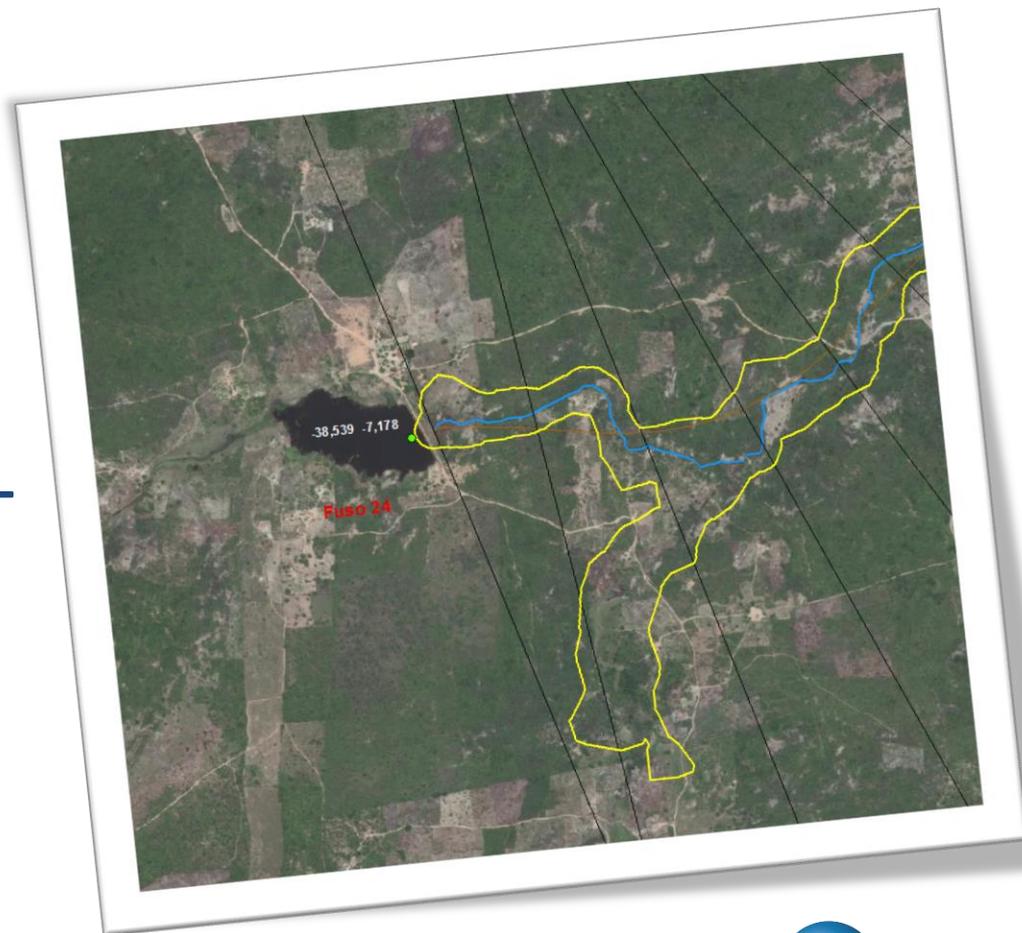


Geração de Manchas para Classificação de Barragens Quanto ao Dano Potencial Associado

- Metodologia Simplificada -

Marcio Bomfim

Agência Nacional de Águas
19 e 20 de outubro de 2017



Contexto

- Parceria com o Banco Mundial.
- Contratação do LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal.
- LNEC define método simplificado com base na qualidade dos dados disponíveis no Brasil e na experiência de outros países.
- ANA adapta metodologia proposta – novos dados e parceria com o USGS e USACE norte-americanos.

Contexto

- Lei 12.334 de 20 de dezembro de 2010 – Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens.
- Resolução nº 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - Estabelece critérios de classificação de barragens por categoria de risco e dano potencial associado.
- Resolução nº 132/2016 da Agência Nacional de Águas - Estabelece critérios complementares de classificação de barragens reguladas pela ANA, quanto ao DPA.

Contexto

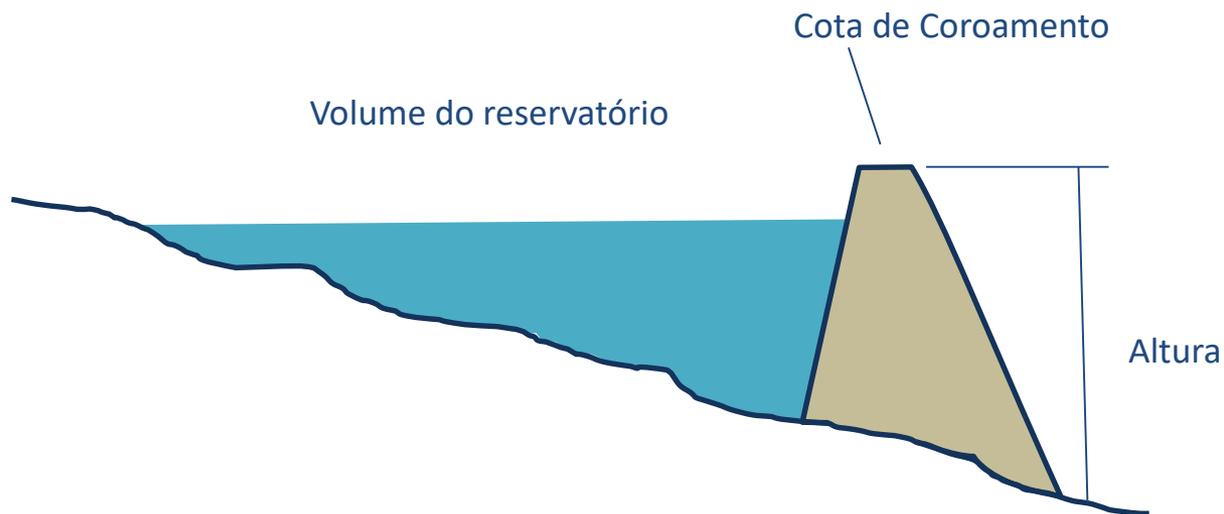
- Metodologias tradicionais de modelagem costumam exigir muitos dados e com grande precisão.
- Em geral, esses dados não estão disponíveis.
- Exige-se do analista muitas horas de aprendizado.
- Método simplificado foi desenvolvido procurando minimizar as necessidades de dados para se adaptar à realidade do país.

Dados Necessários

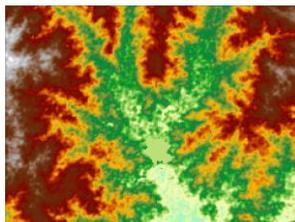
Imagens de satélite



Volume do reservatório



SRTM 30m



Introdução

- A Lei 12.334/2010 estabelece como um de seus instrumentos o desenvolvimento de um sistema de classificação das barragens quanto à sua categoria de risco e à sua classe de DPA.
- Categoria de risco não será tratada nesse curso; será discutida brevemente em um exercício ao final.
- Chamamos “mancha” para classificação de barragens quanto ao DPA, um polígono que define uma “área de análise”.
- As ocorrências de feições de interesse para a legislação no interior desse polígono serão computadas para fins de classificação.
- O Objetivo da metodologia simplificada é fornecer esse polígono com uma qualidade compatível com os dados e um mínimo de esforço.

