	0.000	141.748	-0.265	<u>0.023</u>
33	146.5	135.057	<u>141.428</u>	141.429	-0.001	141.646	-0.218	0.027
32	154.0	121.545	<u>141.397</u>	141.403	-0.006	140.924	+0.473	<u>0.410</u>
31	155.5	135.298	<u>140.473</u>	140.468	+0.005	140.598	-0.125	0.115
30	162.5	134.581	<u>139.580</u>	139.578	+0.002	139.964	-0.384	0.060
29	165.5	135.429	<u>139.466</u>	139.463	+0.003	139.614	-0.148	0.136
28	169.0	135.252	<u>138.374</u>	138.373	+0.001	138.689	-0.315	0.104
27	174.5	131.457	<u>137.019</u>	137.022	-0.003	137.075	-0.056	0.107
26	178.5	133.271	<u>136.240</u>	136.230	+0.010	136.554	-0.314	0.030
25	189.5	131.460	<u>135.971</u>	135.885	+0.086	136.325	-0.354	<u>0.023</u>
24	193.0	132.637	<u>135.770</u>	135.780	-0.010	136.171	-0.401	0.069
23	195.5	132.180	<u>135.389</u>	135.388	+0.001	136.038	-0.649	0.045
22	198.5	129.708	<u>135.232</u>	135.236	-0.004	135.997	-0.765	<u>0.010</u>
21	206.5	130.765	<u>135.107</u>	135.102	+0.005	135.236	-0.129	0.128
20	210.5	130.360	<u>134.170</u>	134.170	0.000	134.568	-0.398	0.073
19	222.5	124.727	<u>133.636</u>	133.640	-0.004	133.541	+0.095	0.085
18	231.5	129.945	<u>132.288</u>	132.291	-0.003	132.451	-0.163	0.042
17	238.0	127.126	<u>131.360</u>	131.369	-0.009	131.314	+0.046	0.041
16	243.5	128.766	<u>130.818</u>	130.816	+0.002	130.776	+0.042	<u>0.013</u>
15	256.5	117.699	<u>130.133</u>	130.133	0.000	130.636	-0.503	0.034
14	269.5	126.519	<u>129.883</u>	129.878	+0.005	130.577	-0.694	<u>0.023</u>
13	282.5	125.742	<u>129.421</u>	129.429	-0.008	130.219	-0.798	0.047
12	293.0	124.304	<u>128.709</u>	128.714	-0.005	128.657	+0.052	<u>0.178</u>
11	297.5	120.451	<u>127.695</u>	127.642	+0.053	127.102	+0.593	0.100
10	308.5	118.080	<u>123.375</u>	123.369	+0.006	123.589	-0.214	<u>0.022</u>
9	327.5	119.095	<u>122.400</u>	122.396	+0.004	123.174	-0.774	<u>0.023</u>
8	339.5	116.424	<u>122.200</u>	122.201	-0.001	122.684	-0.484	0.079
7	344.5	113.629	<u>121.885</u>	121.890	-0.005	122.085	-0.200	0.148
6	357.5	110.182	<u>120.722</u>	120.725	-0.003	120.717	+0.005	0.110
5	360.0	116.129	<u>120.594</u>	120.597	-0.003	120.590	+0.004	0.036
4	363.5	116.668	<u>120.521</u>	120.521	0.000	120.409	+0.112	0.071
3	366.5	116.107	<u>119.949</u>	119.951	-0.002	119.897	+0.052	<u>0.021</u>
2	369.5	110.426	<u>119.840</u>	119.840	0.000	119.850	-0.010	<u>0.021</u>
1	372.5	113.261	<u>119.830</u>	119.830	0.000	119.847	-0.017	<u>0.021</u>
MÉDIA ARITMÉTICA				-	-0.008	-	-0.232	+0.079
DESVIO PADRÃO (POPULAÇÃO)				-	+0.070	-	+0.366	+0.072

Legenda:

¹ Valores sublinhados em verde estão acima de 0,160 ou abaixo de 0,025 s/m^{1/3} (fora da faixa de rugosidade estabelecida por Chow, *Open Channel Hydraulics*, 1959).

4.1 Calibração do Modelo no Trecho Piloto

Para a calibração do modelo HEC RAS 2.2 foi selecionado o trecho à montante de Conceição do Araguaia, cuja extensão é de 15,5 km. A quantidade de dados hidráulicos e hidrológicos disponíveis nesse trecho é muito superior aos demais trechos, justificando sua escolha. Na Figura 12 são observadas algumas características importantes do trecho piloto:

