



ANÁLISE ESPACIAL DA INFLUÊNCIA DA PROXIMIDADE DO CANAL NO POTENCIAL DE SATURAÇÃO SUPERFICIAL AO LONGO DA FERROVIA CARAJÁS COM APLICAÇÃO DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE (TWI)

Felipe Pacheco Silva¹

Max Levin²

Luiz Felipe Goulart Fiscina³

Felipe Santos de Almeida⁴

João Vitor Barros Zanotti⁵

Gabriela Vitelli⁶

Marcos Massao Futai⁷

RESUMO

Este estudo analisa o comportamento do Índice Topográfico de Umidade (*Topographic Wetness Index* – *TWI*) em segmentos da Estrada de Ferro Carajás (EFC), próximos ao Rio Pindaré, no Maranhão, com o objetivo de avaliar a influência da proximidade do canal fluvial na distribuição espacial do potencial de saturação hídrica superficial. A pesquisa integra a análise de fatores condicionantes à suscetibilidade geotécnica de infraestruturas lineares, especialmente em regiões de interação entre processos fluviais e estabilidade de taludes. Embora o TWI seja amplamente utilizado em estudos hidrológicos, são escassas as pesquisas que relacionam diretamente esse índice com o risco geotécnico em corredores ferroviários localizados em ambientes tropicais úmidos. Nesses contextos, a influência da proximidade de canais fluviais sobre o potencial de saturação superficial ainda é pouco compreendida. Este trabalho busca preencher essa lacuna, contribuindo para a compreensão dos fatores geomorfológicos e hidrográficos que afetam a estabilidade da ferrovia. O TWI foi calculado a partir de parâmetros topográficos extraídos de um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 12,5 metros, obtido por meio do sensor ALOS PALSAR e processado no *software* ArcGIS Pro 3.2. Foram derivadas variáveis hidrogeomorfológicas essenciais, como declividade, direção de escoamento e área contributiva, além da distância euclidiana entre a ferrovia e o rio. A análise revelou correlação negativa significativa entre a distância mínima da ferrovia ao canal fluvial e os valores máximos de TWI. Isso indica que os segmentos mais próximos ao rio apresentam maior potencial de retenção de umidade. Destacam-se áreas críticas como o trecho 10 (km 405+500 a 408+400), com distância mínima de 10 metros e TWI de 21,78, além dos trechos 3, 8 e 9, com distâncias entre 11 e 17 metros e elevados valores de TWI. Os resultados reforçam o TWI como ferramenta eficaz para identificação de áreas suscetíveis a instabilidades geotécnicas, apoiando o planejamento preventivo em corredores ferroviários em ambientes fluviais.

INTRODUÇÃO

¹ Pós-doutorando pelo Programa de Pós-graduação Engenharia Civil e Estruturas da Universidade de São Paulo – USP – SP, felipe_pacheco@usp.br

² Graduando do Curso de Geografia da Universidade de São Paulo – USP – SP, max.levin@usp.br

³ Doutorando pelo Programa de Pós-graduação Engenharia Civil e Estruturas da Universidade de São Paulo – USP – SP, luizfiscina@usp.br

⁴ Doutorando pelo Programa de Pós-graduação Engenharia Civil e Estruturas da Universidade de São Paulo – USP – SP, almeida.felipe@usp.br

⁵ Graduando do Curso de Geografia da Universidade de São Paulo – USP – SP, jzanotti28@usp.br

⁶ Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade de São Paulo – USP – SP, gabrielaivitelli@usp.br

⁷ Professor orientador: Professor Titular, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP – SP, futai@usp.br



A topografia, mais do que uma simples representação da paisagem, é um indicador-chave na identificação de áreas suscetíveis a inundações. Estudos recentes demonstram que atributos como elevação, declividade e convergência de fluxo são determinantes para prever o potencial de saturação superficial, e, nesse contexto, o Índice Topográfico de Umidade (Topographic Wetness Index – TWI) (Moore et al., 1993; McKenzie e Ryan, 1999; Sørensen et al., 2006) se destaca como uma ferramenta essencial (Rizaliali et al., 2024).