Obs: Não se deve imaginar esse polígono como uma mancha de inundação *stricto sensu* pois os dados utilizados, especialmente o SRTM, não tem precisão suficiente para tal.

Introdução

A metodologia consiste em:

- Traçar o trecho de rio de interesse (com base no SRTM ou imagens de satélite).
- Suavizar esse traçado.
- Definir seções transversais para o cálculo hidráulico.
- Calcular a vazão máxima de rompimento na barragem.
- Estimar a altura máxima da onda de ruptura em cada uma das seções transversais.
- Projetar essas alturas no modelo do relevo (SRTM) de modo a estimar a área atingida.
- O método fornece um polígono que será passado para uma equipe de análise fazer a classificação quanto ao DPA.

Introdução

A Equipe de análise deverá verificar a ocorrência de feições de interesse para a PNSB no interior da mancha:

- Residências
- Povoados
- Estradas Vicinais
- Rodovias
- Indústrias
- Unidades de Conservação Ambiental
- Outras

Introdução



Residências



Povoados

Introdução



Estradas vicinais

Introdução



Rodovias

Introdução



Indústrias

Introdução



Áreas de Proteção
Ambiental

Exercício

Que dados você precisaria obter, ou comprar, ou contratar a sua produção de modo a fazer estudos precisos de rompimento de barragens?

Faça uma pesquisa rápida na internet
Discuta com os colegas

15 minutos

Fundamentos

O que seria necessário para um estudo de rompimento?

- Projeto “como construído” da estrutura da barragem.
- Batimetria do reservatório.
- Modelo Digital de *Terreno* da região a jusante da barragem (acurácia vertical de 0,5m ou melhor).
- Série histórica hidrometeorológica no local da barragem.
- Rugosidades das superfícies a jusante.
- Detalhes das estruturas como pontes, bueiros, etc.
- ...

Fundamentos

Realidade:

- Pouca disponibilidade de dados construtivos das barragens
- MDE disponível não é de terreno, mas de superfície – SRTM
- Incerteza na altimetria do MDE.
- Batimetria dos reservatórios inexistentes ou antigas.
- Séries históricas hidrometeorológicas em locais distantes sem estudos de regionalização.
- Rugosidades das superfícies a jusante não disponíveis.
- Detalhes das estruturas como pontes, bueiros, etc. ausentes.
- ...

Assim, a partir de diversos estudos envolvendo um universo de rompimentos de barragens anteriores, definiu-se um procedimento que consiste em:

1. Cálculo empírico da extensão do rio a ser modelada.
2. Verificação da adequação do limite determinado analisando a ocupação e a geomorfologia do vale a jusante da barragem.
3. Cálculo da vazão máxima associada à ruptura da barragem.
4. Cálculo das vazões de pico em cada uma das seções transversais ao longo do vale.
5. Comparação da vazão amortecida em cada seção transversal ao longo do vale com a vazão máxima do vertedouro para interrupção da modelagem no ponto onde os danos devidos à ruptura sejam menores que o dano devido à cheia de projeto do extravasor.
6. Obtenção da altimetria de pontos ao longo das seções transversais.
7. Cálculo hidráulico para estimativa do nível máximo da onda de ruptura em cada uma das seções transversais.
8. Criação da superfície envoltória da onda de ruptura.
9. Obtenção do polígono para classificação de DPA.
10. Eventual adoção de correções para adequação às condições locais.

1 – Cálculo empírico da extensão do rio a ser modelada

Origem dos dados	Dados de base considerados para obter a curva de regressão		Dist.Máx. com base na curva regressão
	Vmax (hm ³)	Distância para Jusante (km)	Dist. Máx. Jus. (km) Fórm. Regressão
	0	-	6,7
Val. impostos p/ efeitos da Regressão	0,2	5,0	6,8
Proposta	5	10,0	8,1
do	75	25,0	25,2
Produto 4	200	50,0	50,0
Valores impostos p/ efeitos da Regressão	700	95,0	95,3
	1.000	100,0	100,4

$$D_{max} = 8,870 \times 10^{-8} V_{max}^3 - 2,602 \times 10^{-4} V_{max}^2 + 2,648 \times 10^{-1} V_{max} + 6,737$$

1 – Cálculo empírico da extensão do rio a ser modelada

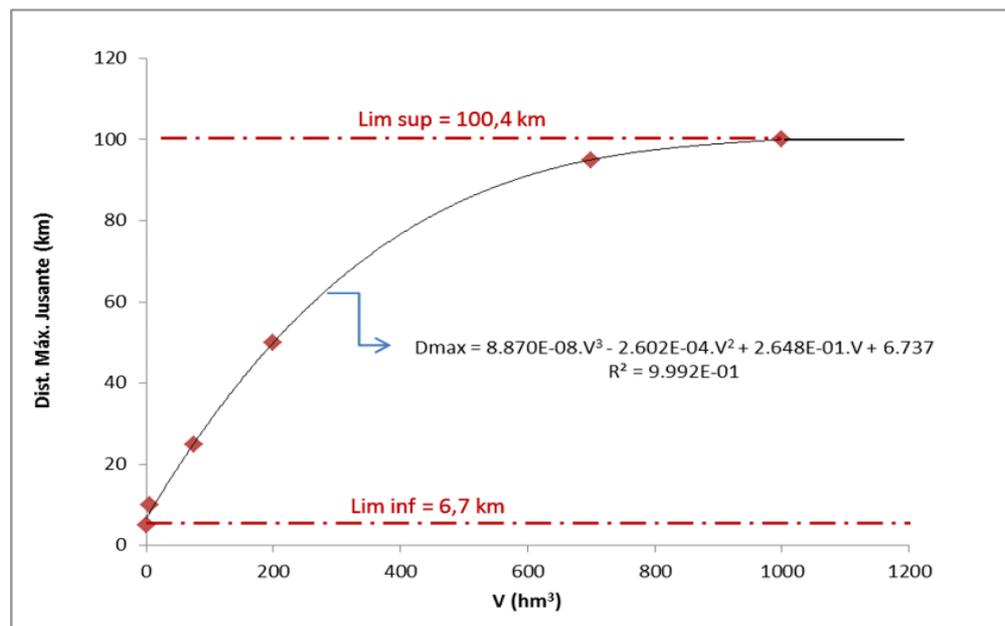


Figura 2 - Relação Volume Armazenado (hm³)/ Distância Máxima para jusante (km)

$$D_{max} = 8,870 \times 10^{-8} V_{max}^3 - 2,602 \times 10^{-4} V_{max}^2 + 2,648 \times 10^{-1} V_{max} + 6,737$$

