



9º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior

Manaus, 6 a 8 de Outubro de 2015

Determinação do Modelo Digital de Elevação de rios de grande extensão para uso em projetos de engenharia - Estudo de caso do trecho brasileiro da Hidrovia do Rio Paraguai.

Henrique Guarneri
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Renata Correia
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Philipe Ratton
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Carlos Aurélio Nadal
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Rodrigo de Castro Mouro
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Tobias Bleninger
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Eduardo Ratton
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)

Resumo:

Este trabalho apresenta a metodologia de criação de um Modelo Digital de Elevações (MDE) para o trecho brasileiro da Hidrovia do Rio Paraguai (1272 km) a partir das informações contidas nas cartas náuticas da Marinha do Brasil. As cartas planimétricas (disponibilizadas em formato raster) foram vetorizadas e as profundidades informadas foram transformadas em valores de altitude. Essa transformação foi feita a partir de interpolações dos níveis de redução das réguas linimétricas existentes ao longo do rio e também dos seguintes dados coletados em campo (junho de 2014): traçado do canal de navegação, rastreio de 77 RRNN implantadas no trecho, tomadas de lâmina da água nos locais de maior interesse. Para isso, foi utilizada a abordagem de linearização dos dados vetorizados, atribuindo a cada ponto batimétrico uma altitude derivada da sua relação linear com a quilometragem da hidrovia. O MDE tem suas altitudes referenciadas ao nível médio dos mares (zero da régua de Imituba). Assim, pode ser utilizado como dado de entrada para um modelo hidrodinâmico (em fase de implementação), que simulará distintas situações de vazão para avaliar os trechos do Rio Paraguai mais críticos em termos de profundidade disponível para o tráfego de embarcações. Uma vez definidos os passos críticos à navegação, serão elaborados projetos de dragagem com estimativa de volumes de sedimentos e custos do empreendimento.

1 – Introdução

Modelos Digitais de Elevação (MDE) de rios tem grande valor em projetos de pesquisa e de engenharia. Eles fornecem a base necessária

para a elaboração de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos.

Modelos hidrológicos e hidrodinâmicos geram perfis da linha d'água para diversos cenários como cheias e estiagens. Estas informações são base para asserções como

cotas de dragagem, calado máximo de embarcações, previsões de cheias e estiagens e determinação de trechos críticos à navegação. São fundamentais para a correta e eficiente gestão de vias navegáveis a fim de otimizar planos de dragagem, definir embarcações-tipo e emitir alertas em situações de risco.

A elaboração de modelos digitais de elevação, no entanto, requer muito cuidado, principalmente no que se refere a interpolações de altitudes e sua atribuição aos pontos cotados. O que se espera de um bom modelo de elevações para rios é que respeite a declividade do rio atribuindo uma variação constante de altitudes a cada sucessiva seção transversal. Procedendo desta forma garante-se uma boa base para a elaboração de modelos hidrodinâmicos e hidrológicos, onde parâmetros como a declividade estão diretamente ligados ao comportamento do escoamento e permitem a análise de trechos com restrições à navegação.

Para trechos de rios com pequenas extensões, este problema pode ser facilmente resolvido pois existem muitos softwares disponíveis que realizam a interpolação de altitudes linearmente entre o alinhamento de dois pontos. No entanto, soluções para trechos de rios de grande extensão devem levar em consideração o traçado do rio como sistema de referência para a interpolação e atribuição das altitudes, o que representa um desafio substantivo. Os softwares existentes têm aplicação mais restrita, não apresentando flexibilidade quanto ao uso de suas funções. Assim, optou-se pelo desenvolvimento de uma metodologia com rotinas de programação específicas (em linguagem Python) para a solução do problema.

Este artigo apresenta uma metodologia geral para a criação de modelos digitais de elevação de trechos de rios de grande extensão. A metodologia é aplicada a partir de dados batimétricos e de contorno de margem na Hidrovia do Rio Paraguai, fornecidos pela Marinha do Brasil e disponibilizados em seu sítio eletrônico (DHN, 2015).