O TWI, também denominado Índice Topográfico Composto (CTI) na literatura, conforme Moore et al. (1993), Quinn et al. (1995) e McKenzie e Ryan (1999), representa uma estimativa da tendência ao acúmulo de água em diferentes porções do relevo, permitindo a identificação de padrões de saturação hídrica a partir de variáveis extraídas de Modelos Digitais de Elevação, com destaque para áreas potencialmente instáveis, como fundos de vale e encostas de baixa declividade. Entretanto, sua aplicação exige atenção metodológica: a acurácia do índice depende diretamente da qualidade do DEM e da adequação dos algoritmos de fluxo utilizados (Riihimäki et al., 2021). Além disso, o índice apresenta limitações em áreas com relevo plano, onde a definição do escoamento é ambígua, e deve ser complementado com informações hidrológicas e meteorológicas para garantir análises mais completas (Chipatiso, 2023). Esse conjunto de evidências reforça o papel da topografia como vetor preditivo em estudos ambientais, consolidando o TWI como um instrumento teórico e prático na avaliação de riscos hidrológicos e no planejamento territorial preventivo.

Este estudo analisa o comportamento do TWI ao longo de um trecho da Estrada de Ferro Carajás (EFC) (Figura 1), inserida em uma superfície planáltica de baixa altitude do Planalto Dissecado Gurupi-Grajaú (IBGE, 2011; Rodrigues de Sousa et al., 2025). A área selecionada, entre os quilômetros 374 e 411 da ferrovia, abrange os municípios de Buriticupu, Bom Jardim e Bom Jesus das Selvas, no estado do Maranhão, e apresenta recorrentes registros de instabilidades em taludes de aterros ferroviários (Figura 1a, 1b e 1c). A presença do Rio Pindaré e de seus afluentes no entorno imediato da via férrea exerce influência direta sobre a dinâmica erosiva e a saturação dos solos, atuando como fator potencializador de escorregamentos. Conforme indicado no mapa geológico simplificado (Figura 1d), o traçado da ferrovia atravessa litologias com diferentes características geomecânicas, como os depósitos aluviais (Qa), que se estendem ao longo do vale do rio, e formações sedimentares menos consolidadas (Grupo Itapecuru e Formação Ipixuna), além de coberturas lateríticas residuais (Elm).