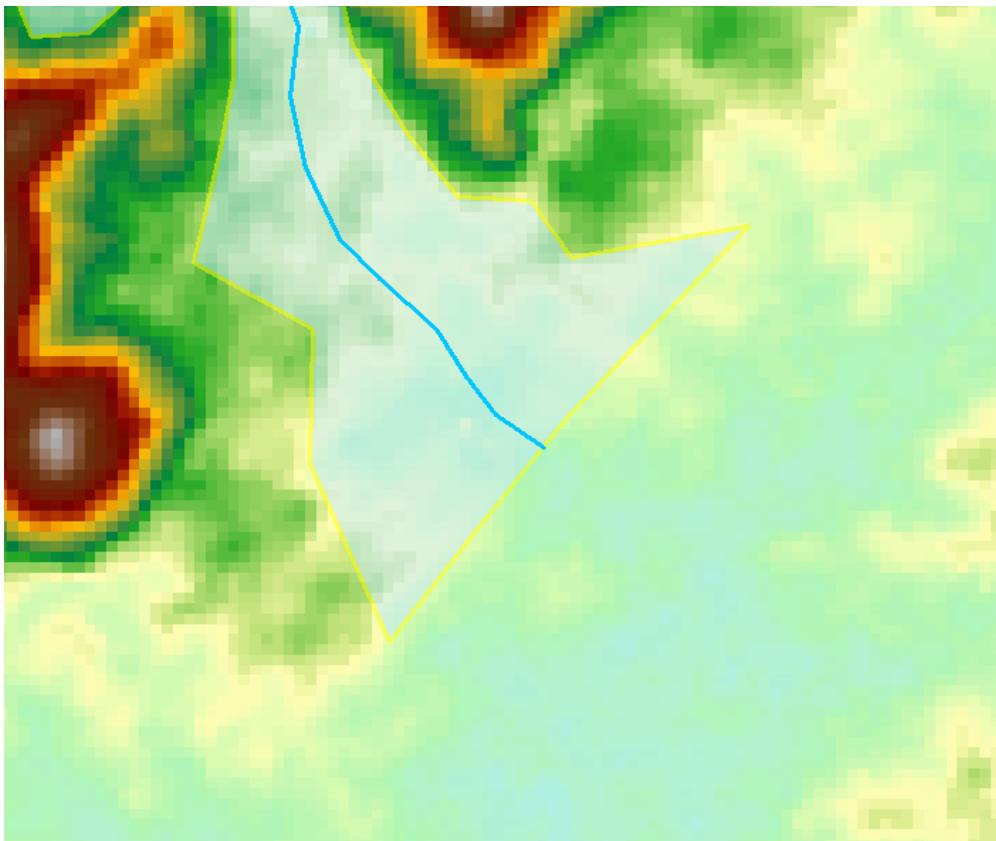
Essa fórmula é válida para volumes entre **0 hm³ e 1.000 hm³**

2 - Verificação da adequação do limite determinado analisando a ocupação e a geomorfologia do vale a jusante da barragem



**Ocupação intensa do vale
imediatamente a jusante**

2 - Verificação da adequação do limite determinado analisando a ocupação e a geomorfologia do vale a jusante da barragem



**Geomorfologia pode
recomendar estender a
modelagem**

3 - Cálculo da vazão máxima associada à ruptura da barragem

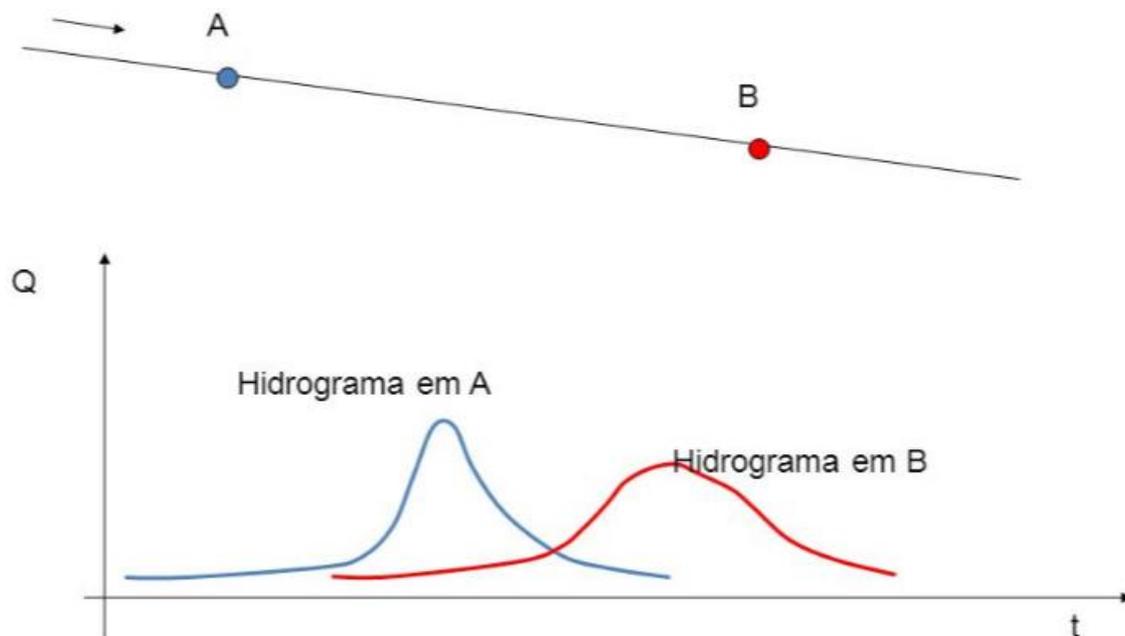
Quadro 12 – Fórmulas empíricas para estimar a vazão máxima produzida por ruptura de barragens (adaptado de Pierce *et al.*, 2010)

Tipo de Fórmula	Autor	Fórmula	Método
$Q_{max} = f(H_{max})$	Kirkpatrick (1977)	$Q_{max} = 1,268 (H_{max} + 0,3)^{2,5}$	Melhor ajustamento
	SCS (1981)	$Q_{max} = 16,6 (H_{max})^{1,85}$	Envolvente
	USBR (1982)	$Q_{max} = 19,1 (H_{max})^{1,85}$	Envolvente
	Singh e Snorrason (1982)	$Q_{max} = 13,4 (H_{max})^{1,89}$	Melhor ajustamento
$Q_{max} = f(V_{max})$	Singh e Snorrason (1984)	$Q_{max} = 1,776 (V_{max})^{0,47}$	Melhor ajustamento
	Evans (1986)	$Q_{max} = 0,72 (V_{max})^{0,53}$	Melhor ajustamento
	MMC	$Q_{max} = 0,0039 (V_{max})^{0,8122}$	Ajustamento
$Q_{max} = f(V_{max}, H_{max})$	Hagen (1982)	$Q_{max} = 1,205 (V_{max} \cdot H_{max})^{0,48}$	Envolvente
	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	$Q_{max} = 1,154 (V_{max} \cdot H_{max})^{0,412}$	Melhor ajustamento
	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	$Q_{max} = 3,85 (V_{max} \cdot H_{max})^{0,411}$	Envolvente
	Costa (1985)	$Q_{max} = 0,763 (V_{max} \cdot H_{max})^{0,42}$	Melhor ajustamento
	Froehlich (1995)	$Q_{max} = 0,607 (V_{max}^{0,295} \cdot H_{max}^{1,24})^{0,42}$	Melhor ajustamento

MMC - Mapping, Modeling, and Consequences Production Center da USACE – resultante de um estudo de 145 rompimentos (*adotada para volumes elevados em relação à altura da barragem*)

Froehlich – equação multiparamétrica (Volume e Altura) que resulta no melhor ajustamento à série de dados

4 - Cálculo das vazões de pico em cada uma das seções transversais ao longo do vale



A equipe do LNEC fez estudos comparativos incluindo o modelo HEC-RAS, muito popular para estudos nesse âmbito. A conclusão foi de que as incertezas decorrentes dos dados disponíveis (SRTM, dados de rugosidade, detalhes das pontes e outras obstruções, etc.) não justificam o uso de modelos como o HEC-RAS.

