



9º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior

Manaus, 6 a 8 de Outubro de 2015

Determinação de trechos críticos à navegação em rios de grande extensão - Estudo de caso: trecho brasileiro da Hidrovia do Rio Paraguai.

Henrique Guarneri
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Philippe Ratton
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Renata Correia
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Hector Guilherme Barsotti
Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI/UFPR)
Gustavo Pacheco Tomas
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:

No contexto da elaboração do EVTEA da Hidrovia do Rio Paraguai, proveniente de um termo de cooperação entre a UFPR e o DNIT, este artigo apresenta a metodologia aplicada para identificar os trechos críticos à navegação no trecho brasileiro do Rio Paraguai, entre Cáceres/MT e a Foz do Rio Apa (1270 km). Uma campanha de campo foi realizada para coletar dados de batimetria longitudinal e de nível d'água nas réguas limimétricas existentes. A partir dos valores de Nível de Redução das réguas, foi possível corrigir as medições batimétricas. Um algoritmo de clusters (DBSCAN) foi utilizado para agrupar os pontos com profundidades inferiores à de projeto, permitindo identificar os locais com necessidade de dragagem. Nesses locais, chamados 'passos críticos', os volumes a serem dragados foram calculados a partir da comparação entre o relevo do fundo e a cota de projeto do canal de navegação. Ao final obtiveram-se 39 clusters e 1.631.793 m³ de sedimentos a serem dragados. Entre as vantagens desta metodologia, está a facilidade e acurácia no cálculo da ordem de grandeza dos volumes de dragagem. Sua aplicação de forma planejada, pode auxiliar a Administração da Hidrovia para a contratação de detalhamentos batimétricos em áreas de interesse, aumentando a segurança da navegação. É importante destacar a necessidade de implantação e operação correta das réguas para melhorar a precisão das estimativas.

1 – Introdução

Gerenciar as atividades de dragagem e manutenção de hidrovias de grande extensão pode apresentar grandes desafios de logística e de engenharia. O ciclo hidrológico exerce influência sobre o transporte de sedimentos em

rios com fundos móveis e pode alterar ao longo do tempo a batimetria dos trechos navegáveis.

Dentre as dificuldades oriundas deste processo, está a identificação e quantificação dos trechos críticos à navegação através de uma metodologia célere e confiável. Não há no Brasil nenhuma metodologia consagrada e atualmente em vigor. Normalmente, depende-

se muito mais da experiência e intuição de profissionais da área do que de métodos técnicos e objetivos.

Esse artigo pretende apresentar uma metodologia simples e eficaz para a identificação dos trechos críticos à navegação segundo os calados de projeto de uma hidrovía em estudo, bem como uma estimativa preliminar de volumes de dragagem. Com os resultados obtidos, são definidos os trechos que requerem atenção, detalhamento batimétrico e possivelmente dragagens ou intervenções mais duradouras (espigões, proteção de margens, etc).

O método proposto foi desenvolvido no âmbito do Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) da Hidrovía do Paraguai, resultado do Termo de Cooperação nº 096/2014, celebrado entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR), a qual realiza os estudos através do Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI).

A Hidrovía do Paraguai tem fundamental importância como meio de escoamento da produção de sua área de influência e vetor logístico das micro/meso regiões a que serve, bem como indutora de desenvolvimento do país.

O presente artigo busca apresentar um diagnóstico do perfil batimétrico longitudinal do Rio Paraguai, como subsídio para a aferição dos trechos críticos à navegabilidade segundo a profundidade de projeto da hidrovía. São apresentadas as técnicas utilizadas no processamento dos dados e os resultados da análise.

2 – Área de Estudo

O trecho do Rio Paraguai em análise situa-se integralmente em território brasileiro, entre Cáceres/MT e a confluência com o Rio Apa, estendendo-se por aproximadamente 1270 km. Devido a característica técnicas e operacionais, a hidrovía pode ser dividida em dois tramos (Figura 1): 1) “Tramo Norte”: entre as cidades de Cáceres/MT e Corumbá/MS (670 km); 2) “Tramo Sul”: entre Corumbá/MS e a foz do Rio Apa (divisa entre o Brasil e o Paraguai) (600 km).

3 – Levantamentos de Campo

Com o objetivo de coletar dados batimétricos ao longo dos 1270 km de hidrovía, foi realizada uma campanha de campo em junho de 2014, iniciando em Cáceres/MT e terminando na foz do Rio Apa. O levantamento

foi realizado a bordo do Barco “Jacaré”, com o apoio de duas voadeiras (Figura 2).

O ecobatímetro utilizado foi um “GARMIN GPSMAP 521S” (Figura 3), com precisão do GPS de 15 metros em 95 % do tempo (Garmin, 2012). A precisão do transdutor não é informada pela fabricante.

O levantamento batimétrico foi realizado ao longo do canal navegável balizado pela sinalização náutica da hidrovía. No entanto, houve desvio em relação a esta rota em alguns casos, a saber: cruzamento com outra embarcação; inexistência de sinalização náutica; situações em que havia risco de encalhe da embarcação; e trechos onde, segundo o comandante, a sinalização estava desatualizada e o canal havia mudado de local (especialmente tramo norte).

O transdutor do ecobatímetro foi instalado a 50 cm de profundidade na proa da embarcação. Esta prática visa minimizar efeitos de turbulência que podem interferir na medição adequada dos dados.

No primeiro dia de levantamento, o ecobatímetro foi programado para coletar dados a intervalos de 15 m. Nos dias subsequentes, optou-se pela realização de medições a cada dois ou três segundos, conforme o trecho. A alteração de metodologia resultou na melhora da qualidade dos dados levantados.