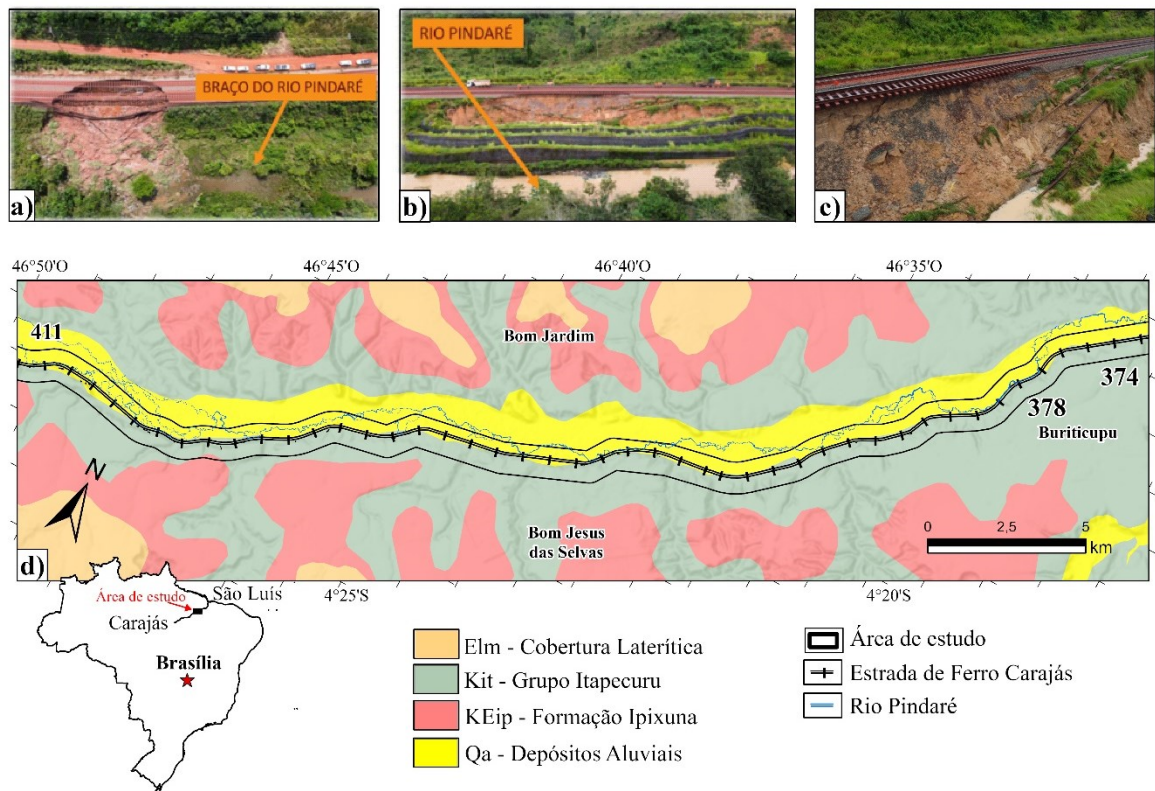


Figura 1. Trecho selecionado da Estrada de Ferro Carajás (EFC) entre os quilômetros 375 e 411, no estado do Maranhão, abrangendo os municípios de Buriticupu, Bom Jardim e Bom Jesus das Selvas. A escolha da área de estudo fundamenta-se na recorrência de instabilidades geotécnicas em aterros ferroviários e na proximidade com o Rio Pindaré. a) Escorregamento registrada nas imediações do km 378; b) Escorregamento em talude de aterro no km 374; c) Processo erosivo com escoamento superficial no talude ferroviário no km 374+100; d) Mapa geológico simplificado do trecho, destacando a distribuição das unidades litológicas (Qa – Depósitos Aluviais, KEtp – Formação Ipixuna, Kit – Grupo Itapecuru, Elm – Cobertura Laterítica) e a localização da EFC e do Rio Pindaré.

O objetivo central é avaliar a influência da proximidade da ferrovia em relação ao canal fluvial na distribuição espacial do potencial de saturação superficial do solo, utilizando o TWI como indicador do potencial de saturação hídrica superficial em áreas de planície aluvial (Sirtoli et al., 2008). Considerando a recorrência de escorregamentos em setores associados a depósitos aluviais e à presença de água subsuperficial, a aplicação do TWI permite identificar zonas de maior predisposição à instabilidade, contribuindo para a compreensão dos condicionantes hidrogeomorfológicos que afetam a segurança dos taludes ferroviários. O TWI tem sido correlacionado à distribuição espacial da umidade, principalmente identificando áreas em que ocorre a saturação superficial, como é o caso dos solos hidromórficos, que ocorrem em relevo plano, em áreas alagadas, ou seja, que possuem o nível freático próximo ao da superfície, na maior parte do ano. Desse modo, esse índice aplicasse à separação desse tipo de solo daqueles que ocorrem em outras áreas planas e suave onduladas (Sirtoli et al., 2008).

MATERIAIS E MÉTODOS

O delineamento metodológico adotado neste estudo compreendeu distintas etapas analíticas, conforme esquematizado na Figura 2. Os dados espaciais utilizados nesta pesquisa foram estruturados e organizados no ambiente ArcGIS Pro 3.2 (ESRI, 2023), que serviu como base para a etapa de análise geoespacial. Inicialmente, procedeu-se ao mapeamento do canal principal e de seus respectivos meandros, utilizando imagens e dados vetoriais disponíveis. A partir desse mapeamento, foi aplicada a ferramenta de distância euclidiana para calcular a distância mínima entre o canal e a plataforma da Estrada de Ferro Carajás (EFC). Com base nos resultados obtidos, foram selecionados 13 segmentos da ferrovia que apresentavam distância igual ou inferior a 100 metros em relação ao canal, com o objetivo de permitir uma análise mais detalhada da dinâmica hidrogeomorfológica nessas áreas críticas.

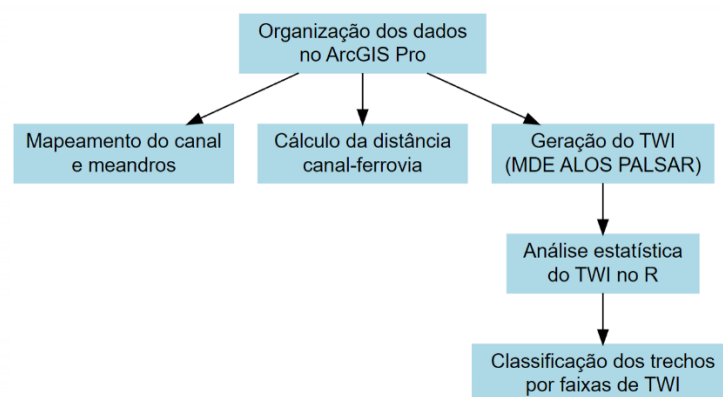


Figura 2. Metodologia adotada neste estudo.

