

MODELAGEM DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO DAS CIDADES MARANHENSES DE CAXIAS, BACABAL, COLINAS E PEDREIRAS UTILIZANDO HEC-RAS EM MODELO HIDRODINÂMICO 2D



Uema
UNIVERSIDADE ESTADUAL
DO MARANHÃO



**Editora
Uema**



Modelagem das Manchas de Inundação das Cidades Maranhenses de Caxias, Bacabal, Colinas e Pedreiras Utilizando HEC-RAS em Modelo Hidrodinâmico 2D

GOVERNO DO ESTADO DO MARANHÃO

CARLOS ORLEANS BRANDÃO JUNIOR
GOVERNADOR

FELIPE COSTA CAMARÃO
VICE-GOVERNADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA

WALTER CANALES SANT'ANA
REITOR

PAULO HENRIQUE ARAGÃO CATUNDA
VICE-REITOR

ILKA MÁRCIA RIBEIRO DE SOUZA SERRA
PRÓ-REITORA DE EXTENSÃO E ASSUNTOS ESTUDANTIS

MARCELO CHECHE GALVES
PRÓ-REITOR DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

THIAGO CARDOSO FERREIRA
PRÓ-REITOR DE PLANEJAMENTO E ADMINISTRAÇÃO

JUCIVAN RIBEIRO LOPES
COORDENADOR DO NÚCLEO GEOAMBIENTAL

KARINA SUZANA FEITOSA PINHEIRO
CHEFE DO LABORATÓRIO DE RECURSOS HÍDRICOS

© copyright 2025 by UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte.

Todos os direitos desta edição reservados à EDITORA UEMA.

EDITOR RESPONSÁVEL

Jeanne Ferreira de Sousa da Silva

CONSELHO EDITORIAL

Alan Kardec Gomes Pachêco Filho

Ana Lucia Abreu Silva

Ana Lúcia Cunha Duarte

Cynthia Carvalho Martins

Eduardo Aurélio Barros Aguiar

Emanoel Cesar Pires de Assis

Denise Maia Pereira

Fabíola Hesketh de Oliveira

Helciane de Fátima Abreu Araújo

Helidacy Maria Muniz Corrêa

Jackson Ronie Sá da Silva

José Roberto Pereira de Sousa

José Sampaio de Mattos Jr

Luiz Carlos Araújo dos Santos

Marcos Aurélio Saquet

Maria Medianeira de Souza

Maria Claudene Barros

Rosa Elizabeth Acevedo Marin

Wilma Peres Costa

Modelagem das Manchas de Inundação das Cidades Maranhenses de Caxias, Bacabal, Colinas e Pedreiras Utilizando HEC-RAS em Modelo Hidrodinâmico 2D

AUTORES

Daniel de Lima Nascimento Sírío
Karina Suzana Feitosa Pinheiro
Leila Maria Feitosa Pinheiro
Letícia Pontes Cavalcante Segtowich

EDIÇÃO E DESIGN GRÁFICO:

Letícia Pontes Cavalcante Segtowich

Modelagem das manchas de inundação das cidades maranhenses de Caxias, Bacabal, Colinas e Pedreiras utilizando HEC - RAS em modelo hidrodinâmico 2D[recurso eletrônico]. / Daniel de Lima Nascimento Sírío, Karina Suzana Feitosa Pinheiro, Leila Maria Feitosa Pinheiro, Letícia Pontes Cavalcante Segtowich. - São Luís, MA: EDUEMA, 2025.

56p.il.color.

ISBN: 978-85-8227-684-6

1.Modelagem. 2. Inundação. 3. Hidrologia. I. Sírío, Daniel de Lima Nascimento [et.al]. II. UEMA. III. NUGEO. IV. Labhidro. V.Título.

CDU: 556.166(812.1)

Elaborado por Luciana de Araújo – CRB 13/445

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA

**PROJETO DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DAS CONDIÇÕES
AMBIENTAIS DO ESTADO DO MARANHÃO: Mudanças da Cobertura
Florestal, Dinâmica do Uso da Terra, Panorama dos Recursos Hídricos,
Tempo, Clima e Tendências às Mudanças Climáticas**

**Modelagem das Manchas de Inundação das Cidades Maranhenses de
Caxias, Bacabal, Colinas e Pedreiras Utilizando HEC-RAS em Modelo
Hidrodinâmico 2D**

São Luís - MA
2025

APRESENTAÇÃO

As inundações urbanas representam um dos maiores desafios enfrentados pelas cidades brasileiras, especialmente aquelas situadas em regiões com forte influência de rios e chuvas intensas. No estado do Maranhão, municípios como Caxias, Bacabal, Colinas e Pedreiras têm vivenciado, ao longo dos anos, episódios recorrentes de alagamentos que afetam diretamente a população, a infraestrutura e o desenvolvimento local.

Este estudo propõe a aplicação do modelo hidrodinâmico bidimensional HEC-RAS 2D como ferramenta de análise e previsão das manchas de inundação nessas quatro cidades maranhenses. A escolha do HEC-RAS se justifica por sua robustez, acessibilidade e capacidade de simular com precisão o comportamento das águas em terrenos complexos, permitindo a geração de mapas de inundação que auxiliam na tomada de decisão por parte de gestores públicos, engenheiros e planejadores urbanos.

Ao longo deste trabalho, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados, os dados utilizados, os cenários simulados e os resultados obtidos, com o objetivo de contribuir para o aprimoramento da gestão de riscos hidrológicos no Maranhão. Mais do que uma análise técnica, esta modelagem busca oferecer subsídios concretos para a construção de cidades mais resilientes, seguras e preparadas para os desafios climáticos do presente e do futuro.



Karina Suzana Feitosa Pinheiro
Chefe do Laboratório de Recursos Hídricos
LabHidro/Nugeo/Uema

Sumário

INTRODUÇÃO	5
O HidroWeb, o SNIRH e os Sistemas de Alerta Hidrológico brasileiros.....	7
Perspectiva de Aplicação do HEC-RAS 6.6 no Contexto das Políticas Públicas Brasileiras de Gestão Hídrica.....	8
CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA	9
Obtenção de Dados e Produção das Manchas de Inundação.....	10
Aplicações no Brasil e no Mundo	13
Análise Comparativa e Crítica dos MDEs	15
MATERIAIS E MÉTODOS	15
Input de Dados Hidrometeorológicos e Vetorização de feições	17
Tratamento das Imagens Matriciais Alos-Palsar	19
Configuração do HEC-RAS 2D	19
Malha de células de Processamento e intervalo temporal	21
RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
Mancha de Inundação em Caxias	22
Mancha de Inundação em Pedreiras/Trizidela do Vale	27
Mancha de Inundação em Colinas	32
Mancha de Inundação em Bacabal.....	38
CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS	45
APÊNDICE I	47
APÊNDICE II	50

PROJETO DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO ESTADO DO MARANHÃO: Mudanças da Cobertura Florestal, Dinâmica do Uso da Terra, Panorama dos Recursos Hídricos, Tempo, Clima e Tendências às Mudanças climáticas.

Modelagem das Manchas de Inundação das Cidades Maranhenses de Caxias, Bacabal, Colinas e Pedreiras Utilizando HEC-RAS em Modelo Hidrodinâmico 2D

5

1. INTRODUÇÃO

A partir do século XX, o processo de urbanização e o surgimento dos grandes centros urbanos ocasionou uma considerável mudança no uso e ocupação do solo que passou a impermeabilizar extensas áreas, o que resultou num aumento significativo do escoamento superficial. Somado ao aumento do escoamento e à maior velocidade dada às águas nessas cidades vem, historicamente nas cidades brasileiras, a ocupação das várzeas maiores dos rios, ou seja, os locais de alagamento natural dos rios nas grandes cheias. Isso decorre da dinâmica imobiliária das cidades, menores preços e/ou invasões que produzem um maior acesso da população mais carente a esses locais. Fato é que essas áreas inundações ribeirinhas, decorrentes das cheias naturais dos rios, quando associada as áreas urbanas e a ocupação indevida de suas várzeas de inundação, causa grandes danos, principalmente à população de baixa renda, dado que essas áreas são ocupadas no Brasil, em sua maioria esmagadora, por essa parcela da população.

Entre os problemas decorrentes do crescimento desse escoamento nas cidades, podemos citar as inundações, alterações climáticas locais, interferência no ciclo hidrológico e no balanço hídrico e consequentes problemas de saúde pública, histórias trágicas dos cidadãos e muitos danos materiais, inclusive alguns imensuráveis.

Por outro lado, as cheias dos rios são fenômenos naturais associados a períodos de grandes precipitações que abastecem os solos com água, o que eleva seus aquíferos e contribui fortemente com o escoamento superficial e subterrâneo e fazem com que os rios deixem suas calhas principais e ocupem as várzeas maiores, locais naturais de inundação de períodos de cheia, mas que são ocupadas pelas cidades por se apresentarem secas durante grandes períodos.

A urbanização descontrolada das cidades brasileiras tem provocado, dentre outros impactos, o agravamento das enchentes naturais e a ampliação de sua frequência, além de criar

novos pontos de alagamento. Estes impactos provêm da crescente impermeabilização do solo com aumento do volume pluvial escoado e redução de amortecimento, causando aumentos nas vazões máximas, que podem representar seis vezes a vazão de pré-urbanização (Tucci e Genz, 1995).

Se por um lado a urbanização concentra os escoamentos podendo agravar as ocorrências das enchentes ribeirinhas e de inundação em áreas urbanas, por outro lado, surgem novas tecnologias, modelos e métodos capazes de auxiliar desde sua predição de amplitude, até as ações de contingência e emergência de maneira planejada na ocorrência desses eventos, podendo-se lançar mão dessas ferramentas para prever cotas, vazões, Períodos de Recorrência (TR) e fomentar as possibilidades de prever eventos e ações de emergência para salvar vidas e diminuir os prejuízos materiais e na saúde pública.

Por sorte e necessidade, as tecnologias disponíveis advindas graças ao avanço da ciência no campo multidisciplinar da atualidade, associadas ao acesso à informação, ao aumento da capacidade de processamento, à melhoria de obtenção de dados ambientais em termos de velocidade, quantidade e qualidade, à longevidade e continuidade do monitoramento, aos pacotes e avanços da programação e ferramentas de última geração que vão desde a ciência do solo até conhecimento do espaço sideral e que auxiliam no controle e monitoramento ambiental, que também cresceram à medida que a urbanização aumentou nas últimas décadas.

Nesse contexto, entram em cena as medidas estruturais e não estruturais para tentar, de alguma maneira, fomentar as ações de monitoramento, controle, previsão, planejamento e gestão das ações de contingência das cheias ribeirinhas nas cidades (Canholi, 2015), que são fundamentais para o conjunto de ações dos entes interessados, tais como as salas de situação e emergências ambientais e as defesas civil estadual e municipal. Dentre essas medidas surgem a necessidade de criação de sistemas de alerta e risco em todo país que atuam em três grandes frentes que são: o monitoramento hidrológico, ações de infraestrutura propriamente ditas e o planejamento estratégico de curto, médio e longo prazo.

1.1 O HidroWeb, o SNIRH e os Sistemas de Alerta Hidrológico Brasileiros

A Lei nº 9.433/1997, conhecida como a Lei das Águas, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), do qual o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) é um dos instrumentos essenciais. O SNIRH tem como objetivo reunir, organizar e divulgar dados sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos do país, sendo crucial para a tomada de decisão, o planejamento e a gestão integrada da água (BRASIL, 1997).

No contexto do SNIRH, foi desenvolvido o HidroWeb, um sistema administrado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que disponibiliza publicamente dados hidrometeorológicos coletados por meio da Rede Hidrometeorológica Nacional. Essa base de dados é composta por milhares de estações fluviométricas, pluviométricas, meteorológicas, de monitoramento da qualidade da água, entre outras, servindo de suporte técnico-científico para diversas ações de gestão hídrica e ambiental (ANA, 2024).

Com base nos dados históricos e em tempo real do HidroWeb, a ANA e o Serviço Geológico Brasileiro – SGB, desenvolveram os Sistemas de Alerta Hidrológico (SAH). Esses sistemas visam monitorar, prever e alertar eventos extremos, como inundações, por meio da integração entre dados de campo, modelos hidrológicos e sistemas de comunicação com a população e a defesa civil. Os SAH são operados em bacias hidrográficas críticas, como nas bacias dos rios São Francisco, Itapecuru, Doce, Tocantins, entre outros, permitindo uma resposta antecipada a eventos hidrológicos extremos (ANA, 2022).

Portanto, o HidroWeb concretiza o princípio da informação como instrumento de gestão previsto na Lei nº 9.433/1997, e os SAHs representam a aplicação prática desses dados para fins de prevenção de desastres naturais, especialmente as inundações, que têm se tornado mais frequentes e intensas com as mudanças climáticas. Segundo Souza *et al.* (2021), cinco cidades do Maranhão são monitoradas pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB, que opera os SAHs, um deles já implementado na Bacia Hidrográfica do Rio Itapecuru e denominada como SAH-Itapecuru, atua em cinco cidades maranhenses, que são: Cantanhede, Caxias, Codó, Coroatá, Itapecuru Mirim. Outras bacias hidrográficas e sistemas hidrográficos para a implementação dos sistemas de alertas no Estado do Maranhão estão em discussão e seus planos já devem ser apresentados nos próximos anos, iniciando-se, ao que tudo indica, pela Bacia Hidrográfica do Rio Mearim.

1.2 Perspectiva de Aplicação do HEC-RAS 6.6 no Contexto das Políticas Públicas Brasileiras de Gestão Hídrica

A Lei nº 9.433/1997 consolidou os pilares da gestão dos recursos hídricos no Brasil, instituindo a descentralização, a participação social, e principalmente, a informação como instrumento de gestão. A partir disso, o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e ferramentas como o HidroWeb, mantido pela ANA e operado pelo SGB, passaram a integrar o aparato técnico do país na coleta, análise e disseminação de dados hidrológicos (BRASIL, 1997; ANA, 2024).

Com base nesses dados, o país desenvolveu Sistemas de Alerta Hidrológico (SAH) para a mitigação de riscos de inundações, combinando observações em tempo real com modelos preditivos. No entanto, há uma demanda crescente por modelos mais robustos e integráveis, especialmente em contextos urbanos e de bacias hidrográficas críticas. Nesse cenário, ferramentas como o HEC-RAS 6.6 têm ganhado destaque.

Desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do U.S. Army Corps of Engineers, o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) é um software gratuito amplamente utilizado para a simulação unidimensional e bidimensional de escoamento de rios, modelagem de cheias, e análise de risco de inundações (USACE, 2023). A versão 6.6, mais recente, permite modelagem 2D mais precisa e eficiente, com suporte a grandes volumes de dados geoespaciais e integração com modelos de terreno de alta resolução.

No Brasil, o uso do HEC-RAS se alinha às diretrizes da Política Nacional de Recursos Hídricos, que estimula o uso de tecnologias acessíveis, compatíveis com a realidade nacional e com base em dados públicos. O modelo pode ser alimentado com dados do HidroWeb, como séries temporais de vazões, níveis d'água e chuvas, e utilizado por defesas civis, universidades, consultorias e órgãos públicos para simulação de cenários de inundação, estudos de impacto e gestão de áreas de risco.

Além disso, o HEC-RAS pode complementar os SAH ao refinar a previsão de impacto das inundações sobre áreas urbanas e rurais, contribuindo para a emissão de alertas mais precisos e a elaboração de planos de contingência locais. Essa integração entre dados nacionais (via SNIRH), infraestrutura tecnológica (HEC-RAS) e planejamento participativo, é um exemplo de como o Brasil pode avançar na governança climática e hídrica, especialmente diante do aumento de eventos extremos associados às mudanças climáticas, associação congruente a diversos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS da ONU.

Nesse sentido, o aplicativo Hec-Ras em conjunto com a família de aplicativos Hec disponibilizados gratuitamente, produzidos pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA,

tem grande relevância na predição e modelagem de sistemas e processos hidrológicos e hidráulicos, para o Hec-Ras, das inundações e enchentes ribeirinhas, que têm grande relevância na atualidade para as pessoas e centros urbanos, bem como para as instituições e agentes interessados nas ações de gestão, pesquisa, prevenção, previsão, controle e emergência associadas às inundações nas cidades.

Por fim, esse trabalho tem por objetivo aplicar uma metodologia simples para modelar a macha de inundação em quatro centros urbanos no Estado do Maranhão, ao atender as maiores cotas registradas nas estações da rede de monitoramento hidrometeorológico das bacias hidrográficas do Rio Itapecuru (Colinas e Caxias) e do Mearim (Pedreiras/Trizidela do vale e Bacabal), ou seja, as manchas de inundação devem obedecer os valores das cotas registradas naquelas datas em que ocorreram as maiores cotas de nível e, conseqüentemente de vazão, em cada uma das cidades.

Para se alcançar o objetivo proposto, o método proposto consistiu em realizar o tratamento de imagens e vetorização de polígonos, identificação e classificação das áreas de diferentes usos do solo, correção de declividades das calhas dos rios, processamento do modelo e, por fim, a comparação entre a cota gerada pelo modelo e a cota registrada na estação correspondente.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

As inundações urbanas, as quais decorrem do escoamento superficial direto (ESD) das precipitações excedentes, constituem um problema recorrente em diversos municípios brasileiros. O conceito higienista de evacuação rápida dos efluentes gerados nas cidades foi o principal precursor desses problemas e predominou no mundo inteiro até o século XX, mas com a expansão territorial sem uma legislação e uma fiscalização que garantissem o disciplinamento adequado do uso e ocupação do solo, os problemas de alagamentos e inundações se intensificaram e se distribuíram ao longo dos centros urbanos (RIGHETTO *et al.*, 2009).

