



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MELISSY KAIANNY DOS SANTOS PINHEIRO

**APLICAÇÃO DO MODELO HAND MODEL PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS
SUSCETÍVEIS A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES: ESTUDO DE CASO NA
CIDADE DE PAU DOS FERROS/RN.**

PAU DOS FERROS
2025

MELISSY KAIANNY DOS SANTOS PINHEIRO

**APLICAÇÃO DO MODELO HAND MODEL PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS
SUSCETÍVEIS A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES: ESTUDO DE CASO NA
CIDADE DE PAU DOS FERROS/RN.**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharela Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Alex Pinheiro Feitosa, Prof Dr.

PAU DOS FERROS
2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P645a Pinheiro, Melissy Kaianny dos Santos.
Aplicação do modelo hand model para
identificação de áreas suscetíveis a alagamentos e
inundações: estudo de caso na cidade de Pau dos
Ferros/RN. / Melissy Kaianny dos Santos Pinheiro.
- 2025.
40 f. : il.

Orientador: Alex Pinheiro Feitosa.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Gestão de Risco. 2. Áreas críticas. 3. Hand
Model. I. Pinheiro Feitosa, Alex , orient. II.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MELISSY KAIANNY DOS SANTOS PINHEIRO

**APLICAÇÃO DO MÉTODO HAND MODEL PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS
SUSCETÍVEIS A ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES: ESTUDO DE CASO NA
CIDADE DE PAU DOS FERROS/RN.**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharela Interdisciplinar em Ciência e
Tecnologia.

Defendida em: 16 / 12 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Alex Pinheiro Feitosa, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Paulo Cesar Moura da Silva, Prof. Dr.
(UFERSA) Membro Examinador

Luis Cesar de Aquino Lemos Filho, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

*Dedico à memória de **Murilo Vinicius**.
A ele, que sempre acreditou em mim.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, dedico este trabalho a Deus. A Ele, que conhece todos os meus caminhos e planos, a quem sou grata por me guiar e me capacitar, e que me ensinou que tudo tem o seu tempo, e no tempo certo, tudo é possível.

O meu amor e gratidão mais profundos aos meus pais, Chagas e Marta. Que sob muito sol e trabalho, me fizeram chegar aqui pela sombra, vocês são a minha inspiração de vida, meus principais incentivadores e a razão pela qual acredito em um propósito maior. Recebam meu agradecimento por todo o apoio incondicional, pelos sacrifícios silenciosos e por acreditarem em mim. Aos meus irmãos, Mayra e Marlon que dividem comigo todos os momentos da vida, e a toda a minha família, agradeço por serem uma rede de apoio, valorizando e incentivando a educação.

Aos amigos maravilhosos que fiz durante esse curso, que se tornaram família, obrigada pela troca de experiências e pelos momentos de leveza. Um agradecimento especial pela amizade, carinho e parceria.

A Guilherme, que foi minha fonte de energia, inspiração e paciência. Sua ajuda nos processos, seu incentivo constante e a sua crença em meu potencial foram essenciais para que eu não desistisse em momentos de desafio. Muito obrigada por caminhar ao meu lado nesta jornada.

Por fim, expresso minha gratidão ao meu orientador, Alex Pinheiro. Pela sabedoria, pela dedicação em compartilhar seu conhecimento e, sobretudo, pelo direcionamento.

EPÍGRAFE

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

O crescimento urbano desordenado e o aumento das atividades antrópicas têm alterado o fluxo natural da água e ampliado a ocorrência de inundações e alagamentos em áreas urbanas. Diante dessas transformações, este estudo aplicou o modelo HAND (Height Above Nearest Drainage) como ferramenta de geoprocessamento para identificar e mapear as áreas suscetíveis a esses fenômenos no município de Pau dos Ferros/RN. A metodologia envolveu a correção do Modelo Digital de Elevação (MDE), a determinação da direção e acumulação do fluxo hídrico, a geração do raster HAND e a posterior reclassificação dos dados em cinco níveis de vulnerabilidade (muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa) por meio do software QGIS. O estudo concentrou-se no perímetro urbano do município, revelando que aproximadamente 18,54 km² quase toda a área urbana analisada estão classificados nas faixas de suscetibilidade muito alta e alta (0 m a 5 m acima da drenagem). Esses resultados evidenciam que o processo de urbanização local avançou sobre áreas de planície aluvial, reforçando a carência de políticas públicas de ordenamento territorial e gestão de risco. Conclui-se que o modelo HAND é uma ferramenta eficaz, acessível e tecnicamente consistente para subsidiar o planejamento urbano e ambiental, especialmente em municípios de pequeno e médio porte do semiárido nordestino.

Palavras-chave: áreas críticas. hidrologia. classificação. gestão de risco. planejamento territorial.

ABSTRACT

The unplanned urban growth and the intensification of human activities have altered the natural water flow and increased the occurrence of floods and inundations in urban areas. In light of these transformations, this study applied the HAND model (Height Above Nearest Drainage) as a geoprocessing tool to identify and map areas susceptible to these phenomena in the municipality of Pau dos Ferros/RN, Brazil. The methodology involved the correction of the Digital Elevation Model (DEM), the determination of flow direction and accumulation, the generation of the HAND raster, and the subsequent reclassification of data into five vulnerability levels (very high, high, moderate, low, and very low) using the QGIS software. The study focused on the urban perimeter of the municipality and revealed that approximately 18.54 km²—almost the entire analyzed urban area—were classified as having very high and high susceptibility (0 m to 5 m above drainage). These results demonstrate that local urbanization has advanced over floodplain areas, highlighting the lack of public policies for land-use planning and risk management. It is concluded that the HAND model is an effective, accessible, and technically consistent tool to support urban and environmental planning, especially in small and medium-sized municipalities of the Brazilian semiarid region.

Keywords: critical areas. hydrology. classification. risk management. territorial planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caso de alagamento na cidade de São Paulo.....	18
Figura 2 - Caso de alagamento na cidade Pau dos Ferros.....	18
Figura 3- Diferença entre enchente, inundação e alagamento.....	19
Figura 4 - Etapas sequenciais do HAND Model	20
Figura 5 - Dados de precipitação média mensal e anual para Pau dos Ferros de 1964 a 2025	23
Figura 6 - Etapas para aplicação do modelo Hand	24
Figura 7 - Alagamentos na cidade de Pau dos Ferros/RN em 1967	25
Figura 8 - Alagamentos na cidade de Pau dos Ferros/RN em 1967	26
Figura 9 - Tela inicial do programa HAND MODEL	26
Figura 10 - Menu para seleção do arquivo	27
Figura 11 - Identificação do tipo de arquivo selecionado	27
Figura 12 - Barra de ferramentas	28
Figura 13 - Métodos para obtenção do modelo final	29
Figura 14 - Classificação das áreas.....	33
Figura 15 - Alagamento no centro da cidade em 2019	36
Figura 16 - Bairro Paraíso em 2008.....	36

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 - Localização do município de Pau dos Ferros/RN.....	22
Mapa 2 - Área Urbana de Pau dos Ferros/RN.....	25
Mapa 3 - Arquivo na tela inicial do programa.....	28
Mapa 4 - Modelo DEM corrigido	30
Mapa 5 - Mapa de Direcionamento de Fluxo	31
Mapa 6 - Mapa de Acumulação de fluxo	31
Mapa 7 - Mapa de rede de Drenagem.....	32
Mapa 8 - Raster HAND.....	32
Mapa 9 - Mapa de Suscetibilidade.....	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Distribuição espacial das classes de risco.....	34
Quadro 2 - Classificação de suscetibilidade por bairro.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 REVISÃO TEÓRICA	17
3.1 Urbanização de Pau dos Ferros/RN	17
3.2 Planejamento Urbano	17
3.3 Enchente, inundação e alagamento	19
3.4 Modelo HAND	20
4. METODOLOGIA	22
4.1 Caracterização da área de estudo	22
4.2 Fluxograma do processo	23
4.3 Recorte da área de estudo	24
4.4 Aplicação do modelo HAND	26
4.4.1 Importação do MDE	26
4.4.2 Identificação e visualização do arquivo DEM	27
4.4.3 Procedimento para gerar o HAND Model.....	28
5 RESULTADOS	30
5.1 Resultados obtidos no HAND Model.....	30
5.1.1 Modelo Digital de Elevação Corrigido (DEM corrigido)	30
5.1.2 Rede de Drenagem, Acumulação de Fluxo e de Drenagem	30
5.2 Raster HAND	32
5.3 Reclassificação e geração do mapa de Suscetibilidade.....	33
5.4 Análise Quantitativa da Suscetibilidade.....	34
5.5 Análise de distribuição de suscetibilidade por bairro	35
5.6 Análise Comparativa: Suscetibilidade HAND e Risco Histórico.....	35
5.6.1 Estudo de Caso Secundário: O Risco de Cheias no Bairro Paraíso	36
5.6.2 Destaques de risco: Bairro Riacho do Meio e São Vicente de Paulo	37
5.6.3 Validação negativa do Bairro Princesinha do Oeste	37
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

A intensificação das atividades antrópicas e o crescimento urbano desordenado modificaram significativamente o uso e a ocupação do solo à escala global. Estas transformações, que muitas vezes são realizadas sem o devido planejamento territorial e ambiental, contribuem para o aumento da impermeabilização das superfícies e para a alteração do escoamento natural da água.