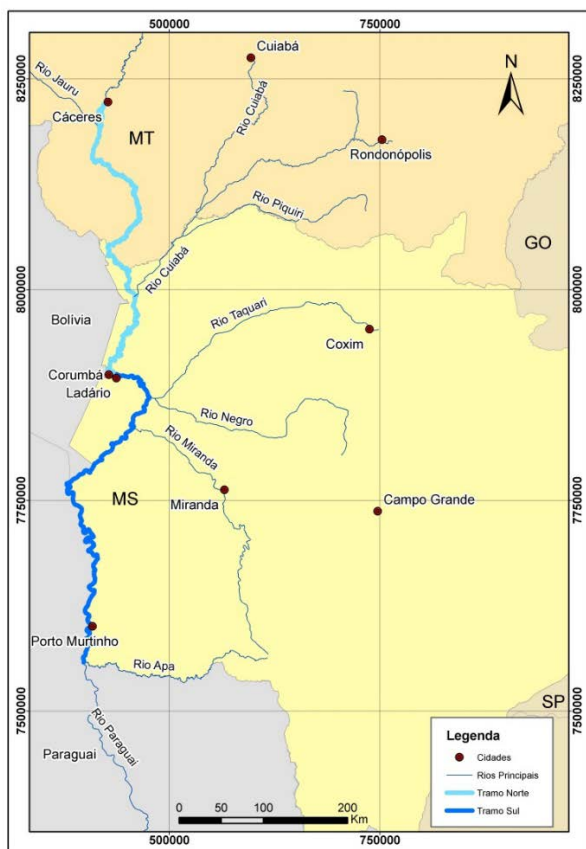


Figura 1 – Hidrovia do Rio Paraguai em território brasileiro.
Fonte: UFPR/ITTI (2014)



Figura 2 – Barco “Jacaré” utilizado na campanha de levantamento batimétrico longitudinal.
Fonte: UFPR/ITTI (2014)



Figura 3 – GARMIN GPSMAP 521S, equipamento utilizado no levantamento.
Fonte: Garmin (2015).

4 – Pré-Tratamento dos Dados

O pré-tratamento dos dados levantados seguiu as seguintes etapas:

- 1) Transformação do arquivo de texto em arquivo vetorial para visualização;
- 2) Eliminação dos dados espúrios (exemplo: registros em que a embarcação saiu do canal de navegação para amarração junto à margem ao final de cada dia);
- 3) Identificação dos trechos com falhas na medição;
- 4) Adição de 50 cm aos dados medidos (profundidade de instalação do transdutor).

O cálculo da extensão da hidrovia foi realizado somando-se a distância entre os pontos batimétricos consecutivos. Desta forma, cada ponto possui um valor "s", iniciando em Cáceres ($s = 0$) e finalizando na foz do Rio Apa, onde o valor de s é máximo.

5 – Nível de Redução e Correção das Profundidades

Nesta seção é descrita a metodologia aplicada para ajustar os valores de profundidades medidas aos níveis de redução do Rio Paraguai. Este procedimento é realizado para se obter as profundidades com permanência de 90% (noventa por cento) do tempo. Com isso, é possível definir os locais onde a profundidade do canal de navegação é menor que a mínima necessária para navegar, considerando o calado máximo homologado para cada tramo. Esta análise é fundamental para a posterior aferição dos passos críticos.

Para realizar a redução (ou correção) dos valores medidos, foram levantados: a localização de cada régua linimétrica, o nível d'água diário lido durante a campanha e o nível de redução (NR) de cada régua informado pela Marinha do Brasil. Vale ressaltar que as régua

levantadas apresentam histórico de dados (níveis e vazões) disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) no site da Hidroweb. No procedimento de redução, foram utilizados os dados oficiais de NR, localização e leitura fornecidos pelo Serviço de Sinalização Náutica do Oeste (SSN-6), da Marinha do Brasil.

A Tabela 1 apresenta as estações linimétricas utilizadas para interpolação. A Tabela 2 apresenta os valores de redução de cada régua (valor a ser deduzido de cada medição batimétrica) conforme o dia de levantamento.

Tabela 1 – Estações linimétricas utilizadas: código, altitude, posição geográfica e nível de redução.

Estação	Código ANA	E	N	Alt. (m)	NR (m)
Cáceres (Ponte BR 070)	66070004	424883	8222533	99,12	2,02
Bela Vista do Norte	66125000	426683	8049327	76,22	3,39
Ladário	66825000	437390	7898839	74,71	2,02
Forte Coimbra	66970000	421621	7797135	69,91	1,34
Porto Murinho	67100000	407780	7599975	61,64	3,54

Fonte: Marinha do Brasil (2015).

Tabela 2 – Reduções diárias das estações linimétricas durante a campanha de levantamento.

Data	Cáceres	Bela Vista do Norte	Ladário	Forte Coimbra	Porto Murinho
10/06/2014	1,53	2,85	3,39	2,72	3,14
11/06/2014	1,53	2,83	3,40	2,74	3,18
12/06/2014	1,48	2,83	3,40	2,74	3,24
13/06/2014	1,44	2,77	3,37	2,81	3,33
14/06/2014	1,38	2,78	3,37	2,83	3,39
15/06/2014	1,36	2,76	3,37	2,85	3,46
16/06/2014	1,24	2,75	3,38	2,86	3,53
17/06/2014	1,16	2,75	3,38	2,86	3,60
18/06/2014	1,06	2,75	3,38	2,89	3,62
19/06/2014	0,94	2,73	3,37	2,90	3,62

Fonte: Marinha do Brasil (2015).

A cada ponto de medição foi atribuído um valor de distância em relação ao ponto de partida. O cálculo da distância acumulada foi realizado definindo-se Cáceres como marco zero.

A redução de cada régua é definida como a diferença entre o valor lido e o nível de

redução. Para o cálculo das reduções, foi elaborada uma rotina em linguagem de programação 'Python'. A cada ponto medido foi atribuído um valor "s", uma data e uma hora de medição, coordenadas (E, N) e uma profundidade medida. A profundidade reduzida de cada ponto foi calculada como a diferença entre a profundidade medida e a redução interpolada no ponto correspondente (eq. 1).

$$Pr_d = Pm_d - r_d \quad (1)$$

Onde: Pr_d é a profundidade reduzida; Pm_d é a profundidade medida; e r_d é a redução interpolada. A redução em um ponto foi calculada interpolando-se os valores de redução entre a régua a montante i e a régua a jusante $i + 1$ para o dia d de sua medição. A generalização deste raciocínio é descrita pela equação 2.

$$r_d(s) = m_d \times s + b_d \quad (2)$$

Onde: o coeficiente angular $m_d = \frac{R_{i+1,d} - R_{i,d}}{S_{i+1} - S_i}$,

$b_d = R_{i,d} - \frac{R_{i+1,d} - R_{i,d}}{S_{i+1} - S_i} * S_i$; S é a distância longitudinal entre a régua e o ponto de início (Cáceres/MT); R é o valor da redução da régua; e r é o valor a ser reduzido no ponto. A equação pode ser lida como: a redução em um ponto é o valor r obtido por interpolação entre os valores de redução das régua de montante e de jusante, conforme a localização (s) do ponto.

Na Figura 4 estão ilustrados o traçado percorrido, a localização das régua e dos pontos de parada diários. Na Figura 5 são ilustradas as leituras diárias de cada régua, seus níveis de redução e o valor a ser reduzido (Eq. 2) de cada leitura ao longo do traçado percorrido.

