

ANÁLISE REGIONALIZADA DE EQUAÇÕES IDF NO ESTADO DO PARÁ UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO E MODELAGEM ESTATÍSTICA

Gledson da Silva¹, Roseilson Souza do Vale²

RESUMO

A presente pesquisa está vinculada à linha de estudos sobre gestão de riscos e eventos hidrológicos extremos, com foco na análise e regionalização de equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) no estado do Pará. O objetivo principal foi desenvolver curvas IDF específicas para os municípios paraenses, contribuindo para o dimensionamento adequado de obras hidráulicas e a mitigação de impactos causados por chuvas intensas. A metodologia baseou-se na extração de séries históricas de precipitação da plataforma HidroWeb (ANA), utilizando linguagem R para tratamento dos dados, aplicação de testes estatísticos e técnicas de interpolação espacial. Os dados foram replicados para 144 municípios, considerando critérios de consistência, preenchimento de falhas por regressão linear e ponderação regional. Os resultados revelaram desempenho superior dos modelos Log-Normal e Gumbel em regiões com séries confiáveis, além de variações significativas em relação a estudos anteriores. As equações IDF regionalizadas demonstram-se essenciais para o planejamento urbano, segurança hídrica e instrumentos de gestão como planos de bacia e outorga de uso. O trabalho contribui para o cumprimento do ODS 6 (água potável e saneamento), ao promover estratégias de gestão eficiente dos recursos hídricos frente às mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrologia. Mudanças climáticas. Recursos hídricos.

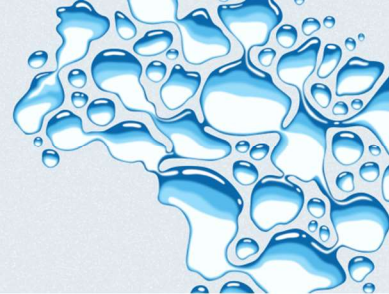
ABSTRACT

This research is part of the study line on risk management and extreme hydrological events, with a focus on the analysis and regionalization of Intensity-Duration-Frequency (IDF) equations in the state of Pará, Brazil. The main objective was to develop municipality-specific IDF curves for Pará, contributing to the proper sizing of hydraulic structures and the mitigation of impacts caused by intense rainfall. The methodology was based on the extraction of historical precipitation series from the HidroWeb platform (ANA), using the R programming language for data processing, application of statistical tests, and spatial interpolation techniques. The data were replicated for 144 municipalities, considering consistency criteria, gap filling using linear regression, and regional weighting. The results revealed that the Log-Normal and Gumbel models performed better in regions with reliable time series, and significant variations were found compared to previous studies. The regionalized IDF equations are shown to be essential for urban planning, water security, and management tools such as basin plans and water use permits. This work contributes to achieving SDG 6 (clean water and sanitation) by promoting efficient water resource management strategies in the face of climate change.

KEYWORDS: Climate change. Hydrology. Water resources.

¹ Aluno da Universidade Federal do Oeste do Pará-UFOPA, Linha de pesquisa: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos. Santarém. Pará. Brasil. E-mail: gledsonsilvaeng@gmail.com.

² Docente do Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação dos Recursos Hídricos. Universidade Federal do Oeste do Pará – Pará, E-mail: roseilsondovale@gmail.com.



INTRODUÇÃO

A ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como chuvas intensas, tem se tornado cada vez mais frequente e impactante, especialmente em regiões com infraestrutura urbana e rural sensível. Nesse contexto, o desenvolvimento de equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) regionalizadas surge como ferramenta essencial para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Este trabalho está vinculado à linha de pesquisa em gestão de riscos e monitoramento de eventos extremos, com foco na produção de dados hidrológicos aplicáveis à realidade do estado do Pará. A escassez de equações IDF específicas para os municípios paraenses e a limitada cobertura de softwares de modelagem, como o Plúvio, motivaram a realização deste estudo, cujo objetivo central é fornecer suporte técnico para a elaboração de obras hidráulicas adequadas, além de contribuir com instrumentos de planejamento e regulação como planos de bacia e outorga de uso.

