Fatecnológica
Fatec Jahu

IV CONGRESSO DE TECNOLOGIA FATEC JAHU 10 a 13/11

ISSN 2763-5600

Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

ANÁLISE DETERMINÍSTICA E BENCHMARKING OPERACIONAL DO PROCESSO DE ECLUSAGEM DE COMBOIOS EMPURRADOS NA HIDROVIA TIETÊ–PARANÁ

DETERMINISTIC ANALYSIS AND OPERATIONAL BENCHMARKING OF PUSHED CONVOY LOCKAGE OPERATIONS ON THE TIETÊ–PARANÁ WATERWAY

Ingridi de Lima Teodoro
Fatec Jahu – CST em Sistemas Navais, ingridi.teodoro@aluno.cps.sp.gov.br

Antonio Edurdo Assis Amorim
Fatec Jahu , antonio.amorim@cps.sp.gov.br

DOI: https://doi.org/10.54628/issn2763-5600.v20.1.2026.406

Resumo

O presente estudo tem como objetivo analisar a influência dos tempos operacionais na transposição de comboios empurrados pela eclusa de Bariri, na Hidrovia Tietê–Paraná. A metodologia consistiu na decomposição do processo de eclusagem em 54 etapas e na construção de 16 cenários, considerando combinações de tempos mínimos e máximos das operações realizadas pela tripulação. Os resultados indicaram tempos totais entre 236,92 e 269,08 minutos, com amplitude de 32,17 minutos, dos quais 12,67 minutos correspondem às atividades controláveis pela tripulação. O acostamento apresentou o maior potencial de redução temporal, seguido pela desconexão, amarração e liberação do comboio. A matriz de oportunidades permitiu identificar os processos prioritários e estabelecer referências de eficiência operacional. Conclui-se que a análise determinística constitui uma ferramenta para o benchmarking e a identificação de melhorias, fornecendo subsídios para futuras simulações estocásticas e avaliações da confiabilidade e capacidade operacional das eclusas.

Palavras-chave: Eclusagem; Hidrovia Tietê–Paraná; Eficiência operacional; Benchmarking; Modelagem determinística.

Abstract

This study aims to analyze the influence of operational times on the transit of pushed convoys through the Bariri Lock, located on the Tietê–Paraná Waterway, Brazil. The methodology involved decomposing the lockage process into 54 stages and developing 16 scenarios based on combinations of minimum and maximum execution times for crew operations. The results indicated total transit times ranging from 236.92 to 269.08 minutes, representing a variation of 32.17 minutes, of which 12.67 minutes were associated with crew-controlled activities. Berthing operations showed the greatest potential for time reduction, followed by convoy disconnection, mooring, and release procedures. The opportunity matrix enabled the identification of priority processes and the establishment of operational efficiency benchmarks. The findings demonstrate that deterministic analysis provides a useful framework for operational benchmarking and improvement identification, supporting future stochastic simulations and assessments of lock reliability and operational capacity.

Keywords: Lockage; Tietê–Paraná Waterway; Operational efficiency; Benchmarking; Deterministic modeling.

Fatecnológica
Fatec Jahu
IV CONGRESSO DE TECNOLOGIA FATEC JAHU 10 a 13/11
ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

1. INTRODUÇÃO

O transporte hidroviário interior apresenta menor consumo de combustível e emissão de CO_2, além de maior capacidade de carga em comparação aos modais rodoviário e ferroviário. Nesse contexto, a Hidrovia Tietê–Paraná (HTP) é importante para o transporte de produtos agrícolas e industriais, conectando regiões produtoras a terminais intermodais e rotas de exportação, como o de Pederneiras (Felipe Junior; Silveira; Cocco, 2023; Mendonça; Amorim; Rezende, 2025; Silva, 2015; Toloi et al., 2016).

O processo de eclusagem funciona como um elevador de águas, utilizando grandes câmaras que se enchem ou esvaziam para elevar ou abaixar as embarcações de forma segura. Dessa forma, permite a passagem entre diferentes níveis de água, tanto a montante (subida) quanto a jusante (descida). Na Hidrovia Tietê–Paraná, as eclusas são essenciais para superar os desníveis provocados pelas barragens. Entretanto, seu funcionamento impõe restrições que afetam o fluxo de embarcações, os tempos de trânsito e a capacidade da hidrovia, tornando a eficiência da eclusagem importante para o desempenho logístico. (Carroll; Bronzini, 1971; Dantas, 2023; Hammedi et al., 2022; Rogers; Hofseth; Adams, 2012; Wu; Ji; Yu, 2024).