A Figura 6 apresenta a distribuição das profundidades reduzidas nos dois tramos do rio Paraguai, norte e sul. É possível verificar uma clara distinção entre a distribuição de profundidades. No tramo norte (Cáceres - Corumbá), ilustrado em azul, as profundidades são menores que as do tramo sul e aproximadamente 6% do trecho percorrido pode ser considerado crítico, com profundidades inferiores a 1,8 m. No tramo sul (Corumbá – foz do Rio Apa), aproximadamente 1% do percurso é considerado crítico, com profundidades inferiores a 3,0 metros.



Figura 4 – Traçado percorrido e localização das réguas e pontos de parada.
Fonte: UFPR/ITTI (2014).

6 – Seleção dos Passos Críticos

6.1 – Características da Hidrovia

A Hidrovia do Rio Paraguai, na parte brasileira, é classificada em 2 tramos, norte e sul, os quais dividem a hidrovia acima e abaixo de Corumbá.

No tramo sul, o transporte de cargas é muito mais expressivo que no tramo norte. As características hidrogeomorfológicas desse trecho (canal mais largo e profundo) permitem

a navegação de comboios na configuração 4x4 (Figura 7), com 16 chatas de 60 m x 12 m e um empurrador com 50 m de comprimento, atingindo até 2,60 m de calado (Marinha do Brasil, 2000). Somando-se 2,60 m de calado com 0,30 m de Pé de Piloto e 0,10 m de margem de segurança, foi definida a profundidade mínima de 3,0 m para a navegação. A Figura 7 apresenta uma representação esquemática do comboio tipo da Hidrovia Paraguai-Paraná no trecho Corumbá-Assunção. A Figura 8 apresenta uma foto exemplificando um comboio de maior porte (4x5) homologado pela Marinha para operar na hidrovia.

No tramo norte, o transporte de cargas é atualmente inexpressivo, com drástica redução nos últimos 5 anos. As dragagens de manutenção realizadas visam atender ao tráfego de embarcações de turismo (Figura 9). As características hidrogeomorfológicas desse trecho o configuram como um trecho de difícil navegabilidade. Sabe-se de estudos pretéritos e de trocas de informações com a Administração da Hidrovia do Paraguai (AHIPAR) e com a Marinha do Brasil que a região ao sul da cidade de Cáceres, em épocas de estiagem, apresenta dificuldade de navegação inclusive a embarcações de turismo com baixo calado. O sub-trecho denominado Rio Bracinho tem curvas acentuadas e problemas de entupimento por vegetação aquática (balseiros e camalotes – Figura 10). No trecho norte, o calado máximo das embarcações é de 1,50 m. Adicionando-se 0,30 m de pé de piloto, fica definida a profundidade mínima de 1,80 m necessária à navegação. Logo, os locais com profundidades inferiores a 3,0 metros no tramo sul e 1,80 metros no tramo norte são caracterizados como passos críticos.

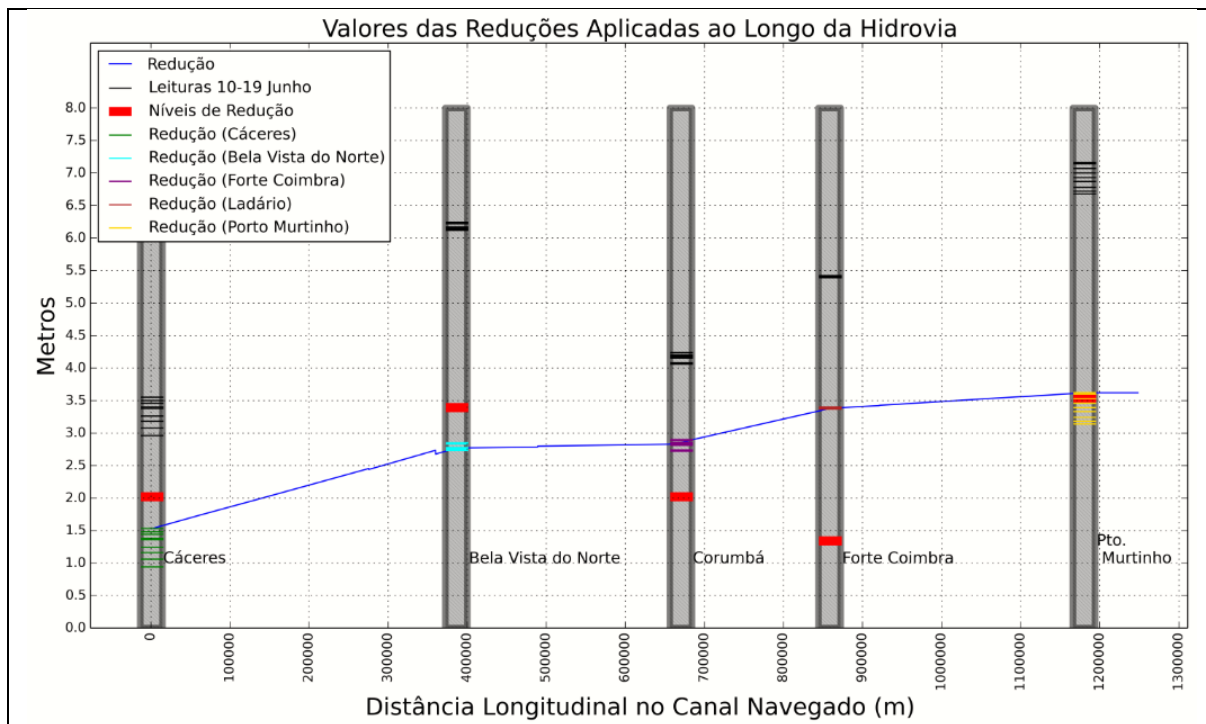


Figura 5 – Valores de redução ao longo do Rio Paraguai para os dias da campanha.
 Fonte: UFPR/ITTI (2014).