4 - Cálculo das vazões de pico em cada uma das seções transversais ao longo do vale

Para reservatórios com volume **superior** a 6,2 hm³

$$Q_x = Q_{max} 10^{-0,01243x}$$

onde

Q_x - vazão máxima em (m³/s) à distância x (km) da barragem;

Q_{max} - vazão máxima na seção da barragem (m³/s);

x - distância à barragem (km).

4 - Cálculo das vazões de pico em cada uma das seções transversais ao longo do vale

Para reservatórios com volume inferior a 6,2 hm³

$$\frac{Q_x}{Q_{max}} = a \cdot e^{b \cdot x}$$

$$a = 0,002 \ln(V_{max}) + 0,9626$$

$$b = -0,20047(V_{max} + 25000)^{-0,5979}$$

sendo:

x - distância à barragem (m);

V_{max} - volume do reservatório (m³)

Q_x - vazão máxima à distância x (m³/s) da seção da barragem;

Q_{max} - vazão máxima na seção da barragem (m³/s);

a e b - parâmetros obtidos por regressão multiparamétrica com base nas cinco curvas representadas na Figura 3.

4 - Cálculo das vazões de pico em cada uma das seções transversais ao longo do vale

Para reservatórios com volume inferior a $6,2 \text{ hm}^3$

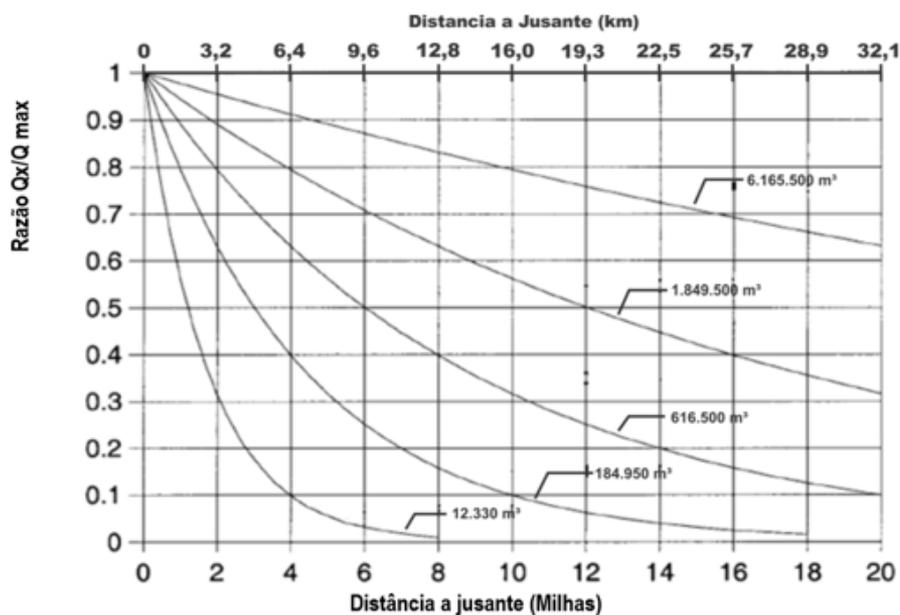
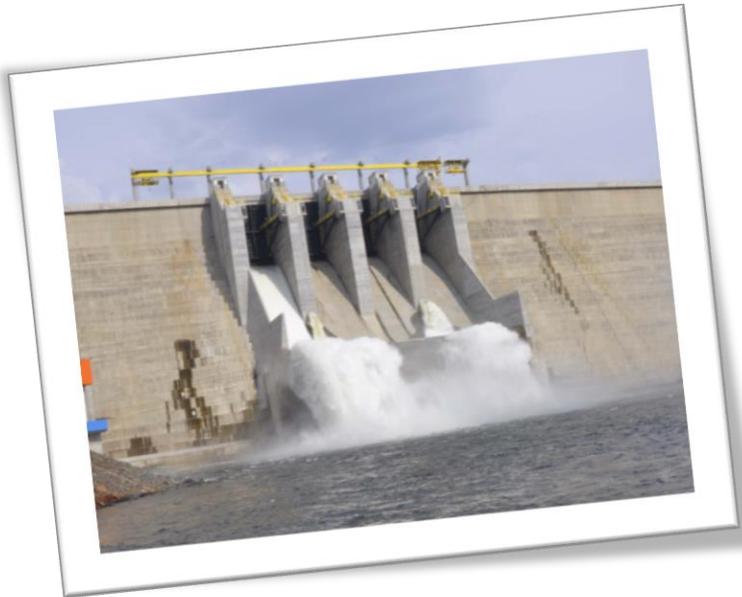


Figura 3 - Atenuação da vazão máxima com a distância para jusante da barragem (Dam Sector, 2011)

5 - Comparação da vazão amortecida em cada seção transversal ao longo do vale com a vazão máxima do vertedouro



Está disponível a vazão máxima do vertedouro?

O LNEC sugere que se faça uma comparação entre a vazão máxima do vertedouro e a vazão máxima das seções transversais. Caso alguma seção S_i possua vazão de ruptura menor ou igual à do vertedouro, é “lícito admitir que os danos produzidos a jusante em consequência de uma ruptura não serão mais severos do que os que ocorrerão em resultado da cheia natural de comparação. A simulação, então, tomará como limite a seção S_i ”.

6 - Obtenção da altimetria de pontos ao longo das seções transversais



100m
 100m
 100m

- suavizado
- original



Figura 4 - Digitalização da linha de água original e cálculo da linha de água suavizada

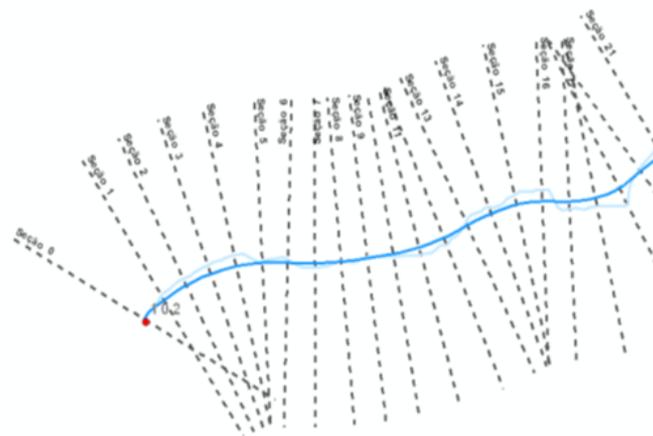


Figura 5 - Seções perpendiculares à linha de água suavizada

- Geração automática utilizando a ferramenta *Hatches* do *ArcMap*.
- 21 seções de 4.000 m de largura.
- Espaçamento uniforme de 1/20 da extensão a ser modelada.