MATERIAIS E MÉTODOS

A base de dados utilizada neste estudo foi obtida a partir da plataforma HidroWeb, mantida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os dados foram extraídos em 12 de janeiro de 2025 por meio de scripts desenvolvidos em linguagem R, que permitiram a coleta automatizada das séries históricas e a geração de gráficos estatísticos. O município de Santarém (PA) foi adotado como referência metodológica e os procedimentos foram replicados para os demais 144 municípios do estado. Para assegurar a consistência dos dados, foram excluídas séries com mais de 10% de falhas. As lacunas restantes foram preenchidas por regressão linear. Em localidades com ausência de registros pluviométricos consistentes, aplicou-se a ponderação regional. A interpolação espacial foi realizada utilizando duas técnicas principais: Krigagem Ordinária (geoestatística) e IDW (Inverso da Distância Ponderada), com o objetivo de estimar os quantis de precipitação para as diferentes localidades.

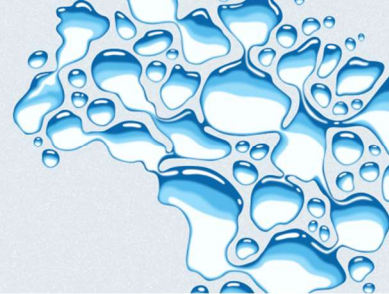
A base de dados regionalizada é o diferencial da ferramenta, permitindo ao usuário obter equações IDF específicas para cada município, mesmo na ausência de séries completas.

Assim, o IDFPará configura-se como um produto inovador e replicável, que visa preencher lacunas de informação hidrológica na Amazônia Legal, fortalecendo a segurança hídrica, a resiliência urbana e a formulação de políticas públicas frente às mudanças climáticas.

Além das funcionalidades internas do aplicativo, os mapas de apoio desenvolvidos durante a pesquisa oferecem uma visão abrangente sobre a distribuição e a qualidade das estações pluviométricas no estado do Pará, bem como a espacialização das intensidades de chuva para diferentes tempos de retorno.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação das metodologias estatísticas e geoestatísticas propostas permitiram gerar equações IDF regionalizadas para os 144 municípios do estado do Pará, suprimindo uma lacuna histórica de dados hidrológicos locais. Os resultados indicaram que os modelos de distribuição de probabilidade Log-Normal e Gumbel apresentaram melhor desempenho na maioria dos municípios com séries históricas consistentes. O modelo Log-Normal destacou-se com melhor ajuste em 25% das localidades, enquanto o Gumbel foi mais eficaz em 18% dos casos.



Por sua vez, o modelo Normal apresentou baixa aplicabilidade, com desempenho satisfatório em apenas 12% das situações analisadas.

Para municípios com dados pluviométricos incompletos ou inconsistentes, o método de interpolação se mostrou essencial.

O método interpolado foi utilizado em 44% dos casos, com destaque para a técnica de Krigagem Ordinária, que proporcionou melhor estimativa espacial dos quantis de precipitação quando comparada ao IDW, especialmente em áreas com maior variabilidade topográfica e climática. A aplicação da regressão linear para preenchimento de falhas também se mostrou eficaz, garantindo continuidade às séries sem comprometer a integridade estatística das análises.

Na comparação com estudos anteriores, especialmente os dados de Souza (2012), observou-se uma diferença média significativa nas intensidades estimadas para diferentes tempos de retorno. Para o tempo de retorno de 15 anos, a diferença média foi de 10,32 mm/h, enquanto para 100 anos foi de 16,33 mm/h, ambos com duração de 30 minutos. Tais discrepâncias sugerem que, além do uso de metodologias distintas, fatores como a ampliação das séries históricas e os efeitos recentes das mudanças climáticas podem estar alterando o regime de precipitação na região amazônica.

Outro aspecto relevante foi a criação do aplicativo IDFPará, que consolida os resultados da pesquisa e os disponibiliza de maneira acessível à sociedade, engenheiros, gestores públicos e pesquisadores.

A análise conjunta dos resultados evidencia que a regionalização das equações IDF é crucial para o fortalecimento da infraestrutura urbana e rural frente aos cenários de mudanças climáticas.