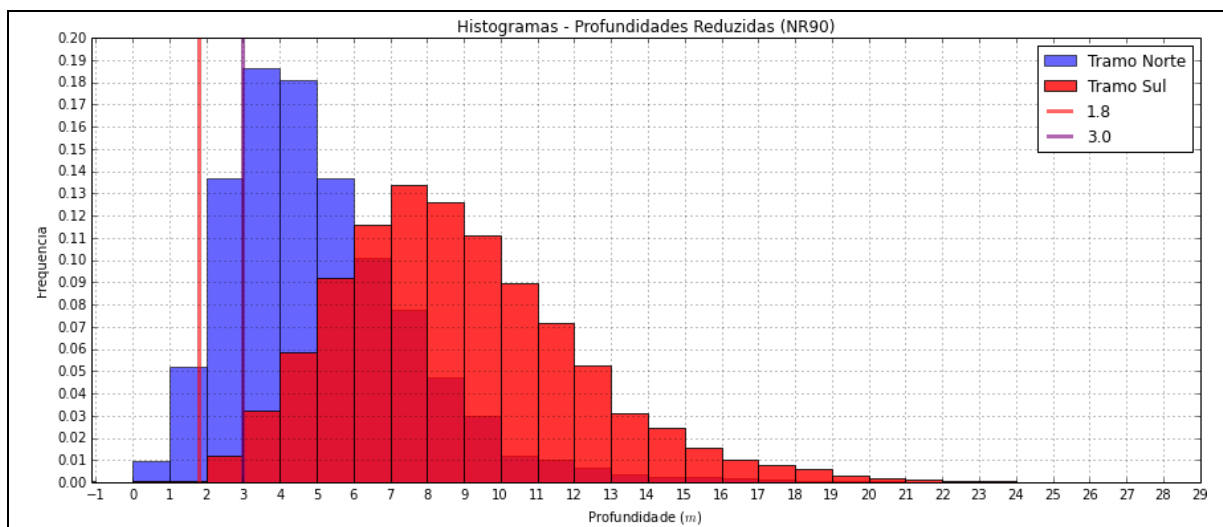


Figura 6 – Histogramas das profundidades reduzidas nos tramos norte e sul da Hidrovia do Rio Paraguai.
 Fonte: UFPR/ITTI (2014).

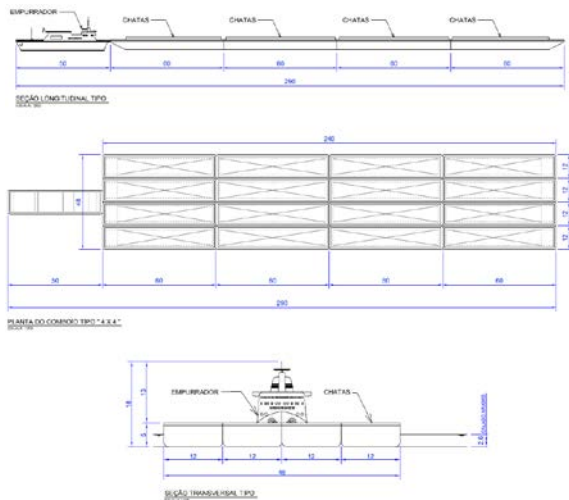


Figura 7 – Representação esquemática do comboio-tipo da Hidrovia Paraguai-Paraná no trecho Corumbá-Assunção.
Fonte: UFPR/ITTI (2012).



Figura 8 – Comboio 4x5 homologado pela Marinha no trecho Corumbá-Assunção.
Fonte: VALE (2009).



Figura 9 – Barcos de turismo às margens de Cáceres/MT.
Fonte: UFPR/ITTI (2014).



Figura 10 – “Entupimento” por vegetação no tramo norte da hidrovia. Localidade: Rio Bracinho.

Fonte: UFPR/ITTI (2014).

6.2 – Agrupamento de Profundidades Críticas

Para a aferição dos passos da hidrovia, as profundidades críticas foram agrupadas considerando suas posições geográficas e distâncias entre cada passo. Para a análise desses pontos foram testados dois métodos de agrupamento. Os métodos foram programados em linguagem de programação Python e desenvolvidos para rodar em cenários 3D e 2D. Nessa fase do estudo foram utilizados os dados batimétricos longitudinais na forma 2D (Perfil). Em análise futuras, os mesmos métodos poderão ser aplicados a levantamentos topobatimétricos mais detalhados.

O primeiro método aplicado chama-se K-Means. É um algoritmo amplamente utilizado para encontrar grupos de dados com a maior semelhança entre si dentro de um conjunto. Mais especificamente o objetivo do algoritmo K-Means é de dividir M pontos em N dimensões entre K grupos de forma que a “soma de quadrados” dentro dos grupos seja minimizada (Hartigan & Wong, 1979). De maneira geral um ponto pertence a um grupo em particular se é mais próximo ao centróide do grupo do que qualquer outro centróide. Esse procedimento, embora prático, provou ser ineficiente à definição dos passos. Um dos parâmetros de entrada requerido é a quantidade de agrupamentos (K), e esse é justamente um dos resultados que se procura.

Para um cenário hipotético de 15 adensamentos, o algoritmo foi aplicado gerando os passos ilustrados na Figura 11. É possível observar que as diferentes cores representam os grupos e os quadrados cinzas seus centróides.

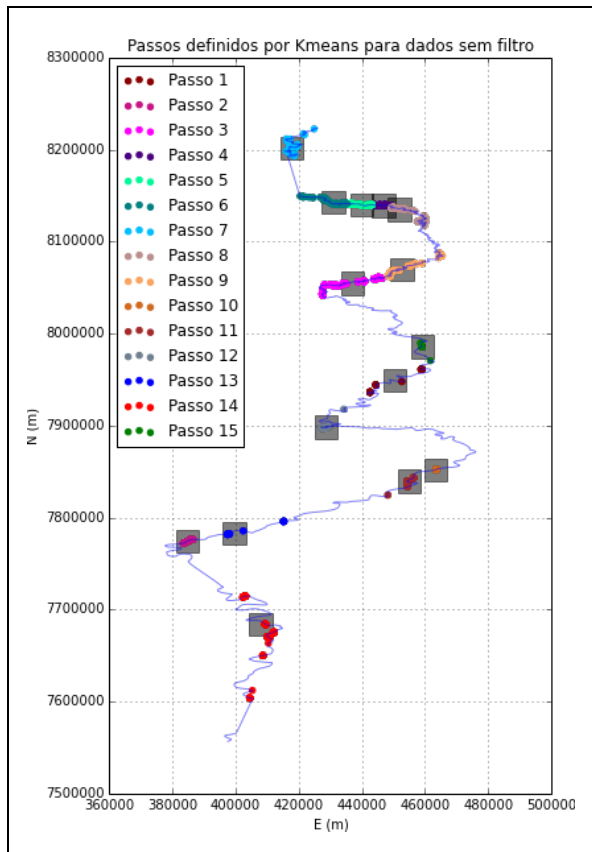


Figura 11 – Passos gerados pelo algoritmo K-Means para K =15.
 Fonte: UFPR/ITTI (2014).