6 - Obtenção da altimetria de pontos ao longo das seções transversais

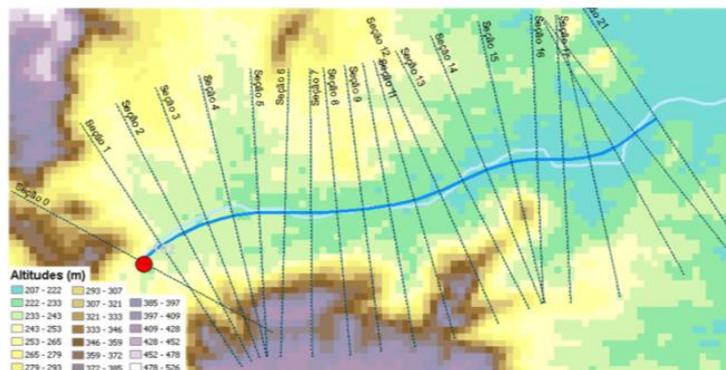
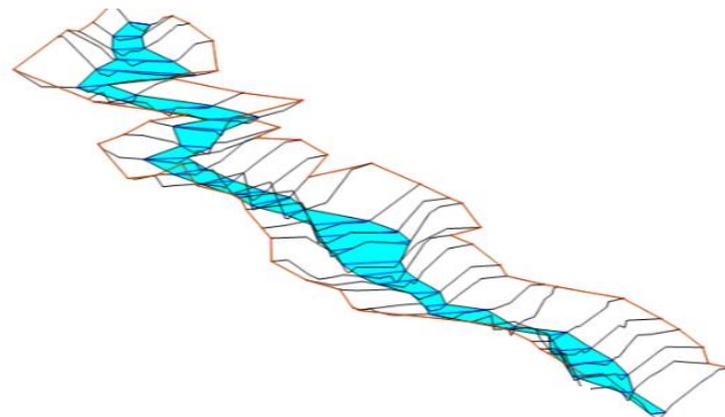
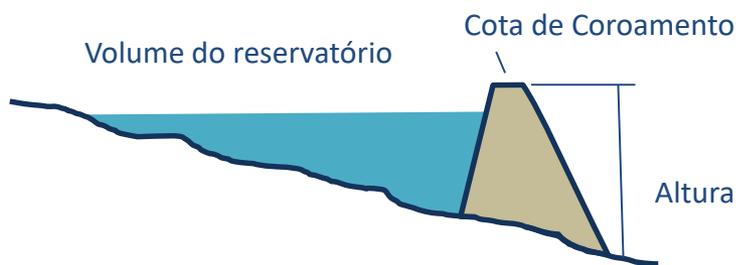


Figura 6 - Exemplo da sobreposição dos pontos das seções transversais do vale e da altimetria do SRTM

- É criado automaticamente um shapefile de pontos igualmente espaçados ao longo de cada uma das seções.
- Estes pontos são confrontados com o MDE para obter sua cota altimétrica.
- É gerada uma tabela em formato Excel com esse valores

7 - Cálculo hidráulico para estimativa do nível máximo da onda de ruptura em cada uma das seções transversais



Equação de Manning-Strickler

$$\frac{Q_x}{\sqrt{j}} = K_s \cdot A \cdot R^{2/3}$$

onde:

Q_x - a vazão máxima à distância x da seção da barragem, em (m³/s);

j - a inclinação da linha de energia com base no esquema da Figura 7;

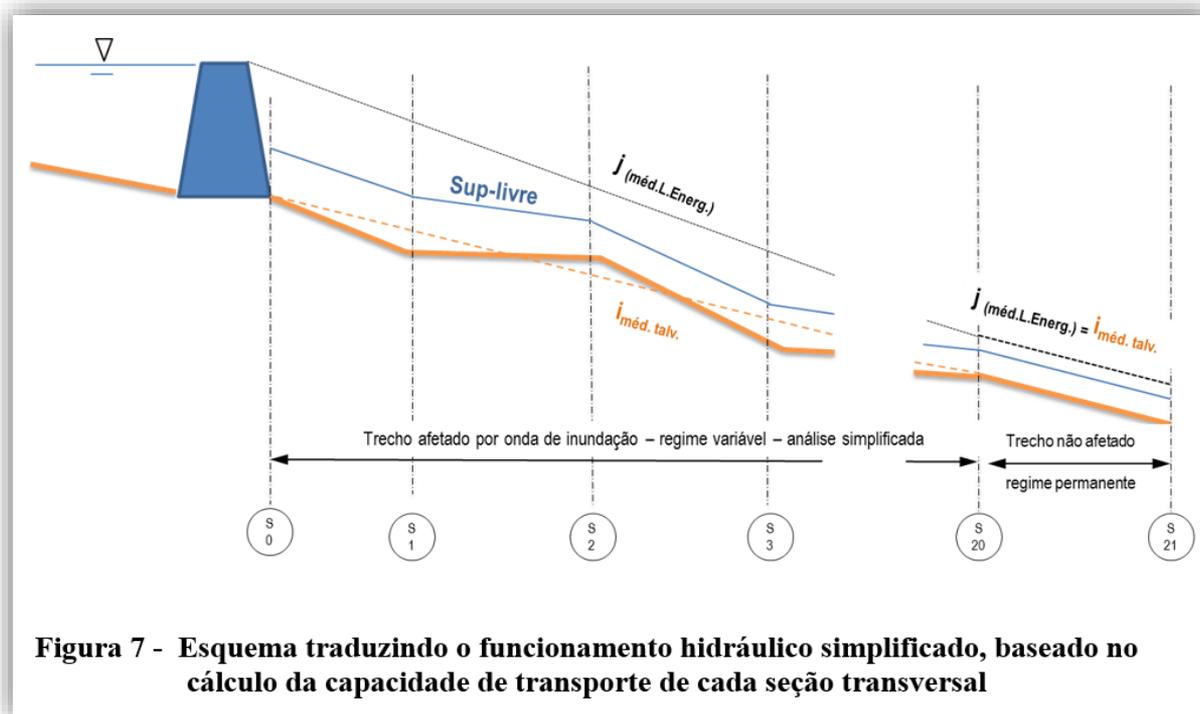
K_s - o coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler, valor admitido de $K_s=15 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$;

A - a área da seção de escoamento (m²);

R - o raio hidráulico da seção de escoamento (m).

7 - Cálculo hidráulico para estimativa do nível máximo da onda de ruptura em cada uma das seções transversais

Quadro 13 – Níveis máximos atingidos pela onda de inundação com base método de cálculo hidráulico simplificado



Seção de cálculo	Nível máximo da onda cheia (m)
0	823.06
1	809.51
2	812.68
3	808.27
4	809.39
5	805.28
6	785.23
7	787.49
8	776.83
9	761.44
10	758.26
11	733.18
12	662.54
13	615.55
14	594.73
15	593.61
16	575.90
17	556.82
18	549.20
19	549.81
20	551.61