O Índice Topográfico de Umidade (Topographic Wetness Index – TWI) foi calculado igualmente no ArcGIS Pro 3.2, a partir de camadas raster derivadas do Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 metros (JAXA, 2021). A geração do TWI baseou-se na extração da declividade do terreno ($\tan \theta$) e da área de contribuição específica (A_a), parâmetros essenciais para o cálculo do índice. O TWI, também conhecido na literatura como Índice Topográfico Composto (CTI), conforme proposto por Moore et al. (1993), Quinn et al. (1995) e McKenzie e Ryan (1999), representa uma estimativa da propensão de acúmulo de água em diferentes pontos do relevo, sendo expresso pela seguinte fórmula:

$$TWI = \ln (A_c / \tan \theta)$$

onde, A_c = área de contribuição específica, expressa em m^2 por unidade de largura ortogonal à direção de fluxo, em metros (proporcional à capacidade da área de acumular fluxo); e $\tan \theta$ = declividade ou gradiente da vertente (proporcional à capacidade da vertente de escoar fluxo). Os altos valores de TWI indicam áreas com maior potencial de acúmulo de umidade superficial, geralmente associadas a vales e encostas de baixa declividade, enquanto valores baixos indicam zonas de escoamento mais rápido, como encostas íngremes ou divisores de água. A aplicação desse índice permitiu caracterizar espacialmente a distribuição potencial da umidade ao longo da ferrovia, contribuindo para a identificação de setores com maior vulnerabilidade a processos de instabilidade relacionados à dinâmica hídrica.

Nesta etapa, realizou-se uma análise quantitativa do Índice Topográfico de Umidade (TWI) ao longo de diferentes segmentos da Estrada de Ferro Carajás (EFC), visando identificar padrões espaciais de potencial saturação superficial do solo associados à suscetibilidade geotécnica. Os dados, organizados em planilha eletrônica, foram processados no ambiente estatístico R (versão 4.5.0; R Core Team, 2025), passando por procedimentos de padronização e limpeza. Posteriormente, foram calculadas estatísticas descritivas (valores máximos e medidas de dispersão) para cada segmento, possibilitando a avaliação da variabilidade interna dos valores de TWI. A partir desses resultados, compararam-se os trechos ferroviários, com destaque para aqueles com maior incidência de valores extremos. Também foi analisada a correlação entre os valores máximos de TWI e a distância da ferrovia em relação a corpos hídricos, o que permitiu inferir possíveis relações espaciais entre o potencial de saturação superficial e proximidade de drenagens. Esses dados subsidiaram a classificação dos segmentos em faixas de TWI, contribuindo para a compreensão da dinâmica hidrogeomorfológica e para o planejamento de medidas preventivas de risco.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variável distância mínima da ferrovia ao rio ($D_{min.}$) apresentou elevada variabilidade ao longo do trecho analisado, com valores mínimos que variam de 10,06 m a 64,40 m (Tabela 1). Essa oscilação espacial evidencia que há segmentos da ferrovia significativamente próximos aos canais fluviais, situação possivelmente influenciada por variações locais na morfologia do terreno e pela configuração topográfica. Essa proximidade pode intensificar a exposição da infraestrutura ferroviária a processos hídricos, como erosão lateral, inundações e instabilidade de taludes.

Tabela 1 - Relação entre a distância da plataforma da ferrovia ao rio e o *Topographic Wetness Index* – TWI para um trecho de 41 km de extensão da Estrada de Ferro-Carajás

AF	TF (km)	D		TWI	
		<i>min</i>	σ	<i>max</i>	σ
1	373,8 - 376,4	20,37	20,64	19,51	3,29
2	381,4 - 381,8	73,65	10,26	16,04	3,08
3	387,4 - 389,5	17,05	22,61	19,99	2,98
4	391,2 - 391,7	45,92	20,52	16,15	2,63
5	395,1 - 395,7	29,29	24,99	15,91	3,29
6	399,8 - 400,5	32,38	21,90	16,05	2,54
7	402,0 - 402,5	74,46	6,16	13,99	2,58
8	402,7 - 404,3	14,29	22,77	22,13	3,72
9	404,7 - 405,4	11,36	40,05	21,79	2,95
10	405,5 - 408,4	10,06	24,02	21,78	3,86
11	411,2 - 411,9	26,06	19,61	19,02	4,15
12	412,0 - 413,2	22,13	22,32	19,00	3,13
13	413,8 - 414,0	64,40	25,00	14,68	2,07
Total	14,70 km	10,06	24,92	22,13	3,70