Como forma de diminuir previamente os efeitos gerados pelos excessos escoados, podem ser empregadas algumas técnicas de estruturais de detenção e retenção difusas na bacia hidrográfica, conhecidas como sistema alternativo de drenagem, que podem ser aplicadas em toda uma região, bem como em nível do lote propriamente dito ou loteamentos. Essas tecnologias também são consideradas alternativas por considerarem os impactos da urbanização de forma global, tomando a bacia hidrográfica como referência. Ou seja, a compensação se dá pelo controle da precipitação excedente, com o intuito de evitar sua transferência rápida para as áreas à jusante (BAPTISTA *et al.*, 2011).

As soluções alternativas para lidar com a gestão das águas urbanas começam a ser propostas em meados do ano 2000, buscando promover o retardamento dos escoamentos, aumentando o tempo de concentração e, conseqüentemente, diminuindo o pico de cheias, a fim de se evitar as perturbações causadas pelas inundações. Essas soluções preveem a redução dos volumes de escoamento superficial por meio de sua contenção no local da precipitação utilizando métodos que se baseiam no aumento das áreas de infiltração ou no armazenamento temporário em reservatórios (CANHOLI, 2005).

Segundo Moruzzi *et al.* (2016), essas novas técnicas alternativas em drenagem urbana, também conhecidas como medidas compensatórias de drenagem, mantêm o conceito de neutralizar os efeitos do processo de urbanização sobre os processos hidrológicos utilizando-se técnicas que tratam o escoamento pluvial no local em que é gerado, chamando-o de controle na fonte da drenagem pluvial, no qual, visa à redução por meio dos processos de armazenamento, detenção, retenção e infiltração das águas do escoamento pluvial.

No entanto, é necessária a adoção de soluções de caráter multidisciplinar, em que sejam analisados de forma integrada todos os aspectos voltados às obras de infraestrutura, mas também pelo viés estratégico de planejamento urbano, consideradas medidas não estruturais por Canholi (2005). Nesse sentido, deve-se considerar toda e quaisquer possibilidades de aplicação de tecnologias capazes de simular, prever, monitorar, executar planos de emergência e evacuação, montar planejamentos estratégicos e gerenciais, dentre outros, a fim de se obter benefícios econômicos, estéticos e ecológicos no combate as inundações das cidades (POMPÊO, 2000).

2.1 Obtenção de Dados e Produção das Manchas de Inundação

As imagens ALOS PALSAR, obtidas por radar de abertura sintética (SAR), são especialmente úteis para a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em áreas com densa cobertura vegetal ou nebulosidade persistente, oferecendo uma alternativa importante às imagens ópticas. Quando integradas ao modelo hidráulico HEC-RAS, essas imagens permitem a representação mais precisa da topografia do terreno, fundamental para a simulação do escoamento superficial e a delimitação de manchas de inundação. Embora o ALOS PALSAR ofereça resolução espacial intermediária (12,5 m), sua capacidade de penetrar na vegetação pode melhorar a acurácia em regiões tropicais — como muitas bacias hidrográficas brasileiras — onde os dados SRTM podem apresentar distorções. Assim, a combinação do ALOS

PALSAR com o HEC-RAS potencializa estudos de risco e planejamento urbano voltados à mitigação de desastres relacionados a inundações (Vicente, 2023).

É nesse cerne que o aplicativo HEC-RAS e as imagens Alos-Palsar e os dados de monitoramento do SNIRH, especialmente o Hidroweb entram em foco. O Hec-Ras foi desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC), uma instituição conjunta ao Institute for Water Resources, do US Army Corps of Engineers, o qual está disponível gratuitamente e possibilita a análise dos escoamentos em rios e canais abertos. O aplicativo gratuito permite a simulação de escoamento unidimensional em regime permanente e a propagação unidimensional em regime transitório. Também estão disponíveis diversos complementos do aplicativo, sendo um deles o chamado HEC-GeoRAS, que é uma extensão GIS que fornece uma série de procedimentos e ferramentas para a preparação dos dados georreferenciados para importação para o HEC-RAS e a geração de resultados georreferenciados (Souza *et al.*, 2021).

Foi realizada no Quadro 1, uma comparação entre os dados de elevação atualmente gratuitos e de domínio público que são as imagens SRTM e Alos-Palsar para melhor elucidação das potencialidades e diferenças de cada uma das imagens disponibilizadas na plataforma ASF e a plataforma Topodata do Instituto de Pesquisas Espaciais brasileiro (INPE), disponibilizados pelo Banco de dados Geomorfométricos do Brasil.

Quadro 1 - Potencialidades e diferenças dos sensores ALOS e SRTM

Característica	SRTM	ALOS PALSAR
Plataforma/Satélite	Endeavour	ALOS
Sensor	Radar SAR em banda C	Radar SAR em banda L
Ano de aquisição	Fevereiro de 2000	2006 a 2011 (ALOS-1)
Resolução espacial	90 m (global) / 30 m	~12,5 m
Resolução espectral	Banda única (Radar Banda C)	Radar Banda L (sensível à vegetação e solo)
Resolução temporal	Missão única (2000)	46 dias (ALOS-1), 14 dias (ALOS-2)
Cobertura	Global entre 60°N e 56°S	Global
Objetivo principal	Mapeamento topográfico global	Monitoramento ambiental
Altura medida	Dossel ou solo (mista)	Penetração em vegetação, solo
Fonte	NASA, CGIAR, USGS (gratuito)	JAXA (gratuito)

Fonte: Autores (2025).

O aplicativo Hec-Ras 6.6, possui uma ferramenta GIS nativa ao aplicativo, bem como desenvolveu uma capacidade de modelagem hidrodinâmica 2D do módulo de fluxo não estacionário, capaz de realizar modelagens hidrodinâmicas 2D ou combinações de 1D e 2D que permitem uma modelagem extremamente flexível para sistemas hidráulicos complexos, dado que pode lidar com regimes de fluxo subcrítico, supercrítico e misto, bem como pré-processa

as células computacionais com até 8 faces, utilizando-se em cada uma delas, de propriedades hidráulicas associadas as características subjacentes do terreno (Brunner et al., 2015).

Como já mencionado a modelagem de manchas de inundação é uma ferramenta essencial para o planejamento urbano e a mitigação de desastres naturais. No Brasil, a Lei nº 9.433/1997 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, promovendo a gestão integrada e descentralizada dos recursos hídricos, além de criar o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Ferramentas como o HEC-RAS, têm sido amplamente utilizadas para simular escoamentos e delimitar áreas sujeitas a inundações.

Por sua vez, ALOS PALSAR é um sensor de radar de abertura sintética (SAR) em banda L, embarcado no satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), também conhecido como DAICHI, desenvolvido pela Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA) em cooperação com a Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA) e outras instituições internacionais. O satélite ALOS foi lançado em 24 de janeiro de 2006, por meio do foguete H-IIA a partir do Centro Espacial de Tanegashima, no Japão. O objetivo principal do ALOS era fornecer dados de observação terrestre para cartografia topográfica, monitoramento de desastres naturais, planejamento urbano, agricultura e gestão de recursos naturais (JAXA, 2011).

O sensor PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) é uma evolução do sensor JERS-1 SAR (também japonês), operando em única banda espectral L (~1,27 GHz; comprimento de onda de aproximadamente 23,6 cm), o que permite maior penetração em vegetação e solo seco, sendo ideal para estudos ambientais e de floresta. Possui resolução espacial variável conforme o modo de operação: Modo Fine Beam Dual (FBD): até 10 metros; Modo Polarimétrico (PLR): 30 metros; e, ScanSAR: 100 metros, cobrindo maiores áreas e com resolução temporal de cerca de 46 dias, com variações conforme latitude e modo de aquisição (EORC, [s.d.]).

O ALOS operou entre 2006 e 2011, mas o satélite parou de funcionar em abril de 2011 após uma falha elétrica. Apesar disso, os dados coletados durante sua operação foram amplamente utilizados para a criação de produtos como Modelos Digitais de Elevação (MDEs), mapeamento da cobertura da terra, desmatamento e deformações do solo por interferometria. O sucessor do ALOS é o ALOS-2, lançado em 2014, equipado com o PALSAR-2, com maior resolução e desempenho avançado, garantindo a continuidade dos dados de radar em banda L. Entre os produtos gerados, destaca-se o AW3D30 (ALOS World 3D - 30 m), um modelo digital de elevação global com resolução espacial de 30 metros, derivado dos dados ópticos do sensor PRISM do ALOS, frequentemente complementado por dados PALSAR para análise de relevo sob vegetação densa. Além disso, há os produtos PALSAR RTC (Radiometric Terrain

Correction) e interferogramas para análise de deformações e subsidência do terreno (ASF, 2020).

A JAXA estabeleceu colaboração com diversas instituições, incluindo a NASA, a ESA (Agência Espacial Europeia), e centros de pesquisa como o Alaska Satellite Facility (ASF) e o Earth Observation Research Center (EORC). Diversos dados do PALSAR estão disponíveis gratuitamente por meio do Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) e do ASF DAAC (NASA Distributed Active Archive Center) (EORC, [s.d.]; ASF, 2020).

2.2 Aplicações no Brasil e no Mundo

a) Caso da Bacia do Córrego do Ipiranga, São Paulo – SP

Pesquisadores da Universidade Federal do ABC utilizaram os modelos HEC-HMS e HEC-RAS para delimitar manchas de inundação na bacia do Córrego do Ipiranga. Após calibração com 11 eventos de chuva-vazão, as manchas simuladas apresentaram áreas de 1,79 km² (TR 10 anos), 1,98 km² (TR 25 anos) e 2,21 km² (TR 100 anos), atingindo até 3.854 edificações. Os resultados foram coerentes com ocorrências históricas de inundações na região (Falcetta e Corsi, 2017).

b) Lençóis Paulista, SP

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) validou o mapeamento de inundações urbanas utilizando HEC-HMS e HEC-RAS, acoplados a dados topográficos do Instituto Geográfico e Cartográfico de São Paulo e da SRTM. O estudo demonstrou a viabilidade de realizar esse tipo de mapeamento sem dados de campo, especialmente quando se utiliza um modelo digital do terreno de boa qualidade (Szymanski *et al.*, 2022).

c) Bacias Montanhosas no Sul do Brasil

Em bacias montanhosas, pesquisadores aplicaram o HEC-RAS 2D para analisar inundações nos rios Molha Coco e Malacara. Utilizando dados de monitoramento e modelagem, foram gerados mapas de profundidade e velocidade da água para diferentes períodos de retorno, evidenciando a eficácia do modelo em áreas com relevo acidentado (Szymanski, 2020).

d) Comparação de MDEs na Bahia

Um estudo comparou os MDEs do SRTM, ALOS PALSAR e levantamento aerofotogramétrico (resolução de 1 m) na modelagem de ruptura hipotética de barragem em Pindobaçu, BA. O ALOS PALSAR apresentou discrepâncias altimétricas significativas em relação ao modelo de referência, sendo considerado inadequado para a modelagem hidrodinâmica local (Vicente, 2023).

e) Avaliação da Suscetibilidade a Inundações no Vale do Hunza, Paquistão

Este estudo utilizou o modelo hidrodinâmico bidimensional HEC-RAS 6.4.1 para simular o escoamento não permanente no rio Hunza, uma região montanhosa sujeita a inundações. Os dados topográficos foram derivados do Modelo Digital de Elevação (MDE) do ALOS PALSAR com resolução de 12,5 metros. A integração desses dados permitiu uma representação precisa da geometria do rio, essencial para a modelagem hidráulica confiável. Além disso, foram incorporados dados de uso e cobertura da terra para atribuir valores de rugosidade de Manning, refletindo as condições físicas reais do escoamento. A análise de sensibilidade da malha computacional resultou em uma resolução de 5 metros, equilibrando eficiência computacional e precisão do modelo. Essa abordagem integrada aprimorou a avaliação da suscetibilidade a inundações na região (Hanif et al., 2025).

f) Modelagem de Inundações por Rompimento de Lago Glacial no Tibete

Este estudo abordou a modelagem de inundações decorrentes do rompimento de lagos glaciais (GLOF) na região de Galong Co, Tibete. Foram utilizados dados dos sensores ALOS-1 PALSAR-1 e ALOS-2 PALSAR-2, juntamente com imagens ópticas de alta resolução, para monitorar mudanças na área e volume dos lagos. O modelo HEC-RAS foi empregado para simular os processos de inundação, considerando diferentes cenários de profundidade de ruptura da barragem natural. A análise de sensibilidade permitiu avaliar o impacto de diferentes volumes de liberação de água nas áreas a jusante. Essa abordagem integrada forneceu insights valiosos para a avaliação de riscos e planejamento de mitigação de desastres naturais (Zhang et al., 2025).

2.3 Análise Comparativa e Crítica dos MDEs

A integração de modelos hidrológicos e hidráulicos com dados de monitoramento e MDEs é fundamental para a modelagem precisa de manchas de inundação. No entanto, a escolha do MDE e o tratamento adequado as imagens é crucial e devem levar em conta:

- SRTM: Adequado para estudos de larga escala, mas pode não capturar detalhes topográficos essenciais em áreas urbanas densas.
- ALOS PALSAR: Útil em áreas com cobertura de nuvens, mas pode apresentar inconsistências altimétricas em determinadas regiões.
- Drones: Proporcionam alta resolução e precisão, sendo ideais para áreas urbanas e estudos detalhados, embora tenham custo mais elevado.

Além disso, a calibração dos modelos com dados de monitoramento é essencial para garantir a confiabilidade das simulações. A falta de dados de campo pode ser mitigada com o uso de MDEs de alta qualidade e técnicas de sensoriamento remoto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho foram utilizados dados de elevação do satélite ALOS PALSAR em conjunto com as imagens do Google Satélite e os dados de cotas e vazões de cada estação fluviométrica instaladas nas cidades da rede de monitoramento do Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (SNIRH), da Agência Nacional de Águas e Saneamento – ANA.

As linhas de quebra do escoamento (*Breaklines*), as condições limites de escoamento (*Boundary Conditions*) e as áreas de refinamento das células de modelagem do aplicativo Hec-Ras 6.6 foram desenhadas no próprio aplicativo e pós processadas com o auxílio do QGis 3.40.6-Bratislava para remoção dos erros, correção dos polígonos e geração dos produtos apresentados neste trabalho. As imagens raster precisaram de alguns tratamentos especiais que serão detalhados nos itens a seguir e no Anexo I.

As cidades que tiveram manchas de inundação modeladas foram Caxias, Colinas, Pedreiras e Trizidela do Vale (estas duas separadas pelas margens do Rio Mearim), além de Bacabal. Caxias e Colinas localizam-se no alto e médio curso da Bacia Hidrográfica do Rio Itapecuru, enquanto Pedreiras, Trizidela do Vale e Bacabal situam-se no médio curso da Bacia do Rio Mearim. Todas essas localidades enfrentam problemas recorrentes relacionados a cheias e inundações ribeirinhas.

Caxias por sua vez, já possui um modelo de inundação gerado pelo Serviço Geológico Brasileiro – SGB, feito pela Divisão de Hidrologia Aplicada da SGB, que publicou um relatório de 2021, ainda em editoração e não finalizado, das manchas de inundação de Caxias-MA. No trabalho, foram geradas as manchas em HecRas 1D, em que foram realizadas geradas manchas de inundações com base na cota até 8,50 m, bem como no tempo de recorrência associado para 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50 e 100 anos. O objetivo foi obter como resultados, modelos das áreas inundáveis associadas à cota limnimétrica observada na estação fluviométrica Caxias (33550000), entre 5,0 e 8,5 m, com intervalos de 0,5 m. Para tanto, a SGB dispôs de uma Estação Total Nikon Nivo 3C, um medidor acústico doppler M9 e GPS-RTK, com os quais fizeram 39 seções verticais no perímetro urbano de Caxias e esperam retornar com um Veículo

Aéreo Não Tripulado (VANT) para colher mais dados para refinar o modelo gerado (Souza *et al.*, 2021).

Neste estudo, não foram realizadas validações dos dados gerados e/ou gerados dados primários de vazões e cotas, produziram-se o modelo de inundação ribeirinha para atender as cotas estabelecidas nas maiores cheias já registradas na série histórica de cada estação localizada nas 4 localidades escolhidas, de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 - Estações do SNIRH - Hidroweb utilizados para estabelecer as cotas dos rios nas datas de ocorrência das maiores cheias registradas na série histórica e o ano de ocorrência.

Nome	Código	Rio	Área drenada x10 ³ (km ²)	Lat.	Long.	Maior cota registrada (m)	Data do registro
Colinas	33480000	Itapecuru	15.0	-6.0208	-44.2486	4.33	03-mai-1985
Caxias	33550000	Itapecuru	32.7	-4.8650	-43.3675	7.59	26-abr-1974
Pedreiras	33280000	Mearim	24.0	-4.5703	-44.6055	10.10	29-abr-1985
Bacabal	33290000	Mearim	25.5	-4.2194	-44.7653	9.10	01-mai-1985

Fonte: SNIRH (2025).