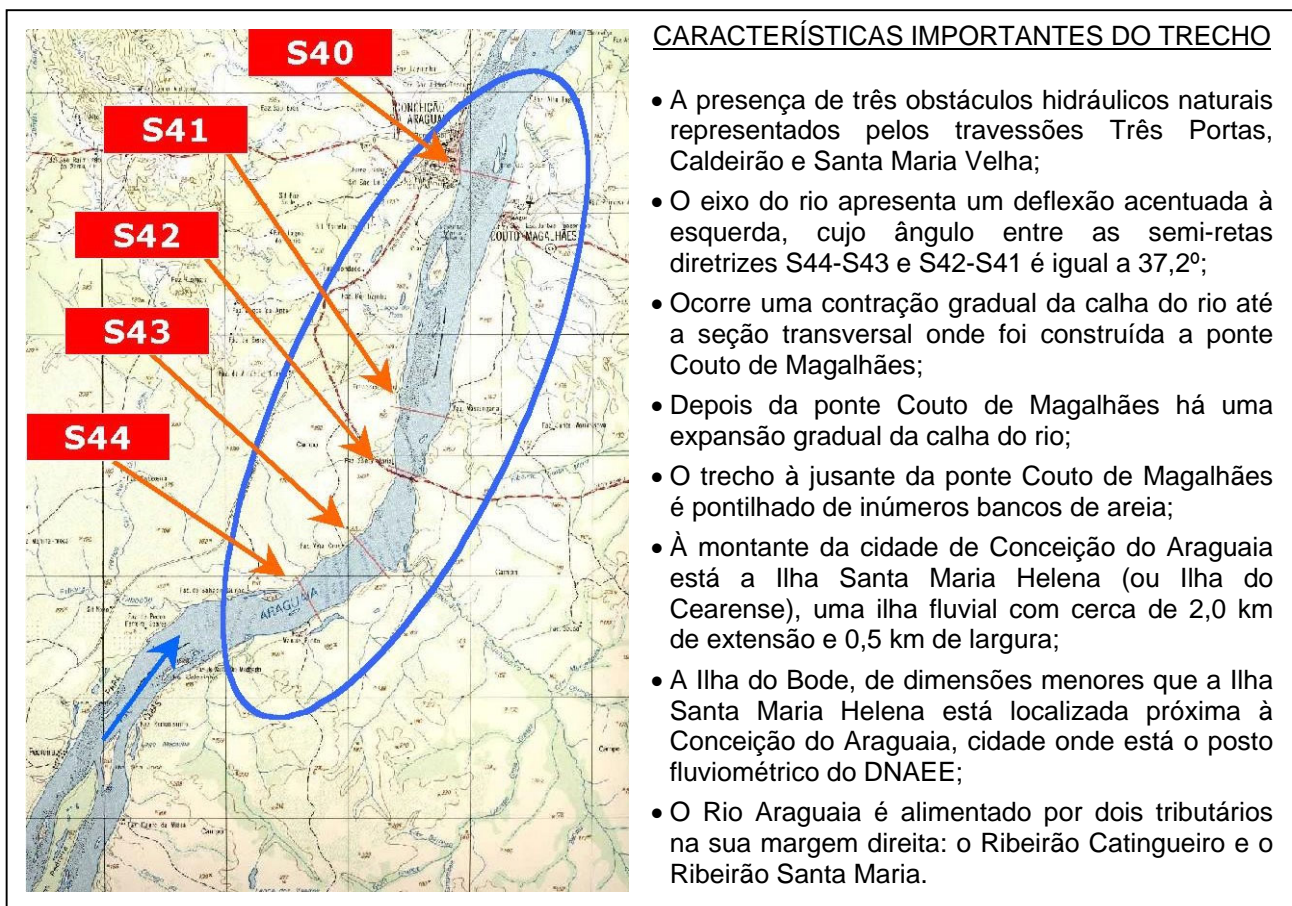


Figura 12 Localização do Trecho Piloto (Cartografia IBGE, 1979)

O perfil longitudinal do Rio Araguaia no trecho piloto é mostrado na Figura 13 (ver adiante). Analisando esta figura, algumas observações adicionais podem ser feitas:

- O perfil longitudinal é muito acidentado pois há uma profunda fossa junto à ponte Couto de Magalhães, com cerca de 22 m de desnível do leito do rio em 5,0 km de extensão;
- Há um pronunciado rebaixamento do nível d'água à montante da ponte Couto de Magalhães igual a 2,90 m (seções S44 a S42), enquanto à jusante da ponte (seções S42 a S40) esse valor é de apenas 0,30 m;
- A declividade média do perfil da superfície d'água no trecho à montante da Ponte Couto de Magalhães é cerca de 17 vezes mais íngreme do que à jusante.

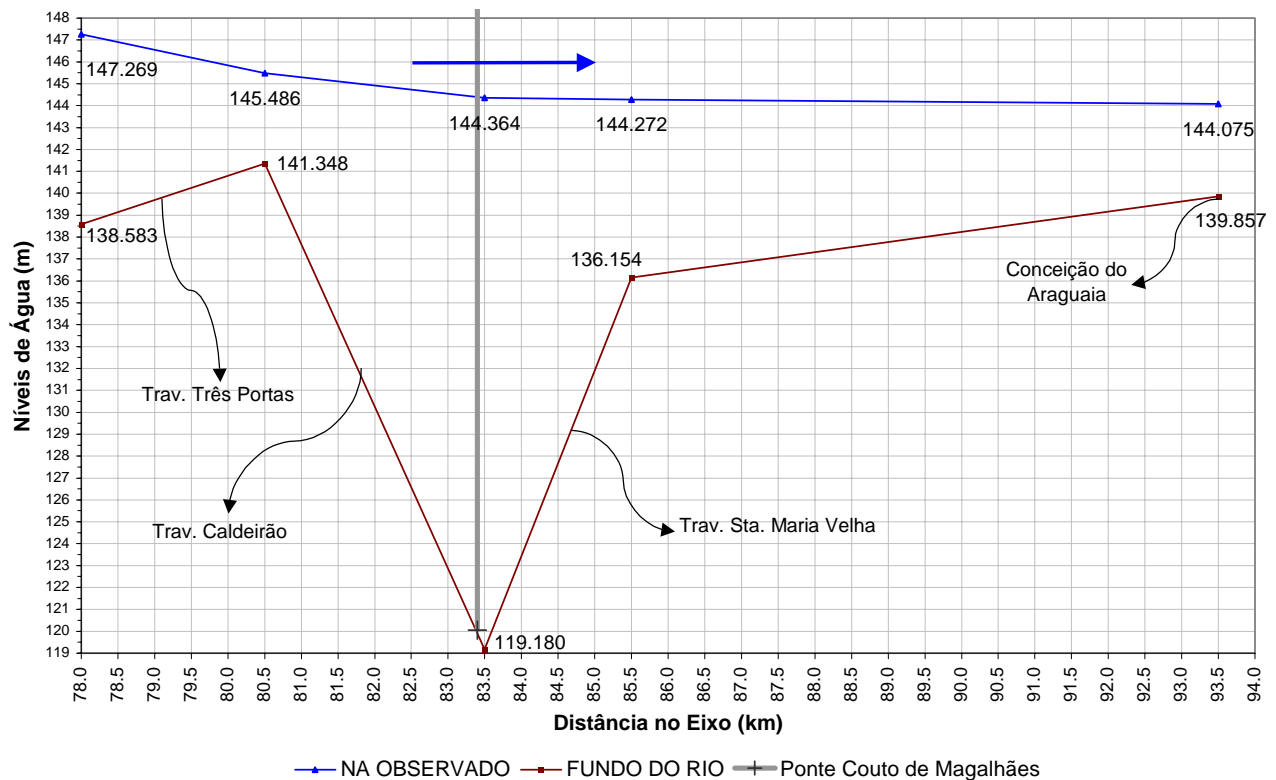


Figura 13 Perfil Longitudinal do Rio Araguaia no Trecho Piloto

O alvo da calibração deste trabalho são os coeficientes de rugosidade de Manning. Alterando-se os valores destes coeficientes procede-se ao ajuste entre os níveis d'água observados e os níveis d'água simulados pelo modelo. Este ajuste deverá ser realizado com uma precisão compatível diante das incertezas inerentes aos processos de medição. Calibrar o modelo com uma precisão superior à necessária significa desperdiçar tempo com simulações adicionais.

