



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL

ROSA TICIANE DE OLIVEIRA ALMEIDA

MAPEAMENTO DE PERIGO DE INUNDAÇÃO INCORPORANDO O
INDICADOR TEMPO

Natal/RN
2019

ROSA TICIANE DE OLIVEIRA ALMEIDA

**MAPEAMENTO DE PERIGO DE INUNDAÇÃO INCORPORANDO O
INDICADOR TEMPO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador (a): Prof.^a Dr.^a Joana Darc
Freire de Medeiros

Natal/RN
2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistemas de Bibliotecas – SISBI
Catalogação da Publicação na Fonte: Biblioteca Central Zila Mamede

Almeida, Rosa Ticiane de Oliveira.

Mapeamento de perigo de inundação incorporando o indicador tempo /
Rosa Ticiane de Oliveira Almeida. - 2019.

46 f.: il.

Dissertação (mestrado) -Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental. Natal, RN, 2019.

Orientadora: Prof. Dra. Joana Darc Freire de Medeiros.

1. Mapa de perigo - Dissertação. 2. Inundação - Dissertação. 3.
HECRAS - Dissertação. I. Medeiros, Joana Darc Freire de. II. Título

RN/UF/BCZM

CDU 556.53

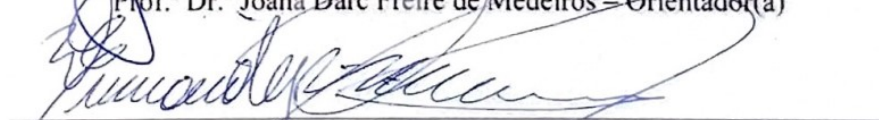
ROSA TICIANE DE OLIVEIRA ALMEIDA

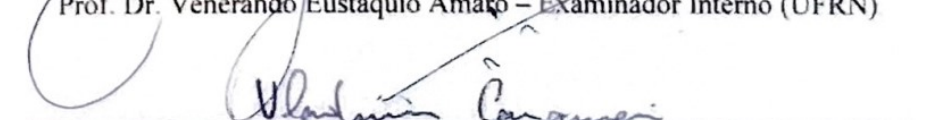
**MAPEAMENTO DE PERIGO DE INUNDAÇÃO INCORPORANDO O
INDICADOR TEMPO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental, da Universidade Federal do
Rio Grande do Norte, como requisito
parcial à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Sanitária e Ambiental.

BANCA EXAMINADORA


Prof.ª Dr.ª Joana Darc Freire de Medeiros – Orientador(a)


Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro – Examinador Interno (UFRN)


Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza – Examinador Externo (UFAL)

Natal/RN, 30 de julho de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, principalmente aos meus pais Rosa e Aurelio, por serem tão presentes em todas as etapas de minha vida, sobretudo durante a pós-graduação. A eles agradeço por cada incentivo, desde o momento da preparação para o processo seletivo, até a entrega desta dissertação.

Meu imenso agradecimento à minha orientadora Joana Darc Freire de Medeiros por todo o apoio, atenção e disponibilidade dedicados a mim e a esta pesquisa. Ser guiada no mundo acadêmico por alguém que admiro como pessoa, docente e cientista é um presente.

À professora Maria de Fátima Alves, por ser tão solícita e gentil em sanar muitas de minhas dúvidas.

Aos professores Venerando Eustáquio Amaro e Vladimir Caramori Borges de Souza por aceitarem compor a banca examinadora da minha defesa de dissertação e por suas observações enriquecedoras.

Ao meu namorado Pablo Rodrigues, por ter sido tão companheiro e compreensivo com as minhas ausências – necessárias para que eu pudesse conciliar trabalho e a alta carga de estudos exigida por um mestrado. Agradeço ainda mais por sua presença em muitos momentos nos quais precisei ficar em casa me dedicando à pesquisa.

As minhas amadas amigas de infância, Marcella Simonetti e Paula Fernandes, obrigada por sempre serem o meu refúgio em meio às responsabilidades da vida adulta. Vocês renovam as minhas energias. Ter uma amizade como a nossa, há tantos anos, é um privilégio de poucos.

Aos colegas de trabalho do Setor de Coleções Especiais da Biblioteca Central Zila Mamede, principalmente minhas companheiras de turno Tercia Marques e Maria do Socorro, obrigada por cada incentivo e conselhos ao final dessa jornada. Suas formações em biblioteconomia, sobretudo a experiência acadêmica adquirida em seus respectivos mestrados, contribuíram para conversas muito enriquecedoras.

Por fim, agradeço aos amigos que conheci no LARHISA – em especial Alexya Brendha, Jéssica Freire, Karolyne Breckenfeld e Maria Helena – agradeço por dividirem esta estrada comigo. Nossa convivência tornou as dificuldades inerentes à pós-graduação um pouco mais leves.

MAPEAMENTO DE PERIGO DE INUNDAÇÃO INCORPORANDO O INDICADOR TEMPO

RESUMO

A urbanização não planejada e a consequente ocupação indevida das áreas marginais dos corpos hídricos têm causado danos materiais, ambientais e socioeconômicos à sociedade devido às inundações. Portanto, prever com fidedignidade o comportamento do sistema hidrológico e os impactos de cada evento de cheia sobre as atividades antrópicas é importante para minimizar estes danos. Para tanto, pode-se realizar um mapeamento do perigo de inundação. Os trabalhos que envolvem o tema geralmente utilizam a frequência, a profundidade e a velocidade como principais indicadores. No entanto, o tempo de duração da cheia também é um critério relevante, visto que inundações de longa duração podem causar erosão do solo, poluição da água e morte de culturas agrícolas. Assim, o objetivo desta pesquisa é realizar, utilizando como local de estudo o baixo curso do rio Piranhas-Açu, um mapeamento de perigo de inundação que considere além dos critérios usuais, o tempo de permanência da água. Para tanto, foi realizada, através do software HEC-RAS, a modelagem hidráulica do corpo hídrico – da qual foram gerados mapas de velocidade, de profundidade e de tempo de duração para 5, 10, 20, 50 e 100 anos de tempo de retorno. A partir do mapa de perigo para cada tempo de retorno foi obtido o mapa de perigo da região, com base na média ponderada pela frequência de ocorrência. Os mapas de perigo dos indicadores para cada período de retorno se mostraram úteis, sendo possível verificar a influência de cada indicador sobre o perigo da cheia. No entanto, a metodologia para gerar o mapa global amorteceu o perigo de inundação, fazendo com que a região apresentasse perigo baixo. Os resultados apontam que as inundações alcançam grandes profundidades, que as águas escoam lentamente, resultando em tempo de duração da cheia elevado.

Palavras-chave: mapa de perigo; tempo de duração da inundação; HEC-RAS.

FLOOD HAZARD MAPPING INCORPORATING TIME INDICATOR

ABSTRACT

Unplanned urbanization and the consequent river banks undue occupation have caused material, environmental and socio-economic damage to society due to floods. Therefore, to predict with confidence the hydrological system behavior and the impacts of each flood event on the anthropic activities is important to minimize these damages. To do this, a flood hazard mapping can be done. The works that involve the topic usually use frequency, depth and speed as main indicators. However, the flood duration is also a relevant parameter, because long duration floods can cause soil erosion, water pollution and agricultural crops loss. Thus, the objective of this research is to do, using as study site the low course of the Piranhas-Açu River, a flood hazard mapping that considers beyond the usual criteria, the time of permanence of water. For this, was done the river hydraulic modeling with the HEC-RAS software, that provided velocity, depth and duration flood maps for 5, 10, 20, 50 and 100 years return period. From the hazard map for each return period the hazard map of the region was obtained, based on the frequency-weighted average. The indicators hazard maps for each return period were useful, and it was possible to verify the influence of each indicator on the flooding hazard. However, the methodology for generating the global map decreased the flooding hazard, causing the map showing low hazard. The results indicate that the floods reach high depths, that the water flows slowly, resulting in high duration time flood.