AF: Área da Ferrovia; TF: Trecho ferroviário; D: Distância da plataforma ao canal mais próximo; TWI: Topographic Wetness Index

O TWI máximo apresentou valores superiores a 20 em trechos entre o km 402+700 a 408+400 (Figura 3a), sugerindo áreas com maior acúmulo potencial de umidade, geralmente associadas a vales, fundos de encosta ou zonas de convergência de fluxo superficial. Esse comportamento é coerente com a função do TWI, que integra declividade e área de contribuição para estimar o potencial de saturação hídrica do solo. Por outro lado, os altos desvios-padrão de TWI observados em alguns trechos (Figura 3b) revelam heterogeneidade nas condições de potencial de saturação superficial do solo, o que pode representar zonas com diferentes níveis de risco hidrológico e geotécnico ao longo do traçado.

A Figura 4 evidencia uma forte correlação negativa ($r = -0,87$) entre a menor distância da ferrovia (D min.) e os valores máximos de TWI (TWI máx.), indicando que quanto mais próximo o trecho ferroviário está do rio, maior tende a ser o valor máximo de TWI. Áreas próximas ao rio tendem a apresentar menores declividades e maiores contribuições de área de captação acumulada, favorecendo a concentração de fluxo e o acúmulo de umidade superficial. Este padrão geomorfológico explica o aumento dos valores de TWI nas proximidades do canal, indicando maior potencial de saturação hídrica nessas áreas. Essa relação reforça o entendimento de que a proximidade ao rio favorece o acúmulo de umidade no terreno, condição que pode comprometer a estabilidade geotécnica da ferrovia, especialmente em ambientes com baixa declividade e solos com baixa permeabilidade.