Ao relacionar-se cota registrada e a cota modelada cessaram-se os processamentos quando havia correspondência dos níveis máximos de cotas entre as cotas calculados pelo modelo e as cotas registradas na série histórica das estações correspondentes, para que fossem analisadas as imagens da mancha produzida pelo aplicativo, com o objetivo de se comparar com as cotas reais, no intuito de permitir que as ações de mitigação e alerta de eventos extremos nas localidades estudadas possam ser suporte ao corresponderem, com segurança, com a realidade.

3.1 Input de Dados Hidrometeorológicos e Vetorização de Feições

A entrada de dados hidrometeorológicos do Hidroweb no aplicativo Hec-Ras se dá como nível, vazão, precipitação e profundidade normal, o que significa dizer em termos hidráulicos que a massa de água no tempo pode e deve estar associada as cotas de alagamento e com a profundidade normal que depende da declividade gerando diferentes condições de escoamento sobre o terreno, podendo-se associar a precipitação ocorrida no espaço temporal dos eventos. Com exceção da precipitação, os valores de cada um desses dados empíricos do monitoramento (cotas, vazões e alturas do caudal) deverão estar associados a uma única linha de condições de contorno (*Bondary Condictions*) que poderá ser inserida dentro da área de modelagem pelo usuário em lugares estratégicos, ou todos inseridos numa dada estação hidrometeorológica, cuja a localidade é fornecida pelo usuário.

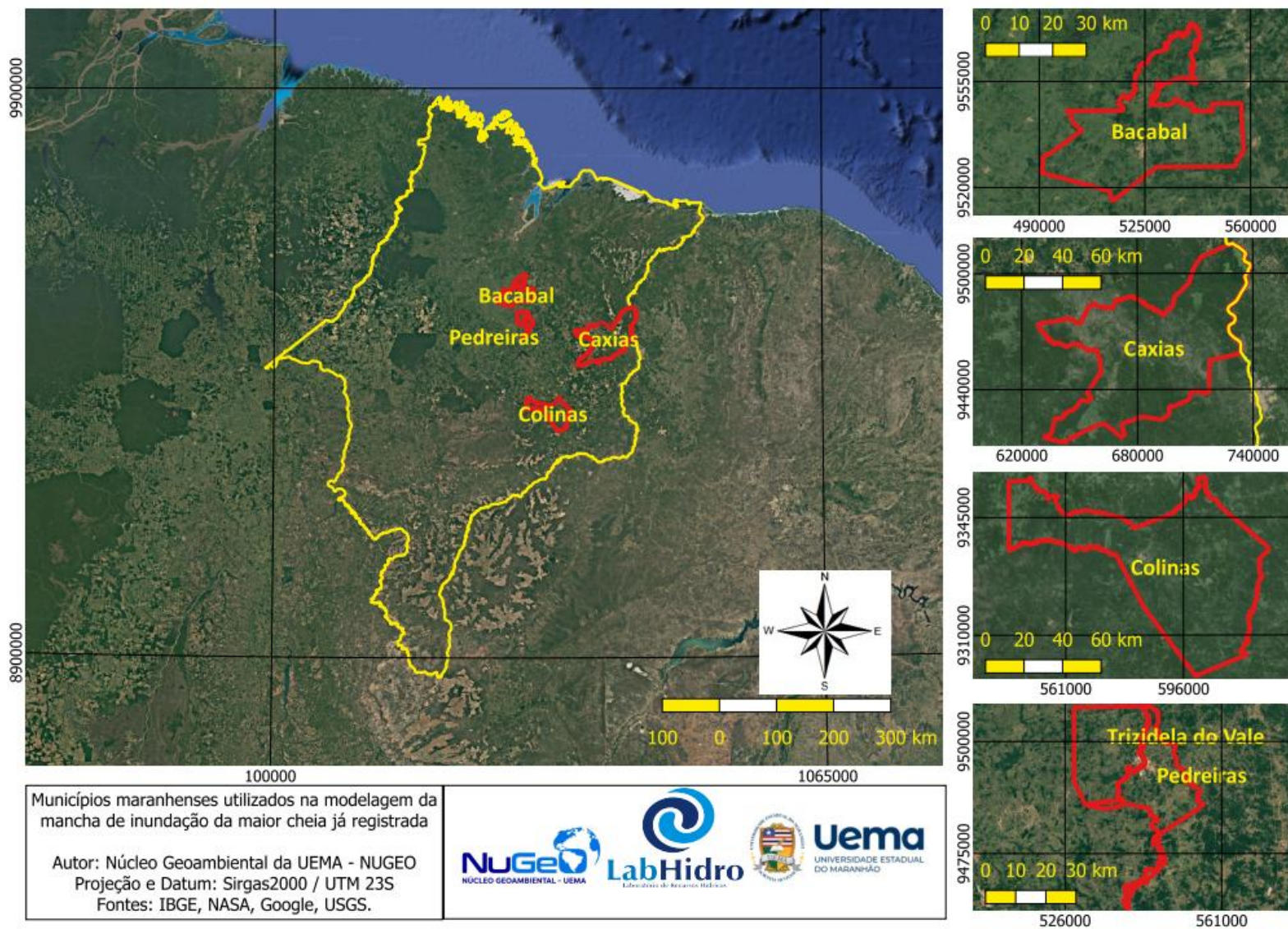
Já a vetorização das áreas de refinamento e do modelo em duas dimensões foram realizadas no aplicativo Hec-Ras 6.6 sobre as áreas relevantes em termos de resistência ao escoamento da água, infiltração e uso do solo. Ou seja, os mesmos polígonos de área de modelagem (limite da área total que contém: as áreas urbanas, áreas rurais, área da calha ribeirinha urbana e áreas periféricas), foram utilizados para a classificação do coeficiente de escoamento de Manning.

As linhas de quebra do escoamento, feitos em duas dimensões de cada uma das cidades, cujas manchas de inundação foram modeladas, foram consoantes às informações de elevação das imagens Alos Palsar, enquanto os polígonos das áreas de refinamento seguiram as informações das imagens Google Satélte® de acordo com o uso do solo, ou seja, as áreas urbanas, a calha do rio, cuja mancha foi modelada, e as áreas rurais, todas, traçadas a partir das imagens de superfície e uso do solo.

Os valores do coeficiente de Manning utilizados foram adotados de acordo com o manual de ajuda do aplicativo Hec-Ras. Já as células modelada a partir do aplicativo tiveram tamanhos diferentes, dado que a velocidade de processamento é inversamente proporcional ao tamanho dessas células, conseqüentemente, quanto maior a cidade ou área de modelagem, para um valor de célula de cálculo constante, maior será a demanda da capacidade de processamento.

Na Figura 1 estão representados a localização dos municípios de Caxias, Colinas, Pedreiras/Trizidela do Vale e Bacabal em relação ao Estado do Maranhão que foram objeto da modelagem em duas dimensões das manchas de inundação no aplicativo Hec-Ras 6.6.

Figura 1 - Localização dos municípios de Caxias, Colinas, Pedreiras/Trizidela do Vale e Bacabal em relação ao Estado do Maranhão que foram objeto da modelagem.



3.2 Tratamento das Imagens Matriciais Alos-Palsar

As imagens matriciais de elevação Alos-Palsar foram tratadas para a retirada de células sem dados (nodata value ou null) com o comando de preenchimento fill nodata que utiliza o método *spline interpolation* nas imagens, para preencher via interpolação e automaticamente, os pixels que possuíam células sem dados. Para a várzea menor dos rios, ou seja, a calha permanente onde escoar a água fora do período de cheias as imagens, foram tratadas suas calhas com o auxílio das imagens de uso do solo, ou seja, foi realizado o recorte dos pixels contidos na calha seguindo as margens direitas e esquerda do rio. Após recortado o raster, foi aplicado apenas nos pixels dentro da calha a declividade de fundo desejada por meio do script em Phyton apresentado no Anexo I. Após esse processo, os pixels da calha original foram substituídos pelo arquivo gerado. No entanto, esse processo não precisa ser aplicado em todas as imagens Alos, apenas naquelas que apresentarem valores de pixels elevados dentro da calha ou em parte dela e que precisam ser corrigidos. Também após o tratamento da calha, deve-se avaliar a elevação do pixel e a declividade ao longo do rio, em termos da seção de entrada e a seção de saída, no sentido do escoamento.

Outro tratamento de refinamento nas imagens, nem sempre recomendado, mas que pode trazer bons resultados visuais é gerar curvas de nível a partir das imagens Alos Palsar de intervalos de 1 m e reprocessar o raster com pixels de 1 x 1 m. Esse processo não deverá alterar significamente o escoamento, mas deixará a camada matricial de inundação produzida mais suavizada e orgânica no produto final, o que por outro lado, aumentará a demanda por capacidade de processamento dos aplicativos. Os processos utilizados para realizar essa manobra, indicando os valores dos tamanhos dos pixels, que devem ser aplicados após a extração das curvas de nível do Modelo Digital de Elevação (MDE) das imagens Alos-Palsar, são as aplicações do Qgis: v.to.ras e r.surf.contour, em sequência, quando não for o caso da necessidade de pequenas correções.

3.2 Configuração do HEC-RAS 2D

Uma vez que uma camada n de Cobertura do Solo para Manning tenha sido desenvolvida e associada a um conjunto de dados de geometria específico, o usuário tem a opção de criar Regiões de Calibração de Manning que são aplicadas apenas a esse conjunto de dados de Geometria específico. Para calibrar um modelo hidráulico, pode ser necessário aumentar ou diminuir os valores n de Manning em cada polígono separadamente, por alcance, para uma geometria ou evento específico. Esse processo pode ser realizado desenvolvendo as regiões de calibração n de Manning

e usando essas regiões para aumentar ou diminuir todos os valores n de Manning contidos nessa região ou polígono.

Nesse trabalho os valores de Manning que podem ser visualizados nas figuras apresentadas nos resultados foram obtidos das planilhas do Manual do Usuário do Hec-Ras que está disponível no “Menu _Ajuda” do aplicativo, de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 - Valores do coeficiente de resistência ao escoamento de Manning n usuais propostos pela USACE (2025)

Manning (n)	Aplicações
0.025 - 0.05	Águas Abertas - áreas de águas abertas, geralmente com menos de 25% de cobertura de vegetação ou solo. Isso é para riachos naturais em encostas amenas a moderadas.
0.03 - 0.05	Ambiente Desenvolvido - áreas com uma mistura de alguns materiais construídos, mas principalmente vegetação na forma de gramíneas. As superfícies impermeáveis representam menos de 20% da cobertura total. Essas áreas geralmente incluem unidades habitacionais unifamiliares de grandes lotes, parques, campos de golfe e vegetação plantada em ambientes desenvolvidos para recreação, controle de erosão ou fins estéticos.
0.06 - 0.12	Áreas desenvolvidas, de baixa intensidade - com uma mistura de materiais construídos e vegetação. As superfícies impermeáveis representam 20% a 49% da cobertura total. Essas áreas geralmente incluem unidades habitacionais unifamiliares.
0.08 - 0.16	Áreas desenvolvidas, de média intensidade - com uma mistura de materiais construídos e vegetação. As superfícies impermeáveis representam 50% a 79% da cobertura total. Essas áreas geralmente incluem unidades habitacionais unifamiliares.
0.12 - 0.20	Áreas desenvolvidas de alta intensidade - altamente desenvolvidas onde as pessoas residem ou trabalham em grande número. Exemplos incluem complexos de apartamentos, casas geminadas e comerciais/industriais. As superfícies impermeáveis representam 80% a 100% da cobertura total.

Fonte: USACE (2025). Adaptado.

3.5 Malha de células de Processamento e intervalo temporal

Foram utilizadas parâmetros de construção das malhas (*mesh*) dentro das áreas de refinamento de 1 x 1 m para a cidade de Pedreiras/Trizidela do Vale, 2 x 2 m para Colinas e 5 x 5 m para as cidades de Bacabal e Caxias. No restante da área onde não foi requerido o refinamento, dado que não estavam dentro do perímetro urbano, foi de 20 x 20 m para todas as cidades, com exceção de Caxias que foi de 50 x 50 m.

O processamento foi calculado a cada 12 horas e o intervalo de saída dos resultados foram de 1 dia, já que os dados de entrada também são da máxima diária, tanto de cotas, quanto das vazões e precipitações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram organizados em mapas com as imagens dos refinamentos para cada uma das cidades; em mapas com a mancha propriamente dita no dia de maior cota registrado no sistema de monitoramento hidrometeorológico da ANA, Hidroweb; em figuras de detalhamento das áreas urbanas inundadas; em figuras que comparam a imagem de elevação em relação a calha total do corpo hídrico; e, de figuras de comparação entre as cotas geradas pelo modelo e as cotas registradas no mesmo período pelo sistema de monitoramento.

Os resultados do aplicativo Hec-Ras, que gera imagens matriciais das manchas de inundação para cada intervalo de saída, ou seja, 1 mancha por dia, não foram detalhados no trabalho, mas podem ser visualizadas no site do NUGEO. Como o objetivo do trabalho foi criar a mancha para o dia de maior cota e vazão registrados, o foco desse trabalho foi sobre o dia de maior cota já registrado.

As imagens de elevação Alos-Palsar estão com a escala vertical (*Z factor*) bastante exagerada de 10 vezes para destacar a área da calha ocupada pelas cidades e por isso parece que o terreno é bastante sinuoso, o que não é de fato real e foi utilizada apenas para a visualização apropriada da ocupação e uso do solo das áreas das cidades, dentro da grande várzea dos rios. Foram calculados os valores de correlação quadrática (R^2) entre as cotas registradas e as cotas modeladas nas estações inseridas no projeto, que estão localizadas nas pontes das cidades, bem no meio do perímetro urbano. Dentre todas as cotas modeladas a de Caxias foi a que apresentou menor correlação de 0,869, enquanto a que apresentou a maior correlação foi a mancha modelada para a cidade de Pedreiras/Trizidela do Vale no valor de 0,993. As manchas de Colinas e Bacabal a

correlação quadrática calculada foi de 0,943 e 0,975, respectivamente. No Quadro 4 estão as datas das imagens de uso do solo utilizadas, as correlações quadráticas entre as manchas modeladas e registradas, quantidade de dias de duração da cheia e os valores da maior cota calculada e registrada.

Quadro 4 – Quadro comparativo entre as cotas registradas no sistema Hidroweb e modeladas no Hec-Ras, quantidade de dias de cheia, e R² das 4 cidades.

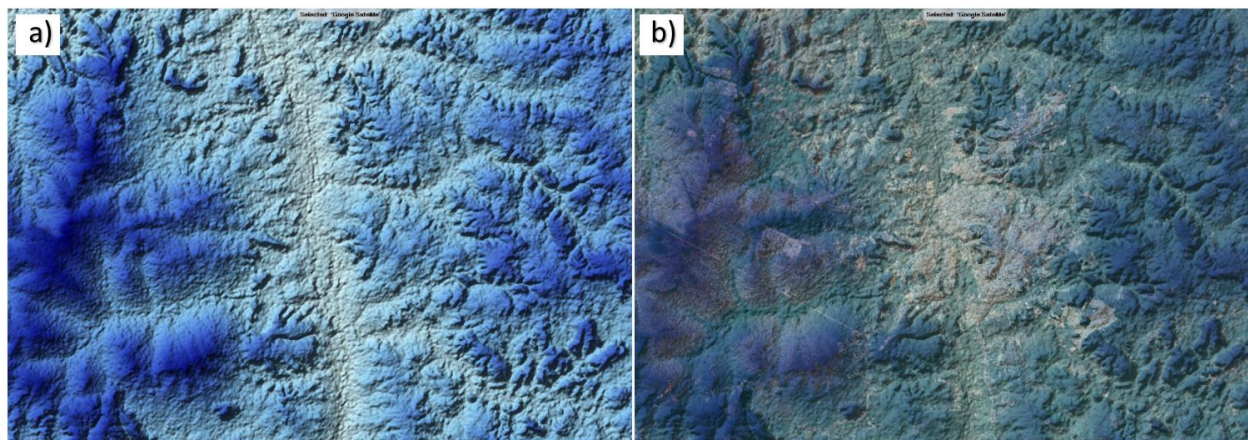
Estação	Código	Cota Hidroweb (m)	Cota modelo (m)	Dias	Data das imagens de uso do solo	R ²
Colinas	33480000	4.33	4.32	87	Julho/2024	0.943
Caxias	33550000	7.59	7.59	181	Agosto/2024	0.869
Pedreiras	33280000	10.1	10.10	212	Outubro/2024	0.993
Bacabal	33290000	9.10	9.09	271	Mai/2024	0.975

Fontes: Hidroweb, Google Satélite e Autores (2025).

4.1 Mancha de Inundação em Caxias

Na Figura 2-a) pode-se observar a imagem Alos de Caxias, exagerada em termos de elevação para detalhar a calha maior do Rio Itapecuru no perímetro urbano. Já na Figura 2-b) é a mesma imagem Alos, com as mesmas características de escala, cor e georreferenciamento, mas com a sobreposição da imagem Google Satélite® em transparência de 50%. Nota-se ao comparar as imagens que grande parte da cidade está ocupando a calha do Rio nas duas margens.

Figura 2 - a) Imagem de elevação do terreno do perímetro urbano de Caxias; e, b) sobreposição das imagens de uso do solo sobre a imagem de elevação Alos.



Fontes: ASF-NASA e Google Satélite, (Z factor Alos = 10x).

Figura 3 – Áreas de Refinamento na malha urbana de Caxias e coeficientes de Manning (n) relacionados.