Keywords: hazard map; duration flood; HEC-RAS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Local de estudo: áreas inundáveis no Baixo-Açu.....	13
Figura 2 – Precipitação média mensal da Estação Pluviométrica Açú de código 536021 (ANA, 2019)	14
Figura 3 – Vazões diárias registradas pela estação fluviométrica Sítio Acauã II da ANA (ANA, 2018)	15
Figura 4 – Geometria do rio Piranhas- Açú desenhada pelo software HECGeo-RAS para modelagem hidráulica do rio Piranhas-Açu.....	17
Figura 5 – Seções interpoladas pelo software HEC-RAS entre as seções conhecidas da geometria do rio Piranhas- Açú para modelagem hidráulica.....	18
Figura 6 – Perfis das seções transversais traçadas através do software HEC-RAS para modelagem hidráulica do rio Piranhas-Açu de número (a) 32000; (b) 40000; (c) 48000; (d) 68000.....	19
Figura 7 – Metodologia para geração de mapa de perigo com certo tempo de retorno.....	20
Figura 8 – Áreas inundadas no município de Ipanguaçu durante evento de cheia cuja vazão foi a maior registrada no ano de 2009 (ROUSSOS, 2009 apud FERNANDES JUNIOR, 2009b).....	21
Figura 9 – Hidrogramas de projeto da região do Baixo-Açu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.	22
Figura 10 – Vazões diárias de um evento de cheia com duração maior que 60 dias na região do Baixo-Açu.....	23
Figura 11 – Mapas de profundidade de inundação na região do Baixo-Açu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.....	25
Figura 12 – Mapas de profundidade de inundação no município de Ipanguaçu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.....	26

Figura 13 – Mapas de profundidade no município de Alto do Rodrigues para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.....	27
Figura 14 – Mapas de profundidade no município de Carnaubais para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.....	28
Figura 15 – Mapas de profundidade no município de Pendências para os tempos de retorno d (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.....	29
Figura 16 – Mapas de profundidade no município de Açu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.....	30
Figura 17 – Mapas de velocidade de fluxo de inundação na região do Baixo-Açu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.....	32
Figura 18 – Mapas de tempo de duração de inundação na região do Baixo-Açu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.....	33
Figura 19 – Áreas agrícolas nos municípios de Açu e Ipanguaçu atingidas por cheia de tempo de retorno de 100 anos, com elevado tempo de duração.....	34
Figura 20 – Mapas de perigo dos indicadores (a) profundidade; (b) velocidade; (c) duração; e (d) mapa de perigo geral para tempo de retorno de 5 anos.....	36
Figura 21 – Mapas de perigo dos indicadores (a) profundidade; (b) velocidade; (c) duração; e (d) mapa de perigo geral para tempo de retorno de 10 anos.....	37
Figura 22 – Mapas de perigo dos indicadores (a) profundidade; (b) velocidade; (c) duração; e (d) mapa de perigo geral para tempo de retorno de 20 anos.....	38
Figura 23 – Mapas de perigo dos indicadores (a) profundidade; (b) velocidade; (c) duração; e (d) mapa de perigo geral para tempo de retorno de 50 anos.....	39
Figura 24 – Mapas de perigo dos indicadores (a) profundidade; (b) velocidade; (c) duração; e (d) mapa de perigo geral para tempo de retorno de 100 anos.....	40
Figura 25 – Mapa de perigo de inundação da região do Baixo-Açu.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limiares dos indicadores para construção do mapa de perigo.....	19
Tabela 2 – Vazões máximas segundo distribuições Log Normal, Gumbel e Log Pearson III.....	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 METODOLOGIA.....	12
2.1. ÁREA DE ESTUDO.....	12
2.2. ESTIMATIVA DA VAZÃO E HIDROGRAMA DE PROJETO.....	15
2.3. MODELAGEM HIDRÁULICA.....	16
2.4. MAPA DE PERIGO.....	19
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
3.1. VAZÕES MÁXIMAS E HIDROGRAMAS DE PROJETO.....	21
3.2. MAPAS DE PROFUNDIDADE.....	23
3.3. MAPAS DE VELOCIDADE DE FLUXO.....	31
3.4. MAPAS DE TEMPO DE DURAÇÃO.....	31
3.5. MAPAS DE PERIGO.....	34
3.6. MAPA DE PERIGO GERAL DA REGIÃO DO BAIXO-AÇU.....	35
4 CONCLUSÕES.....	41
REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Em condições naturais, as águas dos rios transbordam seus leitos periodicamente e invadem os terrenos marginais, caracterizando os ciclos de cheia. Devido à urbanização não planejada, contudo, as cidades crescem desordenadamente e ocupam o espaço de extravasamento natural do rio, resultando em prejuízos à sociedade em consequência das inundações (RIBEIRO NETO et al., 2015). Esta ocupação indevida também ocorre na área rural, uma vez que a proximidade dos cursos d'água facilita a irrigação, estimulando o estabelecimento de áreas agrícolas nesses locais (VIGLIONE et al., 2014).

Tendo em vista os danos materiais, ambientais e socioeconômicos causados pelas inundações, prever com fidedignidade o comportamento do sistema hidrológico e os impactos de cada evento de cheia sobre as atividades antrópicas é importante para minimizar estes danos (SARHADI; SOLTANI; REZA, 2012). Para tanto, pode-se realizar um mapeamento do risco ou do perigo de inundação, que pode ser utilizado para nortear o planejamento do uso e ocupação do solo, a fim de evitar que sejam ocupadas indevidamente as áreas de extravasamento natural de rios (BÜCHELE et al., 2006).

Primeiramente, se faz necessário diferenciar conceitualmente o que seria mapa de inundação, mapa de perigo e mapa de risco. O primeiro deles consiste na simples delimitação das áreas inundadas e de suas alturas de lâmina d'água, sendo cada área relacionada a um período de retorno. Basicamente, indica a extensão da inundação (MONTEIRO; KOBIYAMA, 2013).

Já o segundo, o mapa de perigo de inundação, traz informações acerca da frequência e intensidade das inundações. Ou seja, acrescenta ao mapa de inundação dados sobre a magnitude do evento (SCHANZE, 2006). Segundo Moel, Ven Alphen e Aerts (2009), os indicadores de perigo são: velocidade, duração, taxa de aumento da lâmina d'água etc – chamados de indicadores físicos.

Para entender o terceiro, é importante destacar que o risco é definido como a combinação entre perigo e vulnerabilidade (BIRKMANN et al., 2013; MERZ et al., 2010; GOERL et al., 2012). A vulnerabilidade indica o quanto um elemento pode sofrer danos devido à sua exposição ou à sua habilidade de se recuperar ou resistir às situações adversas (ADGER, 2006; RIBEIRO NETO; BATISTA; COUTINHO, 2016). Logo, o mapa de risco adiciona ao mapa de perigo informações sobre os potenciais prejuízos que a inundação causa numa determinada área. Em sua concepção estão inclusos indicadores como distribuição populacional no espaço, classe econômica dos habitantes, tipos de edificações, tipos de

cultivo agrícola, presença de ativos ambientais ou econômicos etc.

Diferentes metodologias para avaliar risco e perigo de inundação surgiram e foram aprimoradas nas últimas décadas (GICHAMO et al., 2012; HARTANTO et al., 2011; XIA et al., 2011). Balica et al. (2013) as separou em duas categorias: as abordagens paramétricas, que visam usar dados de informação prontamente disponíveis para criar uma imagem da vulnerabilidade de uma área; e as abordagens determinísticas, as quais utilizam modelagens fisicamente associadas aos modelos de avaliação de danos para fornecer uma avaliação do risco de inundação em uma área.

Os métodos para geração de mapas de perigo geralmente utilizam indicadores, tais como: profundidade; velocidade; combinação entre profundidade e velocidade; energia; força e intensidade (RIBEIRO NETO; BATISTA; COUTINHO, 2016); frequência e intensidade (MONTEIRO; KOBAYAMA, 2013), sendo a intensidade conceituada pelos autores como o produto da profundidade e da velocidade; ou velocidade, profundidade e frequência (DERDOUS et al., 2015; DUTTA et al., 2010; GONÇALVES et al., 2015).

Como se pode observar nos estudos que mapeiam perigo, os principais indicadores utilizados são a profundidade e a velocidade de escoamento das inundações. No entanto, outro fator que influencia o perigo da inundação, por ter potencial de trazer dano à construção, é o tempo de duração da cheia (THIEKEN et al., 2005). Logo, este é um indicador que precisa ser levado em consideração, uma vez que inundações de longa duração podem causar consequências nocivas, como a erosão do solo e a poluição da água. Ademais, muitas culturas durante períodos críticos de crescimento são sensíveis às condições de solo anaeróbico causadas pelo excesso de água oriundo de inundações prolongadas (MORRIS e HESS, 1988).

Um exemplo de local que enfrenta este tipo de problema periodicamente é a bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu. Apesar de estar totalmente inserida no semiárido e por isso estar sujeita a longos períodos de seca, foram registradas 211 notificações de eventos críticos de cheia na bacia nos anos de 1991 a 2012, sendo 55% delas relativas a inundações bruscas. Um dos municípios que mais registrou ocorrências foi o de Ipanguaçu/RN – localizado no trecho final do rio Açu, a jusante da barragem Armando Ribeiro Gonçalves (ANA, 2016).

Particularmente nos anos de 2008 e 2009 houve uma grande enchente no Rio Piranhas-Açu que ocasionou amplas inundações em áreas urbanas e em grandes extensões de terra usadas para atividades agropecuárias, petrolíferas, de carcinicultura e salineiras, resultando em danos ambientais e socioeconômicos (IDEMA, 2009).

Tendo em vista os prejuízos supracitados, é importante que se façam estudos que

mensurem o risco de inundação da região. Além disso, considerando que umas das principais atividades econômicas é a agricultura irrigada, com destaque para a fruticultura, a bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu é um local onde o tempo de duração é, provavelmente, um indicador relevante para mensurar o perigo de inundação.