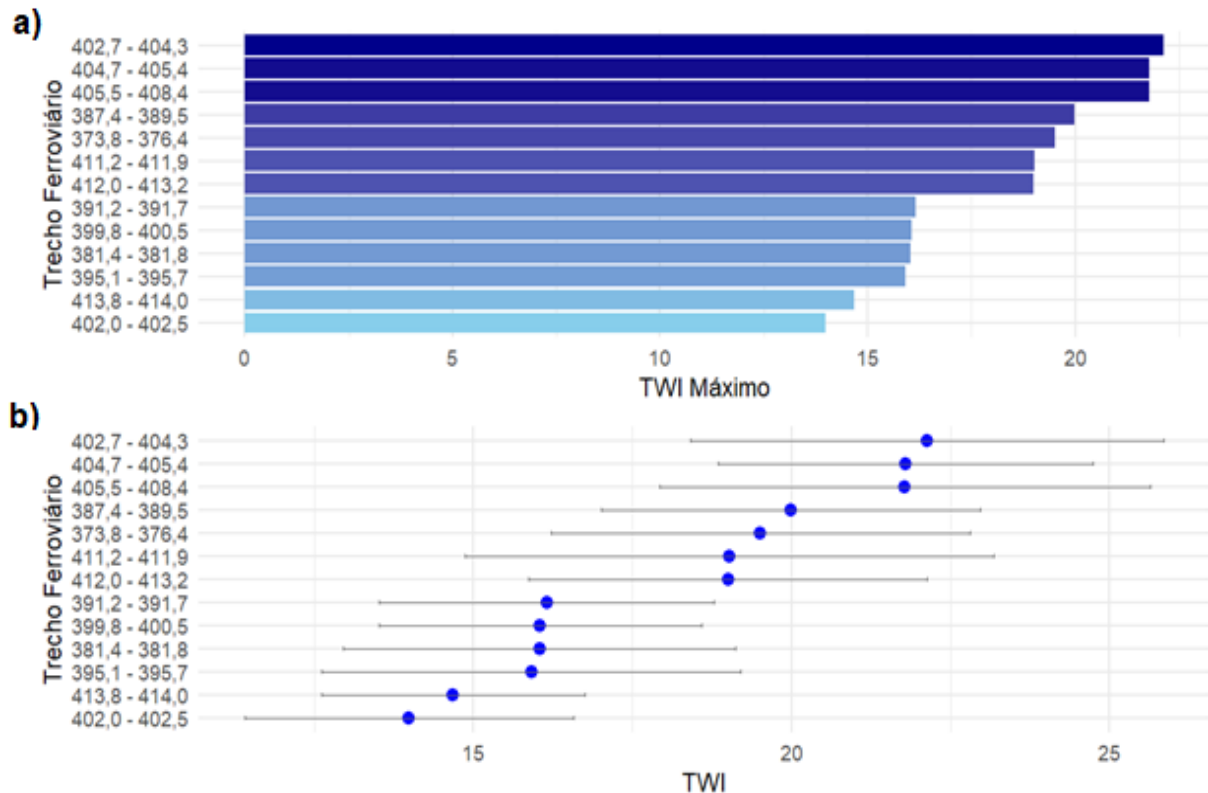


Figura 3. (a) Distribuição do TWI máximo por cada trecho selecionado da Estrada de Ferro Carajás (EFC). (b) Desvio padrão dos valores de TWI por cada trecho selecionado da Estrada de Ferro Carajás (EFC).

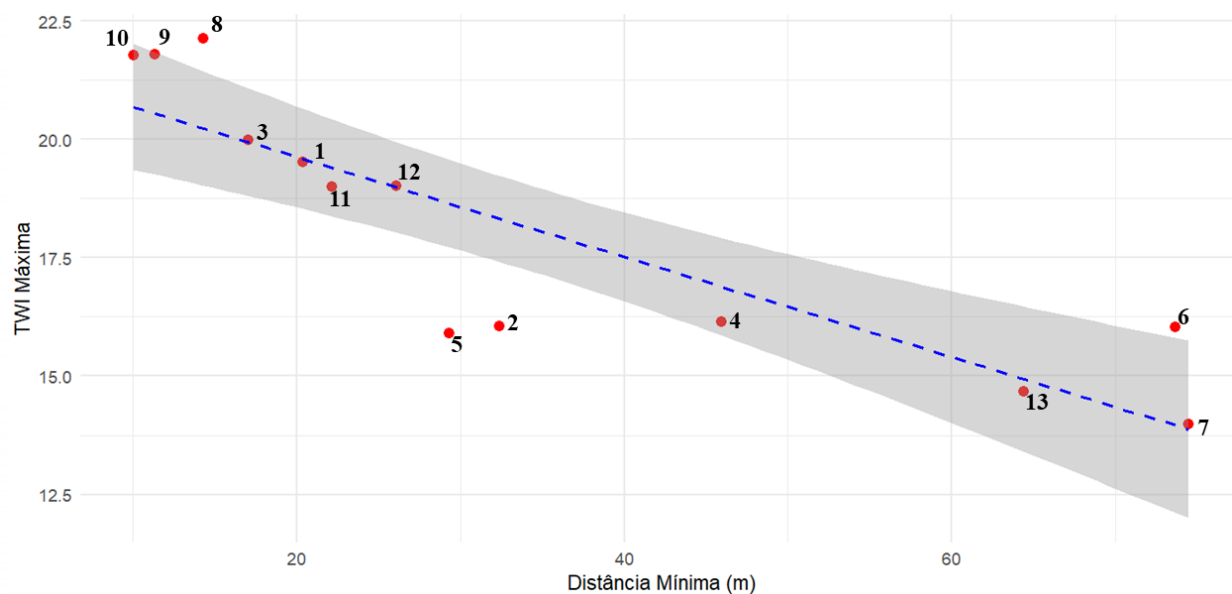


Figura 4. Distribuição do TWI máximo em relação a distância mínima no trecho estudado da Estrada de Ferro Carajás (EFC).

Destacam-se, entre os trechos analisados, áreas críticas que combinam alto potencial de saturação superficial do solo e proximidade significativa ao canal fluvial, configurando zonas de maior vulnerabilidade geotécnica. O trecho 10, situado entre os quilômetros 405+500 e 408+400, apresenta distância mínima de apenas 10 metros em relação ao canal e um valor

máximo de TWI de 21,78, indicando elevada propensão a saturação superficial do solo. Situação semelhante é observada nos trechos 3 (387+400 a 389+500), 8 (402+700 a 404+300) e 9 (404+700 a 405+400), que apresentam distâncias mínimas entre 11 e 17 metros, associadas a valores elevados de TWI (Figura 5).