Segundo Rusteberg (2000), a determinação da vazão em rios pelo processo de medição de velocidades (molinete) apresenta precisão de até 5%. Assim, adotando-se uma precisão de 4% nos cálculos da vazão, verifica-se a maior variação dos níveis d'água simulados com o HEC-RAS 2.2. Introduzindo-se no modelo as vazões distribuídas no trecho piloto acrescidas de 4% obteve-se uma variação média da elevação do perfil da superfície d'água igual a 3,4 cm. Dessa forma, o valor 3 cm é a maior diferença admitida no ajuste dos níveis d'água simulados aos observados. Esta precisão é obedecida em todas as operações de calibração com o modelo HEC-RAS 2.2 no trecho piloto.

Em seguida, é efetuada a calibração dos coeficientes de Manning no regime subcrítico no sentido da seção à jusante do trecho piloto para montante (S40 até S44). A metodologia de calibração é mostrada na forma de um fluxograma (ver Figura 14 adiante). Os valores obtidos na primeira calibração dos coeficientes de Manning, conforme o fluxograma, são mostrados resumidamente (apenas a primeira e última tentativa) na Tabela 4. Os parâmetros de simulação são provenientes dos Estudos de Simulação do Trecho Santa Maria das Barreiras a Xambioá.

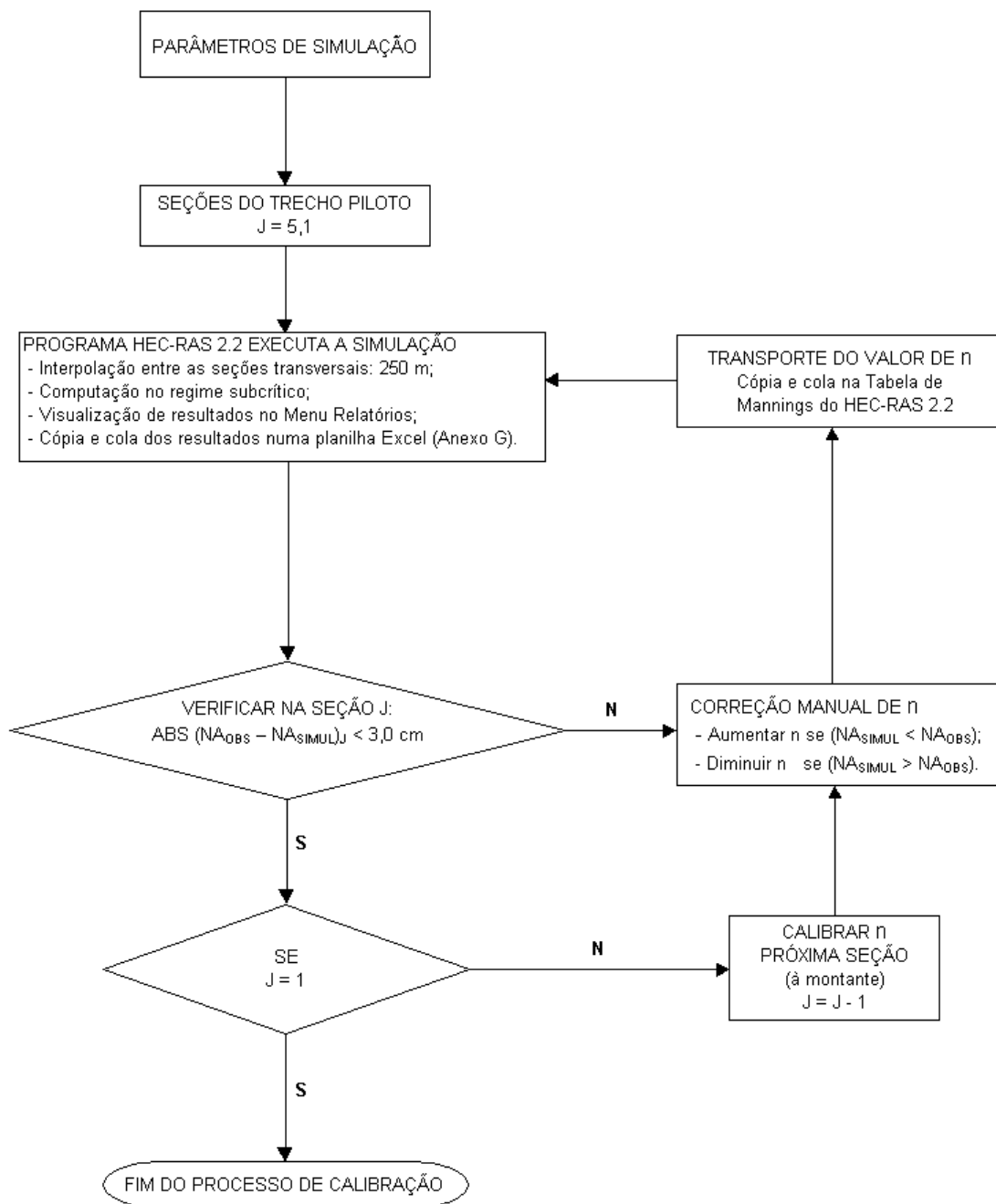


Figura 14 Fluxograma das Operações de Calibração com o HEC-RAS 2.2

Tabela 4 Primeira Calibração dos Coeficientes de Manning (Trecho Piloto)

Seção HEC-RAS	Distância Acumul. (km)	N.A. Observ (m)	1.º TENTATIVA			18.º TENTATIVA		
			Manning n (s/m ^{1/3})	N.A. (m)	ΔNA (m)	Manning n (s/m ^{1/3})	N.A. (m)	ΔNA (m)
44	0.000	147.269	0.298 ▲	147.495	-0.226	0.170	147.282	-0.013
43	2.500	145.486	0.078	144.721	+0.765	0.230	145.484	+0.002
42	5.500	144.364	0.143	144.452	-0.088	0.600	144.354	+0.010
41	7.500	144.272	0.078	144.437	-0.165	0.030	144.271	+0.001
40	15.500	144.075	0.024	144.076	-0.001	0.030	144.076	-0.001

Nota: A seta vertical indica o sentido da calibração.