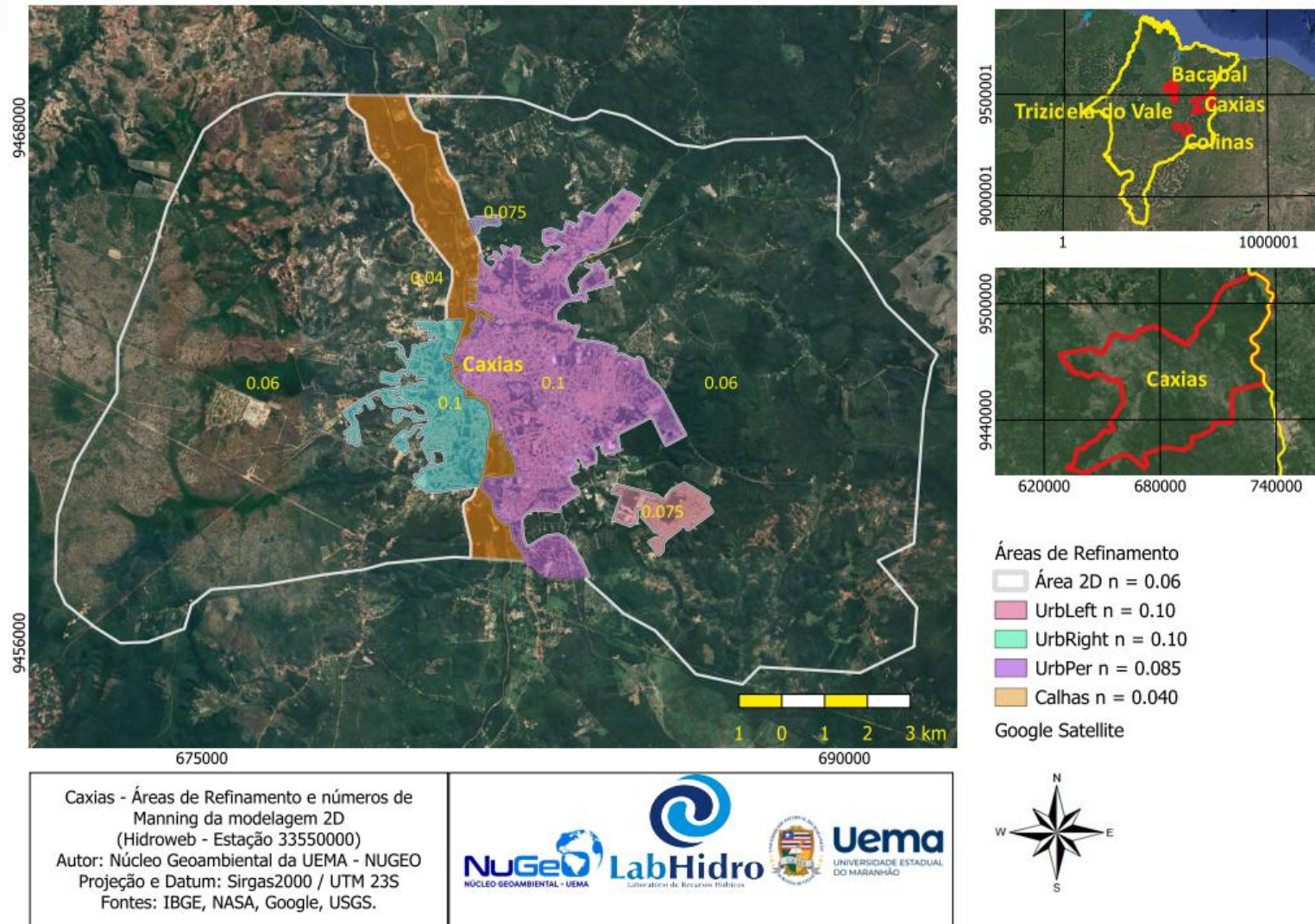
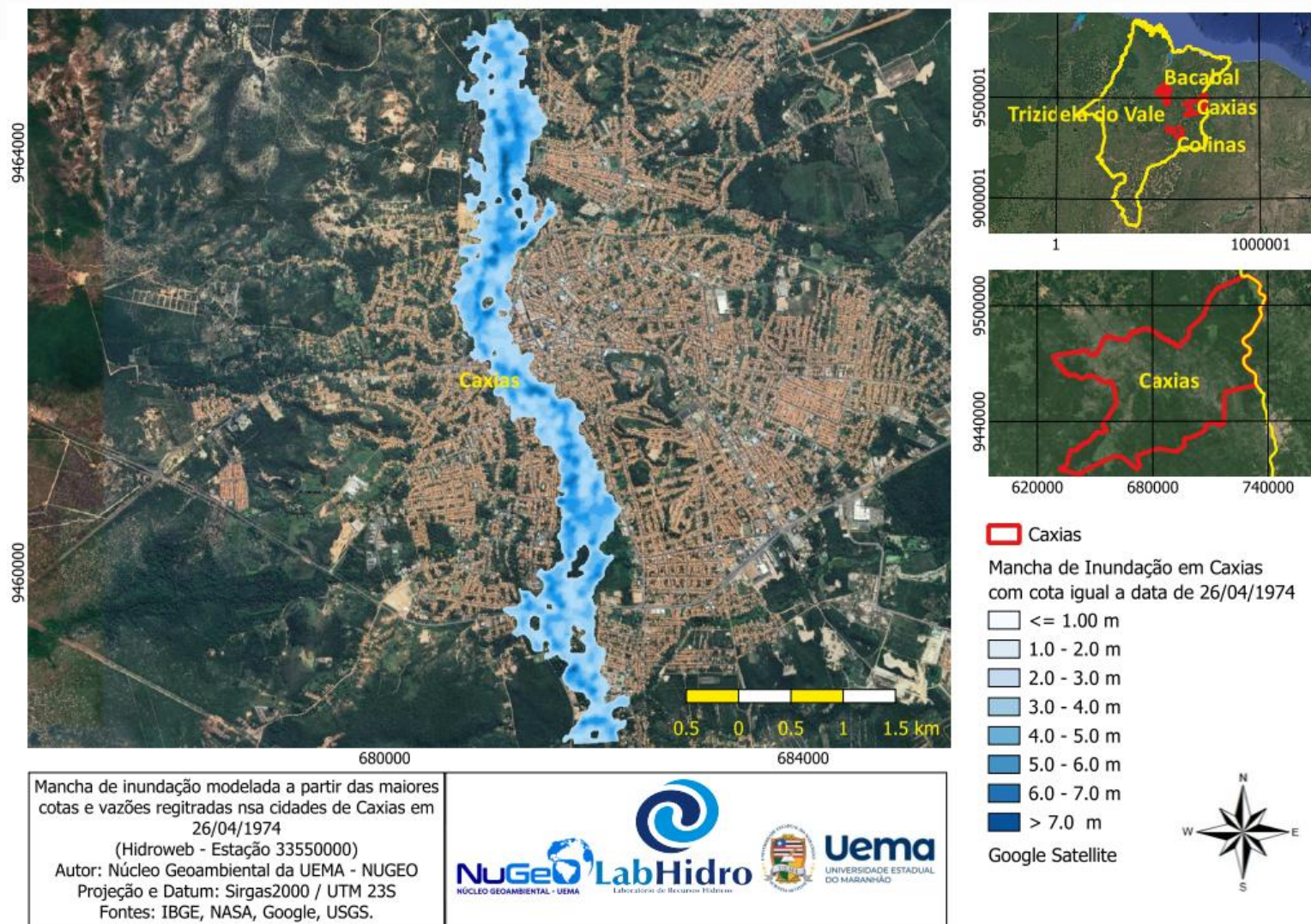


Figura 4 – Mancha de inundação para Caxias modelada a partir da cota de maior Cheia em 26/04/1974 e áreas atingidas A, B e C.

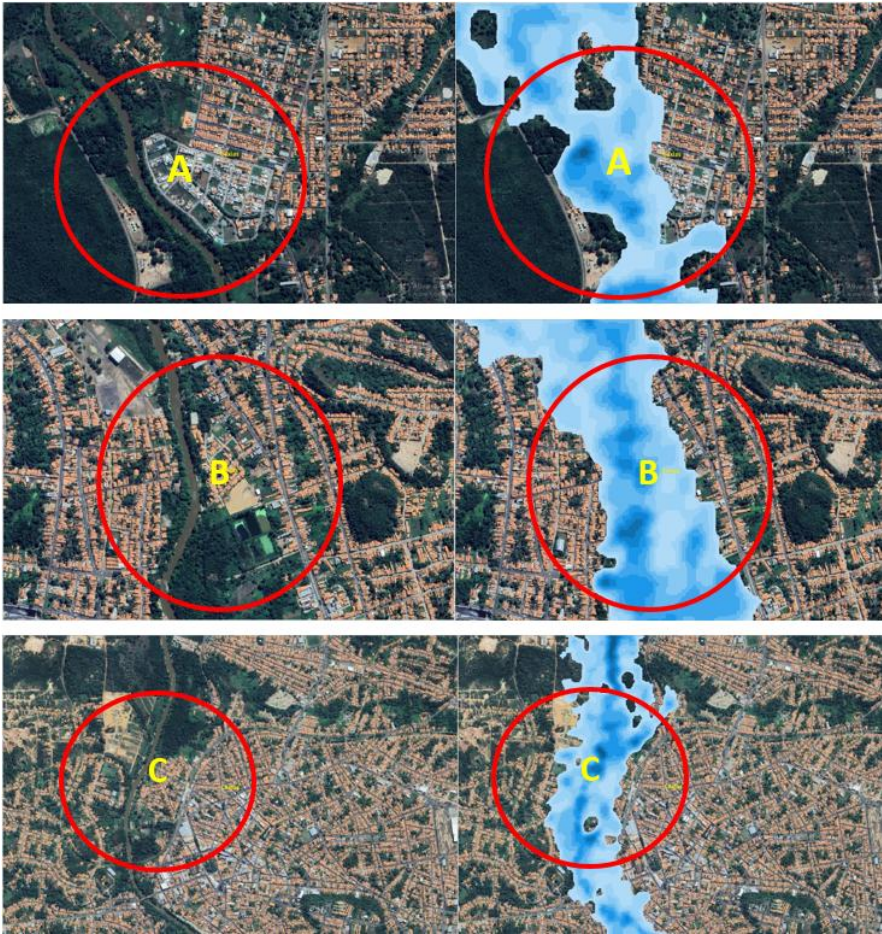


Na Figura 3 estão representadas as áreas de refinamento do modelo que foram também utilizadas para determinação do uso do solo e, conseqüentemente, dos valores do coeficiente de resistência ao escoamento de Manning.

A mancha de inundação de Caxias está representada na Figura 4 e em comparação a o modelo realizado com o trabalho do SGB, a inundação está bastante semelhante com exceção dos estrangulamentos nas pontes, que não foram considerados no modelo 2D. Também algumas áreas apresentaram maior influência da mancha de inundação em relação ao trabalho realizado pelo SGB.

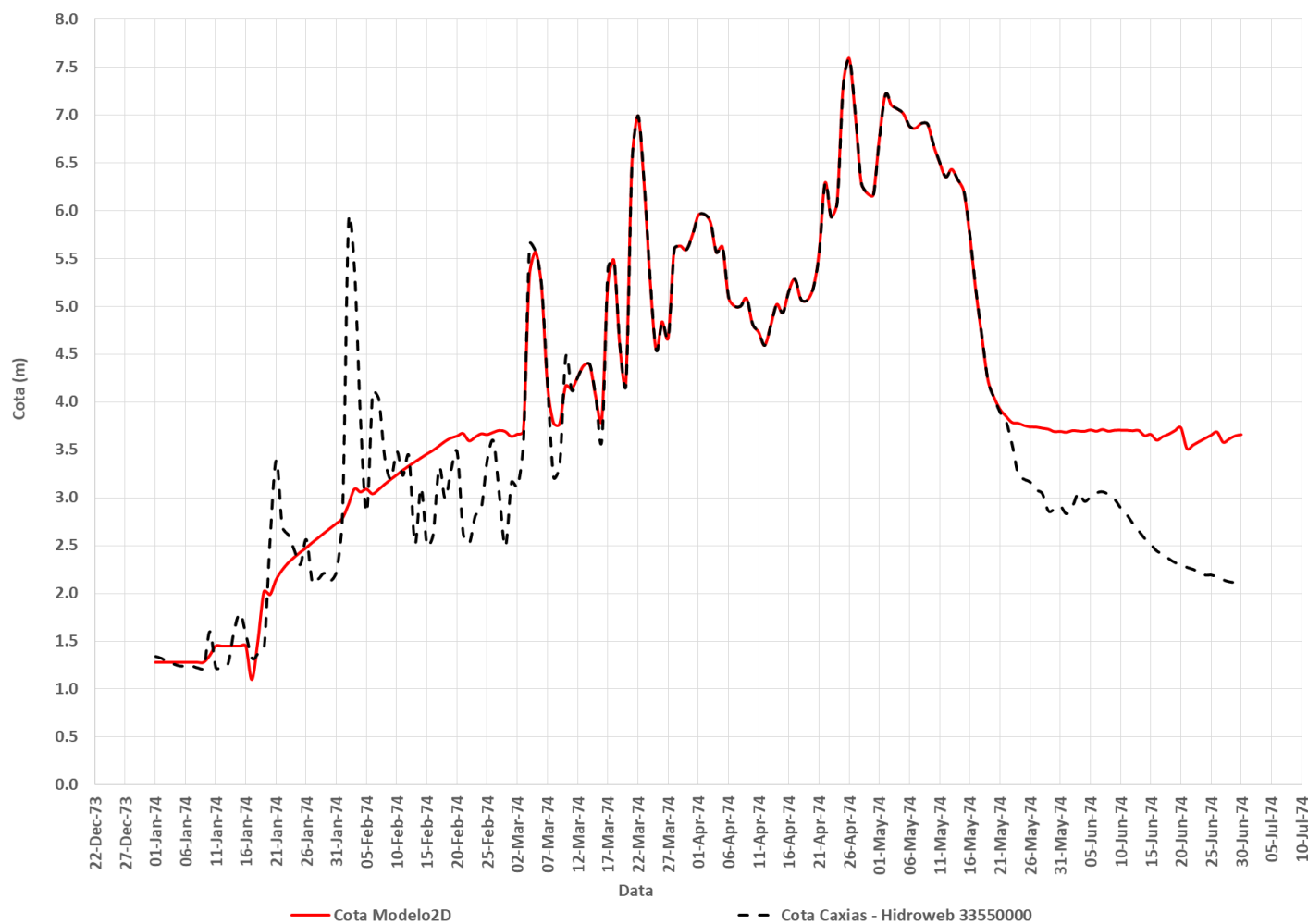
A seguir, na Figura 5 são detalhadas as áreas A, B e C demarcadas na Figura 4 anterior, dos locais da mancha de inundação da cidade de Caxias que atingiram a malha urbana e que devem ser mapeadas pelos setores interessados, segundo os dados do modelo.

Figura 5 – Detalhe das áreas urbanas A, B e C de Caxias atingidas pela mancha de inundação modelada para a data de maior cota registrada em 26/04/2974.



A Figura 6 é a representação das cotas do modelo e as registradas no sistema Hidroweb para Caxias (Estação 33550000) e o que se observa é que as cotas começam a ser coincidentes apenas a partir de 01/02/1974, no entanto o valor de maior cota estabelecida no modelo e as registradas coincidem na data de 26/04/1974.

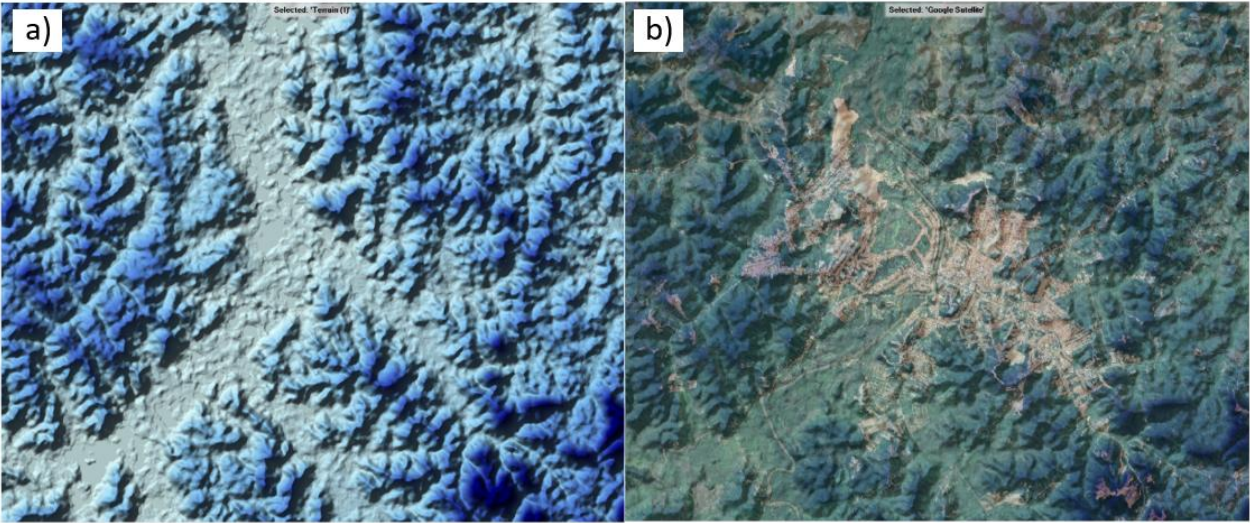
Figura 6 – Comparação entre as cotas geradas no modelo 2D e as registradas no sistema Hidroweb para Caxias (Estação 33550000)



4.2 Mancha de Inundação em Pedreiras/Trizidela do Vale

Na Figura 7-a) pode-se observar a imagem Alos de Pedreiras, exagerada em termos de elevação para detalhar a calha maior do Rio Mearim no perímetro urbano. Já na Figura 7-b) é a mesma imagem Alos, com a mesma escala e características, mas com a sobreposição da imagem Google Satélite em transparência de 50%. É notável que grande parte da cidade de Trizidela do Vale, às margens esquerda do rio e da cidade de Pedreiras, às margens direita do Rio Mearim, quando comparadas, estão ocupando a calha do Rio nas duas margens e as cidades tem uma área de 82% dentro do grande leito maior. E isso justifica as cheias recorrentes na cidades de Pedreiras/Trizidela do Vale nas épocas de cheias um pouco mais severas. A maior cota já registrada na cidade, segundo dados do sistema Hidroweb, ocorreu em 29/04/1985 e teve uma duração de 212 dias seguidos com a ocorrência de diversos eventos de chuvas severas de grande intensidade.