A Hidrovia do Rio Paraguai é um importante eixo de integração política internacional, bem como um vetor de desenvolvimento econômico brasileiro. Estende-se por 1272 km desde Cáceres/MT até a foz do Rio Apa, próxima a Porto Murtinho/MS.

A principal carga transportada na hidrovia atualmente é o minério de ferro, que corresponde a 98% da carga transportada, com aproximadamente 6 milhões ton/ano. As produções cada vez maiores de grãos,

principalmente no estado do Mato Grosso, fomentam a possibilidade de firmar o transporte de cargas no tramo norte da hidrovia, entre a cidade de Cáceres/MT e Corumbá/MS.

Neste contexto, o projeto intitulado “Estudo de Viabilidade Técnico, Econômica e Ambiental (EVTEA) da Hidrovia do Rio Paraguai”, que engloba o trajeto brasileiro da hidrovia, é objeto de uma parceria entre o Departamento Nacional de Transportes e Infraestrutura (DNIT) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR), que o desenvolve por meio do Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI). Os resultados apresentados neste artigo são derivados do escopo deste Projeto.

2 – Área de Estudo

A área de estudo compreende a Hidrovia do Rio Paraguai, no trecho brasileiro entre a cidade de Cáceres no Mato Grosso e a foz do Rio Apa no Mato Grosso do Sul, perfazendo 1272 km (Figura 1). O rio apresenta uma largura média de 700 m e uma declividade média de 3,2 cm/km. O período de águas baixas ocorre normalmente entre julho e novembro; e o período de águas altas entre dezembro e abril (AHIPAR, 2015).

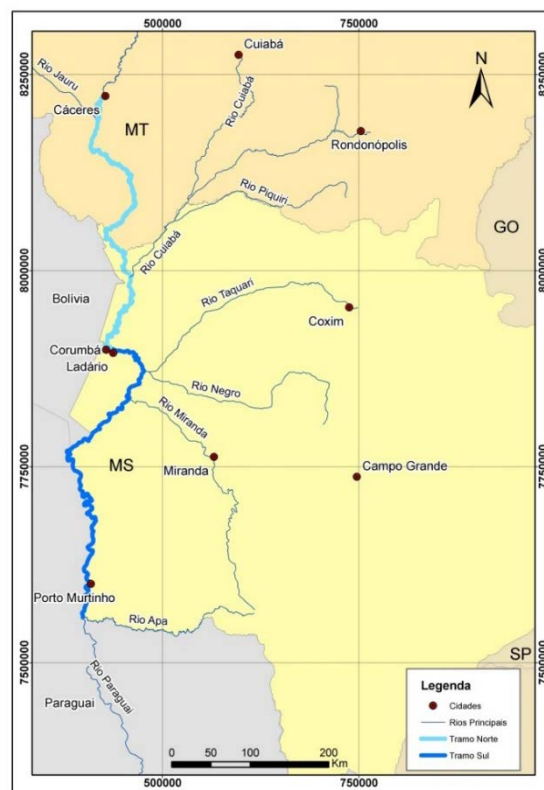


Figura 1 – Área de estudo.
Fonte: UFPR/ITTI (2014)

3 – Materiais e Métodos

Para a aplicação do método, é necessário realizar o levantamento das coordenadas geodésicas (latitude e longitude) e da altitude ortométrica das RRNN implantadas ao longo do rio em estudo. Ou, no caso de ausência de RRNN, implantar novas. Entende-se como altitude ortométrica aquela referenciada ao geóide (nível médio dos mares). O controle de qualidade destas RRNN deve apresentar alta precisão, pois são os dados base fundamentais para a criação do MDE.

Com os valores das altitudes ortométricas das RRNN, deve-se realizar uma campanha de leitura da lâmina d'água nas réguas linimétricas disponíveis no trecho, associando os níveis medidos a valores de altitude. Se houver uma régua junto à RRNN de referência, esta pode ser medida diretamente; caso a RRNN esteja entre duas réguas, recomenda-se a leitura das duas réguas (a montante e a jusante) no mesmo dia.