A precisão nas estimativas de intensidade de chuva para diferentes tempos de retorno e durações fornece uma base confiável para o dimensionamento de obras de drenagem, prevenção de alagamentos e formulação de políticas públicas sustentáveis. Dessa forma, o trabalho representa uma contribuição relevante para o cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, em especial o ODS 6, ao fomentar o uso racional, equitativo e tecnicamente embasado dos recursos hídricos no estado do Pará.

Produto Tecnológico: Aplicativo IDFPARÁ

Como principal produto aplicado da pesquisa, foi desenvolvido o aplicativo IDFPará, uma ferramenta computacional de apoio à gestão de riscos hidrológicos e ao planejamento urbano e hidráulico no estado do Pará. O software, com interface gráfica intuitiva, permite ao usuário selecionar um dos 144 municípios paraenses e visualizar de forma imediata as curvas IDF (Intensidade-Duração-Frequência), parâmetros estatísticos e localizações geográficas das estações analisadas.

A Figura 1 apresenta o mapeamento geral das estações pluviométricas utilizadas, classificadas conforme a disponibilidade e consistência dos dados históricos, sendo um insumo fundamental para o processo de interpolação e definição das equações IDF regionais.

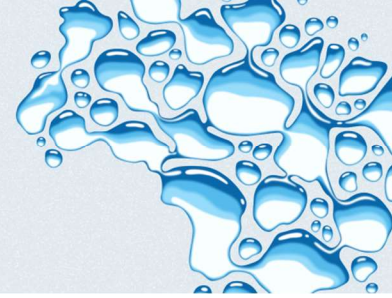
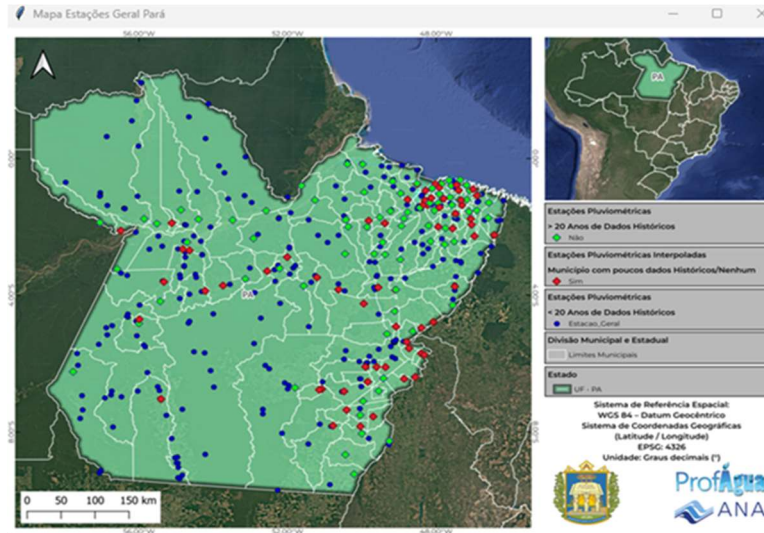
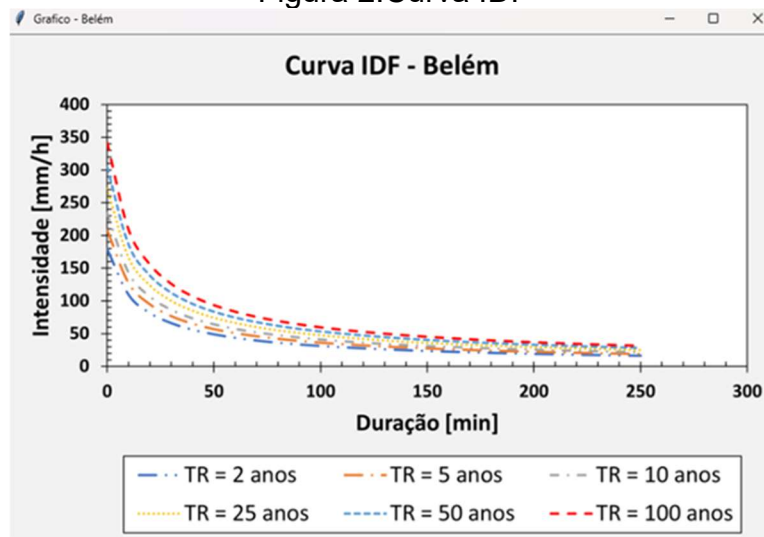