Como consequência direta, observa-se uma incidência crescente de alagamentos e inundações em áreas urbanizadas. Neste contexto, é fundamental compreender como a ocupação do solo influencia a dinâmica hidrológica local.

O município de Pau dos Ferros/RN registra um crescimento populacional contínuo, que desconsidera amplamente a vulnerabilidade da área a ser ocupada. Esse desenvolvimento contribui para o aumento do risco de inundações em vários bairros, especialmente em estações chuvosas. Apesar dessas circunstâncias, as iniciativas para o mapeamento completo das áreas afetadas por eventos hidrológicos ainda são limitadas, o que dificulta a elaboração de medidas públicas eficazes de prevenção e gestão.

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para mapear e identificar áreas suscetíveis, entre eles podemos destacar o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), técnicas de Geoprocessamento, entre outros. Tais modelos variam desde abordagens empíricas até complexas simulações computacionais, destacando-se na representação de processos hidrológicos em bacias e na drenagem urbana.

Entretanto, a aplicação de modelos hidrodinâmicos como o HEC-RAS exige um elevado volume de dados, a literatura técnica aponta desafios na sua operacionalização; conforme observado por Lauriano (2009), embora o HEC-RAS ofereça grande capacidade de detalhamento e excelentes ferramentas gráficas, apresenta maior complexidade na estabilidade numérica, enquanto modelos mais simplificados podem oferecer maior facilidade de convergência durante as simulações. Estas limitações tornam tais ferramentas, muitas vezes, pouco acessíveis para municípios de pequeno e médio porte. Dessa forma, surge a necessidade de se empregar metodologias mais simples e também eficazes, que possibilitem análises territoriais de forma prática.

Entre os métodos mais acessíveis, o modelo HAND (Height Above Nearest Drainage) surgiu como uma alternativa eficiente para identificar áreas de inundação e de alagamentos. Esse modelo utiliza dados de elevação para calcular a altura relativa de cada ponto do terreno em relação à rede de drenagem mais próxima, permitindo a quantificação e medição das áreas

mais propensas a inundações. Estudos recentes, como o de Ferreira et al. (2024), demonstram a eficiência dessa técnica na identificação de áreas suscetíveis a alagamentos em sedes municipais da Amazônia, reforçando a aplicabilidade do modelo para o zoneamento de riscos e o planejamento urbano em localidades.

A aplicação do HAND é particularmente relevante em regiões urbanas em expansão, como o caso de Pau dos Ferros/RN, onde o aumento do uso do solo torna a gestão do risco de inundações um desafio crítico para o planejamento urbano e ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Aplicar o método HAND Model para identificar e mapear áreas suscetíveis a alagamentos e inundações em uma cidade de porte médio do semiárido do nordeste brasileiro.

2.2 Objetivos específicos

Mapear áreas de maior suscetibilidade a risco de inundações e alagamentos;

Analisar a relação entre urbanização e vulnerabilidade;

Estudar a eficiência desse modelo em contexto do semiárido nordestino;

Realizar um estudo comparativo dos riscos de inundação nas áreas habitadas.

3 REVISÃO TEÓRICA

3.1 Urbanização de Pau dos Ferros/RN

O município de Pau dos Ferros está localizado no interior do estado do Rio Grande do Norte, no nordeste do País. Possui uma área territorial de 259,96 km² (quilômetros quadrados) e uma população de 30.479 pessoas, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021).

O povoamento do município teve início no século XVII, impulsionada pela pecuária, também conhecido como “ciclo do gado” (Pessoa & Gomes, 2016.), que atraiu vaqueiros da região, utilizando o Rio Apodi-Mossoró como apoio para descanso e abastecimento hídrico durante a rota, transformando-se em um pequeno povoado e posteriormente, um núcleo urbano.

Logo após sua emancipação política, em 4 de setembro de 1856, Pau dos Ferros começou a ter um crescimento urbano de forma desordenada, o que resultou em um favorecimento a impermeabilização do solo e a ocupação de áreas de risco, fatores que intensificam episódios de inundações e alagamentos no município (Prefeitura Municipal de Pau dos Ferros, s.d.).

3.2 Planejamento Urbano

O adensamento urbano irregular é um fenômeno global que desafia cidades em todo o mundo, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil onde mais de 87,4% da população moram em áreas urbanas (IBGE, 2022), o que tem aumentado a exposição de cidades a riscos hidrológicos.

A rápida urbanização, impulsionada por migrações populacionais e expansão econômica, frequentemente ocorre sem o acompanhamento de um planejamento adequado, resultando em ocupação inadequada de áreas sobre margens de rios, planícies de inundações e áreas de baixa altitude, ou seja, áreas suscetíveis a inundações e alagamentos.

No contexto nacional, a falta de sistemas eficientes de drenagem urbana agrava ainda mais os problemas que são ocasionados pela ocupação do solo de forma irregular, proporcionando e agravando inundações e alagamentos. Essa problemática é observada em diferentes escalas: desde regiões metropolitanas como São Paulo, onde bairros inteiros ficam submersos durante o período chuvoso, como é demonstrado na figura 01, até municípios de médio porte como Pau dos Ferros/RN (figura 02). Ambos os casos causam a degradação do meio ambiente e comprometem a qualidade de vida da população. A urbanização caótica leva a falhas críticas na drenagem das águas pluviais (Tucci, 2018).

Figura 1 - Caso de alagamento na cidade de São Paulo



Fonte: CNN Brasil (2023)

Figura 2 - Caso de alagamento na cidade Pau dos Ferros



Fonte: Tribuna do Norte (2022)

Conforme Cruz (2011), a ausência de planejamento na expansão urbana tende a sobrecarregar o sistema de drenagem que existem, principalmente em cidades de pequeno e médio porte, onde a infraestrutura existente muitas das vezes não acompanha o crescimento urbano.

Diante desse contexto, torna-se fundamental mapear áreas suscetíveis a inundações, por meio de ferramentas geoespaciais, como o modelo HAND, como uma forma de compreender o risco hidrológico.

3.3 Enchente, inundação e alagamento

Os eventos hidrológicos que afetam as áreas urbanas brasileiras têm se tornado cada vez mais recorrentes, reforçando a necessidade de definições claras para compreendê-los.

Segundo o Ministério da saúde (s.d.), as enchentes ocorrem quando a água sobe temporariamente em um rio ou canal por causa do aumento do fluxo, alcançando o ponto máximo, porém sem transbordar.

A Inundação de acordo com Tucci (2007), corresponde ao fenômeno natural em que o escoamento dos rios ultrapassa a capacidade do seu leito menor, ocupando áreas adjacentes conhecidas como planícies de inundação. Trata-se, portanto, de um processo hidrológico recorrente, associado ao regime fluvial e à dinâmica natural dos cursos d'água.

O alagamento está mais diretamente relacionado ao contexto urbano. Isso ocorre devido ao acúmulo de água superficial em áreas impermeabilizadas, geralmente em virtude da deficiência ou saturação dos sistemas de drenagem.

Segundo o Ministério das Cidades (BRASIL, 2012), os alagamentos são caracterizados como eventos de curta duração, mas de forte impacto sobre a mobilidade urbana, infraestrutura e saúde pública. A diferença entre esses fenômenos é ilustrada de maneira esquemática na figura 03.

Figura 3- Diferença entre enchente, inundação e alagamento



Fonte: Adaptada de Rodrigues (2022).

Nesse sentido, enquanto as enchentes e inundações decorrem de processos naturais dos rios e canais, os alagamentos refletem, sobretudo, as consequências da urbanização desordenada, do uso inadequado do solo e da carência de um planejamento eficiente dos sistemas de drenagem.