8 - Criação da superfície envoltória da onda de ruptura

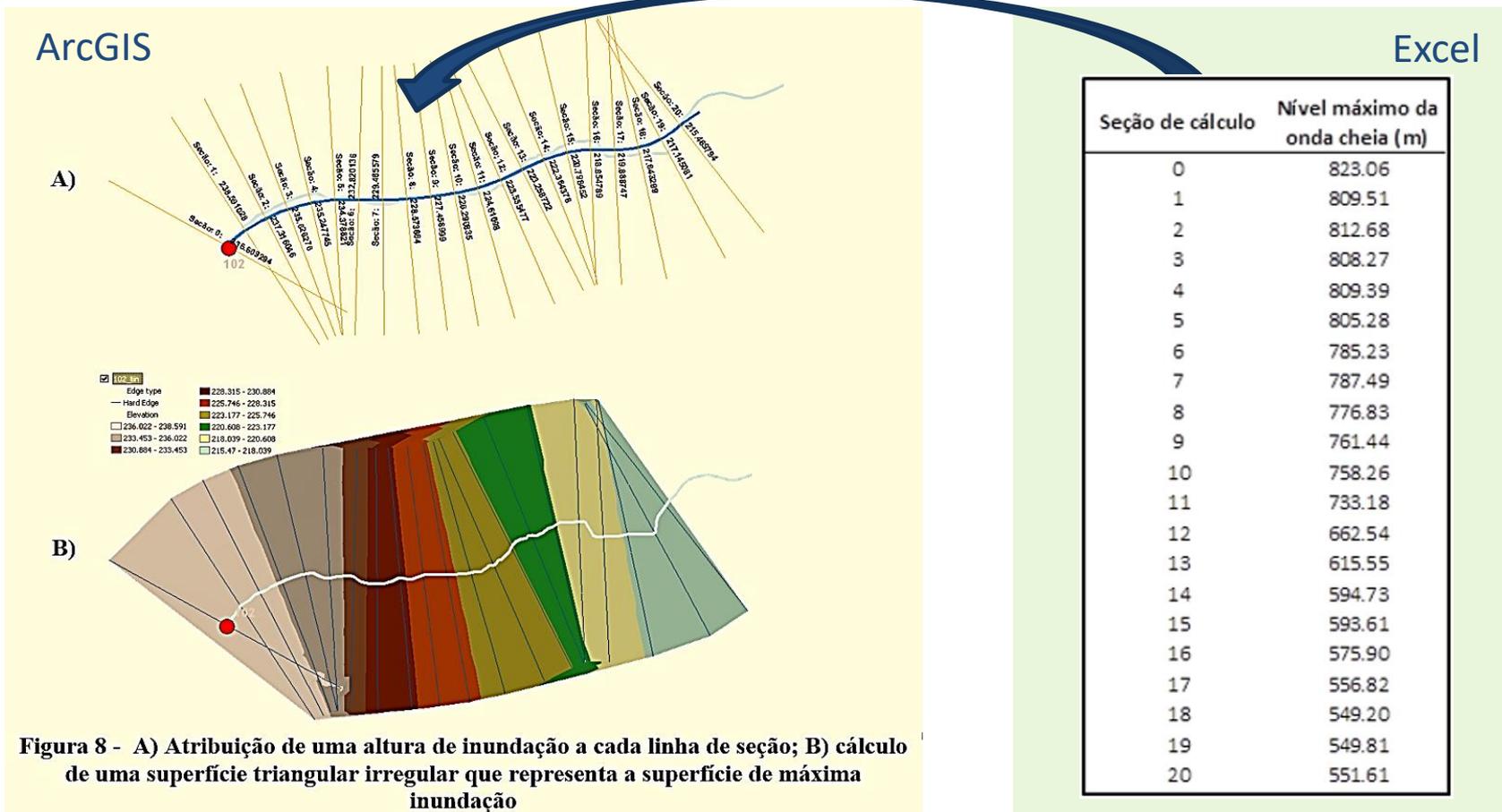


Figura 8 - A) Atribuição de uma altura de inundação a cada linha de seção; B) cálculo de uma superfície triangular irregular que representa a superfície de máxima inundação

9 - Obtenção do polígono classificação de DPA

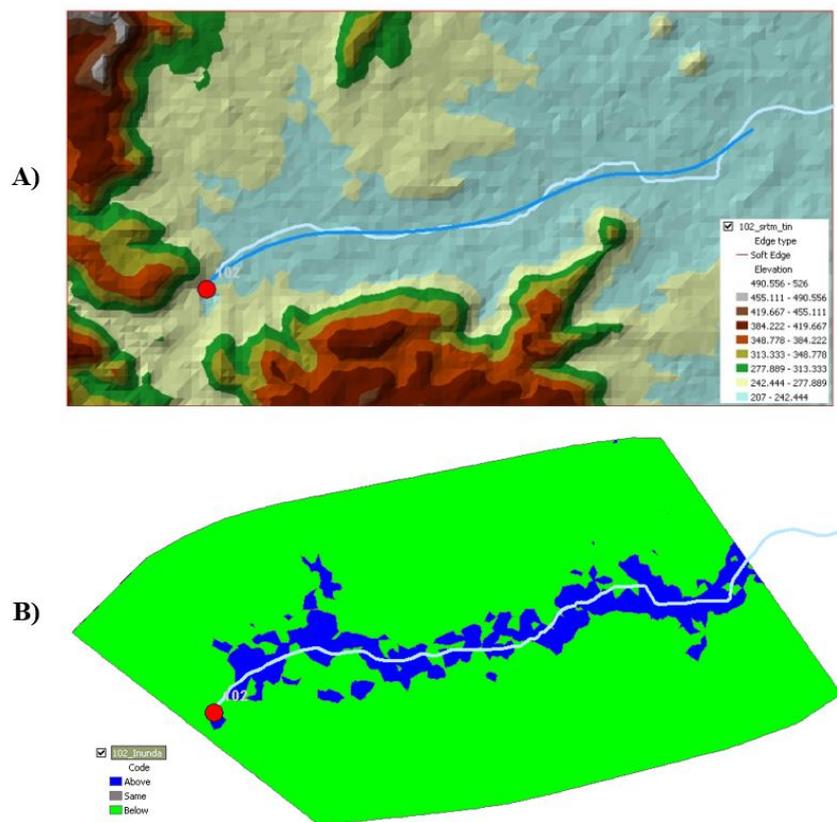
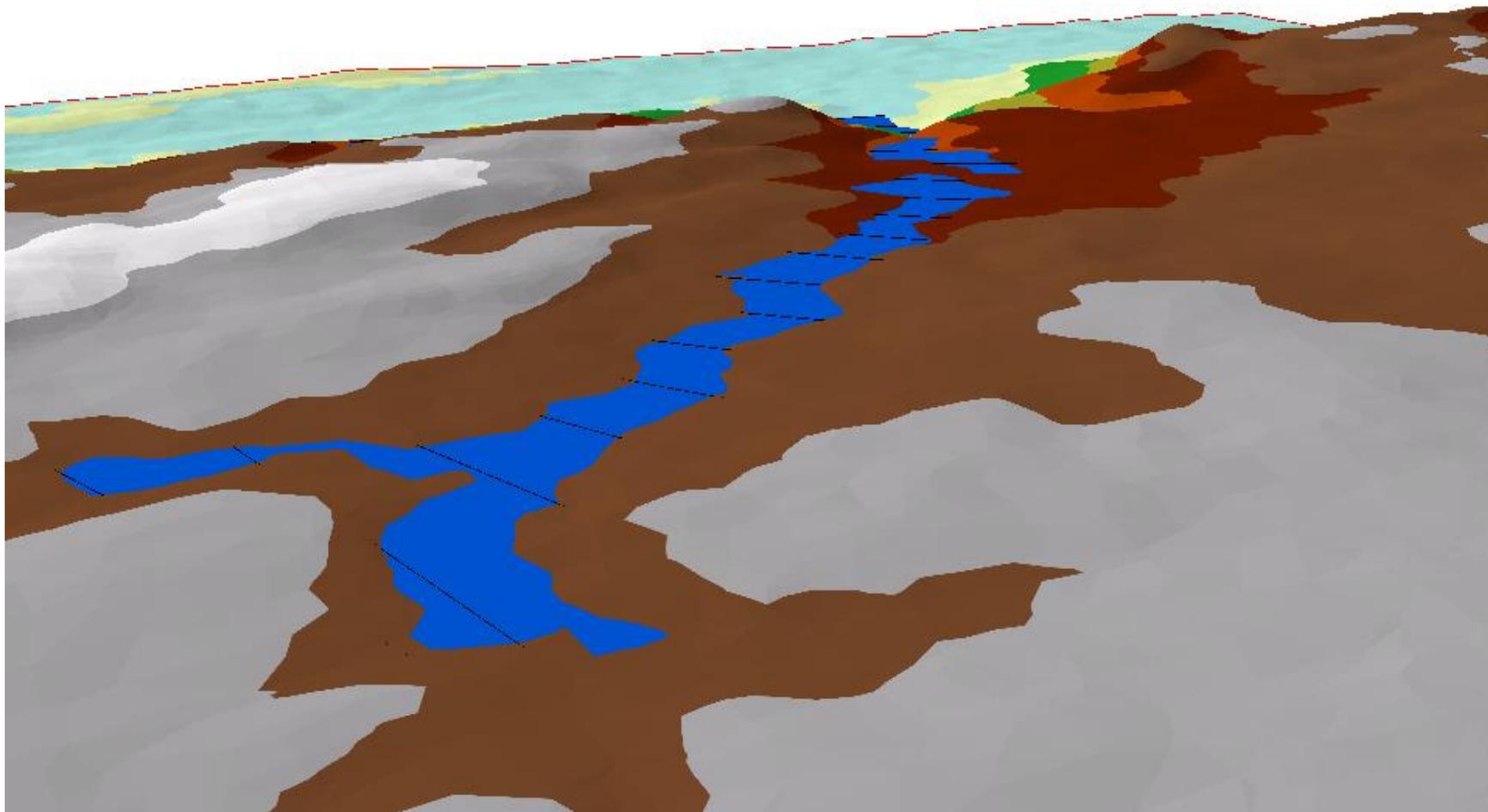