O algoritmo DBSCAN foi utilizado para resolver o problema supracitado. Esse algoritmo é baseado na densidade dos pontos para descobrir grupos com qualquer formato (Ester, Kriegel, Sander, & Xu, 1996). Essa análise requer somente um parâmetro de entrada, o comprimento (ρ) máximo para a exclusão de um ponto de um cluster (grupo). O

valor de ρ que resultou no melhor ajuste dos dados medidos foi de 500 m.

Em algumas situações uma quantidade muito pequena de pontos não representa um grupo significativo de interesse à análise, ou em outras palavras, não constitui essencialmente um passo crítico. Nestes casos e em casos como: perda de sinal, variações na velocidade do som na água (no caso de uma mancha de óleo, por exemplo) ou presença de vegetação próxima ao transdutor, os dados podem apresentar ruídos que comprometem a qualidade final do processamento. Uma vantagem do DBSCAN é a constatação e a classificação dos dados considerados como ruído, oferecendo assim a possibilidade de excluí-los da análise.

Na Figura 12 é possível visualizar em cores diferentes os grupos gerados pelo DBSCAN em um sub-trecho do Rio Paraguai. No centro da figura notam-se pontos de cor preta que exemplificam o que é considerado ruído.

A Figura 13 ilustra a diferença das duas metodologias. Nota-se que a K-Means é baseada na proximidade dos pontos aos centróides dos grupos e a DBSCAN é baseada na densidade dos pontos. A desvantagem da K-Means é que a quantidade de centróides (pontos maiores na figura) deve ser informada no início da análise. O ponto forte do DBSCAN é que sua classificação é similar à do interpretador, como pode ser observado na imagem inferior da Figura 13, onde identifica-se com facilidade três grupos distintos. Neste caso seria fácil informar o número de grupos que se quer ao K-Means, mas mesmo assim não teríamos a resposta desejada equivalente à do DBSCAN. Em rios com meandros expressivos como o Rio Paraguai esta distinção é fundamental e necessária.

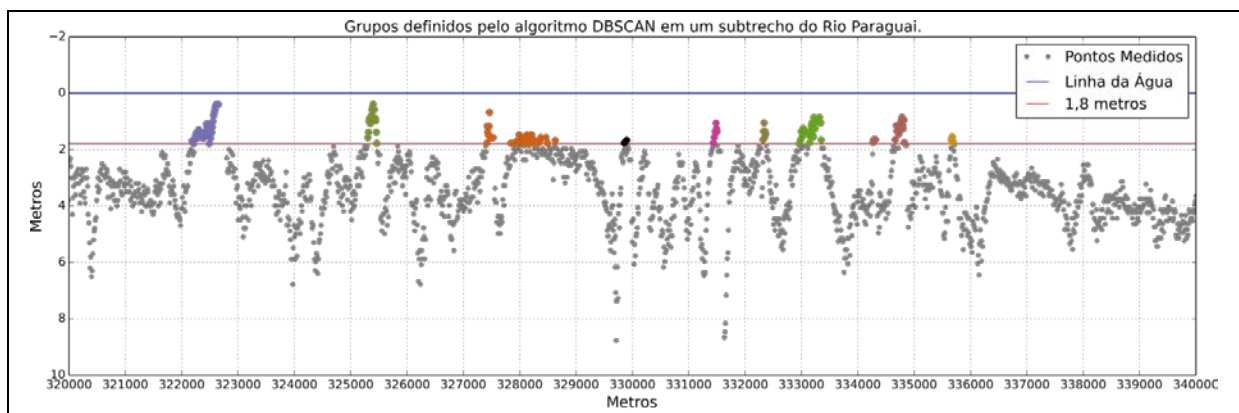


Figura 12 – Adensamentos gerados pelo algoritmo DBSCAN para um trecho do tramo norte da Hidrovia do Rio Paraguai.
 Fonte: UFPR/ITTI (2014).

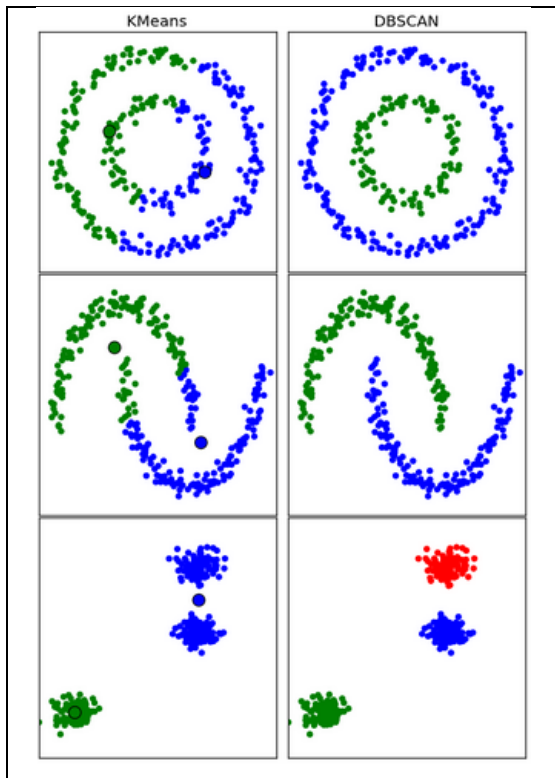


Figura 13 – Exemplo da diferença de agrupamento dos algoritmos DBSCAN e K-Means.

Fonte: Pedregosa et al. (2011).

7 – Aferição dos Passos

O algoritmo DBSCAN gerou 126 agrupamentos ao longo de toda a extensão brasileira da Hidrovia do Rio Paraguai (1270 km). A Figura 14 e a Figura 15 apresentam a localização dos clusters encontrados.

A inspeção visual dos adensamentos sobre as cartas náuticas da Marinha e sobre imagens de satélite atuais norteou o refinamento da classificação e a eliminação de alguns desses grupos. Foram eliminados, por exemplo, agrupamentos localizados muito próximo a margens ou que correspondiam a volumes inferiores a 5.000 m³.

O levantamento batimétrico foi realizado em águas altas e em alguns casos as placas não sinalizavam adequadamente o canal de navegação. Portanto, é possível que parte dos agrupamentos eliminados tenha sido gerada por eventuais erros de traçado.

Uma vez selecionados os adensamentos, foi realizada uma classificação quanto à criticidade. Como critério, foi utilizado o volume de dragagem necessário para prover o canal de profundidades mínimas à navegação (1,80 m no tramo norte e 3,00 m no tramo sul). Destaca-se que a largura do canal de navegação no tramo norte é diferente do tramo sul, correspondendo a 45 m no primeiro e a 105

m no segundo. Assim, o volume foi estimado multiplicando-se esta largura pela área longitudinal do passo. A Figura 16 exemplifica uma área longitudinal entre os pontos críticos de um passo e a cota de dragagem no tramo sul.