Portanto, o objetivo desta pesquisa é realizar um mapeamento de perigo de inundação que considere não só os critérios usuais de frequência de inundação, de velocidade do fluxo e de altura da lâmina d'água, como também o tempo de permanência da água nos locais atingidos.

2 METODOLOGIA

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa está contida na bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu, compreendendo mais precisamente o baixo curso do rio Piranhas-Açu, a jusante da barragem Armando Ribeiro Gonçalves (figura 1).

A bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu tem uma área de drenagem de 43.683 km², dividindo-se entre os estados da Paraíba (60%) e do Rio Grande do Norte (40%). Seu principal curso d'água é formado pelo rio Piancó, que se junta ao rio Piranhas ainda no estado da Paraíba. Após essa confluência, passa a seguir com o nome de Piranhas em direção ao Rio Grande do Norte. Ao passar pela barragem Armando Ribeiro Gonçalves, passa a se chamar Açu e recebe dois afluentes principais, o rio Paraú e o rio Pataxó, antes de desaguar no mar (ANA, 2016).

De acordo com o último censo demográfico realizado pelo IBGE, sua população é de 1.406.808 habitantes, sendo que 69% concentram-se em centros urbanos e 31% em áreas rurais. Especificamente no Baixo-Açu, o município mais populoso é Açu, com 53.227 habitantes (ANA, 2016).

O Baixo-Açu, recorte espacial deste estudo, cujo território está inserido totalmente em clima semiárido, tem precipitação média anual de 507,2 mm e apresenta maior concentração de chuvas nos meses de março e abril, quando acumula mais de 60% do total precipitado ao longo do ano (figura 1). O restante dos meses apresenta totais pluviométricos bem inferiores, sendo o período de setembro a novembro o mais seco (MEDEIROS, 2018). Além disso, a região apresenta um padrão de forte variabilidade interanual, portanto, alternam-se anos de pluviosidade acima da média, regular e anos consecutivos de valores abaixo da média (ANA,

2016).

A temperatura média do Baixo-Açu é em torno dos 27°C, a máxima é em torno de 33,4°C e a mínima de 22°C, sendo novembro e dezembro o período mais quente e o compreendido entre junho e agosto o mais frio. Ademais, a umidade relativa do ar varia entre 60 a 76%, sendo maior em direção ao litoral (MEDEIROS, 2018).

Figura 1 – Local de estudo: áreas inundáveis no Baixo-Açu

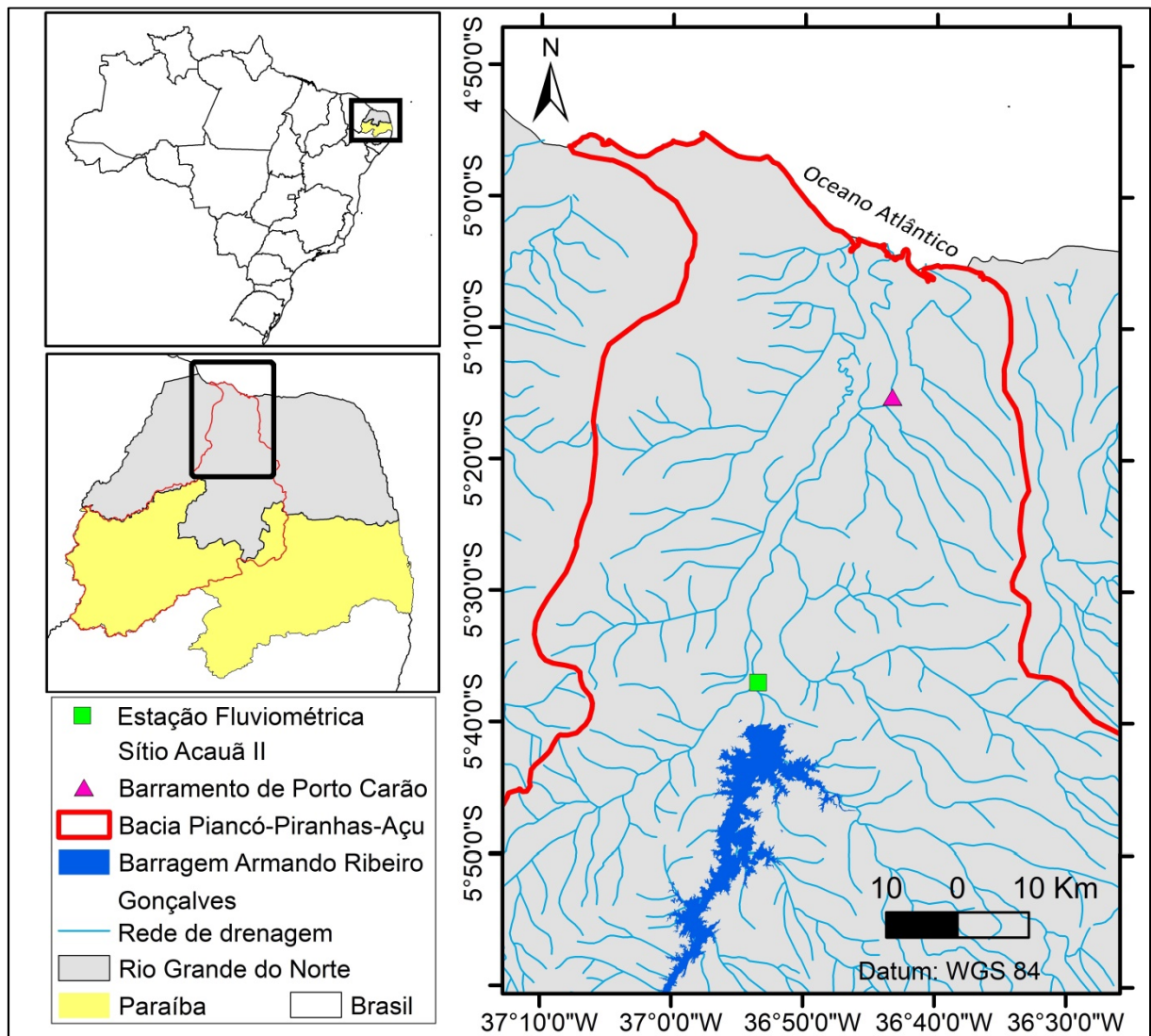
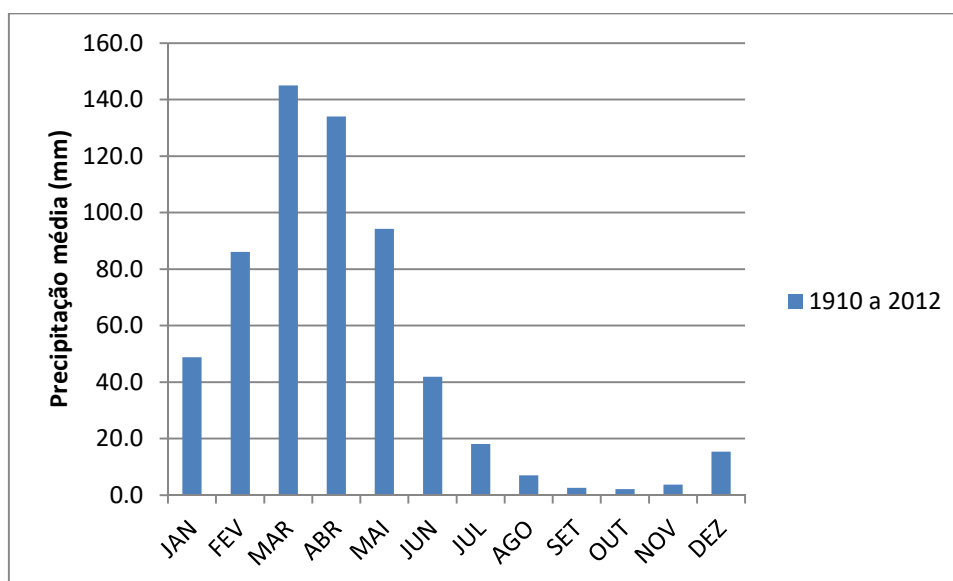


Figura 2 – Precipitação média mensal da Estação Pluviométrica Açú de código 536021 (ANA, 2019)



A bacia do rio Piranhas-Açu é formada basicamente por dois domínios geológicos. A montante da barragem Armando Ribeiro Gonçalves há predominância de embasamento cristalino e no baixo curso prevalecem os depósitos sedimentares. Estas formações possuem maior porosidade e consequentemente, maior capacidade de infiltração de água. Ademais, a porção do Baixo-Açu é caracterizada por ser uma grande planície e os solos que se destacam são: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Cambissolo Háplico Ta Eutrófico, Neossolo Flúvico Ta Eutrófico (ANGELIM, 2006).

Na área de estudo destacam-se a pecuária extensiva e a fruticultura irrigada, sendo esta uma das principais atividades econômicas da bacia e uma das que mais sofre nos períodos de cheia. Como os governos estaduais e federal adotaram a agricultura irrigada como estratégia de desenvolvimento regional, existe um conjunto de perímetros operando com grau de sucesso variável na região. Por exemplo, os municípios de Ipanguaçu, Alto do Rodrigues e Afonso Bezerra possuem 5168 hectares de área irrigável e implantada (CBH Piancó-Piranhas-Açu, 2019).