3.4 Modelo HAND

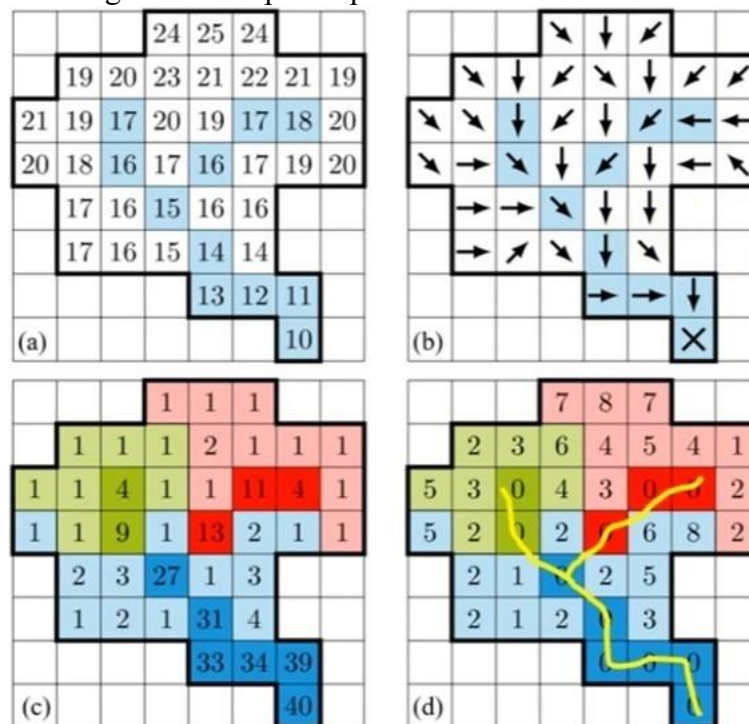
O modelo HAND (Height Above Nearest Drainage) é uma abordagem que foi desenvolvida por pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN).

Foi arquitetado para caracterizar a topografia do terreno levando em consideração à sua rede de drenagem, que permite uma representação mais direta e detalhada do comportamento hidrológico do terreno, sendo possível realizar um mapeamento de áreas suscetíveis a inundações (GeoOne, 2024). De acordo com o autor o modelo HAND permite identificar zonas de inundação com base na altura de cada ponto em relação à bacia hidrográfica mais próxima, possibilitando reconhecer quais regiões correm maior risco de acúmulo de água.

As vantagens desse método incluem: (i) baixo custo dos dados (MDE com uma boa resolução), (ii) facilidade de implementação em GIS e (iii) utilidade para triagem rápida e mapeamento de suscetibilidade onde modelos hidrológicos abrangentes seriam impraticáveis.

Dessa forma, o HAND se estabelece como uma ferramenta importante na gestão de riscos hidrológicos, apoiando tanto estudos acadêmicos quanto o planejamento institucional de proteção civil e políticas de uso do solo. O método do modelo HAND está estruturado em etapas sequenciais, conforme a metodologia proposta por GeoOne (2024), ilustradas na imagem abaixo e descritas a seguir:

Figura 4 - Etapas sequenciais do HAND Model



Fonte: GeoOne (2024)

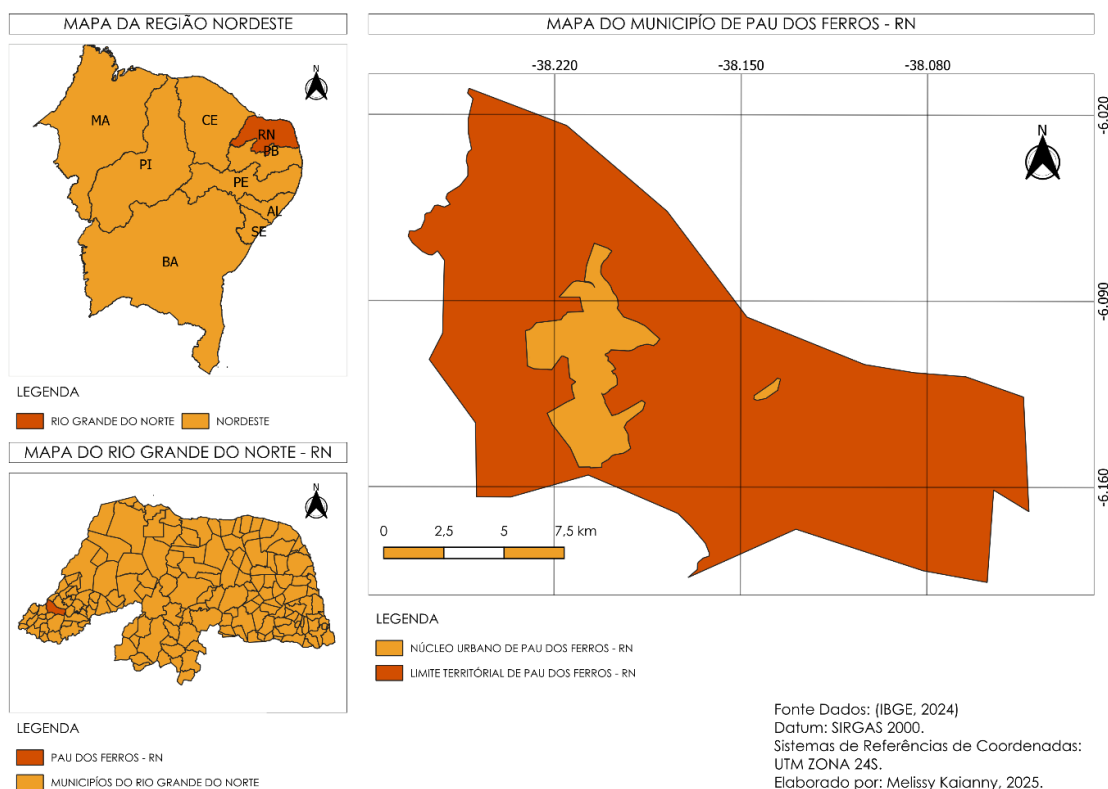
- (a) **Correção do Modelo Digital de Elevação (MDE):** Inicialmente, procede-se à correção do MDE, a fim de representar com maior precisão as características do relevo natural.
- (b) **Determinação da direção de escoamento:** Em seguida, realiza-se a definição da direção do fluxo hídrico, permitindo identificar os caminhos preferenciais que a água tende a percorrer durante os eventos de inundação.
- (c) **Estimativa da acumulação de fluxo:** Na terceira etapa, calcula-se a quantidade de água que pode ser acumulada em cada célula do terreno, constituindo um parâmetro essencial para a previsão de áreas sujeitas a alagamentos.
- (d) **Elaboração do raster HAND:** Por último, é gerado o raster HAND, que expressa a diferença altimétrica entre cada ponto do terreno e o curso d'água mais próximo, possibilitando a identificação espacial das áreas potencialmente vulneráveis a inundações.

4. METODOLOGIA

4.1 Caracterização da área de estudo

O município de Pau dos Ferros localiza-se na mesorregião do Oeste Potiguar, fazendo parte da microrregião de Pau dos Ferros (Mapa 01). Suas coordenadas geográficas são 6°06' 33" de latitude Sul e 38°12' 16" de longitude Oeste, situando-se a aproximadamente 400 km da capital do Estado, Natal (IDEMA, 2008). A área total do município é de 259,96 km², correspondente a cerca de 0,49% da superfície estadual, com altitude média de 193 metros acima do nível do mar.

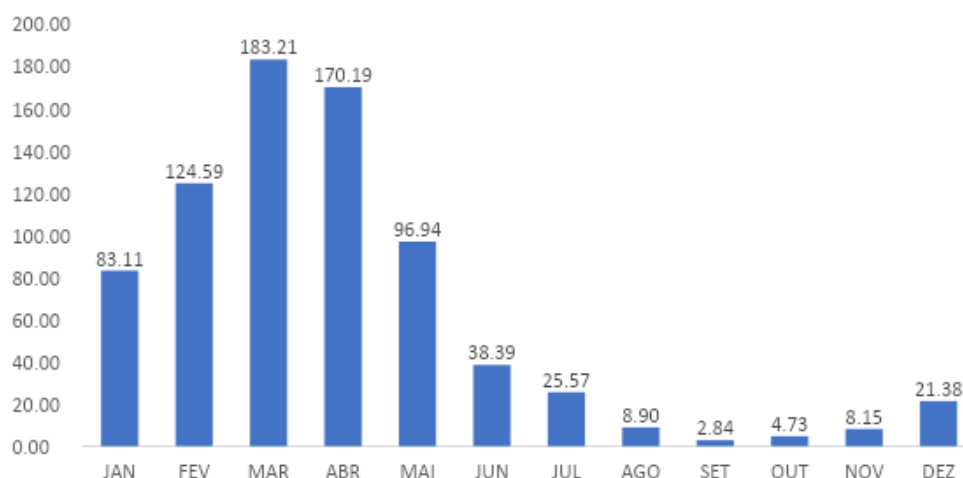
Mapa 1 - Localização do município de Pau dos Ferros/RN



Fonte: Adaptado de IBGE e TOPODATA (2025).