O traçado do canal de navegação ao longo do rio é necessário para interpolar as altitudes, adotando-se um valor de quilometragem para cada ponto. Utiliza-se um método para suavização e ajuste da curva tipo Belzier, que mantém as tangentes das linhas de entrada e saída de cada nó escolhido no trajeto.

As cartas náuticas são documentos oficiais confeccionados pela Marinha do Brasil, através da Diretoria de Hidrografia e Navegação, com o intuito de auxiliar a navegação, bem como apresentar regras, sinalizações e orientações de forma a garantir a segurança das embarcações. Os valores de profundidade informados nas cartas são referenciados a um nível de redução (NR). O nível de redução adotado pela Marina corresponde ao percentil 10, ou seja, o nível garantido em 90% do tempo. A altitude das margens representadas nas cartas náuticas corresponde à altitude do NR no trecho (Miguens, 1996). Em geral, cartas náuticas são as fontes que melhor apresentam a consolidação de informações, pois estão em constante atualização e são documentos oficiais. Assim, são instrumentos base para a elaboração de estudos de grandes trechos de rios navegáveis (DHN, 2015).

Uma vez que se tenham dados batimétricos referenciados ao nível de redução, dados vetorizados das profundidades das cartas náuticas, níveis da linha d'água rastreados com boa precisão altimétrica e um traçado longitudinal do rio, pode-se transformar as profundidades informadas nas cartas em altitudes ortométricas para utilização em modelo hidrodinâmico.

3.1 – Transformação das coordenadas

Para atribuição das altitudes às profundidades primeiro deve-se transformar as coordenadas planimétricas de um sistema cartesiano (E,N) para um sistema de coordenadas orientado ao escoamento (s,d). Essa transformação foi adaptada de Merwade (2005) e pode ser realizada geometricamente utilizando o traçado longitudinal do rio como referência. Cada ponto cotado recebe um valor s correspondente à distância da sua seção transversal do início do traçado e um valor d correspondente a sua distância ortogonal até o traçado longitudinal. A seguinte equação pode ser utilizada para essa transformação:

$$[s, d] = [S_b + (|\overline{PB}| \cdot \cos(\alpha)), \psi (|\overline{PB}| \cdot \sin(\alpha))] \quad (1)$$

Onde:

α é o ângulo entre \overline{AP} e \overline{AB} .

S_b é a distância longitudinal de B até o início do traçado de referência;

B é a coordenada planimétrica $[E_B, N_B]$ do ponto do canal à montante;

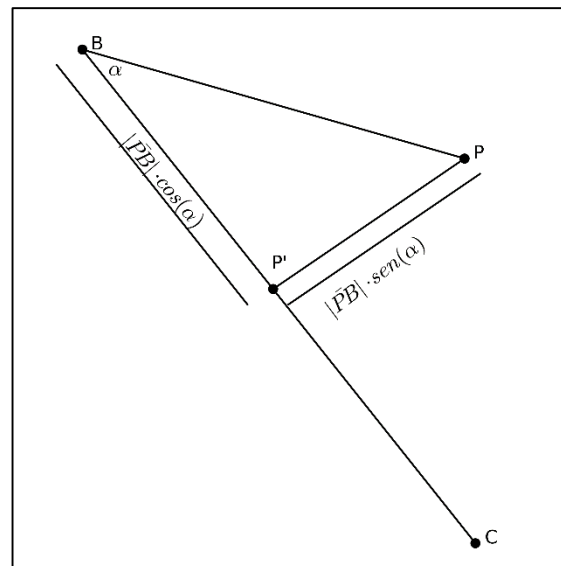
C é a coordenada planimétrica $[E_C, N_C]$ do ponto do canal à jusante;

P é a coordenada planimétrica $[E_P, N_P]$ do ponto em questão;

$\psi = \frac{\begin{vmatrix} \overline{CB}_x & \overline{CB}_y \\ \overline{PB}_x & \overline{PB}_y \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \overline{CB}_x & \overline{CB}_y \\ \overline{PB}_x & \overline{PB}_y \end{vmatrix}}$ é igual a -1 para pontos a direita

e 1 para pontos a esquerda do eixo longitudinal do canal.