A eclusa de Bariri exemplifica as restrições operacionais da Hidrovia Tietê–Paraná. O comboio Tietê Duplo (BP2×2), formado por um empurrador e quatro barcaças, possui aproximadamente 137m de comprimento e 21,34m de largura, enquanto o Tietê Reduzido (BP1×2), com duas barcaças e um empurrador, apresenta comprimento semelhante e largura de 10,67m. Como a câmara da eclusa mede aproximadamente 142m × 12m, a configuração BP2×2 exige desmembramento temporário em duas unidades BP1×2, que realizam eclusagens sequenciais.

A diversidade de fatores operacionais e ambientais traz uma variabilidade nos tempos das etapas de eclusagem, afetando a duração total da transposição. Segundo Rogers, Hofseth e Adams (2012), embora os modelos determinísticos permitam estabelecer condições de referência e estimar tempos nominais, apresentam limitações na representação da dispersão dos tempos operacionais e na estimativa de percentis de risco, aspectos relevantes ao planejamento e à gestão das eclusas. No Brasil, as pesquisas sobre hidrovias concentram-se principalmente na viabilidade econômica, no planejamento logístico e nos impactos ambientais, enquanto os

ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

estudos sobre os tempos de operação das eclusas ainda são pouco explorados (Brinatti; Ramalho; Tonon, 1981; Caljouw, 2015).

A influência de fatores operacionais, incluindo manobras, amarrações, níveis de água e condições de tráfego influenciam o tempo de eclusagem, podendo aumentar as esperas e reduzir a eficiência operacional. O método de Monte Carlo permite representar a variabilidade operacional por meio de simulações estocásticas baseadas em distribuições de probabilidade atribuídas às variáveis de entrada. Essa abordagem possibilita estimar a distribuição dos tempos de eclusagem, sua dispersão e indicadores de risco baseados em percentis, contribuindo para a avaliação da confiabilidade, o planejamento da capacidade e a identificação de oportunidades de melhoria operacional (Bandy, 1996; Campbell *et al.*, 2007; Guan *et al.*, 2021). Um estudo recente foi feito aplicando o método de Monte Carlo na transposição da eclusa de Bariri, considerando a variável tempo de amarração/liberação das embarcações nas boias (Amorim *et al.*, 2026).

2 Materiais e Métodos

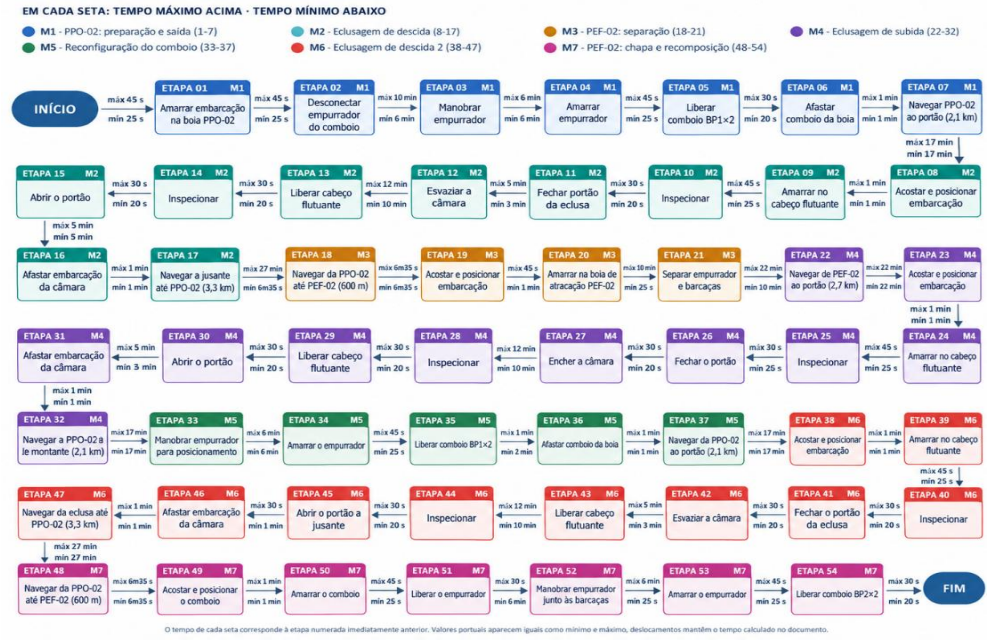
Com base nos 54 processos de eclusagem, os processos foram separados em dois grupos: os realizados pela tripulação e os realizados pela equipe da eclusa. A partir dessa separação, foram criados 16 cenários hipotéticos, chamados de “empresas”, utilizando diferentes combinações de tempos mínimos e máximos dos processos variáveis. A Empresa 1 representa o cenário em que todos os tempos são mínimos, enquanto a Empresa 16 representa o cenário em que todos são máximos. As demais empresas representam combinações intermediárias entre os processos. A codificação foi elaborada em Python. Os dados foram extraídos da literatura (Marinha do Brasil - CFTP, 2023; Silva, 2015).