O clima predominante no município em questão é o semiárido, característico do sertão nordestino, com período chuvoso concentrado entre os meses de Janeiro a Junho (Climatempo, 2025), Como pode ser observado na Figura 05, o pico de precipitação ocorre no mês de março, atingindo uma média de 183,21mm. As temperaturas médias anuais são de 28,1°C, com máximas de 36°C e mínimas de 21°C, apresentando umidade relativa média anual de 66% e cerca de 2.700 horas de insolação por ano (IDEMA, 2008). Essas condições climáticas exercem influência direta sobre a dinâmica hidrológica e o comportamento do escoamento superficial, elementos essenciais para a aplicação do modelo HAND.

Figura 5 - Dados de precipitação média mensal e anual para Pau dos Ferros de 1964 a 2025



Fonte: Autoria de Wesley de Oliveira Santos (2025).

O relevo do município apresenta altitudes variando entre 100 e 200 metros, caracterizando-se por uma topografia suave e pela presença da Depressão Sertaneja, que compreende terrenos baixos situados entre o Planalto da Borborema e a Chapada do Apodi. Do ponto de vista geológico, Pau dos Ferros está inserido em uma área de rochas metamórficas, geomorfologicamente, predominam formas tabulares de relevo, de topos planos e vales de fundo plano, que exercem papel determinante na modelagem do terreno e no comportamento do escoamento superficial, sendo elementos fundamentais para a análise topográfica do modelo HAND.

Hidrograficamente, o município encontra-se 100% inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró, tendo o Rio Apodi como principal curso d'água. Entre os reservatórios de maior porte, destaca-se a Barragem Pau dos Ferros, com capacidade de armazenamento de 54.846.000m³ (metros cúbicos). Esse sistema hídrico desempenha papel essencial na manutenção da disponibilidade de água do município.

Dessa forma, as características físicas e ambientais de Pau dos Ferros tornam o município uma área propícia para a aplicação do modelo HAND, para auxiliar a análise do relevo e da drenagem e compreender a vulnerabilidade do território a processos de inundação e escoamento superficial, fornecendo subsídios técnicos relevantes.

4.2 Fluxograma do processo

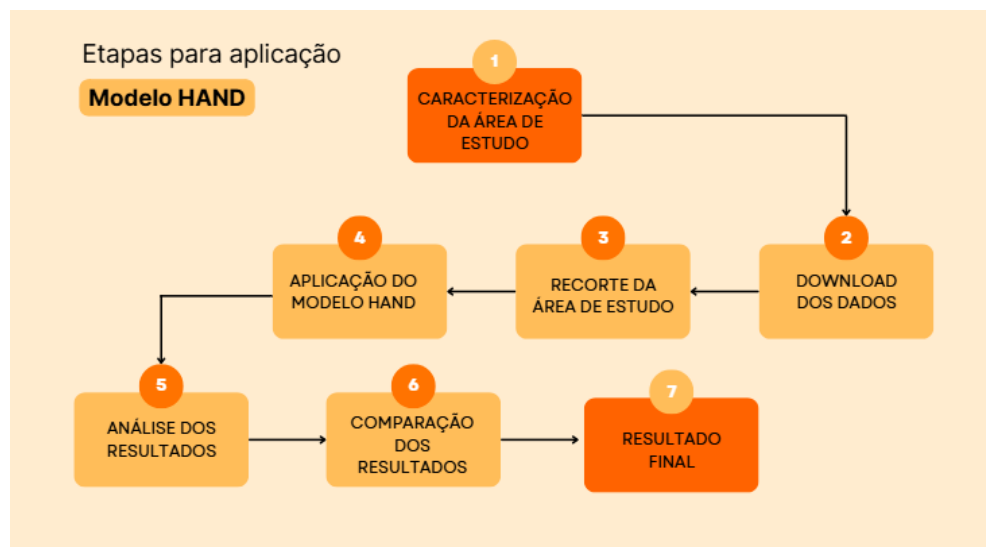
Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o Modelo HAND (*Height Above Nearest Drainage*), que consiste em um método hidrológico para identificação de áreas

susceptíveis a inundações com base na altitude do terreno em relação ao dreno mais próximo. Este modelo permite a classificação do terreno segundo critérios topográficos e hidrológicos, hierarquizando as áreas em níveis de suscetibilidade alto, médio, baixo e não suscetíveis.

A metodologia de pesquisa foi construída em uma sequência contínua e lógica para garantir a progressão sistemática do estudo. Conforme mostrado no fluxograma (Figura 06), o processo começa com a caracterização da região de Pau dos Ferros, que forma a base para a formulação do problema.

Posteriormente, os dados geoespaciais foram adquiridos e pré-processados. O núcleo desta pesquisa reside na aplicação do modelo HAND, cujos resultados foram analisados e comparados com dados de levantamentos de campo e dados históricos. Através dessas etapas, foram obtidos os resultados finais da pesquisa e as conclusões.

Figura 6 - Etapas para aplicação do modelo Hand

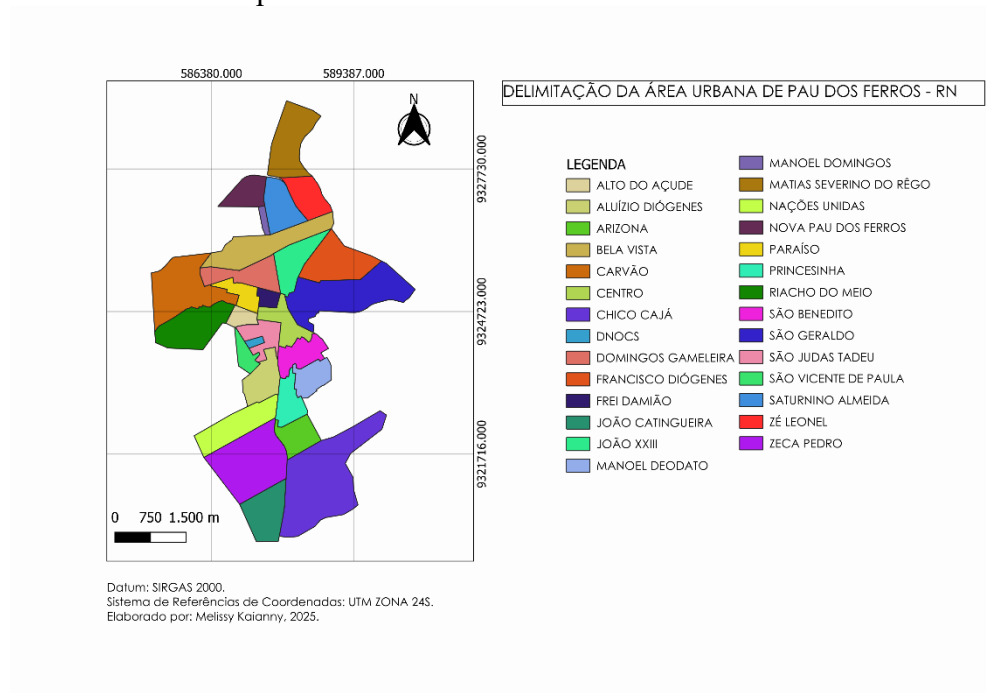


Fonte: Autoria Própria (2025).

4.3 Recorte da área de estudo

A delimitação espacial deste estudo se concentra no perímetro urbano do município de Pau dos Ferros/RN, área mostrada no mapa 02.

Mapa 2 - Área Urbana de Pau dos Ferros/RN



Fonte: Autoria Própria (2025).

Esta escolha é justificada pela recorrência e cronicidade dos alagamentos e inundações que historicamente afetam a cidade, como podemos observar nas figuras 07 e 08.

A motivação prática desta pesquisa reside na ausência de um mapeamento formal das áreas de risco hídrico. Consequentemente, foi introduzido o método HAND para criar espectros espaciais detalhados e confiáveis. Esses dados sobre vulnerabilidade apresentados no mapa destinam-se a servir como dados fundamentais essenciais para melhorar a gestão da prevenção de desastres e o planejamento urbano e ambiental em Pau dos Ferros/RN.