Na Figura 2 é possível visualizar o conceito básico da aplicação do método.



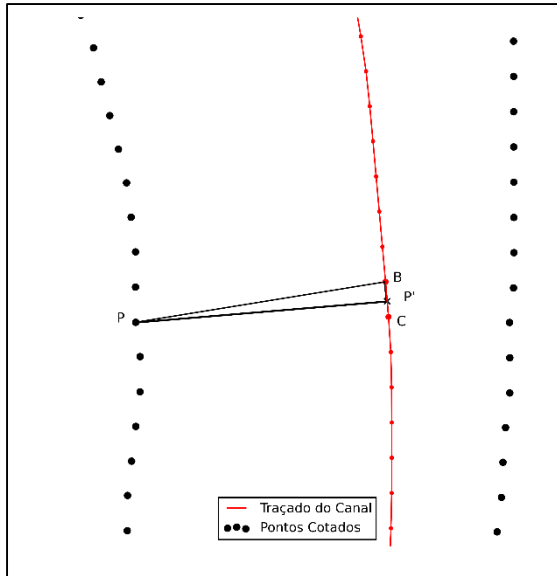


Figura 2 - Conceito básico da aplicação da transformação de projeções.

3.2 Algoritmo

Um desafio na implementação do algoritmo é encontrar qual par $[B, C]$ corresponde a cada P . Uma possível solução é verificar para quais pontos a equação 2 é respeitada.

$$|\overline{CB}| = |\overline{P'B}| + |\overline{CP'}| \quad (2)$$

Onde:

$$P' = B + |\overline{PB}| \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{\overline{CB}}{|\overline{CB}|} \quad (3)$$

Para o caso de um ponto P ter múltiplos pares (B, C) , o mais próximo é provavelmente o par correto. No entanto, deve-se ajustar um parâmetro verificador condizente com as características do rio em questão para o caso do par mais próximo encontrado não ser de fato o par correto. Isto ocorre devido a um efeito chamado de sombreamento. Para minimizar os efeitos dos sombreamentos deve-se ajustar o traçado central do canal a uma curva Belzier ou a alguma outra que mantenha para cada nó a mesma tangente de entrada e saída, assim suavizando o traçado e evitando curvas agudas.

3.3 – Interpolação das altitudes

Uma vez atribuídos todos os valores $[s, d]$ aos seus respectivos pontos cotados, pode-se interpolar as altitudes linearmente ao longo do canal como função de s . As altitudes calculadas devem estar na mesma referência que os valores de profundidade, ou seja, se as profundidades cotadas se encontram

referenciadas ao nível de redução das réguas ao longo da hidrovia, as altitudes devem ser compatíveis com esses mesmos níveis. Cada ponto tem altitude definida conforme a equação 4.

$$A_p = A(s_p) - h_{prof} \quad (4)$$

Onde:

A_p é a altitude do ponto;

$A(s_p)$ é a altitude da lâmina d'água a s metros da origem do traçado;

h_{prof} é a profundidade cotada no ponto.

A altitude em cada ponto é calculada interpolando-se os valores das altitudes (A) entre a RRNN a montante i e a RRNN a jusante $i+1$. A generalização deste raciocínio é descrita pela equação 5.

$$A(s) = \frac{A_{i+1} - A_i}{S_{i+1} - S_i} \cdot s + A_i - \frac{A_{i+1} - A_i}{S_{i+1} - S_i} \cdot S_i \quad (5)$$

Onde: S é a distância longitudinal entre a RRNN e o ponto de início.