3. Resultados e Discussão

O processo de eclusagem envolve diversas etapas, mostradas na Figura 1. Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar, ainda usando a análise determinística, os efeitos das variações nos tempos em vários processos no processo total.

Fatecnológica
Fatec Jahu
IV CONGRESSO DE TECNOLOGIA FATEC JAHU 10 a 13/11
ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

Figura 1. Etapas envolvidas na eclusagem



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

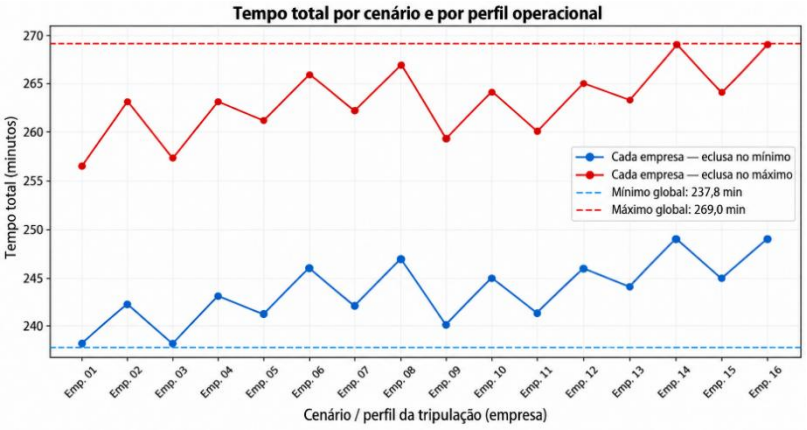
A Figura 2 apresenta os tempos totais de transposição da eclusa de Bariri para 16 cenários operacionais, definidos por combinações dos tempos mínimos e máximos de quatro grupos de atividades da tripulação. A Empresa 1 representa a condição de referência, com tempos mínimos, enquanto a Empresa 16 corresponde à condição de maior duração. Os demais perfis apresentam combinações intermediárias, permitindo avaliar a contribuição de cada atividade para o desempenho operacional. Os tempos totais variaram entre 236,92 e 269,08 minutos, com amplitude de 32,17 minutos (13,58%). Dessa diferença, 19,50 minutos correspondem às condições de funcionamento da eclusa e 12,67 minutos às atividades controláveis pela tripulação. O paralelismo entre as curvas evidencia a natureza aditiva do modelo determinístico.

Entre as atividades controláveis, o acostamento apresentou o maior potencial de redução temporal (5 minutos), seguido pela desconexão (4 minutos), amarração (3 minutos) e liberação (0,67 minuto). A ausência de crescimento contínuo entre os cenários mostra que o desempenho depende dos tempos de cada procedimento, e não apenas da quantidade de atividades realizadas no tempo mínimo.

ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

A Empresa 1 serve como referência para comparar o desempenho e identificar melhorias, considerando separadamente os fatores relacionados à tripulação e à infraestrutura da eclusa.