Figura 7 - Alagamentos na cidade de Pau dos Ferros/RN em 1967



Fonte: Instagram @pauferrosrn

Figura 8 - Alagamentos na cidade de Pau dos Ferros/RN em 1967

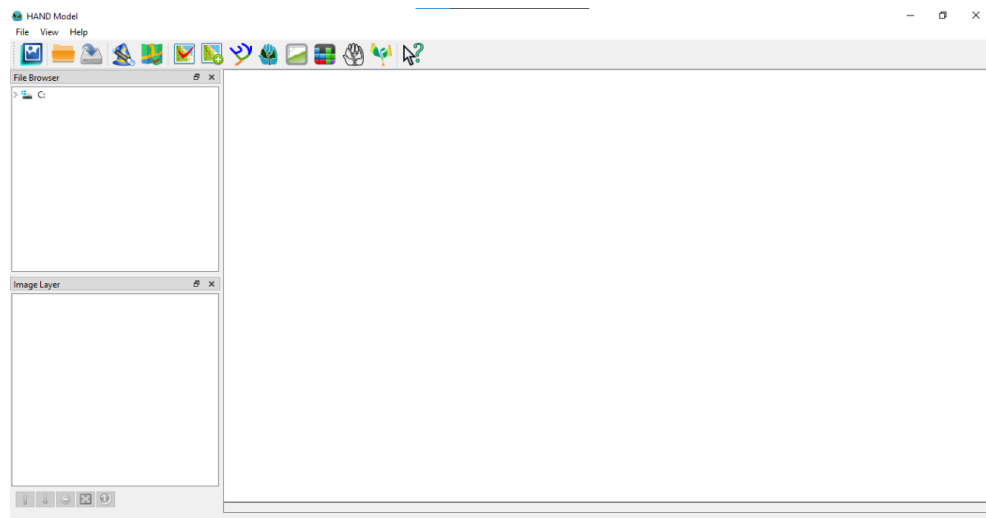


Fonte: Instagram @pau dos ferrosrn

4.4 Aplicação do modelo HAND

Para o início da aplicação do software HAND, é essencial conhecer a interface inicial do programa (figura 09), onde possui todas as ferramentas necessárias para desenvolver e processar os dados.

Figura 9 - Tela inicial do programa HAND MODEL

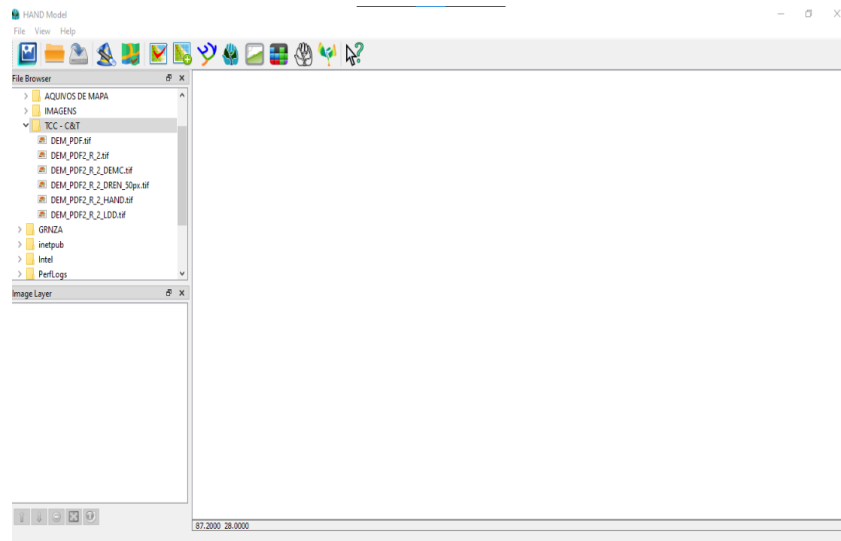


Fonte: HAND MODEL (2025)

4.4.1 Importação do MDE

Após a abertura do software (Figura 09), o primeiro passo metodológico consiste na importação do principal dado de entrada para a modelagem: o Modelo Digital de Elevação (MDE), que pode ser selecionado ao lado direito da tela. O MDE utilizado foi obtido a partir do Copernicus DEM, um modelo global de elevação derivado da missão TanDEM-X, que oferece alta precisão vertical e consistência espacial para a área de estudo.

Figura 10 - Menu para seleção do arquivo

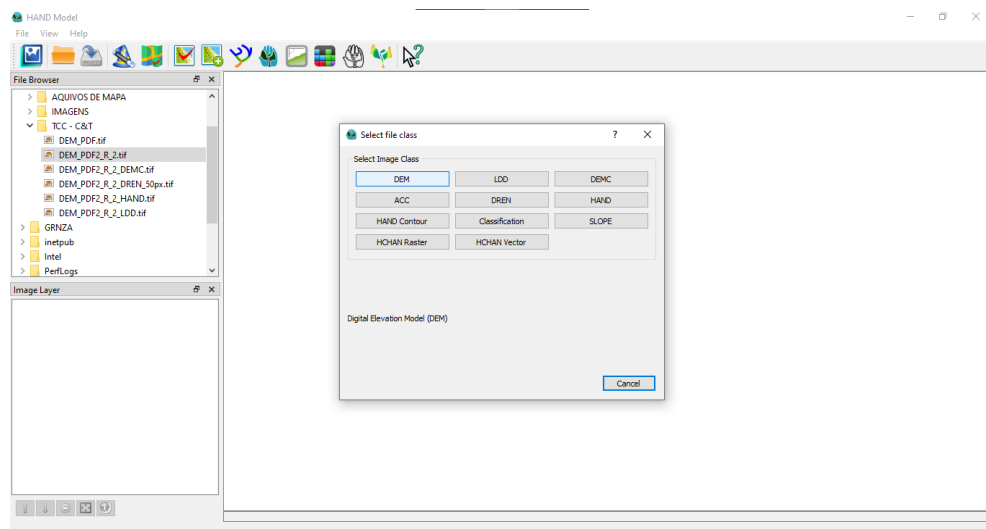


Fonte: Autoria Própria (2025).

4.4.2 Identificação e visualização do arquivo DEM

Nesse passo é importante especificar a natureza do arquivo selecionado. É crucial que o programa reconheça o dado importado como um Modelo Digital de Elevação (MDE).

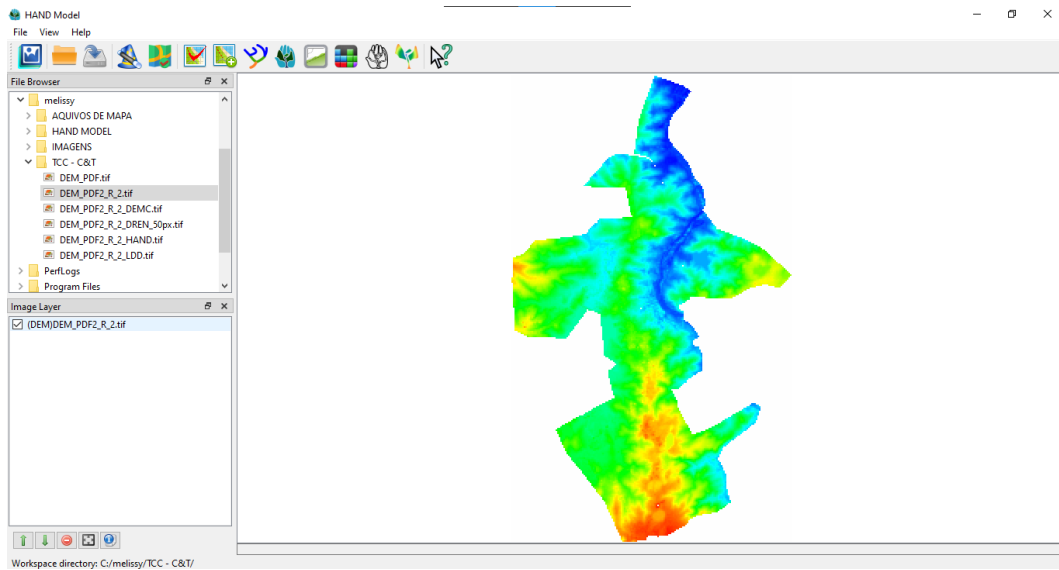
Figura 11 - Identificação do tipo de arquivo selecionado



Fonte: Autoria Própria (2025).

Após a correta especificação do arquivo como Modelo Digital de Elevação (MDE), conforme detalhado na Figura 11, o raster é carregado e visualizado no software. O mapa 03 exibe o DEM da área de estudo aberto na interface do programa.

Mapa 3 - Arquivo na tela inicial do programa



Fonte: Autoria Própria (2025).

4.4.3 Procedimento para gerar o HAND Model

A figura abaixo mostra a barra de ferramentas do software, onde estão concentrados os ícones e comandos necessários para executar as operações de correção.