Figura 7 - a) Imagem de elevação do terreno do perímetro urbano de Pedreiras/Trizidela do Vale; e, b) sobreposição das imagens de uso do solo sobre a imagem de elevação.



Fontes: ASF-NASA e Google Satélite, (Z factor Alos = 10x).

Na Figura 8 estão representadas as áreas de refinamento do modelo para as cidades de Pedreiras/Trizidela do Vale que foram também utilizadas para determinação do uso do solo e, consequentemente, dos valores do coeficiente de resistência ao escoamento de Manning que também estão representados na figura. A mancha de inundação de Pedreiras/Trizidela do Vale está representada na Figura 9 com cota registrada de 10.10 m na data de registro da maior cheia (29/04/1985) e também não há estrangulamento nas seções das pontes sobre o Rio Mearim.

Figura 8 – Áreas de Refinamento na malha urbana de Pedreiras/Trizidela do Vale e coeficientes de Manning (n) relacionados.

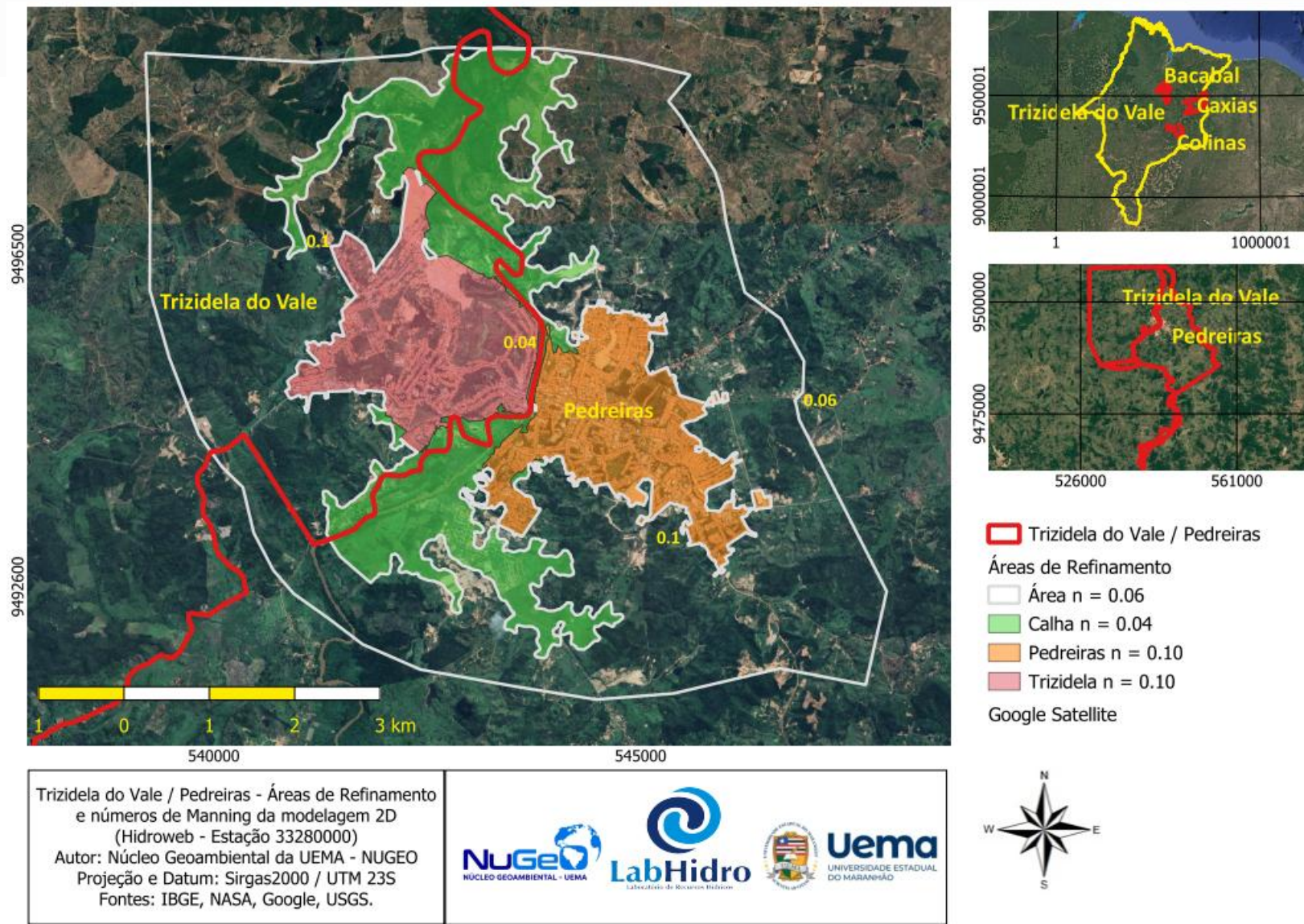
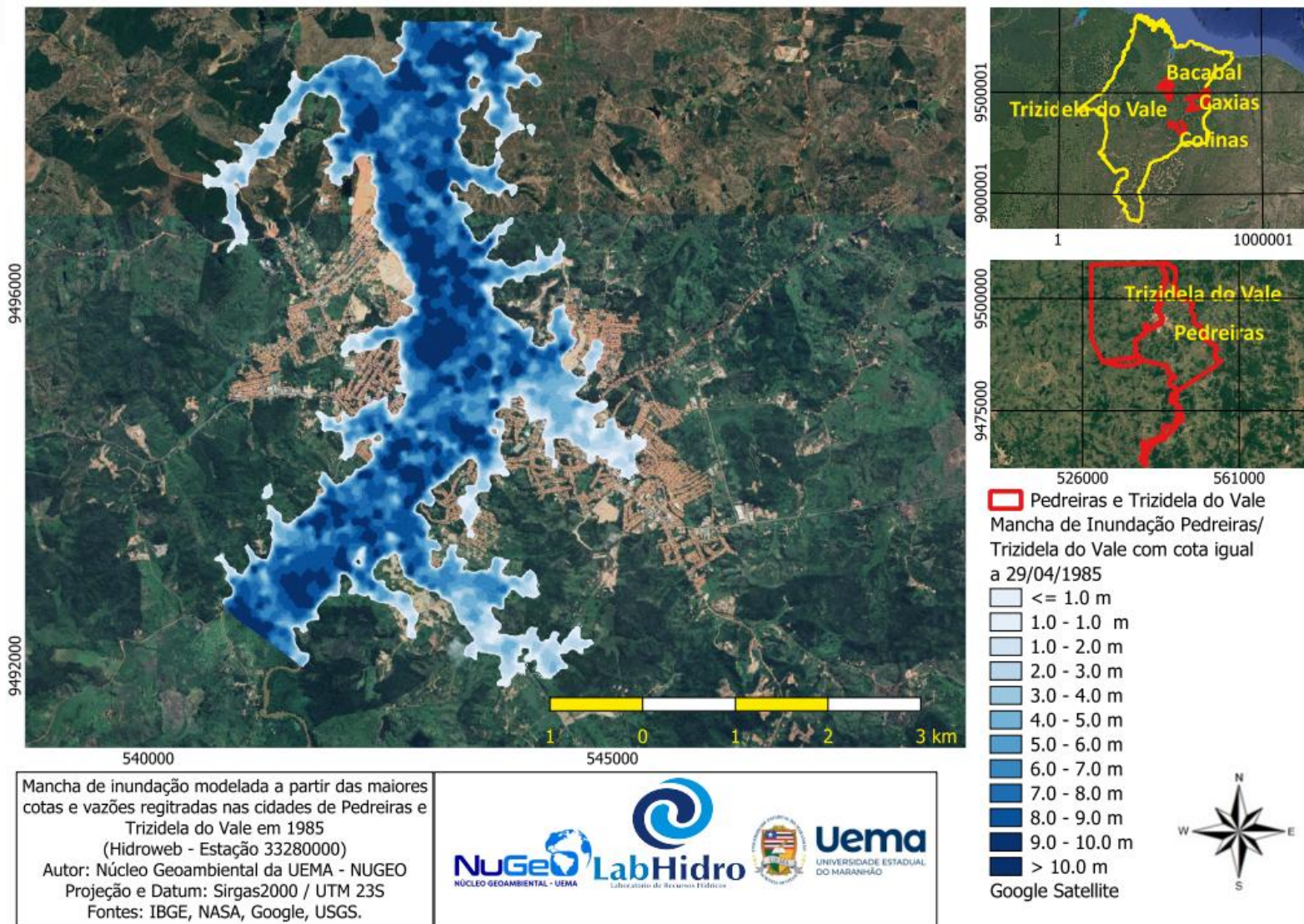


Figura 9 – Mancha de inundação para Pedreiras/Trizidela do Vale modelada a partir da cota de maior Cheia em 29/04/1985 e área atingida.



A seguir, na Figura 10 são detalhadas a área urbana gravemente impactada pela mancha de inundação para Pedreiras/Trizidela do Vale da Figura 9 anterior, dos locais da mancha de inundação de Pedreiras/Trizidela do Vale que atingiram a malha urbana e que devem ser calibrados e limitados nas seções de estrangulamento com dados medidos *in loco*.

Figura 10 – Detalhe da área urbana atingida pela mancha de inundação modelada nas datas de maior cota registrada em 29/04/1985 para Pedreiras/Trizidela do Vale.

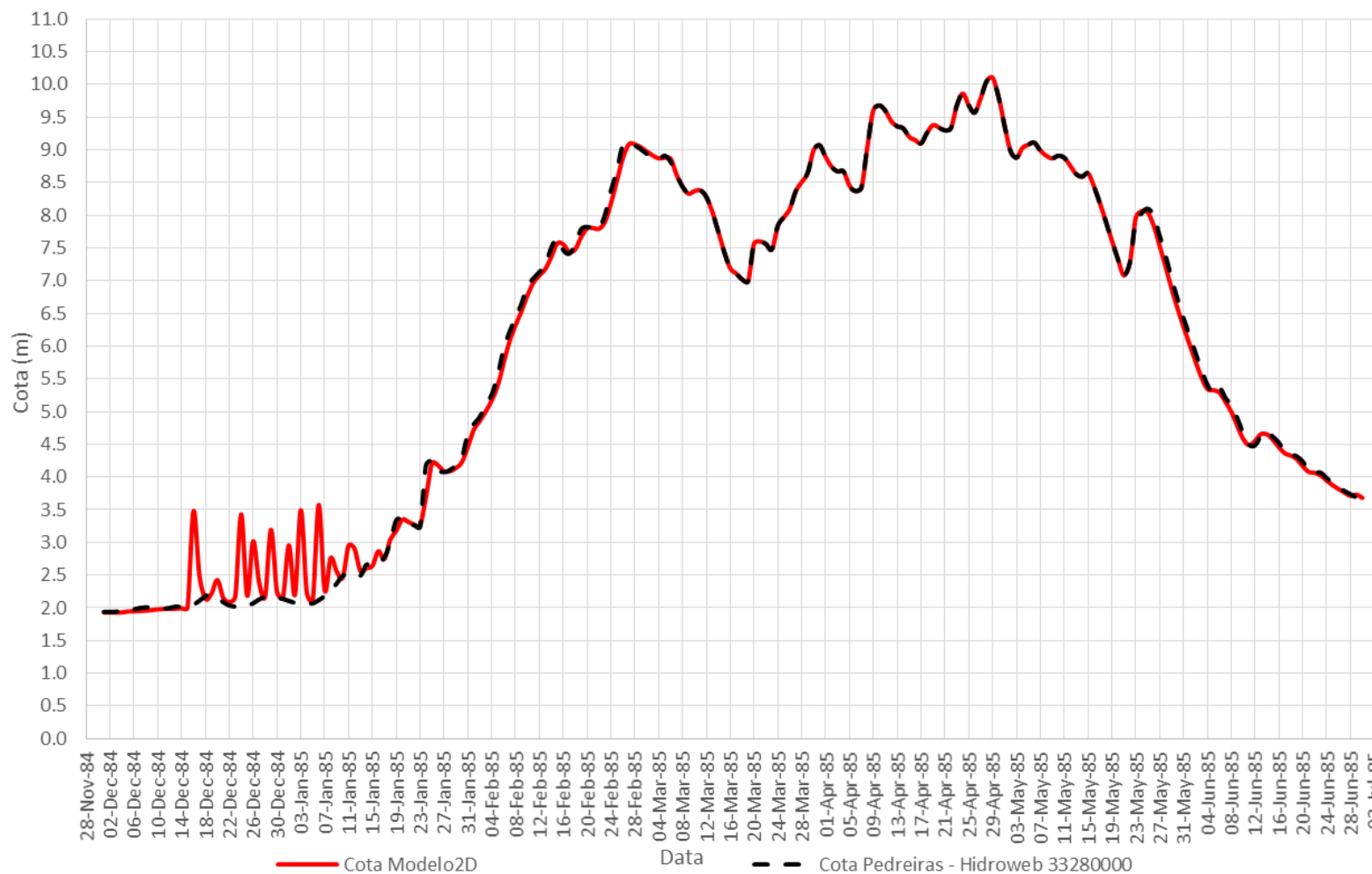


A Figura 11 é a representação das cotas do modelo e as registradas no sistema Hidroweb para o Rio Mearim em Pedreiras e Trizidela do Vale (Estação 33280000) e o que se observa é que existe um erro numérico até os primeiros 46º dias no início do processamento, mas que após 15/01/1985 as cotas começam a ser coincidentes e o valor da maior cota estabelecida no modelo e as registradas no sistema Hidroweb coincidem na data de 29/04/1985. A Estação 33280000 na cidade de Pedreiras/Trizidela do Vale foi a que melhor se ajustou entre as cotas registradas e modeladas para a data de maior cota já registrada na cidade em abril de 1985, com uma cheia que durou 212 dias consecutivos.

Caso essa cheia se repita, com uma cota de 10,10 metros, que foi a maior registrada entre as cidades modeladas, as cidades de Trizidela do Vale e Pedreiras, já que em quase a totalidade da área urbana de cada uma dessas cidades estão ou às margens da esquerda (Trizidela do Vale), ou às margens da direita do Rio Mearim (Pedreiras), cidades que estarão bastante comprometidas em termos de emergência ambiental de eventos extremos, com grande parte dessas cidade sob a

lâmina d'água, dado que as imagens da mancha são das cheias que ocorreram em 1974, no entanto, as imagens de superfície são bem mais recentes, todas do ano de 2024.

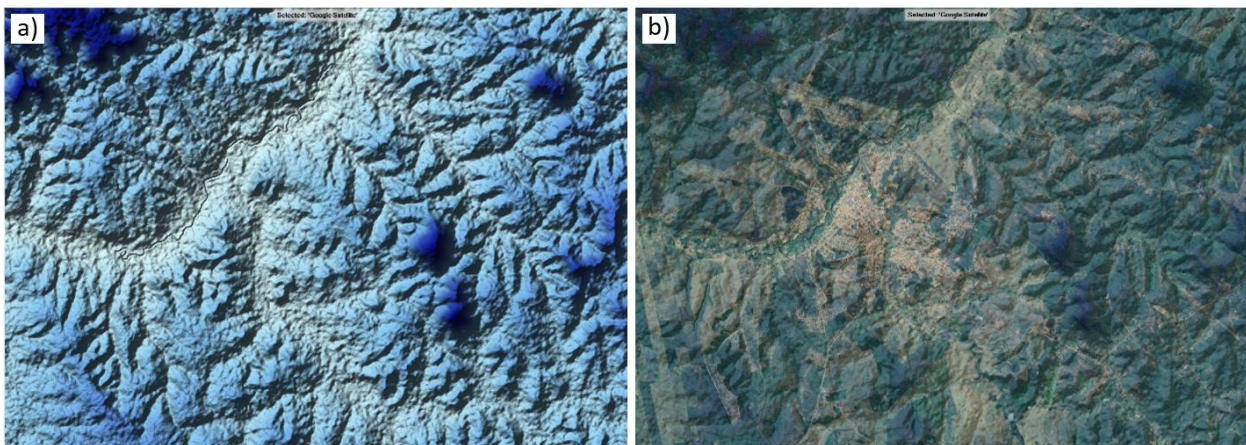
Figura 11 – Comparação entre as cotas geradas no modelo 2D e as registradas no sistema Hidroweb para Pedreiras/Trizidela do Vale (Estação 33280000)



4.3 Mancha de Inundação em Colinas

Na Figura 12-a) pode-se observar a imagem Alos de Colinas, exagerada em termos de elevação para detalhar a calha maior do Rio Itapecuru no perímetro urbano. Já na Figura 12-b) é a mesma imagem Alos, com a mesma escala e características, mas com a sobreposição da imagem Google Satélite® em transparência de 50%. É notável que a cidade de Colinas, ocupou em sua maioria as áreas mais altas do terreno, ficando apenas 18% da malha urbana próximas às áreas de vulnerabilidade à inundação e grandes cheias o que perfaz uma zona habitável com cheias em grandes períodos de recorrência, utilizando-se de Grigorten para eventos extremos Tipo I, essa vazão tem um valor bem aproximado de TR de 1211 anos. A maior cota já registrada na cidade, segundo dados do sistema Hidroweb-33480000, foi de 4,33 m, a menor registrada dentre as cidades modeladas nesse trabalho e que ocorreu em 03/05/1985 e teve uma duração de 87 dias consecutivos com a ocorrência de diversos eventos de chuvas de grande intensidade.