Já atividade industrial compreende a indústria têxtil, curtumes, sal, cerâmica, laticínios e a indústria de petróleo e gás nas proximidades de Alto do Rodrigues. Além disso, na região do Baixo-Açu existe grandes áreas de exploração da carcinicultura (ANA, 2016).

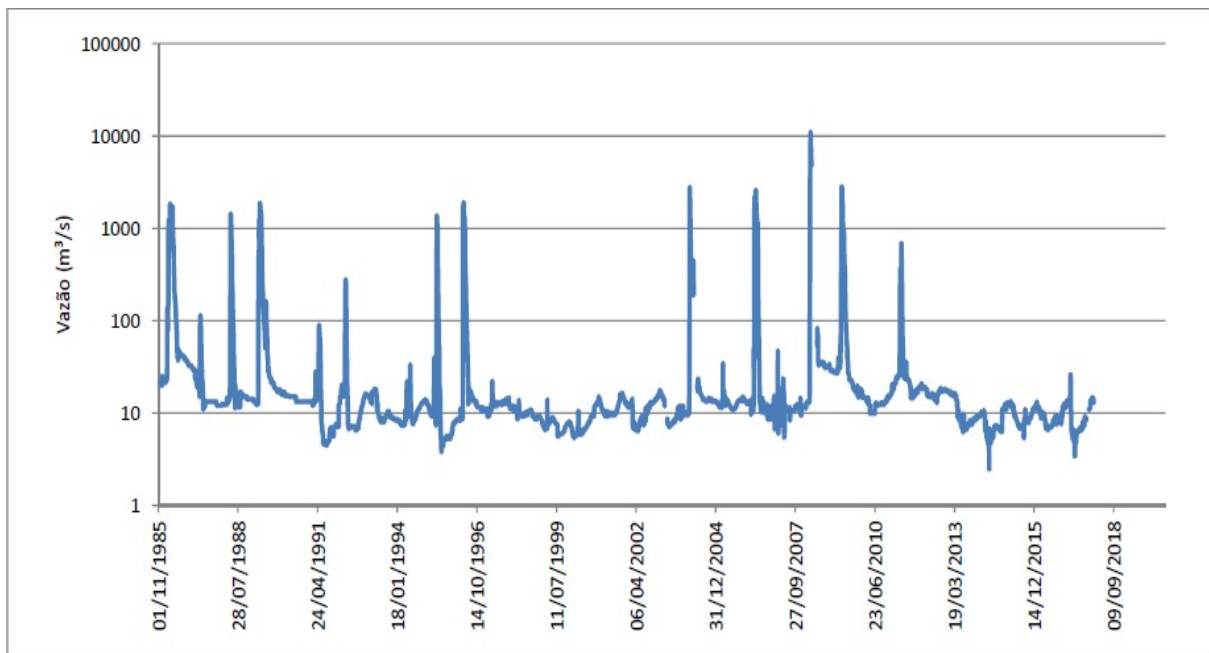
Em consequência do uso predador da caatinga, vegetação predominante, ocorreu uma grande perda de biodiversidade e o solo foi exposto à ação erosiva das chuvas. O assoreamento dos reservatórios e rios decorrente dessa erosão contribui para as enchentes que vem se verificando em anos com muitas chuvas (ANA, 2016).

O mapeamento de perigo de inundação foi realizado nas áreas que inundam a jusante da Armando Ribeiro Gonçalves até o barramento de Porto Carão, que evita o retorno das águas salinas, na cidade de Pendências. Entre esses dois pontos, o Piranhas-Açu perpassa as cidades de Itajá, Açú, Ipanguaçu, Carnaubais e Alto do Rodrigues.

2.2. ESTIMATIVA DA VAZÃO E HIDROGRAMA DE PROJETO

Para estimar as vazões afluentes ao Baixo-Açu foram utilizados os dados da estação fluviométrica Sítio Acauã II (código 37710150) da Agência Nacional de Águas - ANA, localizada a jusante da Armando Ribeiro Gonçalves próximo a BR-304 (figura 1). Esta estação monitora as vazões diárias no rio Piranhas-Açu desde o ano de 1985 até 2017 (ANA, 2018), representadas no gráfico a seguir (figura 3)

Figura 3 – Vazões diárias registradas pela estação fluviométrica Sítio Acauã II da ANA (ANA, 2018)



Para obter as vazões para os tempos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos foram testadas as funções de distribuições Log Normal, Log Pearson III e Gumbel. A distribuição que mais se adequa aos dados históricos observados foi selecionada utilizando-se o teste de aderência Kolmogorov Smirnov. Segundo Silvino et. al. (2007), este teste foi introduzido em 1933 e sua definição tem por base a equação 1.

$$D_{obs} = \text{Max}|F(x) - S(x)| \quad (1)$$

Onde $F(x)$ e $S(x)$ são as funções de distribuição teórica e observada, respectivamente.

Para realizar o teste, deve-se comparar o maior valor de D_{obs} com D_{tab} , que é o desvio máximo tabelado, encontrado em tabelas adequadas. Caso $D_{obs} < D_{tab}$, não se rejeita a hipótese de que a distribuição de probabilidade teórica pode representar os dados observados, ou seja, a amostra provém de uma população que segue a distribuição de probabilidade sob teste.

Os hidrogramas afluentes foram estimados para os mesmos períodos de retorno utilizando-se a metodologia Estatística dos Hidrogramas, de Pfafstetter, a qual utiliza a estatística das vazões máximas observadas de diferentes durações para construir um hidrograma característico associado a um risco (TUCCI, 2015).

Sendo assim, a partir da série de vazões de 1 dia proveniente da estação fluviométrica supracitada, foram obtidas séries de vazões com duração de 2, 3, 5, 10, 15, 30 e 45 dias. Para cada uma dessas oito séries foram determinadas as vazões anuais máximas para os tempos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos utilizando a função de distribuição selecionada na etapa anterior.

2.3. MODELAGEM HIDRÁULICA

A modelagem hidráulica foi realizada através do software HEC-RAS 5 (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), o qual é capaz de simular o escoamento unidimensional ou bidimensional em regime permanente ou variável. Seu módulo 2D gera resultados como profundidades de enchentes distribuídas espacialmente, velocidades, tempos de chegada de inundação, duração da inundação, tempos de recessão de inundações e tempo percentual inundado (USACE HEC, 2016). Para tanto, utiliza as vazões afluentes ao trecho e o Modelo Digital do Terreno (MDT).

Inicialmente foi realizado o pré-processamento utilizando a extensão HECGeo-RAS dentro do ArcGIS. Nesta etapa são desenhados o eixo do rio, suas margens e os prováveis limites máximos de inundação, bem como as seções transversais com base no modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo (figura 4).

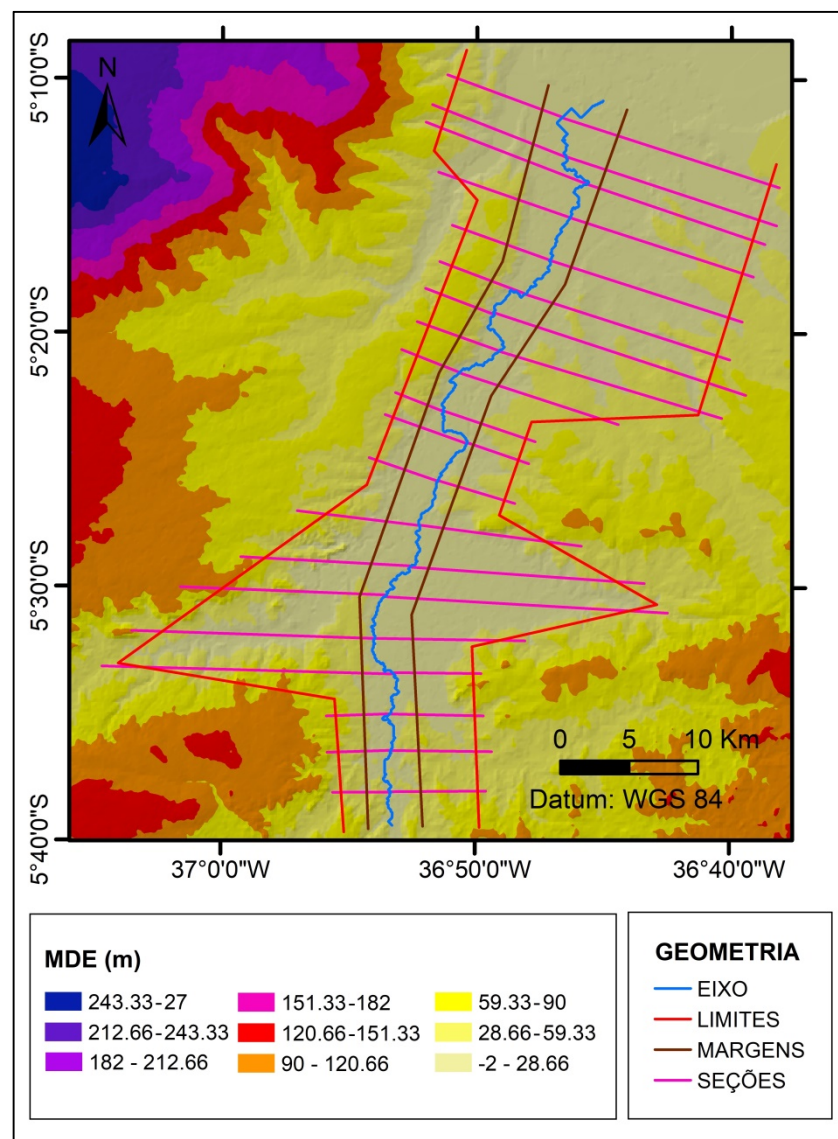
O Modelo Digital de Elevação utilizado é proveniente dos levantamentos realizados pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), executada pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Estes dados, cuja resolução espacial é de 90m, estão disponibilizados pelo Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite da EMBRAPA com uma prévia correção de falhas, sombras e distorções (MIRANDA, 2018).