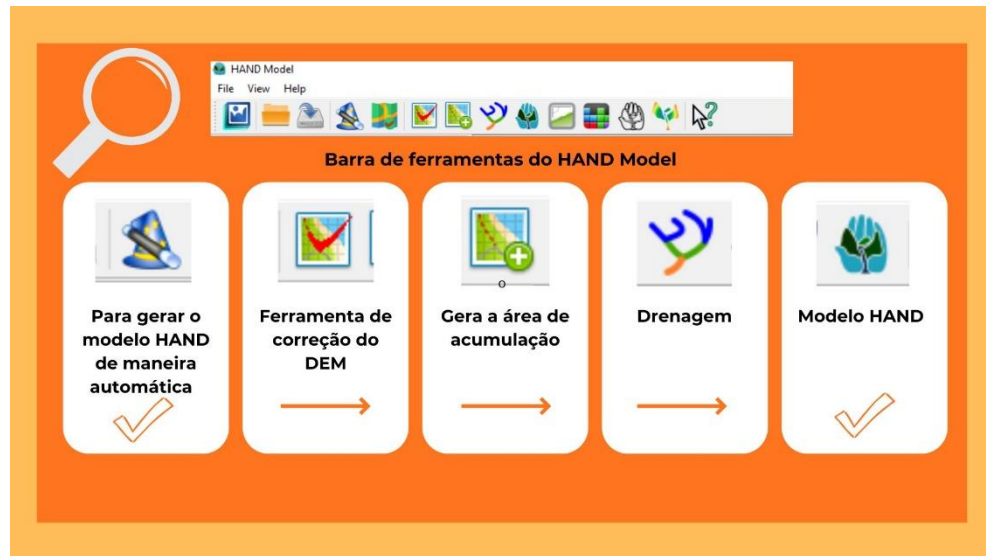
Figura 12 - Barra de ferramentas



Fonte: HAND MODEL (2025)

O programa HAND Model oferece ao usuário duas abordagens para a obtenção do produto final que são ilustradas na figura 12 e detalhadas abaixo.

Figura 13 - Métodos para obtenção do modelo final



Fonte: Autoria Própria (2025).

Processamento Direto: Utilização de um comando único, conforme Figura 13, que automatiza todas as etapas do fluxo de trabalho, como: correção, acumulação e cálculo do HAND.

A outra maneira para a obtenção do nosso produto é o processamento sequencial: Execução das ferramentas de forma separada (Correção do DEM, Geração da Área de Acumulação, Drenagem e Modelo HAND), permitindo maior controle e inspeção dos produtos intermediários.

Para fins de rigor metodológico, esta pesquisa adotou o Processamento Sequencial. Dessa forma, será possível detalhar e ilustrar cada fase que foi utilizada no mapa de suscetibilidade.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados obtidos no HAND Model

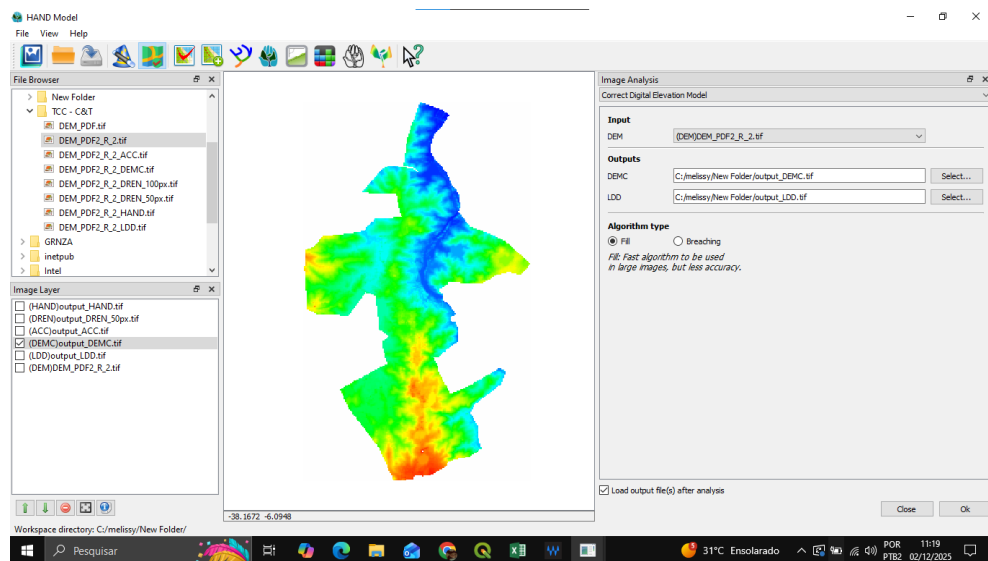
Esta seção detalha os produtos intermediários obtidos durante a execução do Modelo HAND, conforme o fluxo sequencial descrito na Metodologia. A apresentação desses rasters é essencial para demonstrar a correção topológica e a hidrologia superficial simulada, que serviram como base para a indicação final do índice de suscetibilidade.

5.1.1 Modelo Digital de Elevação Corrigido (DEM corrigido)

O primeiro e fundamental produto gerado na aplicação do Modelo HAND foi o Modelo Digital de Elevação (MDE) com sua topologia corrigida. A etapa apresentada é de suma importância na modelagem hidrológica. Este procedimento assegura que o fluxo de água simulado seja contínuo em todas as células do raster.

O mapa 04 apresenta o MDE da área de estudo após a correção.

Mapa 4 - Modelo DEM corrigido

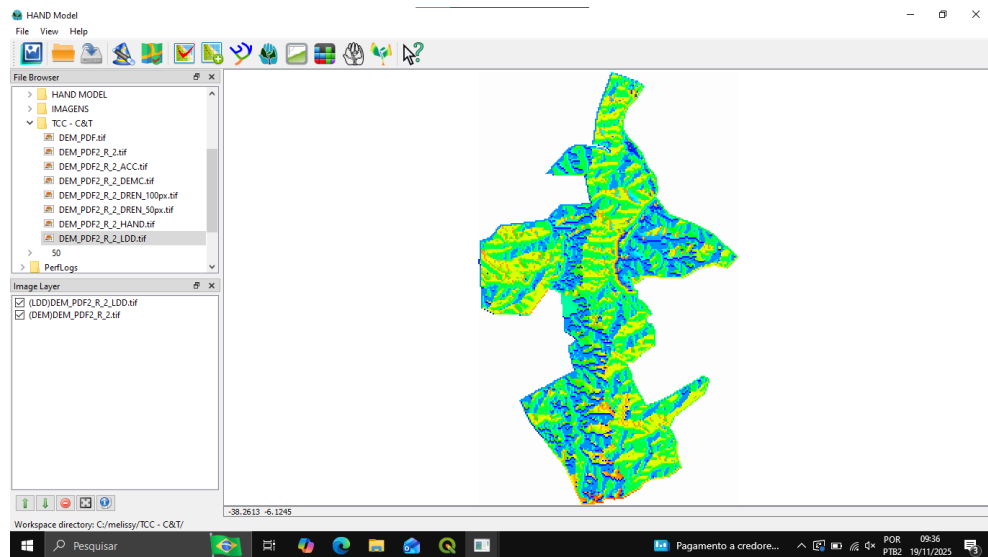


Fonte: Autoria Própria (2025).

5.1.2 Rede de Drenagem, Acumulação de Fluxo e de Drenagem

A partir do MDE corrigido, é possível calcular para cada célula a direção do fluxo, indicando o caminho provável que a água seguiria, sendo o escoamento sempre direcionado para a célula vizinha que apresenta a menor altitude.

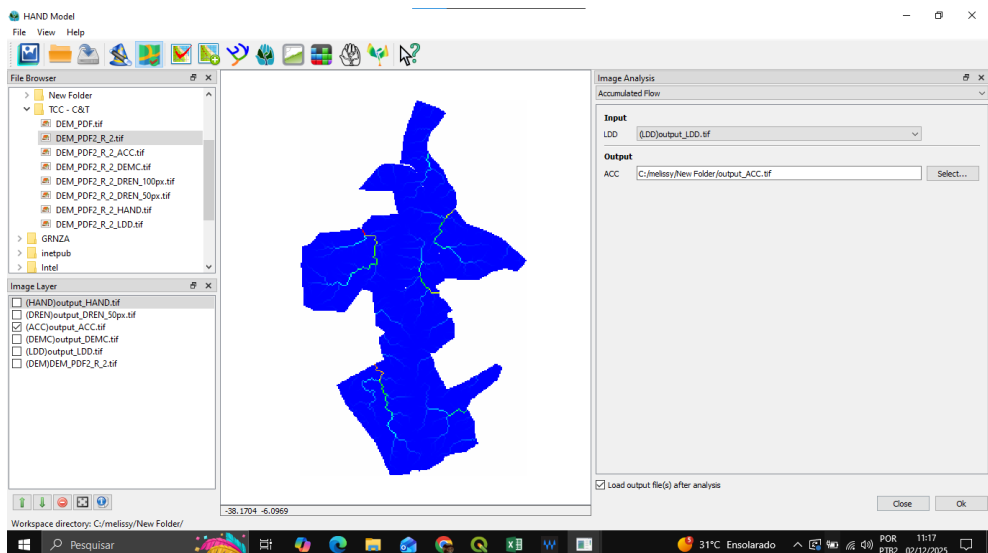
Mapa 5 - Mapa de Direcionamento de Fluxo



Fonte: Autoria Própria (2025).