Figura 12 - a) Imagem de elevação do terreno do perímetro urbano de Colinas; e, b) sobreposição das imagens de uso do solo sobre a imagem de elevação Alos.



Fontes: ASF-NASA e Google Satélite, (Z factor Alos = 10x).

Na Figura 13 estão representadas as áreas de refinamento do modelo para a cidade de Colinas que foram também utilizadas para determinação do uso do solo e, conseqüentemente, dos valores do coeficiente de resistência ao escoamento de Manning que também estão representados na figura. A mancha de inundação de Colinas está representada na Figura 14 com cota registrada de 4.33 m, na data de registro da maior cheia (03/05/1985) e também não há estrangulamento nas seções das pontes.

Figura 13 – Áreas de Refinamento na malha urbana de Colinas e coeficientes de Manning (n) relacionados.

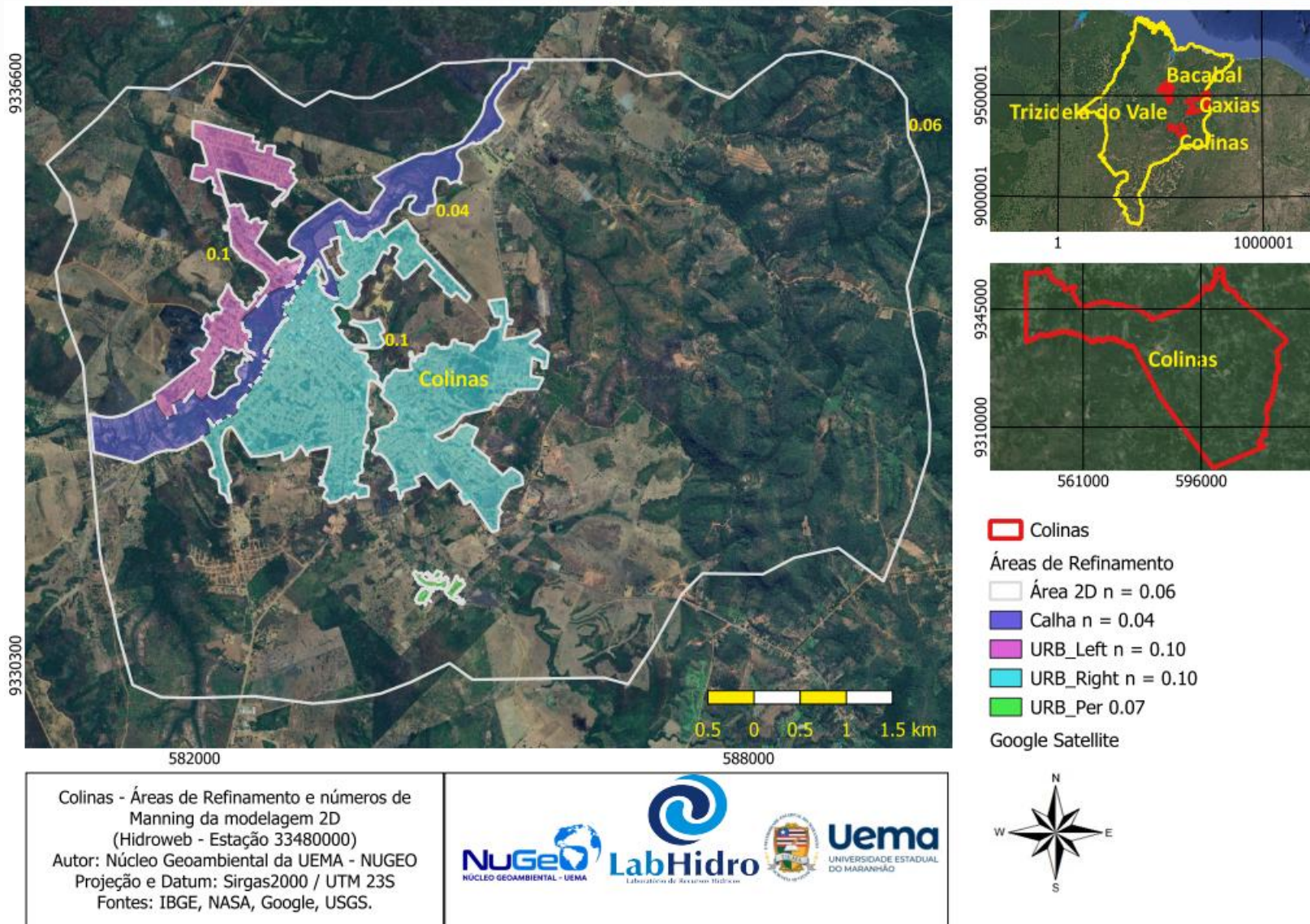
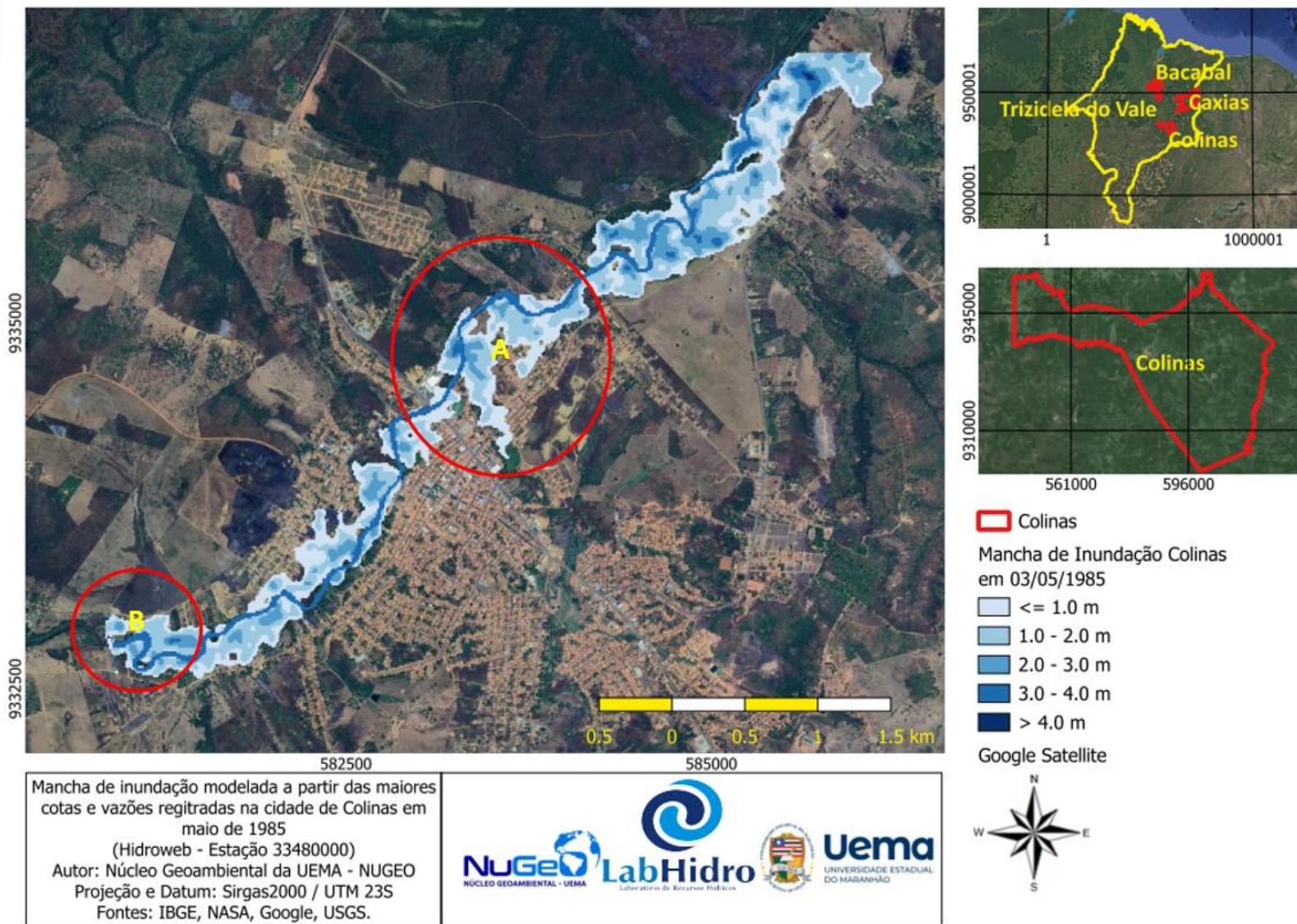


Figura 14 – Mancha de inundação para Colinas modelada a partir da cota de maior Cheia em 03/05/1985 e áreas atingidas A e B.



A seguir, na Figura 15 são detalhadas as áreas urbanas A e B impactadas pela mancha de inundação para Colinas da Figura 14 anterior, nos locais da área modelada da mancha de inundação urbana com maior cota atingida em maio de 1985 no valor de 4,33 m em colinas e que devem ser calibrados e limitados nas seções de estrangulamento e devidamente medidos *in loco*.

A área A mostra claramente uma área de expansão urbana que está dentro da mancha de inundação e até julho de 2024 não havia habitações.

Figura 15 – Detalhe da área urbana atingida pela mancha de inundação modelada nas datas de maior cota registrada em 03/05/1985 para Colinas.



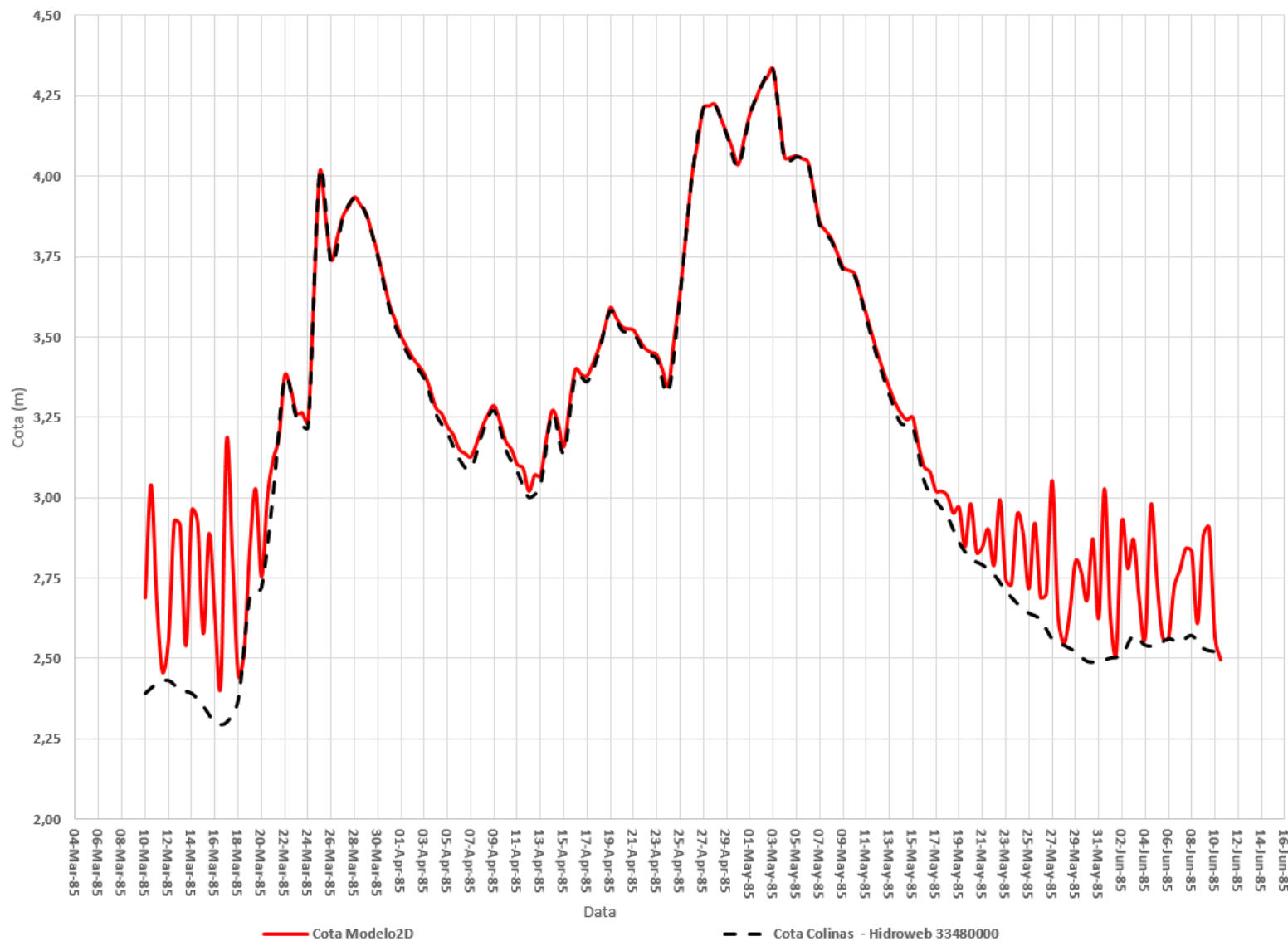
Já a área demarcada como B apresentou alguns erros numéricos logo no início da mancha como pode ser visualizado na figura em que algumas áreas altas do terreno foram alagadas enquanto áreas com menor elevação ficaram secas. Isso deve ter ocorrido por causa da linha de condição de contorno traçada com a característica de escoamento e vazão (flow) próxima dessa região, podendo haver algum efeito de estrangulamento do fluxo nessa condição de contorno de vazões.

A Estação 33480000 na cidade de Colinas de ajustou com uma correlação quadrática de 0,943 entre as cotas registradas e modeladas para a data de maior cota já registrada na cidade em maio de 1985, com uma cheia que durou 87 dias consecutivos.

Com uma cota de 4,33 metros, a maior registrada para Colinas, poderia trazer maiores prejuízos que a mancha modelada, pois a modelagem considerou apenas o Rio Itapecuru que é onde se localiza a estação fluviométrica, mas como pode se observar nas imagens acima é que a cidade está bem em cima da aflúncia do Rio Curimatá e Itapecuru, mas a mancha foi modelada apenas para o primeiro, ou seja, na grande cheia de maio de 1985, certamente os dois rios estavam com cotas de emergência e provavelmente essa mancha ocuparia o lado leste da cidade, o que não ocorreu na modelagem realizada nesse trabalho, já que não existem dados do Rio Curimatá que pudessem ser utilizados no modelo 2D.

A Figura 16 é a representação das cotas do modelo e as registradas no sistema Hidroweb para o Rio Itapecuru em Colinas (Estação 33480000) e o que se observa é que existe inconsistências numéricas no início e final do modelo, como se houvesse uma instabilidade numérica no aplicativo até que as cotas e vazões comecem a crescer ou decrescer em taxas desconhecidas, em unidades de metros por dia, para que por fim, as propriedades hidráulicas calculadas comecem a respeitar os dados registrados, o que acontece a partir do dia 20 de março de 1985, 10 dias após o início do processamento, na ascensão do hidrograma e 20 dias antes do fim da data dos dados de entrada em 16 de maio de 1985, data da maior cota e vazão registradas e, conseqüente, maior cheia registrada.

Figura 16 – Comparação entre as cotas geradas no modelo 2D e as registradas no sistema Hidroweb para Colinas (Estação 33480000).