Conforme a Tabela 4, constata-se que os valores do coeficiente de rugosidade de Manning estão muito acima da prática internacional (seções S43 e S42). Isso indica que a geometria fluvial está mal definida, tornando-se necessário acrescentar novas seções transversais neste trecho. Assim, com a finalidade de aperfeiçoar a calibração do modelo, foram definidas dezessete seções transversais complementares, entre as seções S44 e S41, mostradas na tabela abaixo:

Tabela 5 Seções Transversais Complementares (Trecho Piloto)

REGIÃO DO DETALHAMENTO	TRECHO	SEÇÕES LEVANTADAS
Travessão Três Portas	S44 – S43	S43.3, S43.2, S43.1
Travessão Caldeirão	S43 – S42	S42.5, S42.4, S42.3, S42.2 e S42.1
Travessão Santa Maria Velha	S42 – S41	S41.9, S41.8, S41.7, S41.6, S41.5, S41.4, S41.3, S41.2 e S41.1

A batimetria destas seções complementares consta nos arquivos digitais dos levantamentos batimétricos realizados pela empresa INTERNAVE em 1997. A batimetria gerada com curvas de nível de metro em metro limitou-se ao fundo do canal de navegação previsto em projeto. Assim, somente uma parte restrita do leito do rio foi levantada, obrigando a extrapolar-se o perfil do terreno nas margens. As cotas altimétricas das seções complementares estavam referenciadas à superfície d'água observada nas seções principais imediatamente à montante. O ajuste das cotas executado a partir do perfil longitudinal do leito do canal de navegação é mostrado na figura abaixo:

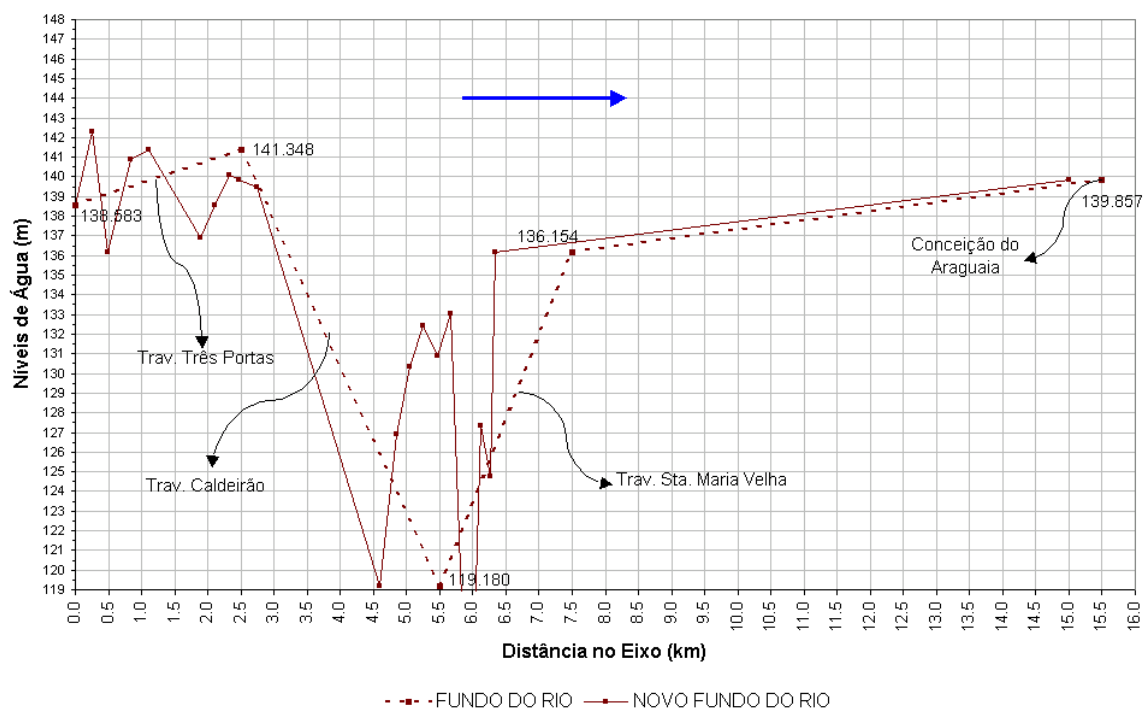


Figura 15 Perfil Longitudinal Corrigido no Trecho Piloto

Feitas as correções das cotas e distâncias medidas no eixo do Rio Araguaia, realizou-se uma nova calibração com o modelo HEC-RAS 2.2. A metodologia de calibração é idêntica à descrita no fluxograma (Figura 14), substituindo-se o valor inicial de J por 22 (5 seções principais e 17 seções complementares). O resumo das tentativas de calibração é mostrado abaixo:

Tabela 6 Segunda Calibração dos Coeficientes de Manning (Trecho Piloto)