Nas operações realizadas acima é importante que se mantenham os dados $[E, N]$ de cada ponto, pois ao final são eles que serão associados aos valores ortométricos.

4 – Estudo de caso

Dentro do escopo do EVTEA, a metodologia descrita nos itens anteriores foi aplicada ao Rio Paraguai. As frentes de trabalho foram organizadas em tramos norte e sul. O tramo norte é definido como o trecho do Rio Paraguai compreendido entre as cidades de Cáceres/MT e Corumbá/MS. O tramo sul é o trecho entre Corumbá/MS e a foz do Rio Apa. Neste trabalho somente será apresentada a metodologia aplicada ao tramo sul, cujos resultados subsidiam o desenvolvimento do modelo hidrodinâmico em fase de implementação (Correia et al., 2015).

Os pontos localizados dentro do rio e junto às margens foram vetorizados a partir das cartas náuticas da Marinha do Brasil (DHN, 2015). Por consistirem em uma fonte de informações completa e oficial foram utilizados para gerar o MDE empregado no modelo hidrodinâmico.

Uma campanha de levantamento de campo foi realizada para instalação de RRNN, rastreio de suas altitudes e tomada da lâmina d'água nos locais de instalação. Este foi efetivado por levantamentos GNSS, realizados pela UFPR/ITTI. Como resultado tem-se as coordenadas geodésicas destas (latitude, longitude e altitude ortométrica) (NADAL et al., 2015). Foram materializadas ao total 77 RRNN ao longo dos tramos norte e sul, sendo 46 no

norte e 31 no sul. A Figura 3 mostra a localização das RRNN implantadas no tramo sul.

As leituras das lâminas d'água foram então reduzidas ao nível de redução das réguas linimétricas oficiais do Rio Paraguai. Esta redução foi realizada longitudinalmente e linearmente, conforme metodologia descrita por Guarneri et al. (2015). A Tabela 1 apresenta as RRNN de referência e as altitudes das lâminas d'água reduzidas ao nível de redução.

A partir desta tabela é possível verificar que de Ladário (AUX) a Porto Murtinho (34A) a declividade média é de 1,8 cm/km.

O traçado de referência utilizado foi o canal percorrido na campanha de batimetria longitudinal de junho de 2014 (Guarneri et al., 2015). Este traçado foi então suavizado levemente em uma curva Belzier e os pontos utilizados foram separados em intervalos fixos de 20 metros. Esse procedimento, como visto anteriormente, minimiza o efeito de sombreamento.

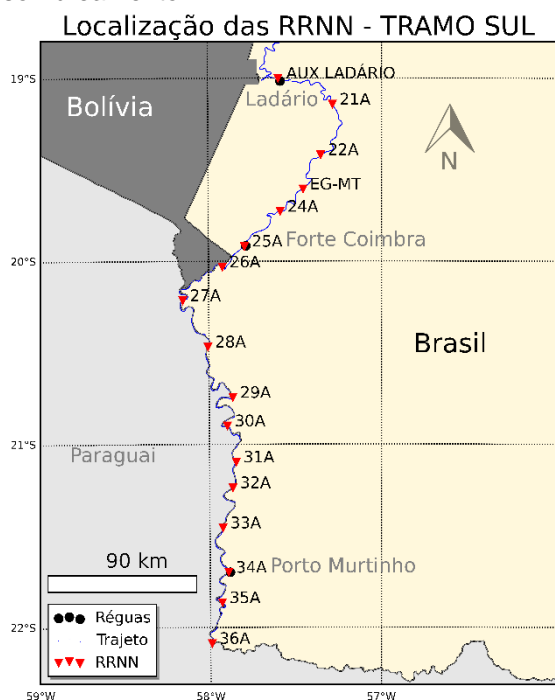


Figura 3 – Localização das RRNN implantadas e levantadas.

Tabela 1 – Resumo das instalações e levantamentos de RRNN no Rio Paraguai.

Fonte: Nadal et al. (2015).