Araújo et al. (2018) chegou a conclusão que dados SRTM de resolução espacial de 30 m, cuja precisão vertical para a América do Sul é de 6.20 m, possuem uma acurácia melhor na área do Vale do Açu, de 3,10 m. Os dados utilizados neste trabalho, de resolução espacial de 90m, tem essa mesma precisão vertical (RODRIGUEZ; MORRIS; BELZ, 2006). Portanto, provavelmente possuem uma acurácia mais precisa na região do Vale do Açu, adequada para este tipo de estudo.

O eixo do rio foi obtido a partir da direção do fluxo calculada com o *plugin* IPH-Hydro Tools desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (SIQUEIRA et al, 2016).

Ao longo do curso do rio foram traçadas 20 seções transversais, às quais foram atribuídas coordenadas tridimensionais com base no MDE.

Figura 4 – Geometria do rio Piranhas- Açu desenhada pelo software HECGeo-RAS para modelagem hidráulica do rio Piranhas-Açu



Após obtidas as características geométricas da área de estudo utilizando o HECGeo-RAS foi realizada a propagação da cheia utilizando o HEC-RAS. Para tanto, foi atribuído o coeficiente de rugosidade de Manning a cada seção tendo por base os valores recomendados por CHOW (1959) e considerando o rio Piranhas-Açu como um curso natural com calha principal parcialmente limpa, com presença de algumas pedras e arbustos, e uma planície de inundação com presença de grama. Assim, o valor do coeficiente de rugosidade utilizado foi de 0,035 para todas as seções estudadas.

Além do valor de 0,035, a modelagem ainda foi realizada com os números de Manning de valor 0,030 e 0,040 a fim de comparar os resultados e realizar uma melhor escolha. Foi observado que quanto maior o coeficiente, maior a mancha de inundação. No entanto, como diferença entre as manchas foi pequena, o valor 0,035 foi escolhido por ser intermediário.

Como o corpo hídrico é muito extenso, fez-se uso da ferramenta de interpolação de seções, a qual calcula seções médias entre duas seções conhecidas, de modo a diminuir as distâncias livres de escoamento (figura 5).

A figura 6 mostra as seções 32000, 40000, 48000 e 68000 (conforme numeração da figura 5).

Figura 5 – Seções interpoladas pelo software HEC-RAS entre as seções conhecidas da geometria do rio Piranhas- Açu para modelagem hidráulica

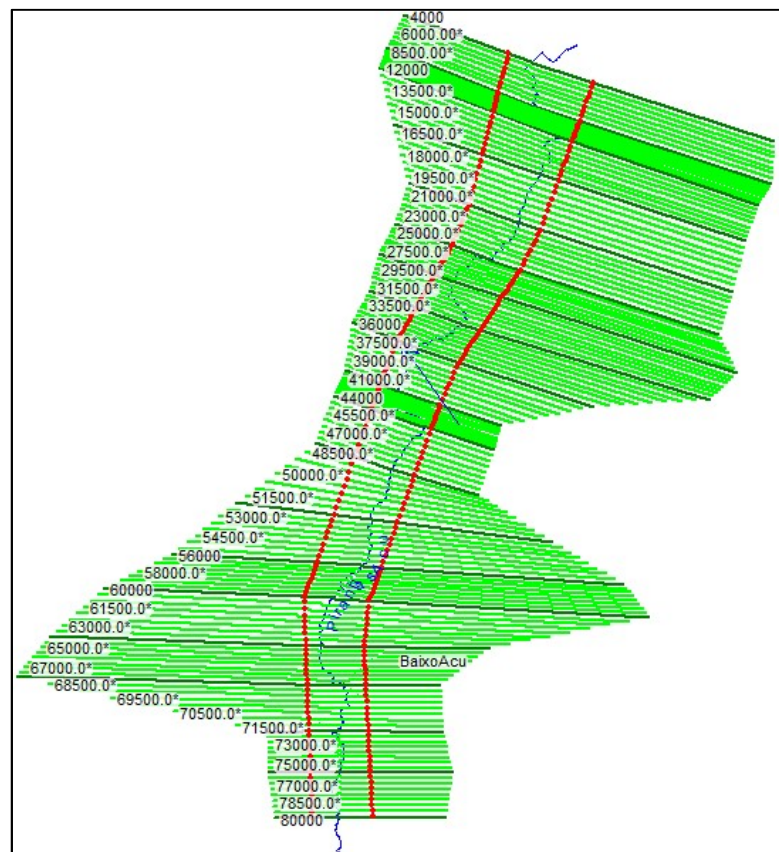
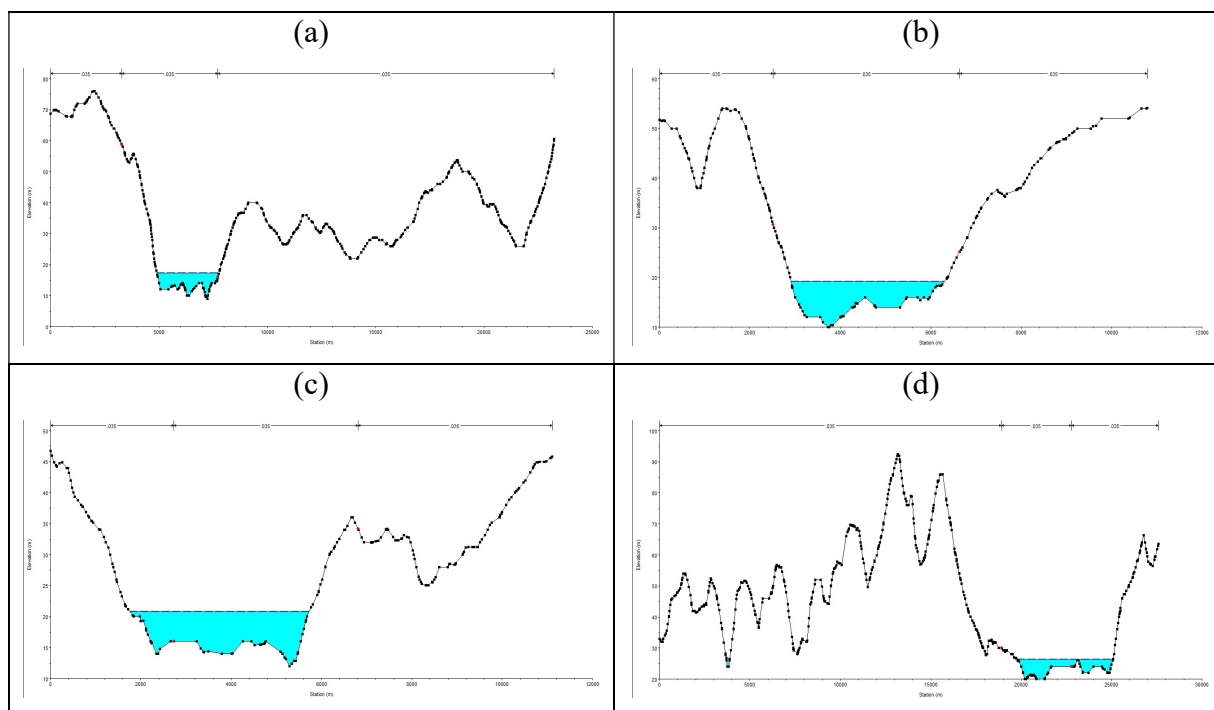


Figura 6 – Perfis das seções transversais traçadas através do software HEC-RAS para modelagem hidráulica do rio Piranhas-Açu de número (a) 32000; (b) 40000; (c) 48000; (d) 68000.