Seção HEC-RAS	Distância Acumul. (km)	N.A. Observ (m)	1.º TENTATIVA			30.º TENTATIVA		
			Manning n (s/m ^{1/3})	N.A. (m)	ΔNA (m)	Manning n (s/m ^{1/3})	N.A. (m)	ΔNA (m)
44	0.000	147.269	0.170	147.799	-0.530	0.300	147.249	+0.020
43.3	0.259	146.855	0.170	147.764	-0.909	0.470	146.833	+0.022
43.2	0.499	146.472	0.170	147.735	-1.263	0.190	146.469	+0.003
43.1	0.827	145.947	0.170	147.607	-1.660	0.100	145.941	+0.006
43	1.116	145.486	0.230	147.497	-2.011	0.105	145.481	+0.005
42.5	1.891	145.237	0.230	147.435	-2.198	0.025	145.398	-0.161
42.4	2.102	145.169	0.230	147.427	-2.258	0.025	145.398	-0.229
42.3	2.317	145.100	0.230	147.420	-2.320	0.025	145.397	-0.297
42.2	2.469	145.051	0.230	147.404	-2.353	0.025	145.317	-0.266
42.1	2.736	144.965	0.230	146.041	-1.076	0.100	144.963	+0.002
42	4.603	144.364	0.600	144.644	-0.280	0.300	144.372	-0.008
41.9	4.846	144.351	0.600	144.617	-0.266	0.300	144.365	-0.014
41.8	5.050	144.340	0.600	144.580	-0.240	0.300	144.355	-0.015
41.7	5.254	144.330	0.600	144.496	-0.166	0.300	144.338	-0.008
41.6	5.460	144.319	0.600	144.419	-0.100	0.300	144.320	-0.001
41.5	5.667	144.308	0.600	144.354	-0.046	0.300	144.303	+0.005
41.4	5.843	144.299	0.600	144.324	-0.025	0.300	144.296	+0.003
41.3	6.005	144.290	0.600	144.321	-0.031	0.300	144.295	-0.005
41.2	6.121	144.284	0.600	144.319	-0.035	0.300	144.294	-0.010
41.1	6.271	144.276	0.600	144.295	-0.019	0.300	144.288	-0.012
41	6.345	144.272	0.030	144.285	-0.013	0.030	144.285	-0.013
40	15.007	144.075	0.030	144.076	-0.001	0.030	144.076	-0.001

Nota: A seta vertical indica o sentido de calibração.

Os níveis d'água nas dezessete seções complementares mostrados na Tabela 6 foram determinados por interpolação linear dos níveis d'água observados nas seções principais. Assim, a calibração dos coeficientes de Manning nas seções complementares não está baseada em medições reais dos níveis d'água. Os coeficientes de Manning calibrados para estas seções apenas serão utilizados como referência auxiliar para as etapas seguintes de modelagem.

Os valores do coeficiente de rugosidade de Manning provenientes das calibrações realizadas com o modelo HEC-RAS 2.2 e pela INTERNAVE são apresentados a seguir:

Tabela 7 Coeficientes de Manning Provenientes das Calibrações

SEÇÕES TRANSV.	DISTÂNCIA ACUMUL. (km)	Coeficiente de Manning n (s/m ^{1/3})		
		INTERNAVE	HEC-RAS (1.º)	HEC-RAS (2.º)
44	0.000	0.298	0.170	0.300
43	2.500	0.078	0.230	0.105
42	5.500	0.143	0.600	0.300
41	7.500	0.078	0.030	0.030
40	15.500	0.024	0.030	0.030

A distribuição espacial desses valores no trecho piloto pode ser disposta num gráfico:



Figura 16 Distribuição Espacial dos Coeficientes de Rugosidade (Trecho Piloto)

Conforme a Tabela 7, há uma tendência em diminuir os valores dos coeficientes de rugosidade com a inserção de novas seções transversais. Na Figura 16 nota-se uma aproximação maior entre os valores da segunda calibração e os da INTERNAVE do que os valores da primeira calibração. Contudo, o coeficiente de rugosidade calibrado para a seção S42 é expressivo (0,300 s/m^{1/3}), não condizendo com a prática internacional em simulação de sistemas fluviais.

O trecho piloto é muito representativo das condições do escoamento fluvial no Rio Araguaia:

- Entre as seções S44 e S43 há dois travessões vizinhos que provocam forte perda de carga;
- Nos últimos 500 m entre as seções S43 e S42 há uma grande contração da seção transversal, com redução da sua largura superficial de 1.400 m para 550 m. Esta contração é acompanhada pelo aprofundamento do leito, cuja cota do fundo aprofunda-se em mais de 20 m. A contração é máxima na ponte, razão deste local para a sua construção;
- Entre as seções S42 e S41 há uma expansão das seções transversais, com aumento da largura superficial de 550 m para 1.400 m, e elevação da cota de fundo em cerca de 16 m. Neste trecho está o travessão de Santa Maria Velha, provocando uma forte perda de carga;
- Entre as seções S41 e S40 o alargamento superficial é maior, surgem várias ilhas e aparecem travessões pouco extensos.

O Rio Araguaia possui uma morfologia fluvial bem distinta dos rios europeus e norte-americanos. Os coeficientes de rugosidade apresentados na Seção (3) refletem as características desses rios. Levantamentos batimétricos complementares serão essenciais para a realização de uma calibração precisa, consistente com a realidade física do sistema fluvial.

4.2 Níveis d'Água no Trecho Piloto Após Dragagem e Derrocamento

Entre Santa Maria das Barreiras e Xambioá estão previstas obras de dragagem e derrocamento no leito do Rio Araguaia. Após a execução destas obras é essencial verificar se há variações significativas dos níveis d'água do projeto bem como das velocidades nas seções transversais.

As obras de dragagem e derrocamento a serem executadas no canal navegável do trecho piloto apresentam seções de corte trapezoidais com taludes cuja inclinação é proporcional a variação horizontal em relação à vertical (H:V). A profundidade do fundo das seções transversais de corte é referenciada ao nível d'água de projeto em cada seção. No Travessão de Santa Maria Velha o canal navegável apresenta raio de curvatura igual a 800 m. Nesse travessão será adicionada uma sobrelargura igual a 9 m, obtendo-se a largura de 39 m. Para os demais travessões a largura do canal de navegação é 30 m. As especificações gerais de projeto para dragagem e derrocamento do canal de navegação para o trecho piloto são mostradas na tabela abaixo:

Tabela 8 Características das Obras de Dragagem e Derrocamento no Trecho Piloto

DENOMINAÇÃO DO PASSO	EXTENSÃO	OBRA	PROFUND. ¹ (m)	LARGURA DO FUNDO (m)	TALUDES (H:V)
Três Portas	S44-S43	DERR	2,10	30	2:3
Caldeirão	S43-S42	DERR	2,10	30	2:3
Santa Maria Velha	S42-S41	DERR	2,10	39	2:3
PK 505	S41-S40	DRAG	2,50	30	7:1

Legenda: DERR = Derrocamento; DRAG = Dragagem

O modelo HEC-RAS 2.2 oferece o recurso de modificar a geometria do canal fluvial depois que o sistema fluvial é introduzido. A opção *Channel Modification* do editor geométrico desse programa permite executar cortes trapezoidais e inserções na geometria existente. As simulações realizadas a partir da geometria modificada possibilitam a comparação dos níveis d'água entre ambas as geometrias existente e modificada.