Figura 14 – Localização dos passos críticos da AHIPAR, SSN-6 e UFPR no tramo norte.
Fonte: UFPR/ITTI (2014).

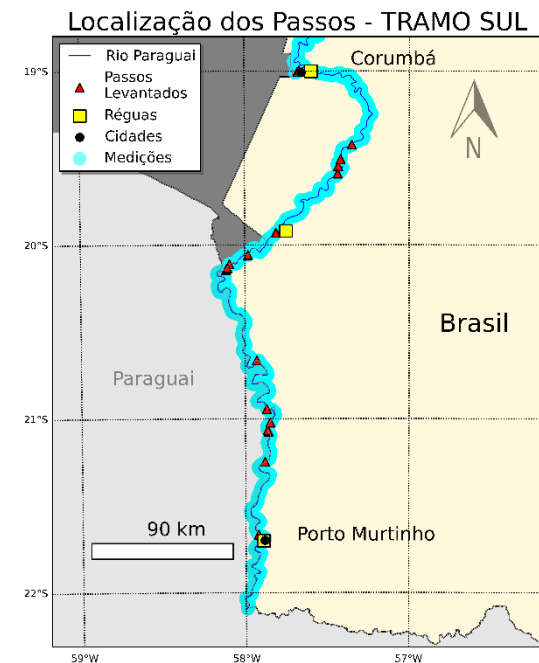


Figura 15 – Localização dos passos críticos da AHIPAR, SSN-6 e UFPR no tramo sul.
Fonte: UFPR/ITTI (2014).

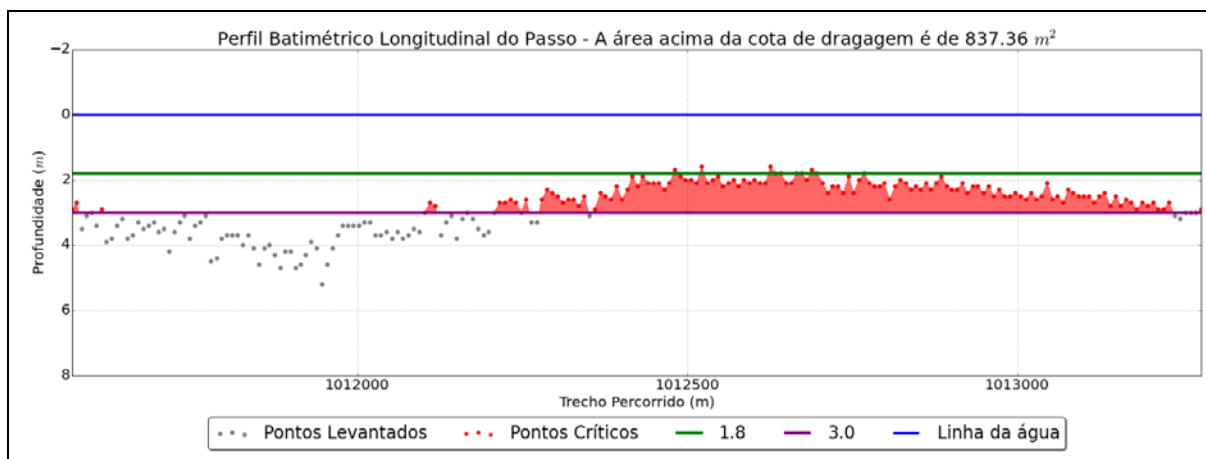


Figura 16 – Perfil batimétrico longitudinal de um passo crítico no tramo sul.
Fonte: UFPR/ITTI (2014).

Com a lista de adensamentos reduzida de 126 para 39 grupos (sendo 31 no tramo norte e 8 no tramo sul), foi realizada a comparação da localização dos grupos selecionados com os passos críticos informados pela AHIPAR e SSN-6. A Tabela 3 resume os 39 adensamentos finais identificados pela metodologia de classificação do DBSCAN, os quais são ilustrados na Figura 17 e na Figura 18.

Dos 39 passos levantados, 23 (59%) coincidem com passos já divulgados (AHIPAR e SSN-6) e 16 (41%) são passos ainda não cadastrados em uma lista oficial (Gráfico 1). Dentre os passos coincidentes, 18 (78%) estão no tramo norte e 5 (22%) no tramo sul (Gráfico 2). Quanto aos 16 passos não coincidentes, 13

(81%) localizam-se no tramo norte e 3 (19%) no tramo sul (Gráfico 3).

A análise dos dados indica uma distribuição desigual dos passos, com a maioria (79%) presente no tramo norte. Em termos de extensão, são 60,6 km de passos a serem dragados, dos quais 51,4 km (85%) estão no norte e 9,2 km (15%) estão no sul. O volume de dragagem no tramo norte equivale a 60% do total. Isso pode-se atribuir ao fato de atualmente estar paralisado o transporte de cargas entre Cáceres e Corumbá. Além disso, a alteração da posição do canal com os ciclos hidrológicos é mais relevante nesse trecho, enquanto no sul há menor necessidade de atualização da sinalização em decorrência de variações no talvegue.

Tabela 3 – Passo Críticos selecionados.

Ranking	Extensão (m)	Volumes (m³)	Tramo	Nome
1	17791	383.747	Norte	Rio Bracinho
2	4200	270.000	Sul	Passo do Jacaré
3	979	223.173	Sul	Passo M'Biguá
4	1711	87.923	Sul	Baixas profundidades
5	5826	60.789	Norte	Rio Bracinho
6	3167	54.409	Norte	Passo Castelo de Areia
7	5916	47.296	Norte	Rio Bracinho
8	1798	42.731	Norte	Rio Bracinho
9	800	40.408	Norte	Passo Margarida
10	1680	39.721	Norte	Passo Corixão Inferior
11	1080	37.173	Norte	Passo Baía das Éguas Inferior
12	1040	33.467	Sul	Ilha Santa Rosa
13	940	25.584	Norte	Passo Ilha do Rio Velho
14	740	23.511	Norte	Passo Baiazinha
15	780	19.354	Norte	Passo Tucum Superior
16	460	19.213	Norte	Passo Beijudo Inferior
17	526	18.761	Sul	Passo Caraguatá
18	500	18.274	Norte	Passo Baía das Éguas Superior
19	858	17.944	Norte	Passo Barranco Vermelho Superior
20	1397	15.827	Norte	Passo Soldado Superior
21	560	14.337	Norte	Passo Paratudal Inferior
22	378	13.233	Norte	Passo Piuva - montante Rio Bracinho
23	467	11.643	Norte	Estirão Inferior da Boca do Cará-Cará
24	388	10.898	Norte	Passo Descalvados