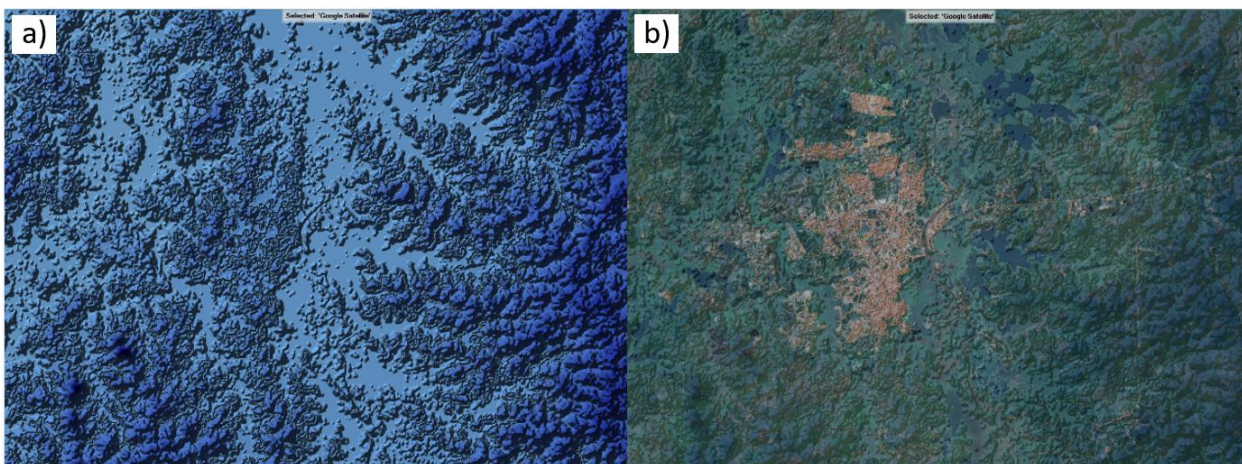


4.4 Mancha de Inundação em Bacabal

Na Figura 17-a) pode-se observar a imagem Alos de Bacabal, exagerada em termos de elevação para detalhar a calha maior do Rio Mearim no perímetro urbano. Já na Figura 17-b) é a mesma imagem Alos, com a mesma escala e características, mas com a sobreposição da imagem Google Satélite® em transparência de 50%. É notável que a cidade de Bacabal, ocupou em sua maioria as áreas mais altas do terreno, na margem leste do Rio Mearim com apenas 8% da malha urbana próximas às áreas de vulnerabilidade à inundação e grandes cheias o que perfaz o leito maior como uma zona habitável com cheias.

A maior cota já registrada na cidade, segundo dados do sistema Hidroweb-33480000, foi de 9,10 m, a segunda maior cota registrada dentre as cidades modeladas nesse trabalho e que ocorreu em 01/05/1985, no entanto a mais longa cheia dentre elas alcançando 271 dias consecutivos com a ocorrência de diversos eventos de chuvas de grande intensidade.

Figura 17 - a) Imagem de elevação do terreno do perímetro urbano de Bacabal; e, b) sobreposição das imagens de uso do solo sobre a imagem de elevação Alos.



Fontes: ASF-NASA e Google Satélite, (Z factor Alos = 10x).

Na Figura 18 estão representadas as áreas de refinamento do modelo para a cidade de Bacabal que foram também utilizadas para determinação do uso do solo e, conseqüentemente, dos valores do coeficiente de resistência ao escoamento de Manning que também estão representados na figura. A mancha de inundação de Bacabal está representada na Figura 19 com cota registrada de 9.10 m na data de registro da maior cheia (01/05/1985).

Figura 18 – Áreas de Refinamento na malha urbana de Bacabal e coeficientes de Manning (n) relacionados.

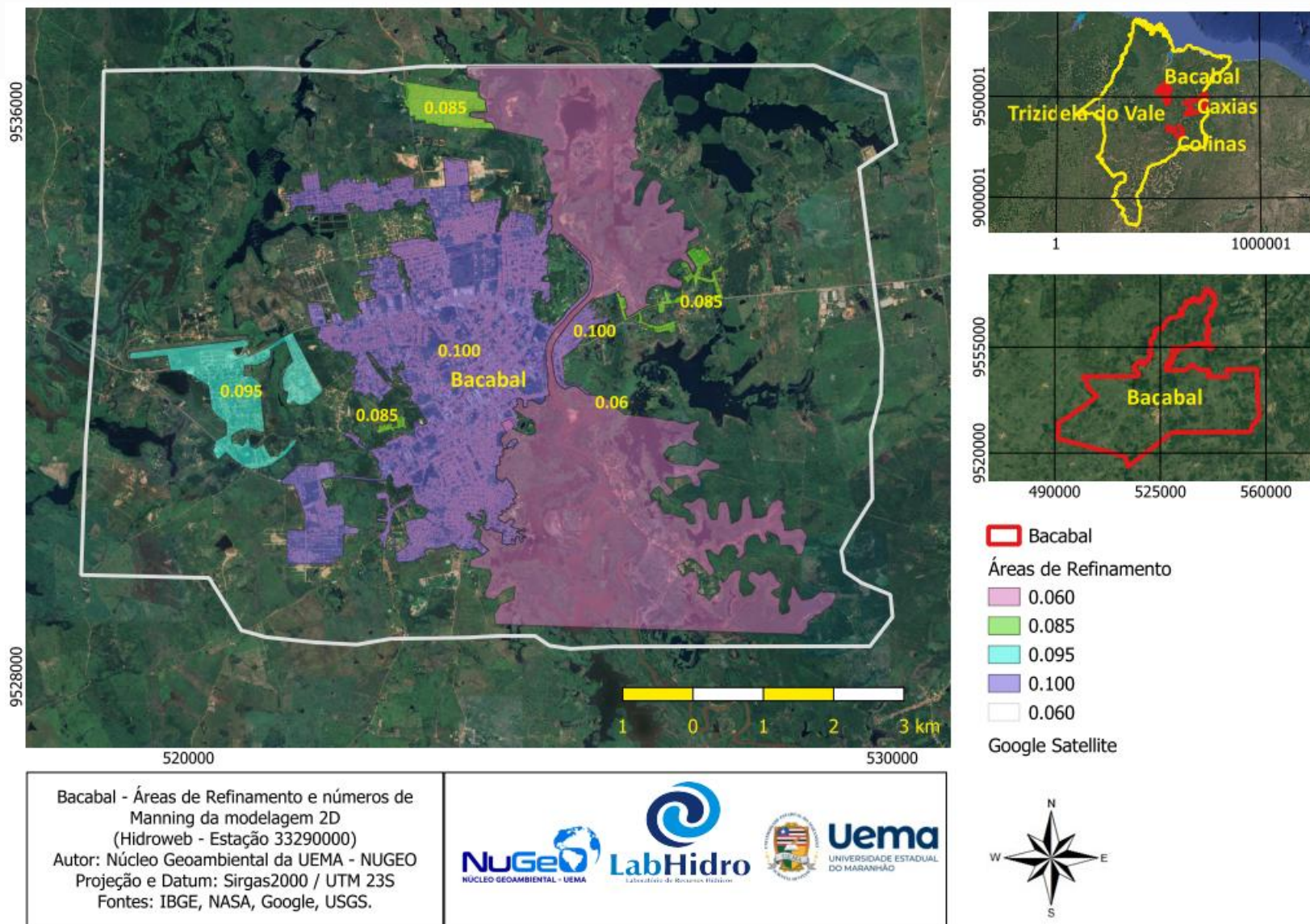
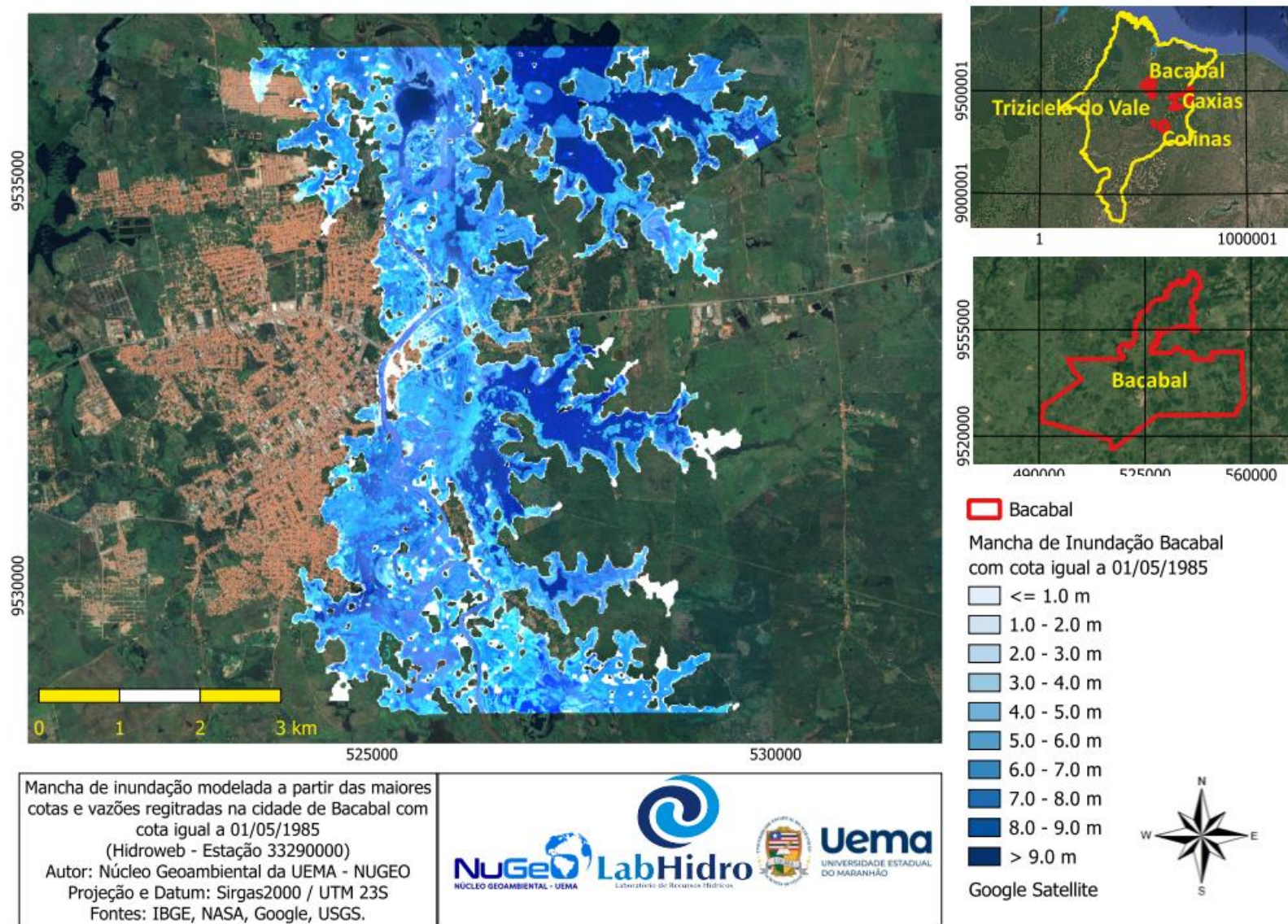
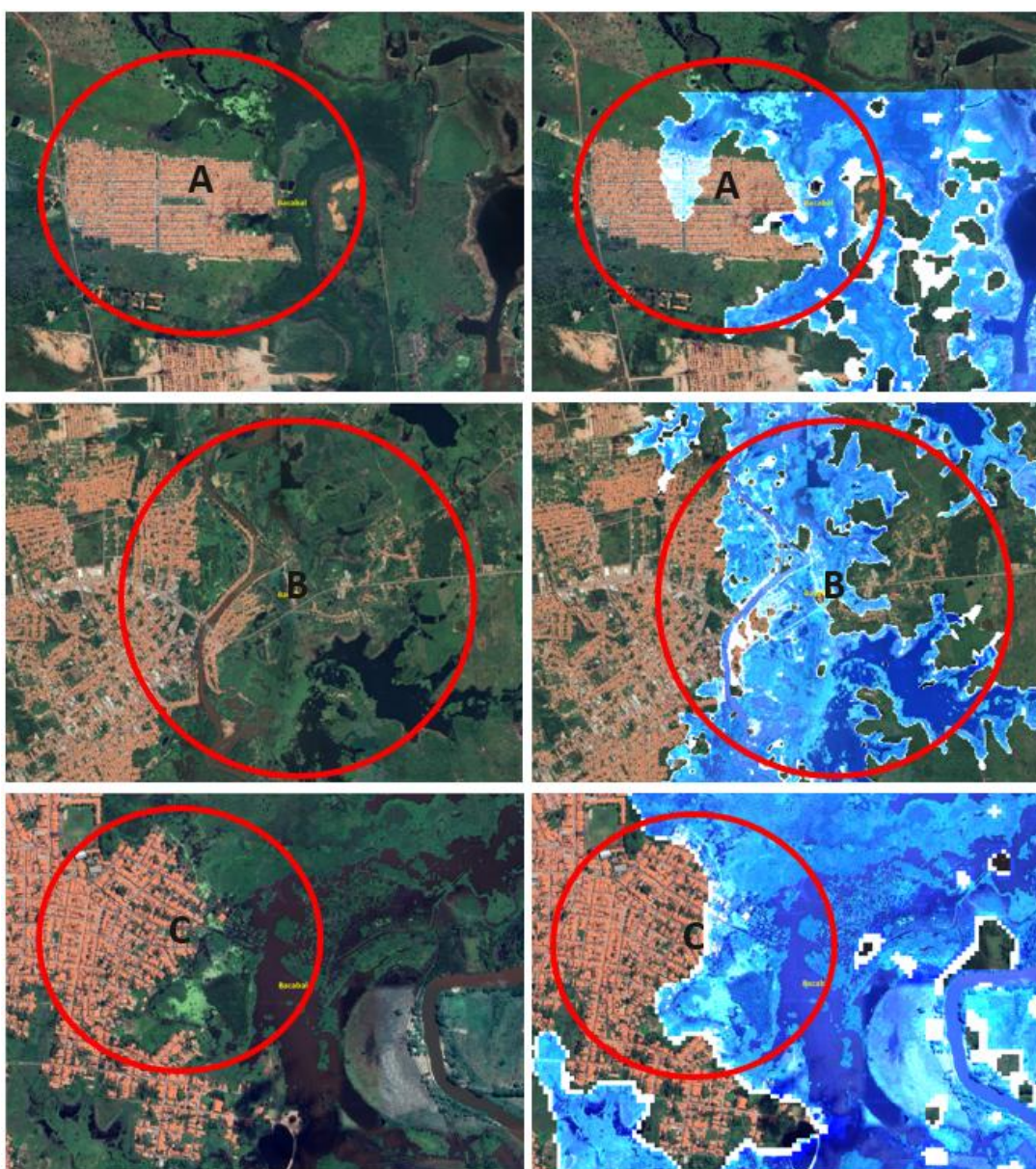


Figura 19 – Mancha de inunda o para Bacabal modelada a partir da cota de maior Cheia em 01/05/1985 e áreas atingidas A e B.



A seguir, na Figura 20 são detalhadas as áreas urbanas A, B e C impactadas pela mancha de inundação modelada para Bacabal da Figura 19 anterior. O modelo 2D da mancha foi produzido com base na maior cota atingida em maio de 1985 no valor de 9.10 m em Bacabal e que devem ser calibrados e limitados nas seções de estrangulamento e devidamente medidos in loco. Na figura a seguir a área A é

Figura 20 – Detalhe das áreas urbanas atingida pela mancha de inundação modelada nas datas de maior cota registrada em 03/05/1985 para Bacabal.

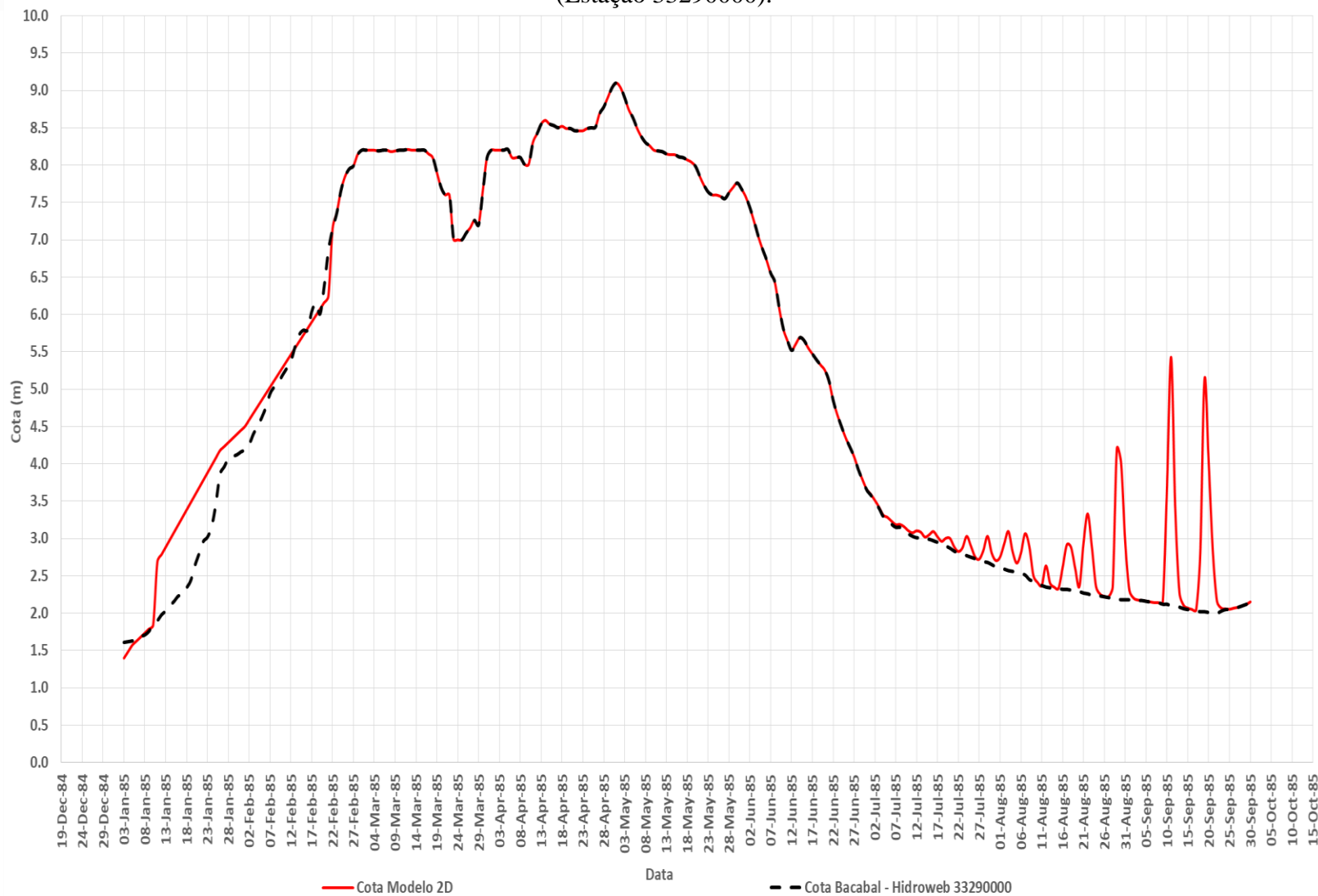


A área demarcada como B teve maior sobreposição da mancha sobre a malha urbana, seguidas de A e C, sendo que em B se encontra a Estação 33290000 na cidade de Bacabal, que se ajustou com uma correlação quadrática de 0,975 entre as cotas registradas e modeladas para a data de maior cota já registrada na cidade em maio de 1985, com uma cheia que durou 271 dias consecutivos.