O mapa 06 abaixo ilustra a distribuição espacial do raster de acumulação de fluxo. As feições lineares de maior intensidade (tonalidade azul escuro) demarcam os canais de drenagem principal, onde o escoamento superficial converge e se concentra.

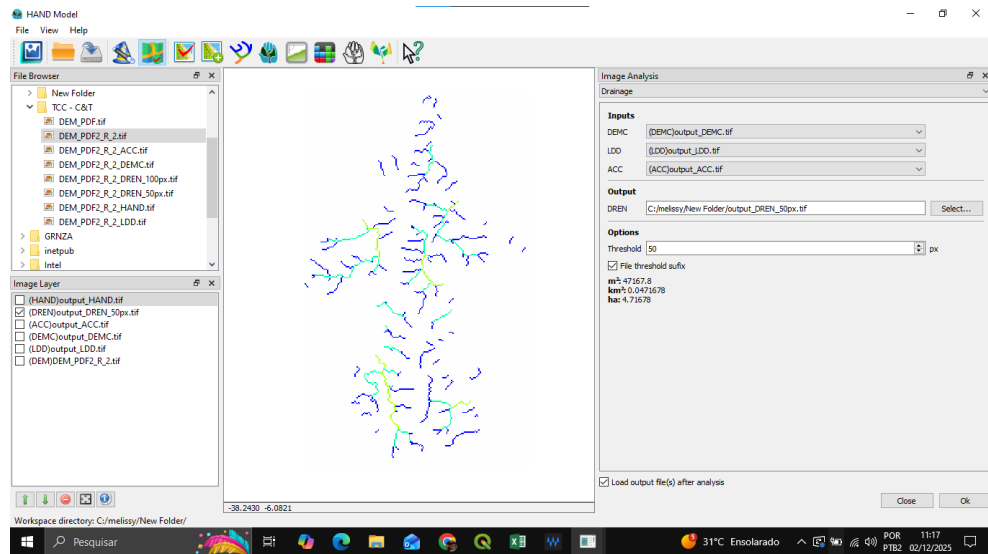
Mapa 6 - Mapa de Acumulação de fluxo



Fonte: Autoria Própria (2025).

A Rede de Drenagem é extraída a partir de um limiar de acumulação, evidenciando o traçado fluvial dentro do perímetro urbano de Pau dos Ferros/RN.

Mapa 7 - Mapa de rede de Drenagem

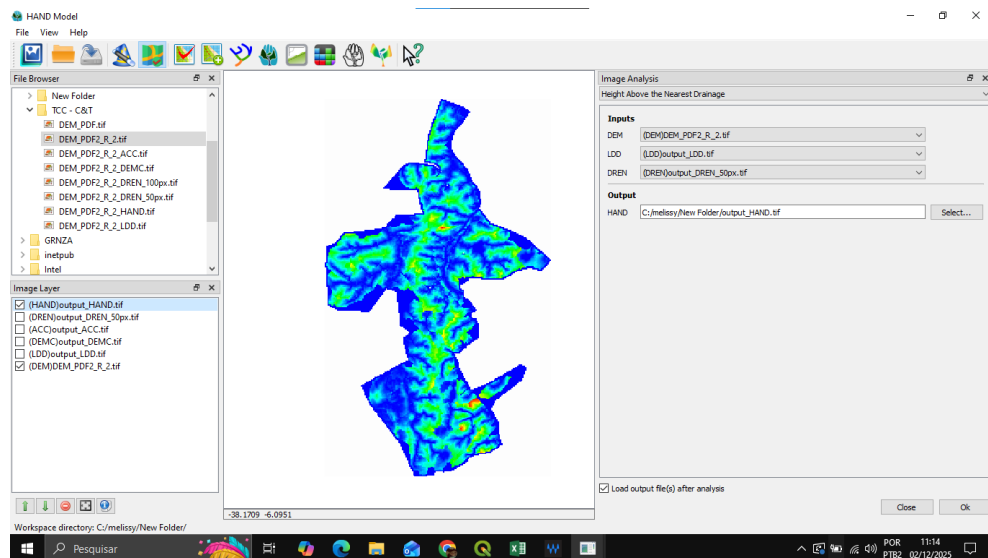


Fonte: Autoria Própria (2025).

5.2 Raster HAND

Para a geração do Raster do modelo HAND em sua forma contínua, foram utilizados o MDE (Modelo Digital de Elevação) corrigido e a rede de drenagem (Mapa 07). Esses elementos são obtidos por meio da aplicação do fluxo sequencial, conforme detalhado na Figura 10.

Mapa 8 - Raster HAND



Fonte: Autoria Própria (2025).

5.3 Reclassificação e geração do mapa de Suscetibilidade

Após a finalização da modelagem hidrológica, o arquivo Raster resultante foi importado para o software QGIS (Sistema de Informação Geográfica) em sua versão 3.40.10 para a etapa de reclassificação. Este processo é de suma importância por converter a elevação contínua em categorias discretas de suscetibilidade.

Os limites dessa reclassificação foram definidos com base em critérios estabelecidos de acordo com o referencial GeoOne (2024), permitindo a separação das áreas em cinco classes: Muito Alto (0m a 1m), Alto (1m a 5m), Médio (5m a 10m), Baixa (10m a 25m) e Muito Baixa (25m a 100m). A correspondência entre os intervalos de altura (em metros) e as classes de risco está detalhada na figura 14 abaixo. O produto final deste procedimento é o Mapa 09, que oferece uma delimitação clara e visual das áreas de riscos em Pau dos Ferros/RN.

Figura 14 - Classificação das áreas



Fonte: Autoria Própria (2025).

Mapa 9 - Mapa de Suscetibilidade



Fonte: Autoria Própria (2025).

5.4 Análise Quantitativa da Suscetibilidade

Para permitir a análise quantitativa das zonas de vulnerabilidade por categorias, foi necessário converter o arquivo raster do modelo HAND para o formato vetorial. Os resultados, apresentados no quadro 01, mostram uma forte concentração de zonas nas classes de risco mais elevadas.

Quadro 1 - Distribuição espacial das classes de risco

CLASSIFICAÇÃO	ÁREA KM ²	PROPORÇÃO DA ÁREA MAPEADA %
MUITO ALTO	7,17	38,6%
ALTO	11,37	61,3%
MÉDIA	0,015	< 0,1%
BAIXA	0,0055	< 0,1%
MUITO BAIXA	0	0%

Fonte: Autoria Própria (2025).

O quadro 01 indica que a categoria de risco Muito Elevado (0m a 1m) abrange 7,17 km², enquanto a categoria Elevado (1m a 5m) cobre 11,37 km² do território mapeado. O somatório dessas duas classes críticas totaliza 18,54 km², demonstrando que a maior parte da área urbana analisada está situada em uma zona de alto risco. Este resultado confirma que o processo de urbanização em Pau dos Ferros/RN ocorreu predominantemente, em áreas com limitações topográficas. Isso sugere que a ocupação do solo incidiu, sobretudo, sobre a planície de inundação do Rio Apodi-Mossoró e seus afluentes.

Em contraste, as classes Média (5m a 10 m) e Baixa (10m a 25m) representam extensões significativamente menores, correspondendo a apenas 0,015 km² e 0,0055 km², respectivamente. Por fim, a categoria de menor risco, as zonas Muito Baixas (acima de 25 m), não apresenta ocupação significativa na área de estudo. Em suma, as zonas de Muito Alto e Alto risco cobrem a quase totalidade do território analisado, enquanto as zonas consideradas seguras são praticamente inexistentes.

5.5 Análise de distribuição de suscetibilidade por bairro

Ainda que o Mapa 09 mostre a distribuição espacial contínua da suscetibilidade, a aplicação prática para a gestão urbana requer a identificação por setor (análise por bairro). Assim, o modelo HAND reclassificado possibilitou o cruzamento dos dados de suscetibilidade com os limites oficiais dos bairros do município de Pau dos Ferros/RN.

O quadro 02 apresenta a classificação de suscetibilidade dos bairros do perímetro urbano, de acordo com os resultados do modelo HAND (Mapa 09) e a categorização utilizada (figura 14).