Figura 1: Mapa das estações pluviométricas do estado do Pará, com destaque para aquelas com mais de 20 anos de dados históricos e os municípios com dados interpolados



Na figura 2, observa-se o gráfico da curva IDF para o município de Belém, com diferentes períodos de retorno (TR = 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos). A curva demonstra a relação inversa entre a intensidade das chuvas (mm/h) e sua duração (minutos), fundamental para o dimensionamento de drenagens e sistemas de contenção.

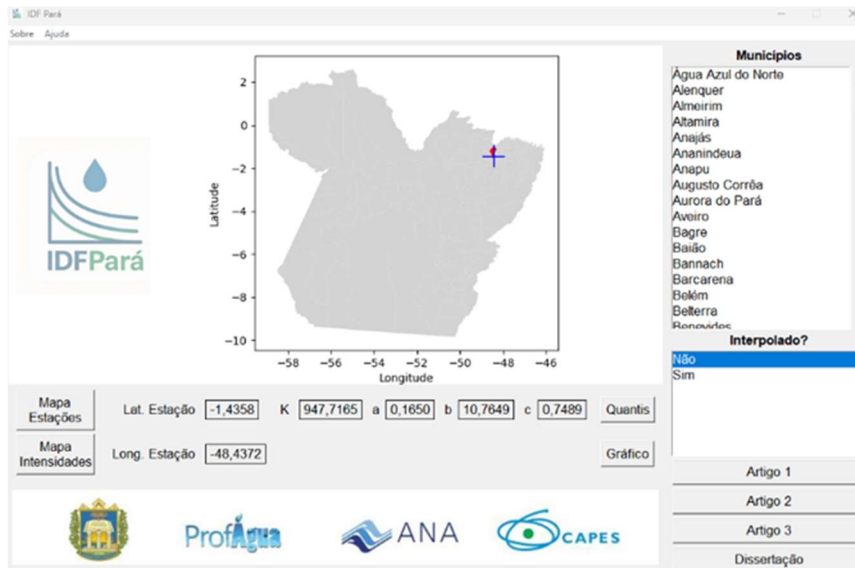
Figura 2: Curva IDF



Na figura 3, é exibida a interface principal do aplicativo, que integra um mapa do estado do Pará com marcação das estações, dados geográficos (latitude e longitude), parâmetros da equação IDF (valores de K, a, b e c), e opções de interpolação ("Sim" ou "Não") para locais com ausência de séries históricas completas. O software também permite a geração de gráficos e acesso a artigos e materiais complementares relacionados ao projeto.



Figura 3: Interface principal do aplicativo IDFPará



A construção do aplicativo utilizou linguagem R para extração, tratamento e análise estatística dos dados da plataforma HidroWeb (ANA), com aplicação das técnicas de Krigagem Ordinária e IDW para interpolação espacial. A base de dados regionalizada é o diferencial da ferramenta, permitindo ao usuário obter equações IDF específicas para cada município, mesmo na ausência de séries completas.