Após a introdução dos cortes trapezoidais nas seções transversais S44 a S40 é realizada uma nova simulação, considerando os valores do coeficiente de rugosidade de Manning provenientes da segunda calibração. O ponto central do fundo das seções trapezoidais de corte coincide com o eixo do canal de navegação, referenciado em relação à margem esquerda. Após introduzir o canal de navegação projetado pela INTERNAVE no trecho piloto, os volumes de material a ser escavado calculados com o HEC-RAS 2.2 ficaram distribuídos da seguinte maneira:

Tabela 9 Volumes de Material a Ser Escavado no Trecho Piloto

Seção	Extensão (km)	Dragagem (m ³)	Derrocamento (m ³)	Volumes (m ³)
S44-S43	2,5	-	27 053	27 053
S43-S42	3,0	-	192 553	192 553
S42-S41	2,0	-	57 591	57 591
S41-S40	8,0	546 499	-	546.499
Totais (m³)	15,5	546 499	277 197	823 696
% Totais	-	66,4%	33,6%	100,0%

O volume total de material removido para a implantação do canal de navegação no trecho piloto é da ordem de 823,7 mil metros cúbicos. Dois terços deste volume (546,5 mil m³) serão dragados no passo PK 505. O terço restante (277,2 mil m³) compreende os volumes a serem derrocados ao longo dos travessões Três Portas, Caldeirão e Santa Maria Velha. Verifica-se assim que os volumes de escavação são elevados ao considerar-se sua distribuição em apenas 15,5 km .

A precisão do cálculo dos volumes de escavação depende da quantidade de seções transversais introduzidas. No trecho a ser derrocado (S44-S41) há 21 seções irregularmente espaçadas em 6,3 km de extensão, apresentando em média, uma seção a cada 315 m. No trecho a ser dragado (S41-S40) a distância entre as seções S41 e S40 é de 8,3 quilômetros. É importante destacar que não foram introduzidas seções complementares entre as seções S41 e S40.

Depois de inserir o canal de navegação no trecho piloto efetua-se a simulação para a condição de vazão de projeto (636 m³/s). Os níveis d'água obtidos são comparados aos valores correspondentes determinados na segunda calibração:

Tabela 10 Níveis d'Água Simulados Após a Introdução do Canal de Navegação

Seção	Vazão Q (m ³ /s)	Manning n (s/m ^{1/3})	Cota do Fundo (m)	Tirante d'Água (m)	Níveis d'Água Simulados		
					NA ₁ (m)	NA ₂ (m)	ΔNA (cm)
44	627,6	0,300	138,583	8,726	147,273	147,257	1,6
43	630,8	0,105	141,348	4,713	145,500	145,429	7,1
42	634,4	0,300	119,180	25,084	144,374	144,356	1,8
41	634,7	0,030	136,154	8,017	144,285	144,266	1,9
40	636,0	0,030	139,857	4,219	144,076	144,076	0,0

Legenda:

NA₁ = Nível d'água simulado antes da introdução do canal de navegação

NA₂ = Nível d'água simulado após a introdução do canal de navegação

A comparação entre os níveis d'água simulados antes e depois da introdução do canal de navegação mostra uma diferença entre as superfícies d'água oscilando na faixa de 1,6 a 7,1 cm. Na

seção S43, posicionada à montante da ponte Couto Magalhães e do travessão Santa Maria das Barreiras, a diferença entre as duas superfícies d'água é igual a 7,1 cm, superior à precisão de calibração. Assim, as obras de dragagem e derrocamento previstas no trecho piloto alteraram significativamente os níveis d'água simulados. Portanto, uma nova calibração dos coeficientes de rugosidade de Manning para o canal de navegação deverá ser feita.

4.3 Análise de Sensibilidade

Os níveis d'água simulados com o modelo HEC RAS 2.2 são o objeto de estudo do presente trabalho e, portanto, devem ser avaliados quanto à sua confiabilidade. A metodologia de avaliação da sua sensibilidade ou resposta diante da variação controlada de alguns parâmetros consiste em:

- Definir os parâmetros chave a serem submetidos à variação controlada;
- Estabelecer os limites inferior e superior do intervalo de variação de cada parâmetro;
- Introduzir os valores modificados de cada parâmetro selecionado e realizar novas simulações com o modelo HEC-RAS 2.2 mantendo inalterados os demais parâmetros;
- Analisar o efeito da variação de cada parâmetro para os níveis d'água simulados.

A análise de sensibilidade é realizada após a calibração do modelo¹⁰. Selecionou-se apenas a rugosidade hidráulica como parâmetro chave pois ela determina o comportamento hidráulico do sistema fluvial estudado, já tendo inclusive sido alvo de calibração. Os coeficientes de Manning oriundos da segunda calibração do modelo HEC-RAS 2.2 foram submetidos a uma variação predefinida de +30% e -30%, ou seja, multiplicados pelos fatores 1,30 e 0,70, respectivamente. Este intervalo de variação abrange desse modo 60% das incertezas no cálculo dos coeficientes de Manning.

Foram realizadas duas simulações distintas, sendo uma para o limite superior (+30%) e outra para o limite inferior (-30%) do parâmetro de rugosidade. Verificou-se a variação dos níveis d'água em cada seção transversal em relação aos obtidos para a geometria modificada do trecho piloto, considerando interpolações de 250 m entre as 22 seções transversais. Os valores dos níveis d'água variando-se os coeficientes de Manning encontram-se na Tabela 11 (ver adiante).

Conforme essa tabela, a variação média do nível d'água simulado está entre -25 cm e +28 cm, para a alteração de $\pm 30\%$ do coeficiente de Manning. Assim, considerando a amplitude do intervalo (53 cm), pode-se afirmar que o modelo HEC-RAS 2.2 é muito sensível à variação dos coeficientes de rugosidade de Manning. As linhas d'água simuladas com o modelo HEC-RAS 2.2 considerando a variação dos coeficientes de rugosidades de Manning é mostrada na Figura 17.