Figura 2. Tempos totais para o melhor e pior perfil operacional para cada empresa



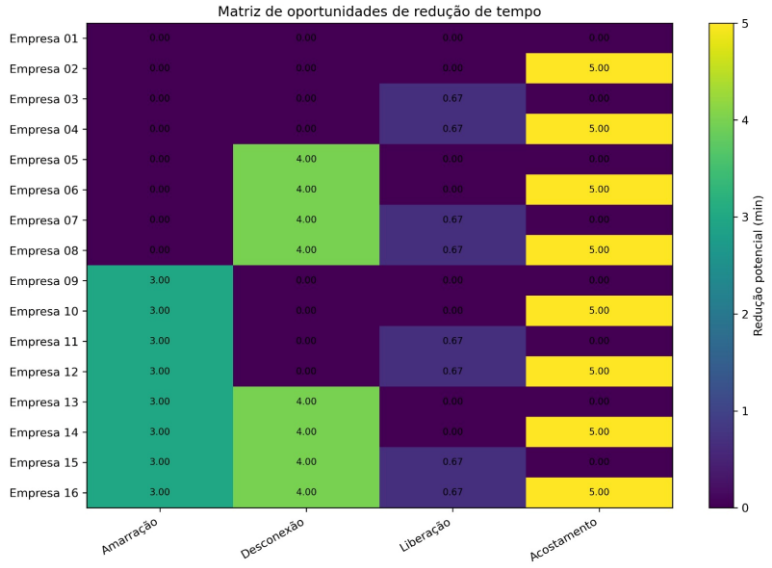
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A Figura 3 apresenta a matriz de oportunidades de redução do tempo de eclusagem para 16 perfis operacionais, considerando quatro atividades da tripulação: amarração, desconexão, liberação e acostamento. Os valores representam o potencial acumulado de redução temporal de cada atividade em relação ao *benchmark* determinístico, estabelecido pela Empresa 01. O acostamento apresentou o maior potencial de redução (5,00 minutos), seguido pela desconexão (4,00 minutos), amarração (3,00 minutos) e liberação (0,67 minuto), correspondendo, respectivamente, a 39,5%, 31,6%, 23,7% e 5,3% do potencial máximo de 12,67 minutos. As três primeiras atividades concentram aproximadamente 94,7% desse potencial, constituindo prioridades para melhorias operacionais. A Empresa 01 apresenta potencial nulo de redução, enquanto a Empresa 16 registra o maior *gap* operacional (12,67 minutos). Entre os perfis intermediários, destacam-se a Empresa 06, com potencial de 9,00 minutos nas operações de acostamento e desconexão, e a Empresa 14, com 12,00 minutos distribuídos entre acostamento, desconexão e amarração.

A matriz permite identificar os processos responsáveis pelas diferenças de desempenho, orientando intervenções específicas e metas incrementais de eficiência. Os valores representam limites determinísticos hipotéticos, não ganhos empiricamente comprovados, cuja viabilidade depende de condições técnicas, ambientais, econômicas e de segurança.

ISSN 2763-5600
Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

Figura 3. Matriz de oportunidades



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

5 Considerações Finais

Este estudo analisou os tempos operacionais da eclusagem de comboios empurrados na eclusa de Bariri, na Hidrovia Tietê–Paraná, por meio da divisão do processo em 54 etapas e da criação de 16 cenários. Os tempos totais variaram entre 236,92 e 269,08 minutos, com uma diferença de 32,17 minutos. Desse total, 19,50 minutos estão relacionados às atividades da eclusa e 12,67 minutos às atividades da tripulação. A comparação dos cenários permitiu identificar diferenças de desempenho e possíveis oportunidades de melhoria, utilizando a Empresa 01 como referência para o benchmarking operacional. Os resultados são teóricos e não representam ganhos comprovados na prática. Como continuidade, propõe-se utilizar simulações de Monte Carlo e dados reais para avaliar a variação dos tempos, verificar a confiabilidade dos resultados e analisar possíveis melhorias na operação da eclusa.

Agradecimentos

Este trabalho conta com o suporte financeiro do CNPq, processo nº 152420/2026-6.

Referências

ADHIKARI, G.; BAE, K.-H.; EVANS, G. W.; BAI, L.; HERAGU, S. S. Simulation Analysis of the Ohio River Waterway Transportation System. *In*: 2014 INDUSTRIAL AND SYSTEMS ENGINEERING RESEARCH CONFERENCE. 2014. **Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference**. [*S.l.*]: [*S.n.*], 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/290563628_Simulation_analysis_of_the_Ohio_river_waterway_transportation_system.