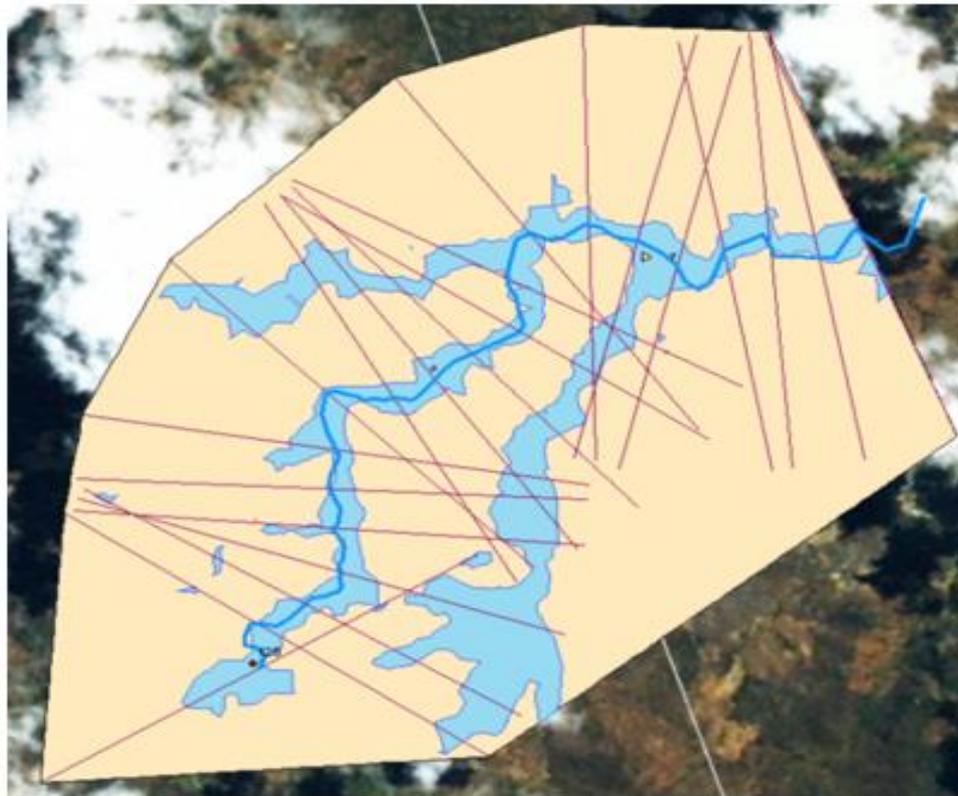
Figura 9 - A) TIN de altitude do terreno; B) área de inundação obtida por diferença entre as TIN da superfície de máxima inundação e da altitude do terreno