O escoamento foi simulado considerando regime não permanente e os hidrogramas foram inseridos como condição de contorno a montante. Dessa forma, foram gerados os mapas de contorno, profundidade e velocidade para vazão máxima, bem como o mapa de duração da inundação em dias para os tempos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

2.4. MAPA DE PERIGO

Para obter o mapa de perigo da área, foram utilizados como indicadores a profundidade da água, a velocidade de fluxo e o tempo de duração da inundação. Para tanto, foram utilizadas faixas de valores desses indicadores que indicam perigo baixo, médio ou alto estabelecidas com base nos estudos de Kwak et al. (2015), Ribeiro Neto et al. (2016) e Thielen et al. (2005), adaptados para a realidade da área estudada. Estas faixas de valores estão resumidas na tabela 1:

Tabela 1 – Limiares dos indicadores para construção do mapa de perigo

Indicador	Perigo baixo	Perigo médio	Perigo alto
Profundidade (m)	0,00 - 0,60	0,60 - 1,20	> 1,20
Velocidade (m/s)	0,00 - 0,60	0,60 - 1,20	> 1,20
Tempo (dias)	0 - 7	7 - 15	> 15

Fonte: Adaptado de Kwak et al. (2015), Ribeiro Neto et al. (2016) e Thielen et al. (2005)

De posse dessa informação, todos os mapas gerados pela simulação hidráulica foram reclassificados e a seus pixels foi atribuído um valor de 1, 2 ou 3 – respectivamente para perigo baixo, médio ou alto, de acordo com a faixa que o indicador se encontra.

Após esse procedimento foi gerado, para cada um dos tempos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos, um mapa cujos valores dos pixels são as médias dos valores dos mapas de perigo dos indicadores velocidade, altura de lâmina d'água e tempo de duração (figura 7). Em seguida, foi realizada uma média ponderada pela frequência de ocorrência de cada um desses mapas, a fim de gerar um único mapa de perigo da região (equação 2).

$$MP = \frac{(0,2 \cdot MP_{TR5}) + (0,1 \cdot MP_{TR10}) + (0,05 \cdot MP_{TR20}) + (0,02 \cdot MP_{TR50}) + (0,01 \cdot MP_{TR100})}{0,38} \quad (2)$$

Onde: MP = perigo global;

MP_{TR5} = perigo com tempo de retorno de 5 anos;

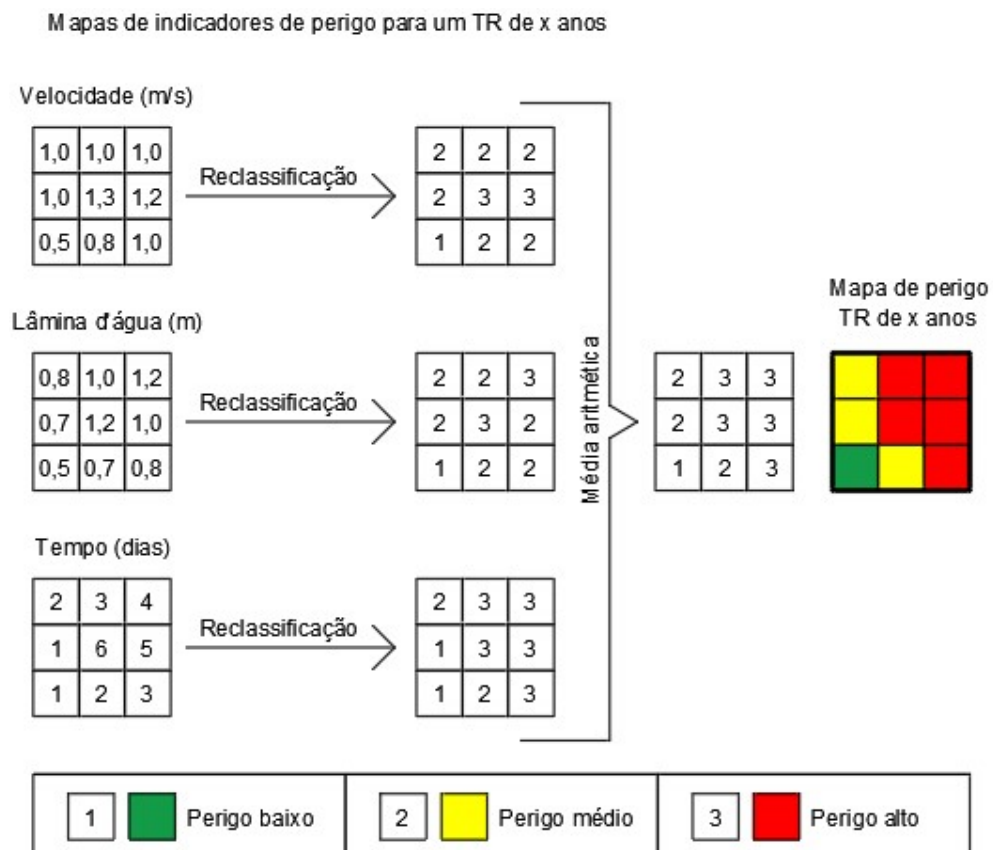
MP_{TR10} = perigo com tempo de retorno de 10 anos;

MP_{TR20} = perigo com tempo de retorno de 20 anos;

MP_{TR50} = perigo com tempo de retorno de 50 anos;

MP_{TR100} = perigo com tempo de retorno de 100 anos.

Figura 7 – Metodologia para geração de mapa de perigo com certo tempo de retorno



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. VAZÕES MÁXIMAS E HIDROGRAMAS DE PROJETO

A estação fluviométrica Sítio Acauã II apresenta uma série histórica de 33 anos de dados diários, com uma média de $58,44 \text{ m}^3/\text{s}$ e desvio padrão de 350,5, indicando claramente uma elevada variabilidade temporal das vazões. O máximo valor de vazão registrado nesta estação foi de $11.073,18 \text{ m}^3/\text{s}$ no dia 5 de janeiro de 2008. Neste período foi registrada uma das maiores cheias da região do Baixo-Açu (CHUVA..., 2008; FRANCISCO, 2008). No ano seguinte, fortes cheias também atingiram a região (FERNANDES JUNIOR, 2009a; FERNANDES JUNIOR, 2009b; MACEDO, 2009), tendo sido registrada uma vazão máxima na estação de $2.844,64 \text{ m}^3/\text{s}$ no dia 2 de maio de 2009 (figura 8).

Figura 8 – Áreas inundadas no município de Ipanguaçu durante evento de cheia cuja vazão foi a maior registrada no ano de 2009 (ROUSSOS, 2009 apud FERNANDES JUNIOR, 2009b)



As vazões máximas para os tempos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos, segundo as distribuições Log Normal, Gumbel e Log Pearson III, para 1 dia de duração (tabela 2) mostraram valores diferentes dos obtidos por Medeiros (2018) e SEMARH (2013). Nestes trabalhos, em todas as distribuições, a vazão para o tempo de retorno de 5 anos é bem maior

do que a obtida por esta pesquisa. No entanto, a vazão obtida para 100 anos de retorno é intermediária aos valores das vazões obtidas por esses trabalhos.

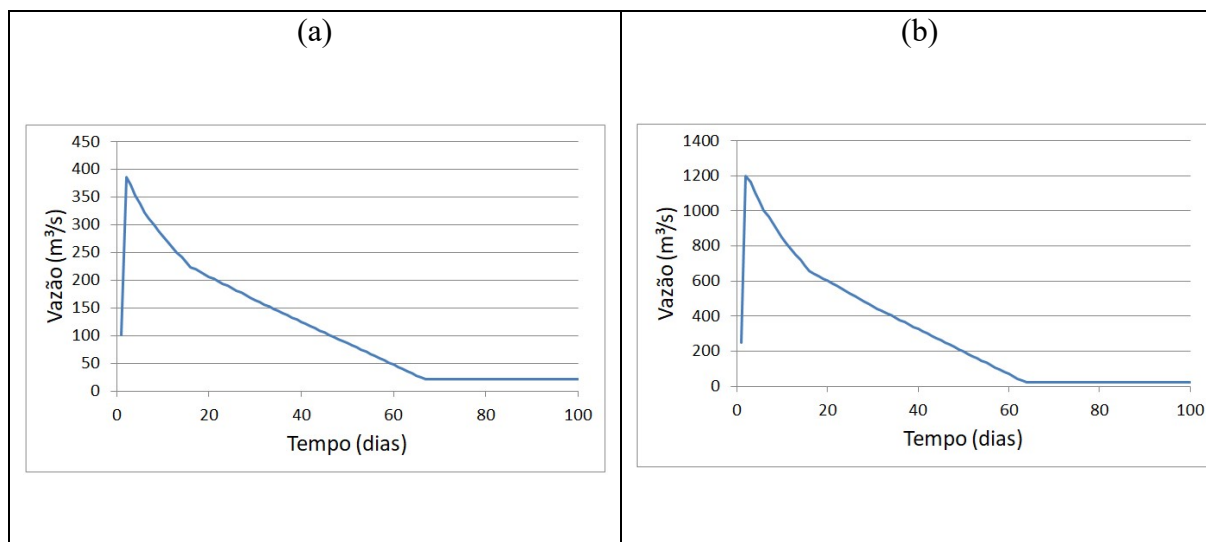
O teste de aderência Kolmogorov Smirnov mostrou que a distribuição Log Pearson III apresenta o melhor ajuste aos dados observados, tendo sido a selecionada para utilização no trabalho.