Quadro 2 - Classificação de suscetibilidade por bairro

BAIRROS	CLASSIFICAÇÃO	BAIRROS	CLASSIFICAÇÃO
Alto do Açude	Muito Alta e Alta	Manoel Domingos	Alta e Muito Alta
Aluizio Diógenes	Muito Alta e Alta	Nações Unidas	Alta e Muito Alta
Arizona	Muito Alta e Alta	Nova Pau dos Ferros	Muito Alta e Alta
Bela Vista	Alta	Paraíso	Alta e Muito Alta
Carvão	Alta e Muito Alta	Princesinha	Alta
Centro	Muito Alta e Alta	Riacho do Meio	Muito Alta e Alta
Chico Cajá	Muito Alta e Alta	São Benedito	Alta e Muito Alta
DNOCS	Muito Alta e Alta	São Geraldo	Alta e Muito Alta
Domingos Gameleira	Muito Alta e Alta	São Judas Tadeu	Alta e Média
Francisco Diógenes	Alta e Muito Alta	São Vicente de Paulo	Muito Alta
Frei Damião	Alta e Muito Alta	Saturnino Almeida	Alta e Muito Alta
João Catingueira	Muito Alta e Alta	Zé Leonel	Muito Alta e Alta
João XXIII	Muito Alta e Alta	Zeca Pedro	Muito Alta e Alta
Manoel Deodato	Muito Alta e Alta	Matias Severinno do Rêgo	Muito Alta e Alta

Fonte: Autoria Própria (2025).

5.6 Análise Comparativa: Suscetibilidade HAND e Risco Histórico

O modelo HAND forneceu resultados que estabelecem uma conexão direta com o trabalho de Vilaça e Costa(2022), o qual descreve as zonas inundáveis da cidade. O estudo indica que a falta de medidas públicas e a insuficiência do sistema de drenagem urbana são as principais causas das inundações. O presente estudo, contudo, utilizou o software HAND para quantificar a vulnerabilidade física que o planejamento urbano não havia mapeado.

O Centro da cidade configura-se como o principal ponto de convergência entre as duas análises. O Centro foi classificado nas categorias de Vulnerabilidade Muito Alta e Vulnerabilidade Alta (0m a 5m).

Essa classificação confirma que o polo econômico da cidade está situado em uma baixa cota topográfica. O artigo de Vilaça e Costa (2022) já mencionava que as inundações resultam da falta de um sistema de drenagem eficiente e da ocupação de áreas críticas. O HAND, portanto, corroborou a ocorrência dessa ocupação inadequada, notadamente em um vale sujeito a inundações fluviais.

Figura 15 - Alagamento no centro da cidade em 2019



Fonte: Portal Grande Ponto (2019)

5.6.1 Estudo de Caso Secundário: O Risco de Cheias no Bairro Paraíso

A análise de suscetibilidade utilizando o modelo HAND permitiu identificar que o bairro Paraíso está classificado predominantemente nas faixas de Muito Alta e Alta Suscetibilidade. Enquanto o Centro de Pau dos Ferros sofre com alagamentos pluviais, agravados pela impermeabilização do solo, o bairro Paraíso apresenta um risco relacionado à dinâmica fluvial, dependendo do derramamento de corpos d'água adjacentes. Essa vulnerabilidade é confirmada pela ocorrência histórica de cheias, como a registrada em abril de 2008 (Figura 16), quando a sangria do Açude 25 de Março provocou inundações no bairro.

Figura 16 - Bairro Paraíso em 2008



Fonte: Tribuna do Norte (2008)

5.6.2 Destaques de risco: Bairro Riacho do Meio e São Vicente de Paulo

Dentre os bairros analisados, também podemos destacar o Riacho do Meio, localizado próximo ao açude da 25, e que apresenta alta susceptibilidade a alagamentos devido ao crescimento urbano e à ocupação inapropriada; e o São Vicente de Paulo, cuja ocupação se encontra em planície de inundação imediata. Ambos são de classificação crítica, pois são predominantemente ocupados pelas classes de Muito Alta e Alta Suscetibilidade. Isso demonstra que esses bairros são os que mais contribuem para o total de 18,54 km² em risco máximo mapeado no presente estudo.

5.6.3 Validação negativa do Bairro Princesinha do Oeste

Para validar completamente o modelo HAND, é essencial apresentar resultados não apenas para áreas de alto risco, mas também para áreas geograficamente seguras. A área de Princesinha do Oeste é a mais segura em termos de altitude entre as áreas analisadas e é classificada principalmente como alta. O mapeamento predominantemente laranja indica que esta área está localizada a uma altitude mais elevada, que fica mais distante da influência direta do rio Apodi-Mossoró e seus afluentes. A classificação desse local é reforçada pelo fato de não haver registros históricos de inundações graves nesta área. Ao contrário das áreas de Centro e Paraíso, a área de Princesinha do Oeste não consta em reportagens locais de desastres causados por inundações, o que comprova que a sua altitude a torna mais difícil a ocorrer inundações. A análise de Princesinha do Oeste é extremamente importante para o planejamento urbano, pois faz sugestões para o crescimento futuro da cidade que deve ser direcionado para áreas mais elevadas e seguras como esta.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido atingiu o seu objetivo principal ao identificar e mapear a suscetibilidade hidrológica do perímetro urbano de Pau dos Ferros/RN, utilizando o modelo HAND, que por sua vez, pode-se concluir que esse software é uma ferramenta eficaz e acessível que fornece o diagnóstico necessário para o desenvolvimento de políticas públicas de mitigação de riscos em Pau dos Ferros/RN.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que a cidade de Pau dos Ferros tem uma área suscetível significativa e apresenta uma concentração crítica de risco, com 18,54 km² (praticamente toda a área urbana mapeada) classificados nas faixas de suscetibilidade muito alta e alta (0 m a 5 m). As zonas de risco médio e baixo são estatisticamente insignificantes.

A eficácia do modelo HAND na identificação de áreas vulneráveis em Pau dos Ferros/RN corrobora com estudos recentes aplicados em outras regiões brasileiras. A convergência de resultados com as análises de Ferreira *et al.* (2024), em Paragominas-PA, e de Pinheiro (2024), em Ilhéus-BA, reafirma que a normalização topográfica é um indicador robusto para o planejamento urbano.

A classificação HAND foi validada também, pelo histórico de inundações, coincidindo o mapeamento das classes de risco máximo com as áreas historicamente afetadas (Figuras 06 e 07). Os dados HAND demonstram que a urbanização da cidade avançou de forma desordenada sobre as planícies aluviais primárias, o que evidencia a ausência de políticas públicas que respeitem as restrições geomorfológicas, como também apontam Vilaça e Costa (2022).

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério das Cidades. **Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais**. Brasília: MCidades, 2012.
- COSTA, F. R. da. **Inundações urbanas no semiárido nordestino: o caso da cidade de Pau dos Ferros - RN**. 2010. 87 f. **Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Cultura e Desenvolvimento)** - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Estados: Pau dos Ferros - RN. 2021.
- FERREIRA, A. S. **Uso de Geoprocessamento e Geotecnologias no Mapeamento de Áreas de Vulnerabilidade a Inundação no Perímetro Urbano do Município de Humaitá, Sudoeste da Amazônia**, 2019.
- FERREIRA, H. de S. et al. Aplicação do método HAND Model para identificação de áreas suscetíveis a alagamentos e inundações na sede municipal de Paragominas-PA. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 12, n. 1, p. e502, 2024.
- GEOONE. **HAND Model: entenda como ele pode ajudar no mapeamento de áreas de inundação**. São Paulo. 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE (IDEMA). **Perfil municipal de Pau dos Ferros**. Natal, [s.d.].
- LAURIANO, André Wilhiam. **Estudo de ruptura da Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. 2009. 193 f. **Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)** – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- NORTE, T. do. **Cheias em Pau dos Ferros**.
- PINHEIRO, J. G. de M. Aplicação do modelo HAND para modelagem de suscetibilidade à inundação nos bairros de Ilhéus, sul da Bahia (Brasil). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 5, n. 1, p. 002-012, 2024.
- PREFEITURA DE PAU DOS FERROS/RN. **O município**. Disponível em: <https://pauferros.rn.gov.br/omunicipio.php>.S0103-40142008000200007.
- SATHLER, D.; MONTE-MÓR, R. L.; CARVALHO, J. A. M.. **As redes para além dos rios: urbanização e desequilíbrios na Amazônia brasileira**. In: Revista Nova Economia. Belo Horizonte, vol.19, nº.1, 2009.
- SILVA, E. F.; RÊGO, T. F. **Caracterização das áreas de alagamentos na cidade de Pau dos Ferros - RN**. 2022.
- SILVA, José Fernandes; SOUZA, Maria Aparecida. Aplicação do método HAND Model para identificação de áreas suscetíveis a inundações: estudo de caso em bacia hidrográfica urbana. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 10, n. 2, p. 45-60, 2023.

TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas**. SciELO, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/>

VILAÇA, I. L. V. V.; COSTA, F. R. **Caracterização Das Áreas De Alagamentos Na Cidade De Pau Dos Ferros – RN**. Sociedade e Território, [S. l.], v. 34, n. 2, p. 83–101, 2022.