ISSN 2763-5600

Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

AMORIM, A. E. A.; REZENDE, L. B. D.; SANZOVO, S. D. A. P. P.; LIMA JÚNIOR, O. F.; PINTO, J. A.; VENZI, J. F. R. Stochastic modeling of inland navigation locks: a Monte Carlo framework for convoy lockage and capacity assessment. **REMUNOM**, [*S.l.*], v. 13, n. 06, p. 1–39, 17 abr. 2026. DOI: https://doi.org/10.66104/1s6ncp14. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/6091. Acesso em: 23 abr. 2026.

BANDY, D. B. Simulation of the Illinois Waterway locks system. *In*: THE 28TH CONFERENCE ON WINTER SIMULATION - WSC'96. 1996. **Proceedings of the 28th conference on Winter simulation - WSC '96**. Coronado, California, United States: ACM Press, 1996. p. 1483–1487. DOI: https://doi.org/10.1145/256562.257000. Disponível em: http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=256562.257000. Acesso em: 12 dez. 2025.

BRINATTI, M. A.; RAMALHO, E. W. R.; TONON, V. J. Determinação dos tempos de espera e transposicao de uma eclusa. *In*: VII CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL, TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERIA PORTUARIA. 1981. **VII Congreso Panamericano de Ingenieria Naval, Transporte Maritimo e ingenieria Portuaria**. Viña del Mar, Chile: IPIN, 1981. Disponível em: https://ipenbrasil.org.br/wp-content/uploads/2025/06/COPINAval_VII_1981_Determinacao-dos-Tempos-de-Espera-e-Transposicao-de-uma-Eclusa.pdf.

CALJOUW, D. **Optimizing the flow of vessels through locks by improving the operational management of locks**. 2015. 130 f. master's thesis – Faculty of Technology Policy & Management, Delft, 2015. Disponível em: https://repository.tudelft.nl/file/File_ffa17643-9e80-43bc-9542-26d938ded16c?preview=1. Acesso em: 12 dez. 2025.

CAMPBELL, J.; SMITH, L.; II SWEENEY, D.; MUNDY, R.; NAUSS, R. Decision Tools for Reducing Congestion at Locks on the Upper Mississippi River. *In*: 2007 40TH ANNUAL HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES (HICSS'07). 2007. **2007 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'07)**. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2007. p. 56–56. DOI: https://doi.org/10.1109/HICSS.2007.164. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/document/4076483/. Acesso em: 22 set. 2025.

CARROLL, J. L.; BRONZINI, M. S. Simulation of Waterway Transport Systems. **Transportation Engineering Journal of ASCE**, [*S.l.*], v. 97, n. 3, p. 527–539, ago. 1971. DOI: https://doi.org/10.1061/TPEJAN.0000177. Disponível em: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/TPEJAN.0000177. Acesso em: 31 jul. 2025.

CARROLL, J. L.; BRONZINI, M. S.; HAYWARD, J. C. **Analysis of waterway systems**. University of California, Berkeley, USA: Institute of Transportation and Traffic Engineering, 1972.

DANTAS, A. A. N. A importância do transporte hidroviário para o escoamento de grãos na região sul do estado de Goiás a partir do porto de São Simão. **COLÓQUIO - Revista do Desenvolvimento Regional**, [*S.l.*], v. 20, n. 1, p. 64–81, 2023. Disponível em: https://seer.faccat.br/index.php/coloquio/article/view/2868. Acesso em: 9 out. 2025.

FELIPE JUNIOR, N. F.; SILVEIRA, M. R.; COCCO, R. G. A hidrovia Tietê-Paraná e a intermodalidade: fluxos de mercadorias, desenvolvimento econômico e repercussões no território. **Boletim Campineiro de Geografia**, [*S.l.*], v. 13, n. 1, 28 set. 2023. DOI: https://doi.org/10.54446/bcg.v13i1.2875. Disponível em: https://publicacoes.agb.org.br/boletim-campineiro/article/view/2875. Acesso em: 28 mar. 2025.

GUAN, H.; XU, Y.; LI, L.; HUANG, X. Optimizing Lock Operations and Ship Arrivals through Multiple Locks on Inland Waterways. **Mathematical Problems in Engineering**, [*S.l.*], v. 2021, p. 1–13, 21 set. 2021. DOI: https://doi.org/10.1155/2021/6220559. Disponível em: https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/6220559/. Acesso em: 31 jul. 2025.