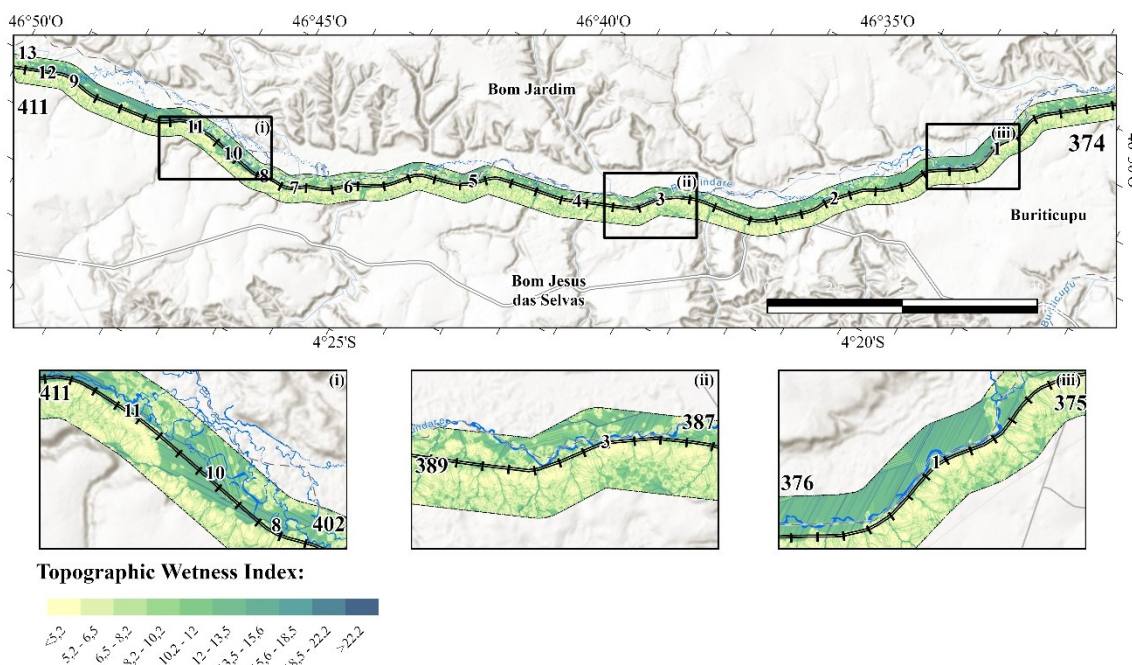


Figura 5. Distribuição espacial do Topographic Wetness Index (TWI) ao longo de um trecho de 41 km da Estrada de Ferro Carajás (EFC), entre os municípios de Buriticupu e Bom Jardim (MA). Os quadros ampliados (i, ii e iii) evidenciam áreas críticas com alto potencial de saturação superficial do solo e pequena distância ao canal, como os trechos 10, 3 e 1, onde os valores máximos de TWI ultrapassam 20.

Esses segmentos merecem atenção especial, sobretudo considerando que áreas como o trecho 1 (373+800 a 376+400), com distância mínima de aproximadamente 20 metros e TWI de 19,51, já registraram processos erosivos e escorregamentos em taludes de aterro (Figura 1b, e 1c). Esses dados reforçam a necessidade de medidas preventivas em setores onde a topografia favorece o potencial de saturação superficial do solo e a proximidade ao canal aumenta a suscetibilidade a instabilidades.

Os resultados ressaltam a importância da incorporação de análises morfométricas, como o TWI, aos estudos de engenharia e ao planejamento da infraestrutura ferroviária. A ocorrência de altos valores de TWI em trechos próximos a canais fluviais evidencia a presença de zonas críticas que podem exigir medidas preventivas, tais como a implantação de sistemas de drenagem superficial e subsuperficial, o reforço do lastro ferroviário e o monitoramento contínuo de áreas com elevada suscetibilidade à saturação hídrica. Esses achados corroboram estudos recentes que destacam a eficácia do TWI no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação, como demonstrado por Ma'rufah et al. (2024) e Rizalihadi et al. (2024), os quais



identificaram maior vulnerabilidade hidrológica em regiões com TWI superiores a 13,95, especialmente nas proximidades de cursos d'água.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstram uma forte correlação negativa entre a distância mínima da ferrovia aos corpos hídricos e os valores máximos do Índice de Umidade Topográfica (TWI), indicando que a proximidade da Estrada de Ferro Carajás (EFC) aos canais fluviais está associada a maior potencial de saturação superficial do solo. Essa condição implica em maior vulnerabilidade geotécnica, especialmente em trechos onde o afastamento ao canal é reduzido e os valores de TWI são elevados, como nos segmentos 10, 3, 8 e 9, evidenciando a necessidade de medidas de mitigação direcionadas.