Tabela 2 – Vazões máximas segundo distribuições Log Normal, Gumbel e Log Pearson III

Tempo de retorno (anos)	Vazão máxima Log Normal (m ³ /s)	Vazão máxima Gumbel (m ³ /s)	Vazão máxima Log Pearson III (m ³ /s)
5	445,27	1158,91	386,82
10	1086,38	1676,57	1201,31
20	2269,15	2173,12	3344,47
50	5198,66	2815,86	11696,83
100	9034,65	3297,50	28639,84

Os hidrogramas de projeto para os tempos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos (figura 9) apresentaram duração longa, com mais de 45 dias de vazão. Este fato se deve, provavelmente, às características hidrográficas do trecho estudado, que por ficar a jusante de um grande reservatório, só recebe vazões elevadas quando ocorre extravasamento do reservatório o que normalmente ocorre durante vários dias consecutivos. Isto pode ser confirmado ao comparar o tempo de duração do hidrograma de projeto com o tempo de duração de eventos observados, como, por exemplo, o evento ocorrido em 2009, quando a estação registrou um evento com mais de 60 dias de duração (figura 10).

Figura 9 – Hidrogramas de projeto da região do Baixo-Açu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.



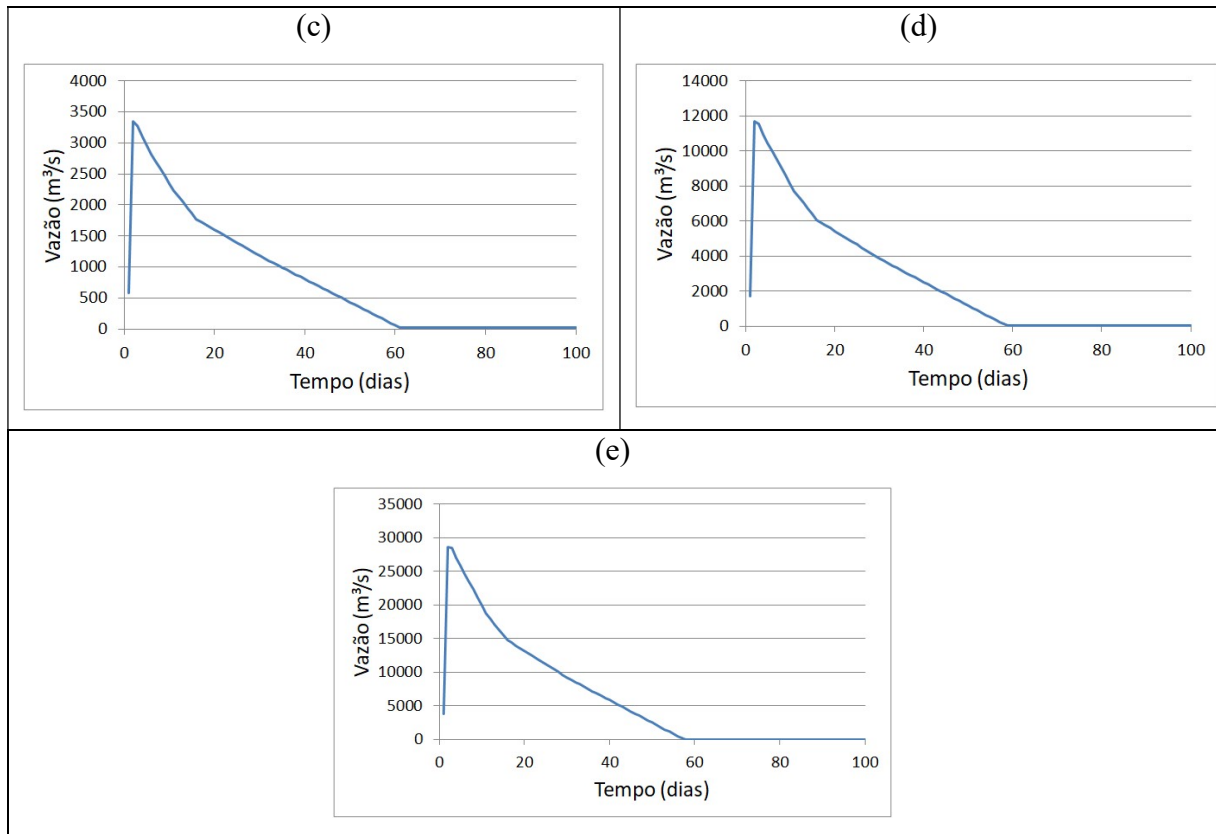
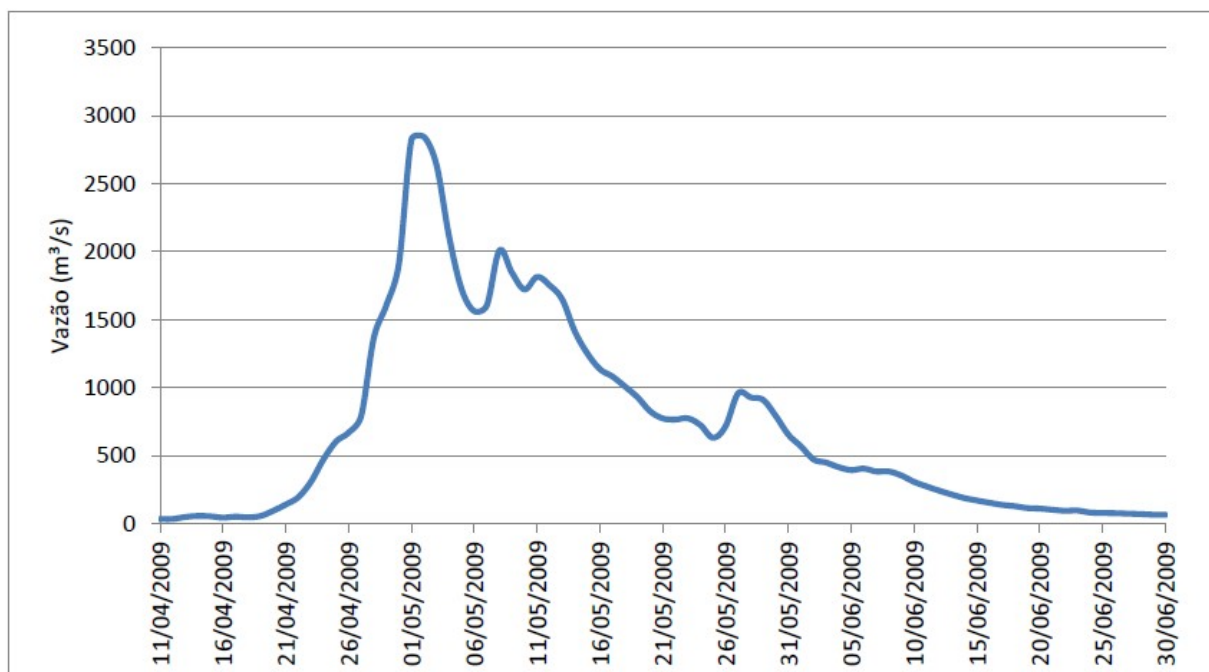


Figura 10 – Vazões diárias de um evento de cheia com duração maior que 60 dias na região do Baixo-Açu



3.2. MAPAS DE PROFUNDIDADE

As áreas inundadas e as profundidades de inundação para os tempos de retorno de 5,

10, 20, 50 e 100 anos são mostrados na figura 11. Observa-se que para os tempos de recorrências pequenos, como 5 ou 10 anos, a mancha de inundação praticamente não sai da calha. No entanto, para tempos de retorno maiores o rio transborda e a inundação se estende muito além da calha do rio, principalmente em duas regiões: próximo à sede urbana do município de Ipanguaçu e próximo à foz (figura 11 c, d, e). Nesses locais a topografia é mais plana e, por isso, embora a inundação se espalhe mais no território, as cotas de profundidade são menores do que no restante do curso do rio. Como era de se esperar, as maiores profundidades acontecem na lagoa do Piató, em Açu, e no próprio eixo do rio Piranhas Açu.

O município de Ipanguaçu é o mais atingido pelas inundações, principalmente em tempos de retorno maiores do que 10 anos. Neste município a onda de cheia avança em direção ao centro, chegando a superar 5 metros de profundidade para tempo de retorno igual a 100 anos na malha urbana (figura 12).

Resultados semelhantes foram obtidos por Medeiros (2018), que também verificou que a cidade de Ipanguaçu sofre com frequentes eventos de inundação. Inclusive o governo do estado do Rio Grande do Norte elaborou em 2009 um estudo de proteção da Ilha de Ipanguaçu contra enchentes dos Rios Açu e Pataxós, o qual concluiu que são necessárias ações estruturantes e não estruturantes para resolução do problema (SEMARH, 2009).