ID	E	N	A	DATA	S	A-R
AUX	437401	7898821	84.91	08/01/2015 13:53	4079	84.75
21A	470315	7883059	83.53	10/01/2015 14:00	58616	83.35
22A	463196	7852557	82.4	11/01/2015 07:34	99215	82.21

EG-MT	452567	7831768	81.58	11/01/2015 09:47	129394	81.38
24A	438741	7818247	81.04	11/01/2015 09:47	154314	80.84
25A	417151	7797112	80.55	12/01/2015 08:20	194652	80.35
26A	403802	7784611	79.55	12/01/2015 09:44	215091	79.36
27A	379905.7	7764325	78.18	13/01/2015 12:05	261189	78.03
28A	395085.9	7736215	77.99	14/01/2015 11:13	306388	77.88
29A	410195.1	7705711	77.4	15/01/2015 11:13	357187	77.35
30A	406911.5	7688514	77.05	16/01/2015 11:26	401045	77.05
31A	412279.8	7666674	76.66	17/01/2015 07:24	430404	76.69
32A	410179.2	7651107	76.38	18/01/2015 08:17	447222	76.42
33A	404288.1	7626883	75.63	18/01/2015 09:18	481741	75.71
34A	407765.3	7599972	75.48	19/01/2015 10:11	518080	75.61
35A	403929.6	7581667	74.44	20/01/2015 09:07	546506	74.57
36A	397761.7	7556918	74.27	20/01/2015 10:06	579225	74.4

Para referência de distância longitudinal, Corumbá/MS foi definido como km 0 do tramo sul, desta forma a partir do cálculo acumulado de distâncias cada ponto do traçado recebeu uma quilometragem (s) que será atribuída aos demais pontos. Cada RRNN recebeu um s respectivo ao ponto do traçado mais próximo.

4.1 – Transformação das coordenadas

A transformação de projeção foi realizada conforme equação 1. A Figura 4 apresenta o mesmo trecho em coordenadas planimétricas (E,N) e coordenadas no sentido do escoamento (s,d).

Para obtenção desses resultados foi necessária a separação dos conjuntos de pontos de margem, batimetria e traçado em 5 subgrupos. O algoritmo foi aplicado para 10 combinações diferentes, 5 de traçado e margem e 5 de traçado e batimetria. Isso devido à grande quantidade de pontos e o tempo de execução do algoritmo.

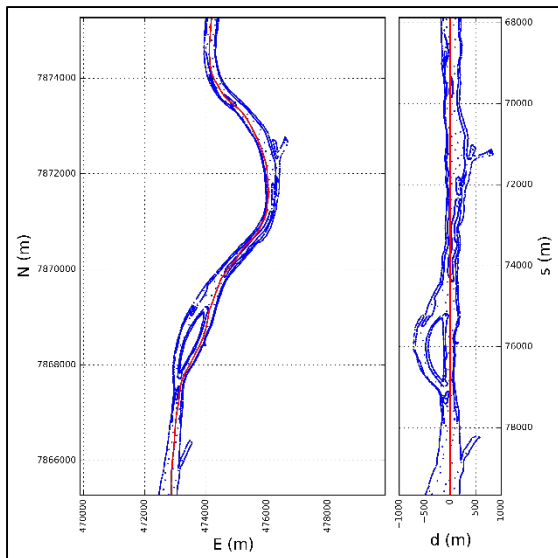


Figura 4 – Transformação de coordenadas (E,N) para (s,d).

4.2 – Interpolação das altitudes

A interpolação das altitudes foi realizada com base nas réguas linimétricas de Cáceres, Forte Coimbra e Porto Murinho. Existem outras réguas existentes na Hidrovia do Paraguai que constam no banco de dados da Agência Nacional das Águas (ANA). No entanto, só foram utilizadas as réguas com níveis de redução oficiais disponibilizados pelo Serviço de Sinalização Náutica do Oeste (SSN-6).