A análise integrada dessas variáveis fornece subsídios relevantes para o mapeamento de áreas críticas e o planejamento de intervenções como drenagem, reforço do leito ferroviário e monitoramento contínuo. Ressalta-se que, embora o TWI seja uma ferramenta eficaz na identificação de áreas suscetíveis à saturação hídrica, sua aplicação deve ser associada a outras variáveis ambientais para garantir análises mais robustas. Recomenda-se a continuidade de estudos com base em dados pluviométricos, uso do solo e características geotécnicas, a fim de aprimorar o diagnóstico e a segurança da infraestrutura ferroviária em contextos de alta vulnerabilidade hidrológica.

Palavras-chave: Topographic Wetness Index (TWI), Umidade do Solo, Rio Pindaré, Ferrovias, Estabilidade Geotécnica.

REFERÊNCIAS

CHIPATISO, E. Flood risk mapping: quantifying topographic wetness index to determine flood risk zones for Mutoko District in Zimbabwe. **Journal of Sensor Networks and Data Communications**, v. 3, n. 1, p. 215–222, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33140/jsndc.03.01.13>.

ESRI. **ArcGIS Pro** [versão 3.2.0]. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc., 2023.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019. Suscetibilidade a Escorregamentos do Brasil: Primeira Aproximação; **Relatório Técnico**; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Rio de Janeiro, Brasil.

JAXA – JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. **ALOS PALSAR Radiometrically Terrain Corrected (RTC) Digital Elevation Model (12.5m resolution)**.



Alaska Satellite Facility, NASA DAAC, 2021. Disponível em: <https://asf.alaska.edu>. Acesso em: 11 jun. 2025.

MA'RUF AH, W.; RIDWAN, R.; AMIN, M. Deteksi kerawanan banjir genangan menggunakan Topographic Wetness Index (TWI) di Sub Das Way Katibung. **Jurnal Agricultural Biosystem Engineering**, v. 3, n. 2, p. 238, 2024. DOI: <https://doi.org/10.23960/jabe.v3i2.9435>.

MCKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v. 89, p. 67–94, 1999.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 443–452, 1993.

QUINN, P. F.; BEVEN, K. J.; LAMB, R. The $\ln(a/\tan \beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. **Hydrological Processes**, v. 9, p. 161–182, 1995.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

RIIHIMÄKI, H.; KEMPPINEN, J.; KOPECKÝ, M.; LUOTO, M. Topographic Wetness Index as a proxy for soil moisture: the importance of flow-routing algorithm and grid resolution. **Water Resources Research**, v. 57, n. 10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021wr029871>.

RIZALIHADI, M.; MEILIANDA, E.; YULIANUR, A.; AWAY, Y. Identification of spatial potential flood-prone area using topographic wetness index under the digital elevation model of Kr. Keureuto watershed, North Aceh. In: **THE 5th ACEH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIVIL ENGINEERING 2024 (AISCE 2024)**. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2916, p. 012009, 2024. DOI: 10.1088/1742-6596/2916/1/012009.

RODRIGUES DE SOUSA, M. T.; SILVA, F. P.; GOULART FISCINA, L. F.; CORDEIRO, W. B.; FUTAI, M. M. Analysis of land use and coverage and its relationships with declividade instability events on the Carajás Railway: the case of the Pindaré River Basin in the Brazilian Amazon biome. **Journal of South American Earth Sciences**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105373>.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T. da; MANTOVANI, L. E. dos A.; SIRTOLI, A. R. dos; OKA-FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia Agraria**, v. 9, n. 3, p. 317–329, 2008. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99516777007>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SØRENSEN, R.; ZINKO, U.; SEIBERT, J. On the calculation of the Topographic Wetness Index: evaluation of different methods based on field observations. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, p. 101–112, 2006.