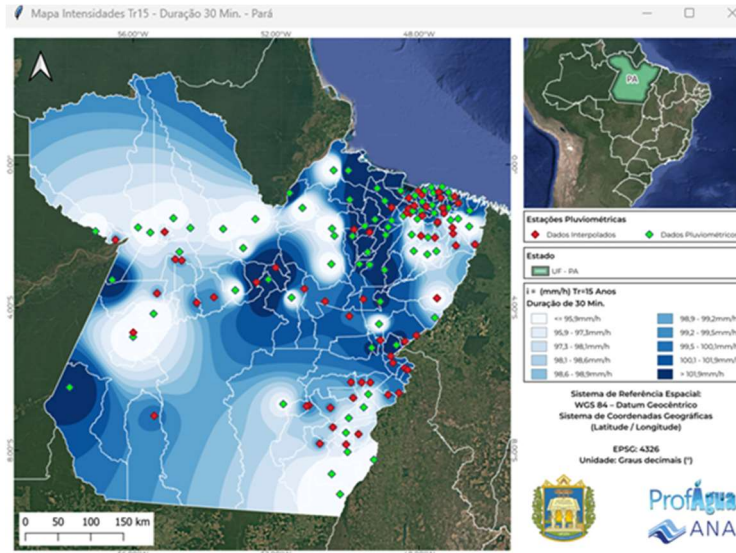
Assim, o IDFPará configura-se como um produto inovador e replicável, que visa preencher lacunas de informação hidrológica na Amazônia Legal, fortalecendo a segurança hídrica, a resiliência urbana e a formulação de políticas públicas frente às mudanças climáticas.

Além das funcionalidades internas do aplicativo, os mapas de apoio desenvolvidos durante a pesquisa oferecem uma visão abrangente sobre a distribuição e a qualidade das estações pluviométricas no estado do Pará, bem como a espacialização das intensidades de chuva para diferentes tempos de retorno.

Na figura 4 mostra a distribuição espacial das intensidades de precipitação para o tempo de retorno de 15 anos e duração de 30 minutos, resultado direto da aplicação das técnicas de interpolação espacial (Krigagem Ordinária e IDW), evidenciando regiões com maiores índices pluviométricos e apoiando decisões técnicas em planejamento urbano, hidráulico e ambiental.



Figura 4: Mapa de intensidades IDF para TR = 15 anos e duração de 30 minutos no estado do Pará, obtido por interpolação espacial



CONCLUSÃO

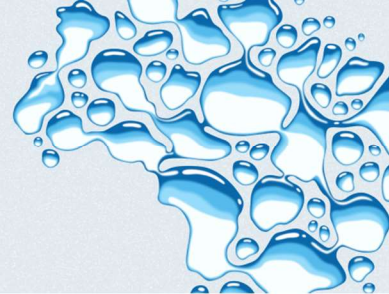
A regionalização das equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para os 144 municípios do estado do Pará representa um avanço significativo para a gestão de riscos hidrológicos, o planejamento urbano e a segurança de obras hidráulicas na região amazônica. A aplicação de métodos estatísticos robustos e técnicas de interpolação espacial permitiu superar a escassez de dados confiáveis em diversos municípios, garantindo maior precisão na estimativa de chuvas intensas e sua frequência ao longo do tempo.

Os resultados obtidos evidenciam a eficácia dos modelos Log-Normal e Gumbel em áreas com séries históricas completas, bem como a importância das técnicas de Krigagem Ordinária e IDW na extrapolação de dados para regiões com lacunas ou ausência de medições.

A comparação com estudos anteriores revelou variações significativas nos parâmetros IDF, reforçando a necessidade de atualização periódica dessas equações frente às mudanças climáticas em curso.

Destaca-se, ainda, o desenvolvimento do aplicativo IDFPará como um dos principais produtos desta pesquisa. A ferramenta consolida os dados gerados, oferece acesso facilitado aos usuários e promove a democratização da informação hidrológica no Pará. Sua interface gráfica interativa e funcionalidades analíticas contribuem diretamente para a tomada de decisões técnicas e para o fortalecimento da capacidade institucional dos municípios na gestão de seus recursos hídricos.

Assim, esta pesquisa não apenas contribui com conhecimento técnico e científico, mas também entrega um instrumento prático e replicável, alinhado aos compromissos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6), promovendo o uso sustentável e resiliente da água em um dos territórios mais sensíveis e estratégicos do Brasil.



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP N°. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua apoio técnico científico aportado até o momento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10520: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

SOUZA, J. A. Equações IDF para a Amazônia Oriental: Análise estatística e aplicações. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n. 4, p. 21-30, 2012.

SILVA, G. S. Regionalização de equações IDF para o estado do Pará utilizando interpoladores espaciais. Santarém: UFOPA, 2025. Trabalho em desenvolvimento.