9 - Obtenção do polígono classificação de DPA

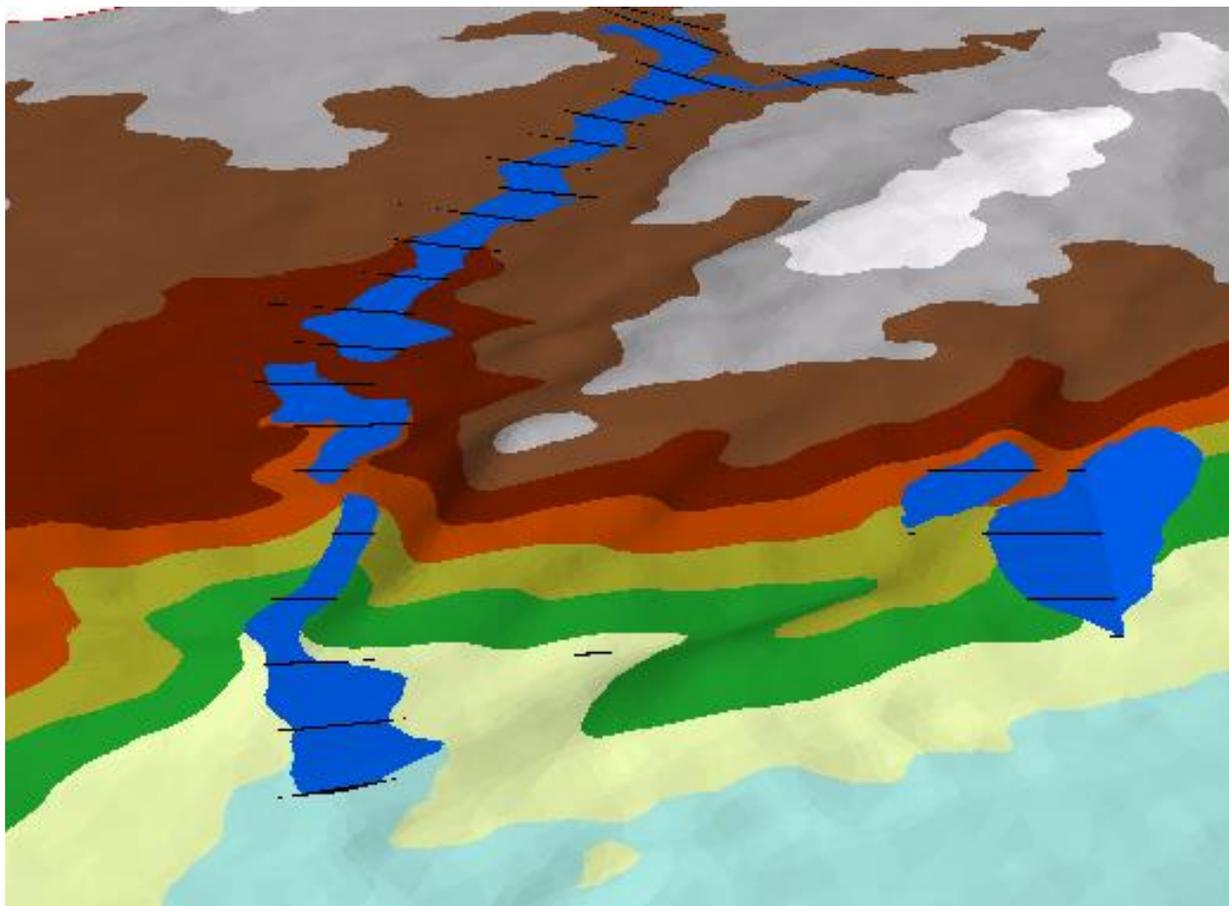


9 - Obtenção do polígono classificação de DPA

A)



9 - Obtenção do polígono classificação de DPA



9 - Obtenção do polígono classificação de DPA

E se nós mudarmos a geometria das seções transversais?

Como podemos mudar a geometria das seções sem invalidar o método?

Apenas para a geração da superfície envoltória, após o cálculo hidráulico

9 - Obtenção do polígono classificação de DPA

PODE

1. Quebrar a seção em vértices para acompanhar o relevo.
2. Acompanhar afluentes largos e baixos com a seção mais próxima da sua foz.
3. Aumentar ou diminuir o comprimento da seção.

NÃO PODE

1. Tirar o ponto central da seção da posição.
2. Mudar o ângulo entre a seção e o rio principal (aproximadamente na perpendicular).
3. Alterar a seção em torno do rio principal.
4. Cruzar as seções.

9 - Obtenção do polígono classificação de DPA



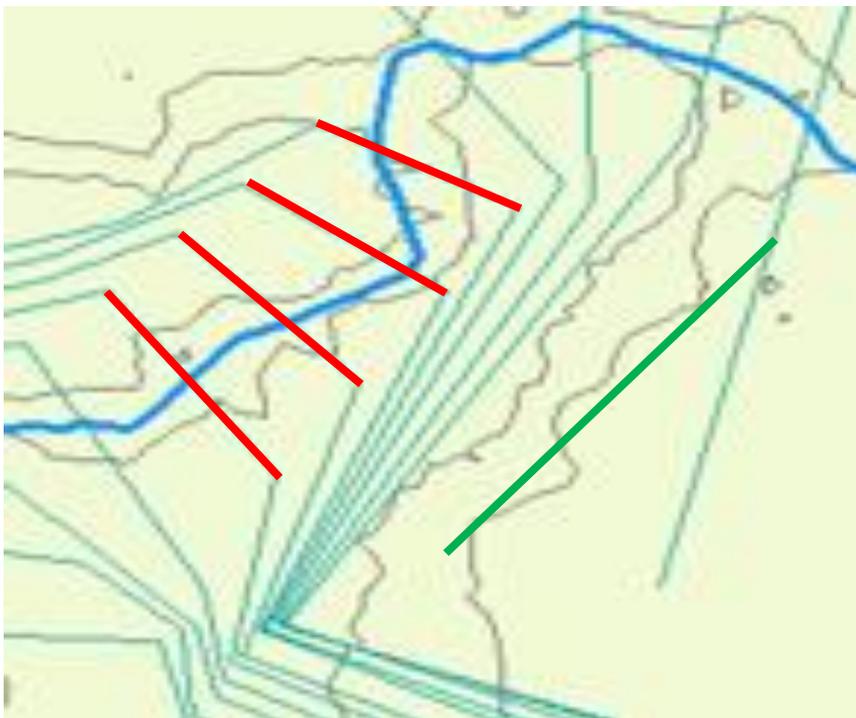
PODE

Quebrar a seção em vértices para acompanhar o relevo.

NÃO PODE

Tirar o ponto central da seção da posição.

9 - Obtenção do polígono classificação de DPA



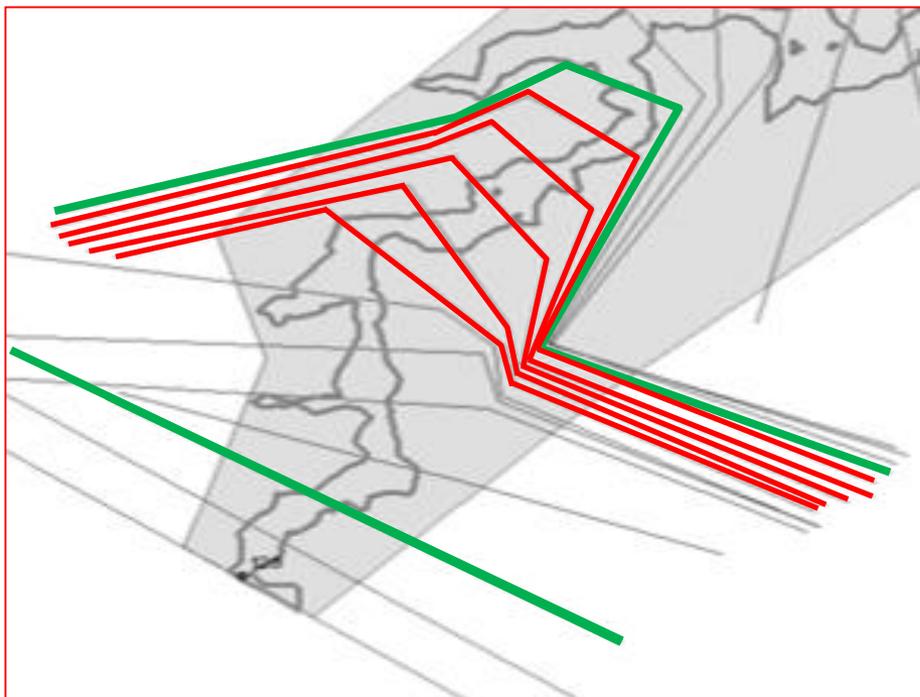
PODE

Acompanhar afluentes largos e baixos com a seção mais próxima da sua foz.

NÃO PODE

1. Mudar o ângulo entre a seção e o rio principal (*aproximadamente* na perpendicular).
2. Alterar a seção em torno do rio principal.

9 - Obtenção do polígono classificação de DPA



PODE

Aumentar ou diminuir o comprimento da seção.

NÃO PODE

Cruzar as seções.

Obrigado!

Marcio Bomfim

Especialista em Geoprocessamento

marcio.bomfim@ana.gov.br | (+55) (61) 2109 –5589

www.ana.gov.br



www.twitter.com/anagovbr

The Facebook logo, consisting of the word "facebook" in white lowercase letters on a dark blue rectangular background.

www.facebook.com/anagovbr

The YouTube logo, featuring the word "You" in black and "Tube" in white on a red rounded rectangle.

www.youtube.com/anagovbr