A redução das leituras da lâmina d'água aos níveis de redução da hidrovia foi realizada com base na metodologia apresentada por Guarneri et al. (2015). Os resultados desta redução estão apresentados na Tabela 1 na coluna 'A-R', referente a altitude menos redução. A Figura 5 apresenta o perfil da lâmina d'água em altitudes ortométricas.

Os valores de altitude foram atribuídos aos pontos cotados conforme a equação 4. A Figura 6 apresenta o mesmo trecho em coordenadas planimétricas (E,N) e coordenadas no sentido do escoamento (s,d) após receber os valores de altitudes (A,d). Note que somente são representados os valores referentes às margens visto que os valores de batimetria têm sua altitude subtraída de sua profundidade.

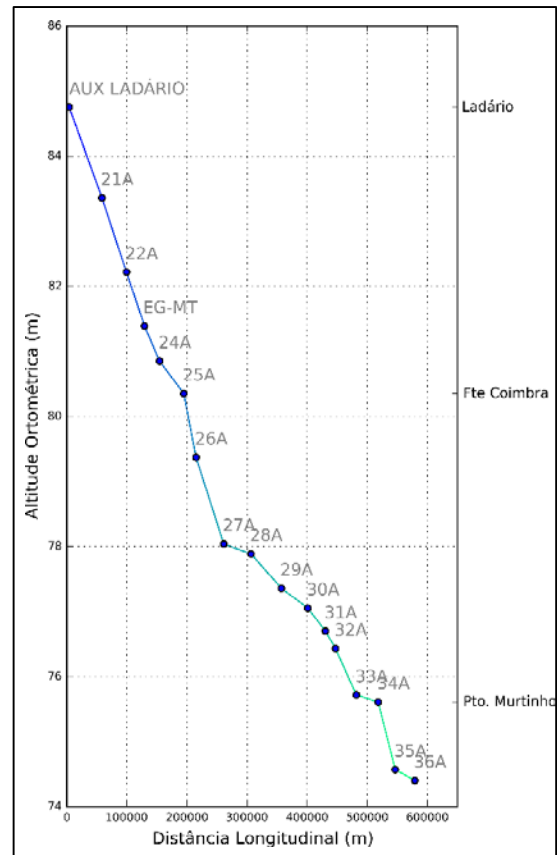


Figura 5 – Perfil da lâmina d'água no nível de redução.

5 – Considerações Finais

Este artigo apresenta uma metodologia para a geração de modelos digitais de elevação de rios de grande extensão para usos em projetos de engenharia. Apresenta também a aplicação dessa metodologia para a geração do modelo de elevações preliminar do tramo sul da Hidrovia do Rio Paraguai, compreendido entre Corumbá (MS) e a foz do Rio Apa (MS).

Os resultados obtidos são satisfatórios para a utilização em modelagens hidrodinâmicas devido à acurácia e precisão da implementação do algoritmo de interpolação de altitudes por meio do método de transformações de projeções. Atribui-se também os bons resultados à campanha de implantação das RRNN no Rio Paraguai, descrita por Nadal et al. (2015), que proporcionou os dados de posicionamento vertical.

Em relação aos níveis de redução (NRs) das réguas linimétricas, há divergência entre os valores informados pela Marinha e os valores calculados com base nas séries históricas mais recentes disponibilizadas pela ANA. Essa divergência implica na alteração das altitudes dos níveis de redução, afetando diretamente o MDE e o modelo hidrodinâmico em desenvolvimento. Não há, inclusive, uma

metodologia consagrada e divulgada pelos órgãos competentes para se realizar o cálculo desses níveis. Por esse motivo, optou-se neste trabalho por utilizar os NRs oficiais da Marinha do Brasil.

O mesmo método está sendo implementado para o tramo norte da Hidrovia do Rio Paraguai e os novos resultados deverão ser integrados em futuras publicações.