¹⁰ Esta é uma prática adotada por alguns engenheiros na modelagem hidráulica.

Tabela 11 Sensibilidade dos Níveis d'Água à Variação dos Coeficientes de Rugosidade (n)
(Trecho Piloto Calibrado)

SEÇÕES HEC-RAS	DIST, ACUMUL. (km)	COEF. DE MANNING ¹ n (s/m ^{1/3})	NA CALIB. (m)	LIMITE INFERIOR (FATOR 0,70)			LIMITE SUPERIOR (FATOR 1,30)		
				MANNING ³ n _I (s/m ^{1/3})	NA _I (m)	ΔNA _I (m)	MANNING ³ n _S (s/m ^{1/3})	NA _S (m)	ΔNA _S (m)
44	0.0	0.300	147.249	0.210	146.798	-0.451	0.390	147.659	+0.410
43.3	0.3	0.470	146.833	0.329	146.388	-0.445	0.611	147.256	+0.423
43.2	0.5	0.190	146.469	0.133	146.041	-0.428	0.247	146.897	+0.428
43.1	0.8	0.100	145.941	0.070	145.541	-0.400	0.130	146.359	+0.418
43	1.1	0.105	145.481	0.074	145.048	-0.433	0.137	146.002	+0.521
42.5	1.9	0.025	145.398	0.018	144.952	-0.446	0.033	145.940	+0.542
42.4	2.1	0.025	145.398	0.018	144.952	-0.446	0.033	145.939	+0.541
42.3	2.3	0.025	145.397	0.018	144.951	-0.446	0.033	145.939	+0.542
42.2	2.5	0.025	145.317	0.018	144.839	-0.478	0.033	145.888	+0.571
42.1	2.7	0.100	144.963	0.070	144.599	-0.364	0.130	145.315	+0.352
42	4.6	0.300	144.372	0.210	144.235	-0.137	0.390	144.545	+0.173
41.9	4.8	0.300	144.365	0.210	144.232	-0.133	0.390	144.534	+0.169
41.8	5.1	0.300	144.355	0.210	144.227	-0.128	0.390	144.517	+0.162
41.7	5.3	0.300	144.338	0.210	144.218	-0.120	0.390	144.481	+0.143
41.6	5.5	0.300	144.320	0.210	144.209	-0.111	0.390	144.449	+0.129
41.5	5.7	0.300	144.303	0.210	144.200	-0.103	0.390	144.422	+0.119
41.4	5.8	0.300	144.296	0.210	144.196	-0.100	0.390	144.410	+0.114
41.3	6.0	0.300	144.295	0.210	144.196	-0.099	0.390	144.409	+0.114
41.2	6.1	0.300	144.294	0.210	144.195	-0.099	0.390	144.408	+0.114
41.1	6.3	0.300	144.288	0.210	144.192	-0.096	0.390	144.398	+0.110
41	6.3	0.030	144.285	0.021	144.190	-0.095	0.039	144.393	+0.108
40	15.0	0.030	144.076	0.021	144.076	0.000	0.039	144.076	0.000
MÉDIA ARITMÉTICA				-	-	-0.253	-	-	0.282
DESVIO PADRÃO (POPULAÇÃO)				-	-	0.168	-	-	0.185

SENSIBILIDADE DOS NÍVEIS DE ÁGUA À VARIAÇÃO DE 30% DA RUGOSIDADE (n)

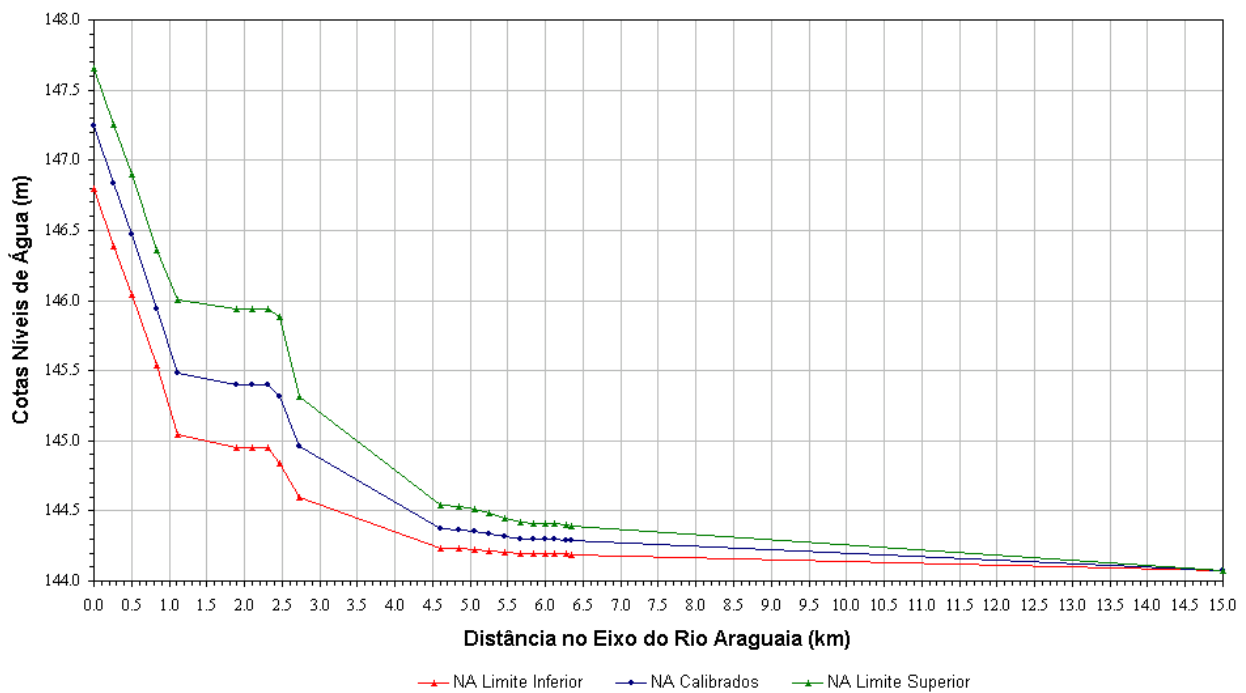


Figura 17 Sensibilidade dos Níveis d'Água à Variação da Rugosidade nas Seções Transversais