Ranking	Extensão (m)	Volumes (m³)	Tramo	Nome
25	340	9.033	Norte	Passo Paratudal Superior
26	273	8.957	Sul	Isla del Sauce
27	215	8.171	Norte	Lagoa Gaíva
28	170	8.103	Sul	Passo Olimpo
29	266	7.601	Norte	Passo Boca da Gama
30	320	6.967	Norte	Passo Morro Pelado Superior
31	487	6.919	Norte	Passo Capitão Fernandes
32	660	6.456	Norte	Passo Corixão Superior
33	828	6.368	Norte	Passo do Alegre Inferior
34	1159	6.305	Norte	Passo Ilha Barranco Vermelho
35	242	5.743	Norte	Passo Furado do Jatobá
36	640	5.693	Norte	Passo sem nome
37	298	5.528	Sul	Passo Fazenda Primavera
38	360	5.290	Norte	Passo Beijudo Superior
39	360	5.243	Norte	Passo do Pote
Total	60.597	1.631.793	Tramo Norte = 31 passos Tramo Sul = 8 passos	

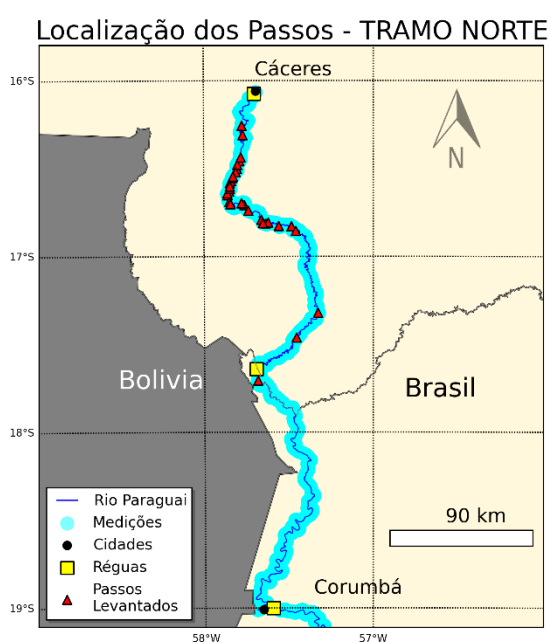


Figura 17 – Localização dos passos críticos selecionados no tramo norte com base na análise de adensamentos.
Fonte: UFPR/ITTI (2014).

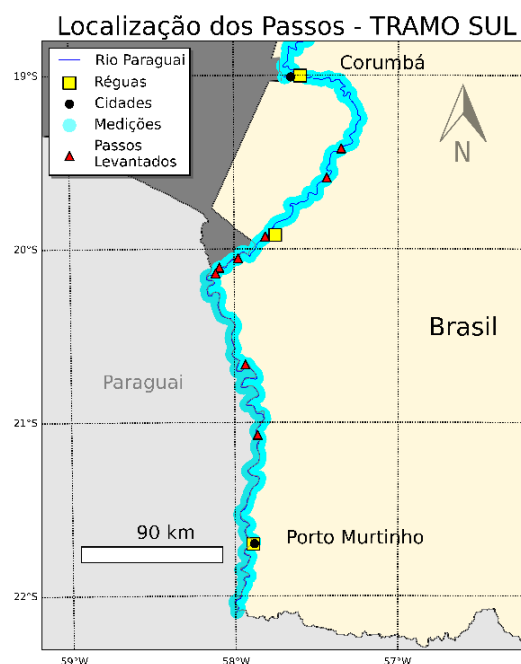


Figura 18 – Localização dos passos críticos selecionados no tramo sul com base na análise de adensamentos.
Fonte: UFPR/ITTI (2014).

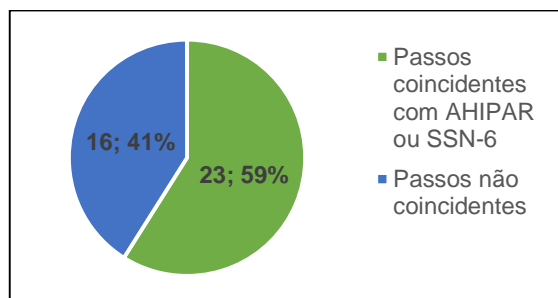


Gráfico 1 – Distribuição dos passos selecionados quanto à coincidência ou não com o cadastro da AHIPAR ou SSN-6.
Fonte: UFPR/ITTI (2014).

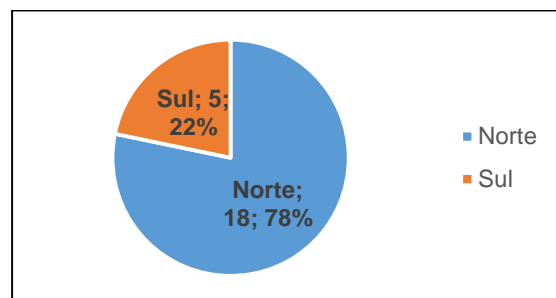


Gráfico 2 – Distribuição quanto à localização (tramo norte ou sul) dos passos coincidentes com AHIPAR/SSN-6.
Fonte: UFPR/ITTI (2014).

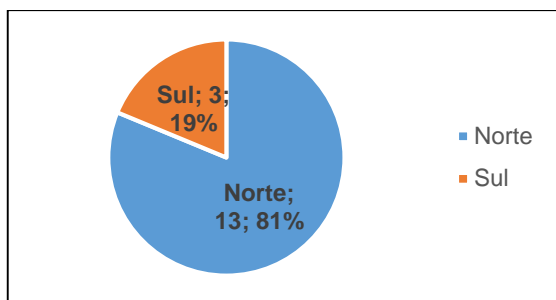


Gráfico 3 – Distribuição quanto à localização dos passos não coincidentes.

Fonte: UFPR/ITTI (2014).

8 – Considerações Finais

Este artigo apresenta os resultados preliminares do processamento dos dados coletados no levantamento batimétrico longitudinal do canal navegável do Rio Paraguai entre a cidade de Cáceres/MT e a confluência com o Rio Apa, em uma extensão de 1270 km, no período de 10 a 20 de junho de 2014. A partir da correção das profundidades medidas de acordo com o nível de redução das réguas linimétricas existentes ao longo de todo o trecho, foi possível selecionar os principais passos críticos que causam dificuldades à navegação por restrição de calado das embarcações.