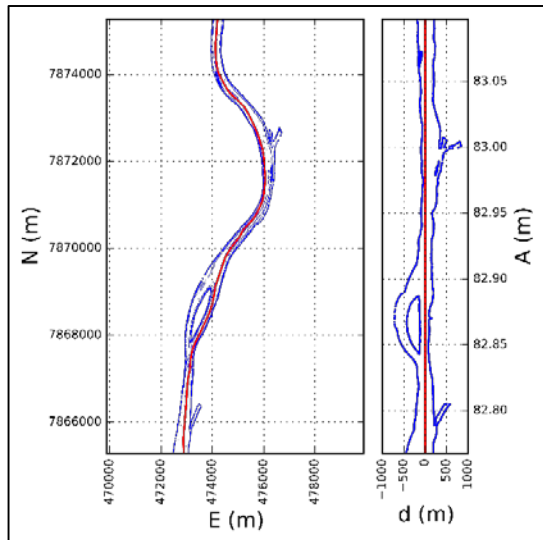


Figura 6 – Coordenadas (E,N) e (A,d) do mesmo trecho.

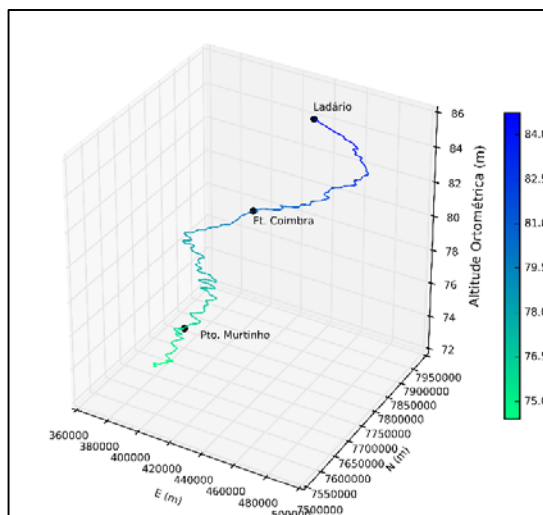


Figura 7 – Visualização 3D do canal de navegação do Rio Paraguai.

6 – Agradecimentos

Este trabalho está inserido no Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) da Hidrovia do Paraguai. Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), à Marinha do Brasil, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos

Hídricos e Ambiental (PPGERHA/UFPR) e ao Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR).

7 – Referências Bibliográficas

AHIPAR, Administração da Hidrovia do Rio Paraguai. <http://www.ahipar.gov.br/> acessado em julho de 2015

CORREIA, R.; GUARNERI, H.; RATTON, P.; BLENINGER, T.; BARSOTTI, H.; TOMAS, G.; RATTON, E.; GODOY, P. et al. (2015). *A contribuição da modelagem hidrodinâmica na caracterização de um sistema fluvial – Estudo de caso de trecho da Hidrovia do Paraguai*. Artigo submetido ao 9º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior, Sobena 2015.

DHN. *Cartas Náuticas rasterizadas*. http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html acessado em julho de 2015.

GUARNERI, H.; RATTON, P.; CORREIA, R.; BLENINGER, T.; BARSOTTI, H.; TOMAS, G.; RATTON, E.; GODOY, P. *Determinação de trechos críticos à navegação em rios de grande extensão - Estudo de caso: trecho brasileiro da Hidrovia do Rio Paraguai*. Artigo submetido ao 9º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior, Sobena 2015.

MERWADE, V.; MAIDMENT, D.; HODGES, B. *Geospatial Representation of River Channels*. J. Hydrol. Eng., 10(3), 243–251.

MIGUENS, P. *Navegação: A Ciência e a Arte*. Rio de Janeiro. DHN, 1996. 1ª Edição.. Volume III, Cap.40, Pag 1529. (disponível em www.dhn.mar.mil.br).

NADAL, C.; VEIGA, A.; RATTON, E.; MORO, R.; BOESE, V.; NICOLAU, M.; GODOY P. *Posicionamento Vertical em Hidrovias Segundo Prescrições Internacionais da FIG-International Federation of Surveyors*. Artigo submetido ao 9º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior, Sobena 2015.