HAMMEDI, W.; SENOUCI, S. M.; BRUNET, P.; RAMIREZ-MARTINEZ, M. Two-Level Optimization to Reduce Waiting Time at Locks in Inland Waterway Transportation. **ACM Transactions on Intelligent Systems**

ISSN 2763-5600

Edição Especial do IV Congresso de Tecnologia da Fatec Jahu

and Technology, [*S.l.*], v. 13, n. 6, p. 1–30, 31 dez. 2022. DOI: https://doi.org/10.1145/3527822. Disponível em: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3527822. Acesso em: 16 out. 2025.

MARINHA DO BRASIL - CFTP. **Normas e Procedimentos da Capitania Fluvial Tietê-Paraná**.: Marinha do Brasil, 2023. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/cftp/sites/www.marinha.mil.br.cftp/files/NPCF_REV2_MOD1_0.pdf. Acesso em: 18 mar. 2025.

MENDONÇA, E. T.; AMORIM, A. E. A.; REZENDE, L. B. D. Desafios e avanços na hidrovia Tietê-Paraná: infraestrutura, obras recentes e sustentabilidade no transporte fluvial. **REVISTA FOCO**, [*S.l.*], v. 18, n. 6, p. e8991, 30 jun. 2025. DOI: https://doi.org/10.54751/revistafoco.v18n6-228. Disponível em: https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/8991. Acesso em: 19 set. 2025.

ROGERS, E.; HOFSETH, C.; ADAMS, D. NaSS: System simulation of inland waterways. **International Journal of Simulation and Process Modelling**, [*S.l.*], v. 7, n. 4, p. 245–254, 2012. DOI: https://doi.org/10.1504/IJSPM.2012.049159. Disponível em: https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJSPM.2012.049159.

SILVA, H. **Considerações sobre planejamento de eclusagens na hidrovia Tietê-Paraná**. 2015. 106 f. master's thesis – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU, Bauru/SP, 2015. Acesso em: 21 out. 2025.

SWEENEY, K. D.; CAMPBELL, J. F.; SWEENEY II, D. C. Impact of Shippers' Choice on Transportation System Congestion and Performance: Integrating Random Utility with Simulation. **Transportation Journal**, [*S.l.*], v. 53, n. 2, p. 143–179, 1 abr. 2014. DOI: https://doi.org/10.5325/transportationj.53.2.0143. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.5325/transportationj.53.2.0143. Acesso em: 3 mar. 2026.

TOLOI, R. C.; FREITAS JUNIOR, M.; REIS, J. G. M. D.; VENDRAMETTO, O.; COSTA NETO, P. L. O. Droughts in the tietê-paraná waterway: impacts on the direct, indirect and hidden costs in the transportation of soybean. **Independent Journal of Management & Production**, [*S.l.*], v. 7, n. 2, p. 431–444, 1 jun. 2016. DOI: https://doi.org/10.14807/ijmp.v7i2.418. Disponível em: http://www.ijmp.jor.br/index.php/ijmp/article/view/418. Acesso em: 1 mar. 2025.

WANG, S. L. A data-driven waterway simulation model for inland waterway operation. **World Review of Intermodal Transportation Research**, [*S.l.*], v. 1, n. 4, p. 419, 2007. DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.1504/WRITR.2007.017096. Disponível em: https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/WRITR.2007.017096?journalCode=writr. Acesso em: 12 dez. 2025.

WILSON, H. G. On the applicability of queueing theory to lock capacity analysis. **Transportation Research**, [*S.l.*], v. 12, n. 3, p. 175–180, jun. 1978. DOI: https://doi.org/10.1016/0041-1647(78)90121-1. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0041164778901211. Acesso em: 3 mar. 2026.

WU, Z.; JI, B.; YU, S. S. Modeling and Solution Algorithm for Green Lock Scheduling Problem on Inland Waterways. **Mathematics**, [*S.l.*], v. 12, n. 8, p. 1192, 16 abr. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/math12081192. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-7390/12/8/1192. Acesso em: 12 dez. 2025.

"O conteúdo expresso no trabalho é de inteira responsabilidade do(s) autor(es)."