A Figura 21 é a representação das cotas do modelo e as registradas no sistema Hidroweb para o Rio Itapecuru em Bacabal (Estação 33290000) e o que se observa é que existe inconsistências numéricas apenas no final do modelo, ocorrendo uma instabilidade numérica no aplicativo na recessão de cotas e vazões. No entanto, é possível observa também que a ascensão dos níveis começam a ser coincidentes a partir de 7 de fevereiro, 36 dias após o início do processamento. Já os erros na recessão ocorrem a partir de 14/07/1985, 79 dias antes do final do processamento.

Apesar dessas inconsistências o momento de maior cheia entre as maiores cotas registradas e as data em que ocorreram são muito semelhantes com erro praticamente inexistente de 0.1% nas cotas maiores.

Figura 21 - Comparação entre as cotas geradas no modelo 2D e as registradas no sistema Hidroweb para o Rio Itapecuru em Bacabal (Estação 33290000).



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos de manchas de inundação das cidades modeladas carecem de validação dado que os dados utilizados são do sistema Hidroweb e não foram verificadas in loco. No entanto, foram realizados os modelos de manchas de inundação de maneira barata e razoável celeridade, que se comparada a deslocamento de equipe, equipamentos, medições de batimetria, utilização de estações totais e drones, as escalas de custo e velocidade de obtenção dos resultados são infinitamente maiores.

O aplicativo tem um histórico de desenvolvimento nas últimas décadas, mas ainda sim apresenta muitos erros numéricos e seu processamento demanda bastante capacidade computacional, inversamente proporcional ao tamanho das células de processamento requeridas pelo usuário. Os dados de entrada do aplicativo também se apresentaram como gargalo, dado que as imagens gratuitas tem resolução espacial de 12,5 m, o que para manchas de inundação não é o adequado, mas é o que existe disponível. Por outro lado imagens de drones com resolução do DEM pequenas vão demandar uma capacidade computacional imensa, dado que em centros urbanos de médio e grande porte as áreas são maiores e, se utilizar-se das células computacionais iguais as da imagens, o processamento fica bastante lento e com uma enorme demanda computacional.

Com exceção de Caxias as cidades de Bacabal, Colinas e Pedreiras não tem um documento de comparação ou estudo que também geraram as manchas de inundação para que se compare as semelhanças e diferenças entre o trabalho aqui apresentado. No caso de Caxias, com exceção do estrangulamento da ponte as áreas de inundação, os resultados obtidos nesse trabalho foram muito semelhantes aos dados obtidos pelo documento de produção das manchas de inundação na cidade de Caxias pelo SGB.

O ideal de todo modelo é realizar a validação e calibração dos parâmetros utilizados, o que não foi objetivo desse trabalho, já que o intuito era modelar a cota do maior registro de nível ocorrido na série histórica com as cotas obtidas no modelo 2D para a malha urbana atual. O aplicativo e seus resultados se apresentaram uma ferramenta importante que pode e deve ser utilizadas para planejamento e gerenciamento de eventos extremos hidrológicos.

REFERÊNCIAS

ANA (2024). AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **HidroWeb** – Sistema de Informações Hidrológicas. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 13 maio 2025.

ANA (2022). AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Sistemas de Alerta Hidrológico**. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-hidrologico/sistemas-de-alerta-hidrologico>. Acesso em: 13 maio 2025.

ANA (2022). AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Sistemas de Alerta Hidrológico**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-hidrologico/sistemas-de-alerta-hidrologico>. Acesso em: 13 maio 2025.

ANA (2010). AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2010**. Brasília, 2010. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/download.aspx>. Acesso em: 12 dez. 2024

ASF DAAC. (2014). **ALOS PALSAR High Resolution Radiometric Terrain Corrected Product [Data set]**. NASA Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>

BARBOSA, S.E.S.; BARBOSA JÚNIOR, A.R.; SILVA, G.Q.; CAMPOS, E.N.B.; RODRIGUES, V.C. (2005). **Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a Bacia do Rio do Carmo, Minas Gerais**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.10, n.1, p.64-71, 2005.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 17 maio 2025.

BRUNNER, G. W., PIPER, S. S., JENSEN, M. R., & CHACON, B. (2015). **Modelagem hidráulica 1D e 2D combinada dentro do HEC-RAS**. Congresso Mundial de Recursos Hídricos e Ambientais 2015. DOI:10.1061/9780784479162.141

FALCETTA, F. A. M.; CORSI, A. C. (2023). **Validação de mapeamento de inundações urbanas utilizando os modelos HE-HMS e HEC-RAS acopladas a dados de cartas topográficas e da SRTM**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2023. Disponível em:

<https://ipt.br/2023/03/20/validacao-de-mapeamento-de-inundacoes-urbanas-utilizando-os-modelos-he-hms-e-hec-ras-acopladas-a-dados-de-cartas-topograficas-e-da-srtm/>. Acesso em: 17 maio 2025.

FERESHTEHPOUR, M. et al. (2023). **Impacts of DEM Type and Resolution on Deep Learning-Based Flood Inundation Mapping**. arXiv preprint arXiv:2309.13360, 2023. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2309.13360>>

SZYMANSKI, F. D. et al. (2025). **Análise de inundações em bacias montanhosas no sul do Brasil por meio de monitoramento e modelagem**. Brazilian Journal of Physical Geography, v. 15, n. 3, p. 1564-1582, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/251335>. Acesso em: 17 maio 2025.

URBANI, G. L.; GRACIOSA, M. C. P.; BRAMBILA, M. C. V. (2020). **Delimitação de manchas de inundação na bacia do Córrego do Ipiranga, São Paulo – SP, Brasil, com modelagem hidrológico-hidráulica utilizando HEC-HMS / HEC-RAS**. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 17, n. 1, p. 1-15, 2020. Disponível em: <https://abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/740>. Acesso em: 17 maio 2025.

USACE (2023). UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS – River Analysis System, Version 6.6**. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2023. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Acesso em: 13 maio 2025.

VICENTE, B., M. (2023). **Comparação entre estimativas de mancha de inundação devido a ruptura hipotética de barragem utilizando diferentes bases topográficas**. 2023. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/234211>. Acesso em: 13 maio 2025.

APÊNDICE I
Script de correção das calhas

```

from osgeo import gdal
import numpy as np

# === CONFIGURAÇÕES ===
input_raster = r'D:\caminho_da_imagem (.tif)\imagem.tif'
output_raster = r'D:\caminho\para\imagem_tratada.tif'
declividade_desejada = 0.0X # ajuste conforme necessário
direcao = 'linha' # ou 'coluna'
# =====

# Abrir raster
ds = gdal.Open(input_raster, gdal.GA_ReadOnly)
band = ds.GetRasterBand(1)
array = band.ReadAsArray().astype(float)

# Obter metadados
geotransform = ds.GetGeoTransform()
projection = ds.GetProjection()
nodata = band.GetNoDataValue()

# Passo 1: Substituir todos os valores pelo menor valor
valor_minimo = np.min(array[array != nodata])
array_base = np.where(array != nodata, valor_minimo, nodata)

# Passo 2: Adicionar declividade linear
linhas, colunas = array.shape
declive_array = np.zeros_like(array_base)

if direcao == 'linha':
    for i in range(linhas):

```

```

    declive_array[i, :] = i * declividade_desejada
elif direcao == 'coluna':
    for j in range(colunas):
        declive_array[:, j] = j * declividade_desejada
else:
    raise ValueError("Direção inválida. Use 'linha' ou 'coluna'.")

# Aplicar declividade onde não for NoData
resultado = np.where(array_base != nodata, array_base + declive_array, nodata)

# Salvar novo raster
driver = gdal.GetDriverByName('GTiff')
saida = driver.Create(output_raster, colunas, linhas, 1, gdal.GDT_Float32)
saida.SetGeoTransform(geotransform)
saida.SetProjection(projection)
saida.GetRasterBand(1).WriteArray(resultado)

if nodata is not None:
    saida.GetRasterBand(1).SetNoDataValue(nodata)

saida.FlushCache()
saida = None
ds = None

print("Processamento concluído.")

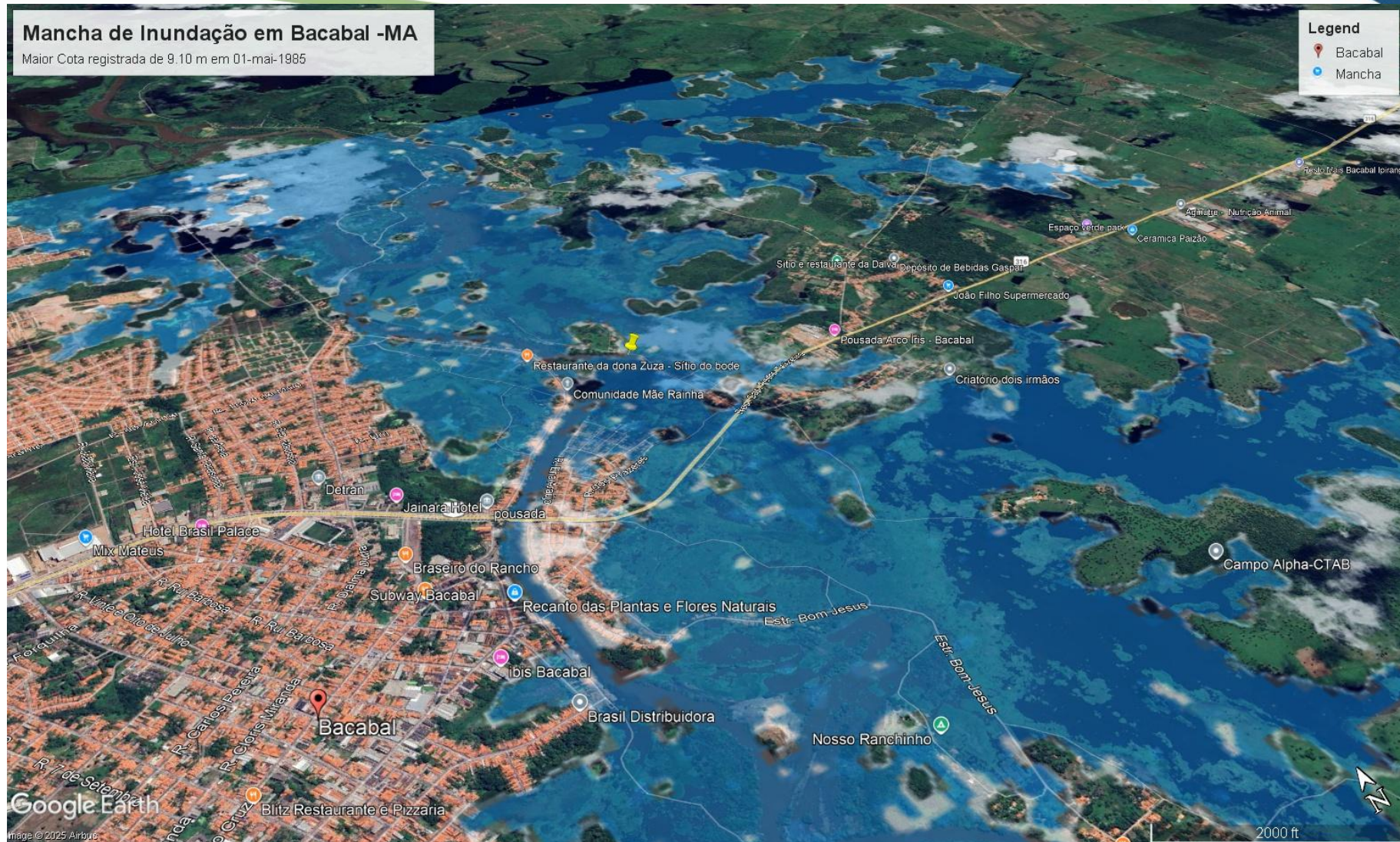
```

APÊNDICE II

Imagens exportadas para o Google Earth®

Mancha de Inundação em Bacabal -MA

Maior Cota registrada de 9.10 m em 01-mai-1985

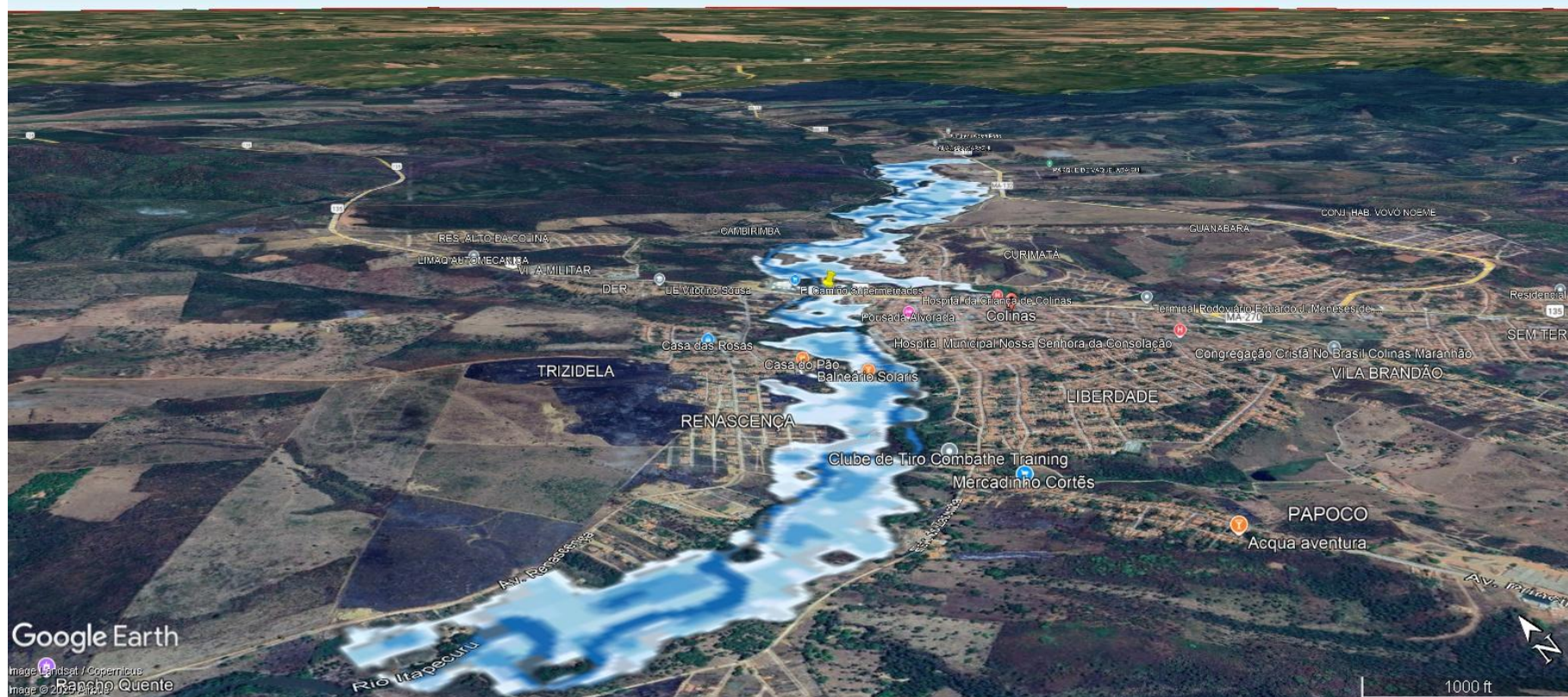


Mancha de Inundação em Colinas -MA

Maior Cota registrada de 4.33 m em 03-mai-1985

Legend




- Colinas
- Hospital
- Mancha



Mancha de Inundação em Caxias -MA

Maior Cota registrada de 7.59 m em 26-abr-1974

Legend

-  Caxias
-  Igreja de Santo Antônio
-  Mancha



Google Earth

Image Landsat / Copernicus
Image © 2025 Airbus
Image © 2025 Maxar Technologies

Mancha de Inundação em Pedreiras e Trizidela do Vale - MA

Maior Cota registrada de 10.10 m em 29-abr-1974