Conclusões

As simulações efetuadas com o modelo HEC-RAS 2.2 reforçam a necessidade de novos levantamentos batimétricos de seções transversais no trecho Santa Maria das Barreiras a Xambioá. Além de contribuir para a redução dos coeficientes de rugosidade hidráulica, o maior número de seções transversais, convenientemente posicionadas, minimizará as incertezas envolvidas no cálculo dos volumes de escavação. A precisão do cálculo dos volumes de material a ser escavado no leito do rio está diretamente associada aos custos de implantação e operação da hidrovia. Volumes de escavação imprecisos resultam em estimativas deficientes dos custos, podendo até mesmo inviabilizar economicamente o empreendimento.

Outro aspecto importante é que o HEC-RAS 2.2, apesar de simular escoamentos unidimensionais somente no regime permanente ou gradualmente variado, apresentou bom desempenho quando a geometria fluvial foi melhor definida no trecho piloto. Os resultados indicam que se a quantidade de seções fosse adequadamente aumentada, então os coeficientes de Manning calibrados seriam mais realísticos e próximos dos valores internacionalmente utilizados.

Os valores dos coeficientes de rugosidade de Manning calibrados com o modelo HEC-RAS 2.2 somente poderão ser utilizados para a condição específica da vazão de projeto ($Q_p = 636 \text{ m}^3/\text{s}$). Para outras vazões diferentes desta condição de projeto será inevitável proceder à novas calibrações dos coeficientes de rugosidade de Manning. Esta deficiência é consequência da reduzida quantidade de seções transversais originalmente levantadas e introduzidas no modelo.

O Hydrologic Engineering Center (HEC) recomenda para projetos de navegação distâncias entre seções inferiores a 60 metros. A geometria fluvial original que foi utilizada neste trabalho apresenta 59 seções transversais irregularmente distribuídas em 373 km de extensão, representando, em média, uma seção a cada 6,3 km de extensão. Este espaçamento é mais de cem vezes superior à distância recomendada pelo HEC. Daí ser muito questionável a qualidade da modelagem dos níveis d'água realizada para o projeto do canal de navegação. O uso de sofisticados programas de computador que simulam o escoamento fluvial a partir de uma base de dados deficiente e inconsistente produzirá resultados que terão, na melhor hipótese, a mesma qualidade dos dados de entrada (“lixo entra, lixo sai”, ditado muito conhecido em modelagem).

Os levantamentos batimétricos realizados no leito do Rio Araguaia em 1997 utilizados neste trabalho representam as condições da natureza vigentes na época da sua realização. É preciso lembrar que o Rio Araguaia é um sistema dinâmico, sua morfologia fluvial está em constante transformação. Faz-se necessário empreender novas pesquisas para monitorar as modificações da sua geometria fluvial bem como estabelecer uma base de dados mais consistente com a finalidade de aproveitamento do Rio Araguaia para navegação.

Referências Bibliográficas

1. AZEVEDO, Rone Antônio de. *Modelagem Matemática dos Níveis D'Água no Rio Araguaia: Projeto Final do Curso de Graduação em Engenharia Civil*. Goiânia: UFG, 2001, 230 p.
2. CHOW, V. T. *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill Inc., 1959, 680 p.
3. COMPANHIA DOCAS DO PARÁ. Administração das Hidrovias do Tocantins e Araguaia (AHITAR). *Elaboração de Modelo Matemático Unidimensional para Definição de Níveis D'Água no Rio Araguaia e Traçado do Ótimo Canal de Navegação, no Trecho Compreendido entre a Cachoeira de São Miguel (Pouco a Jusante da Cidade Tocantinense de Xambioá) e a Cidade Paraense de Santa Maria das Barreiras: Primeiro Relatório Parcial N.º 76904.01*. São Paulo: INTERNAVE Engenharia Ltda., 1998.
4. _____: *Relatório Parcial do Levantamento das Seções Transversais e Instalação das Referências de Nível N.º 76904.02*. São Paulo: INTERNAVE Engenharia S/C Ltda., 1998.
5. _____: *Relatório de Andamento dos Serviços de Campo N.º 76904.03*. São Paulo: INTERNAVE Engenharia S/C Ltda., 1998.
6. _____: *Segundo Relatório Parcial N.º 76904.04*. São Paulo: INTERNAVE Engenharia S/C Ltda., 1998.
7. _____: *Terceiro Relatório Parcial N.º 76904.05*. São Paulo: INTERNAVE Engenharia S/C Ltda., 1998.
8. _____: *Relatório Final N.º 76904.06*. São Paulo: INTERNAVE Engenharia S/C Ltda., 1998.
9. FUNDAÇÃO DO INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Carta do Brasil – Esc. 1:100 000: Conceição do Araguaia (FOLHA SC-22-X-B-I)*. Rio de Janeiro: Diretoria de Geodésia e Cartografia, 1979. Primeira Edição.
10. RUSTEBERG, Bernd. *Notas de Aulas de Portos e Hidrovias*. Goiânia: UFG, 2000. Capítulo Hidrologia Aplicada I e Introdução ao Modelo HEC-RAS 2.2, p. 1-27
11. TOCANTINS ARAGUAIA. *Uma Hidrovia para Sustentar o Desenvolvimento do Brasil Central*. Brasília: CDP/AHITAR, jun., 2000, 40 p. Edição Especial.
12. TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da Universidade / UFRGS / Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998, 669 p.
13. US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Engineering Center (HEC). *HEC-RAS, River Analysis System: User's Manual Version 2.0 Abril 1997*. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers/Hydrologic Engineering Center, 1998. 243 p.
14. _____: *Hydraulic Reference Manual Version 2.0 Abril 1997*. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers/Hydrologic Engineering Center, 1998. 251 p.
15. VASCONCELOS, Augusto Carlos. *Pontes Brasileiras: viadutos e passarelas notáveis*. São Paulo: Editora Pini, 1993, p. 498-506.