No total foram identificados 39 passos críticos que totalizaram um volume de dragagem de aproximadamente 1.631.793 m³ (60% no tramo norte e 40% no tramo sul).

Sabe-se que, especialmente no tramo norte da hidrovia, ocorre relevante transporte de material de fundo (sedimentos), o que interfere diretamente na localização do canal de navegação e nas profundidades disponíveis, com variações significativas de ano para ano. Logo, é importante ressaltar que o levantamento batimétrico realizado reflete o perfil longitudinal do fundo no instante da campanha.

Alguns passos já conhecidos e informados nas listas da AHIPAR e SSN-6 não apareceram no levantamento batimétrico da UFPR. Em função do regime das cheias e secas, a movimentação do fundo pode ano após ano modificar os passos da hidrovia. Em geral os locais são os mesmos, mas ocorre alternância de criticidade entre eles. Isto é, passos que se apresentam como mais críticos em um determinado ano podem sofrer alterações fluviomorfológicas após um ciclo hidrológico completo, sendo substituídos em grau de importância por outros passos que se mostraram irrelevantes no ano prévio. Esta variabilidade ocorre ciclicamente, sempre entre

os mesmos passos já cadastrados (AHIPAR, 2014).

As atividades de manutenção, tais como a mudança de sinalização e as dragagens, devem ser coordenadas entre as entidades operantes na hidrovia. A atualização da sinalização náutica em virtude da migração natural da posição do canal de um ano para o outro pode muitas vezes evitar uma obra de dragagem, trazendo economia de custos. Para identificar essas situações, faz-se necessária a frequente realização de campanhas batimétricas, com periodicidade no mínimo anual.

Nos trechos onde a migração da posição do canal é recorrente, a dragagem pode funcionar como medida paliativa e temporária. Nesses casos com criticidade crônica, pode ser interessante a adoção de soluções mais duradouras como a proteção das margens com enrocamento ou intervenções físico/hidráulicas como a criação de espigões (Tomas, 2014).

Além dos frequentes problemas de profundidade, muitos passos causam dificuldades à manobrabilidade das embarcações por conta de sua geometria (raios de curvatura pequenos) ou pela existência de estruturas civis (pontes) que provocam o estreitamento pontual do canal navegável ou o rebaixamento do gabarito vertical. A análise apresentada neste artigo não considera estes aspectos, atendo-se apenas às restrições de profundidade para a classificação dos passos.

Outro aspecto que merece destaque é que o uso de apenas cinco réguas para interpolar a redução das profundidades ao longo de 1270 km de rio constitui uma aproximação linear que pode implicar em uma estimativa simplista e, às vezes, equivocada dos passos críticos. Para contornar essa situação, seria importante a instalação de réguas e referências de nível nos principais passos, com o objetivo de melhorar o ajuste do perfil da linha d'água para o período de estiagem. Outra possibilidade seria realizar o rastreamento deste perfil com equipamentos GPS de alta precisão altimétrica, do tipo RTK ou RTG.

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 da quantidade e da localização dos passos, bem como na estimativa de volumes de dragagem. 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.

Com o intuito de melhorar a gestão da hidrovia, tanto em aspectos técnico-operacionais como em questões ambientais, seria interessante a contratação de serviços permanentes de monitoramento, com prazos de execução em torno de 3-5 anos. Esses serviços poderiam contemplar medições batimétricas, medições de velocidade e vazão do escoamento em regiões críticas, instalação de referência de nível (RNs) adicionais, monitoramento da biota aquática, monitoramento de sedimentos, monitoramento da qualidade da água, entre outras atividades.

Embora não tenha sido apresentado neste artigo, é possível a avaliação dos passos em função de outros fatores, tais como: dificuldade de manobra dos comboios (raios de curvatura), existência de estruturas (pontes) e estreitamento do canal de navegação.

No âmbito da elaboração do EVTEA do Rio Paraguai pela UFPR, está em processo de implementação um modelo hidrodinâmico para a simulação de diversos cenários de vazão. Diferentemente da metodologia apresentada neste artigo, onde foi realizada uma interpolação linear dos níveis d'água entre réguas com nível de redução conhecidos, o modelo irá calcular as profundidades disponíveis ao longo do rio em função das características físicas do canal e das propriedades do escoamento. Assim, permitirá aferir com maior precisão a metodologia de identificação e quantificação dos passos críticos (Correia, 2015).

9 – 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).

10 – Referências Bibliográficas

AHIPAR. Informações fornecidas pela Administração da Hidrovia do Paraguai em reuniões técnicas com a UFPR. Corumbá, MS, 2014.

CORREIA, R.; BLENINGER, T.; GUARNERI, H.; TOMAS, G. P.; RATTON, P.; RATTON, E. Modelagem hidrodinâmica para a avaliação da

navegabilidade em um trecho da Hidrovia do rio Paraguai. *Artigo submetido ao 9º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior, Sobena 2015.*

ESTER, M., KRIEGER, H.-P., SANDER, J., & XU, X. (1996). A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *Published in Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Portland, Oregon: American Association for Artificial Intelligence.

GARMIN. *GPSMAP 400/500 series Owner's Manual*. 2012.

GARMIN. Disponível em: <<http://www.garmin.com/pt-BR>>. Acesso em: junho, 2015.

HARTIGAN, M. A., & WONG, J. A. A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, Vol. 28, No. 1, pp. 100-108, 1979.

MARINHA DO BRASIL. Dispõe sobre a execução do Regulamento 7 (Regime Único de Dimensões Máximas dos Comboios da Hidrovia Paraguai-Paraná, de 19/06/96). *Decreto nº 3.533, de 30 de junho de 2000*. D.O. de 03.07.2000.

MARINHA DO BRASIL. Fichas de Cadastro das Estações Fluviométricas. Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-estacoes-fluviometricas/fluviometrica.html>>. Acesso em: junho, 2015.

PEDREGOSA et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *JMLR* 12, pp. 2825-2830, 2011.

TOMAS, G. P. Avaliação Hidromorfológica do Uso de Espigões em Hidrovias. Dissertação de Mestrado, Departamento de Hidráulica, UFPR, 2014.

UFPR/ITTI. Projeto de Dragagem do Passo do Jacaré, Hidrovia Paraguai-Paraná. Fevereiro, 2012.

UFPR/ITTI. Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental da Hidrovia do Rio Paraguai (em elaboração). *Levantamentos de campo no Rio Paraguai realizados em junho de 2014*.

VALE. (2009). Vale e a utilização das hidrovias. Apresentação para Câmara dos Deputados. Novembro, 2009.