Outro município bastante atingido pela inundação do rio Piranhas-Açu é Alto do Rodrigues. Grande parte da malha urbana do município localiza-se na margem do rio, por isso sofre inundações mesmo com vazões de baixos tempos de recorrência. Observa-se que a água chega até o centro da cidade e alcança uma altura de 5 metros num período de retorno de 100 anos (figura 13).

Em Carnaubais, as inundações só alcançam uma pequena parte da sede do município, no entanto, a profundidade da água chega a 3,5 metros em uma inundação com tempo de retorno de 10 anos e pode chegar até 7.50 metros num tempo de retorno de 100 anos (figura 14).

Dos municípios da região, Pendências é o menos atingido por inundações, mesmo as de grande magnitude. Inundações com tempo de retorno de 100 anos não atingem a malha urbana (figura 15).

No município de Açu, os fenômenos de cheia do rio Piranhas-Açu contribuem para o transbordamento da Lagoa do Piató, que agrava as inundações em áreas próximas (figura 16). Com tempo de retorno de 20 anos a profundidade na sede municipal alcança 2 metros e alcança 6 metros em inundações com tempo de retorno de 100 anos.

Figura 11 – Mapas de profundidade de inundação na região do Baixo-Açu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.

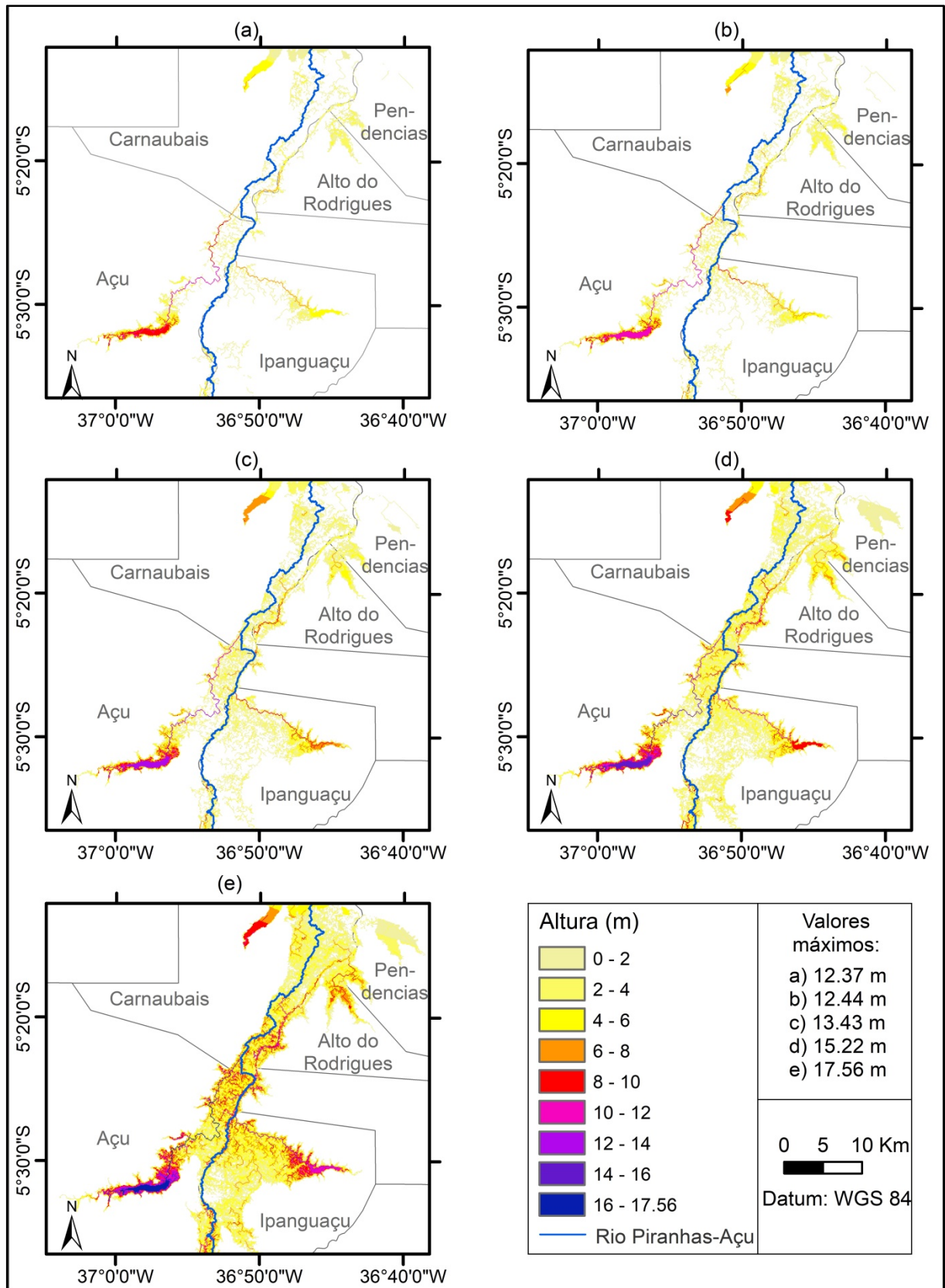


Figura 12 – Mapas de profundidade de inundação no município de Ipanguaçu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.

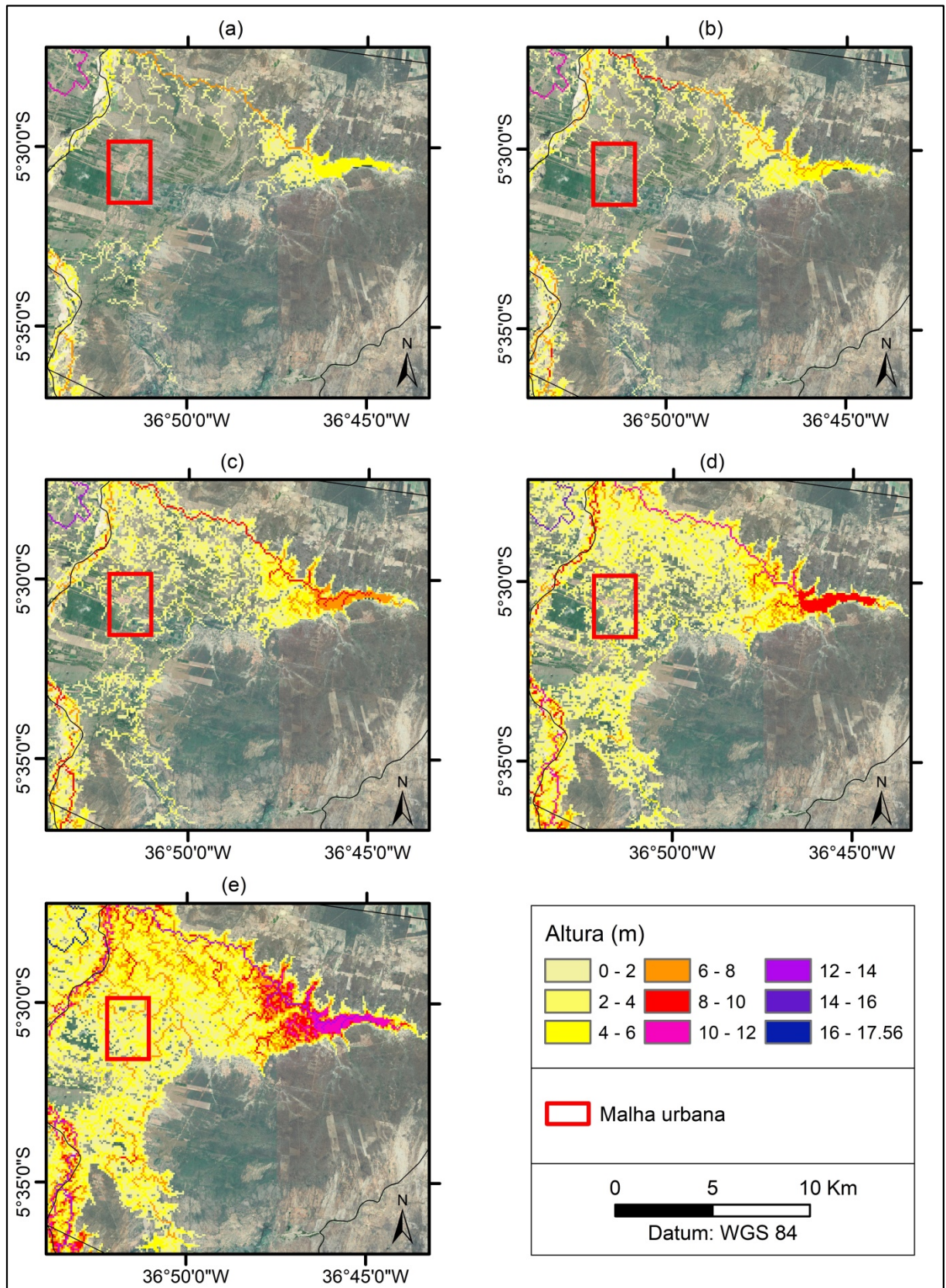


Figura 13 – Mapas de profundidade no município de Alto do Rodrigues para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.

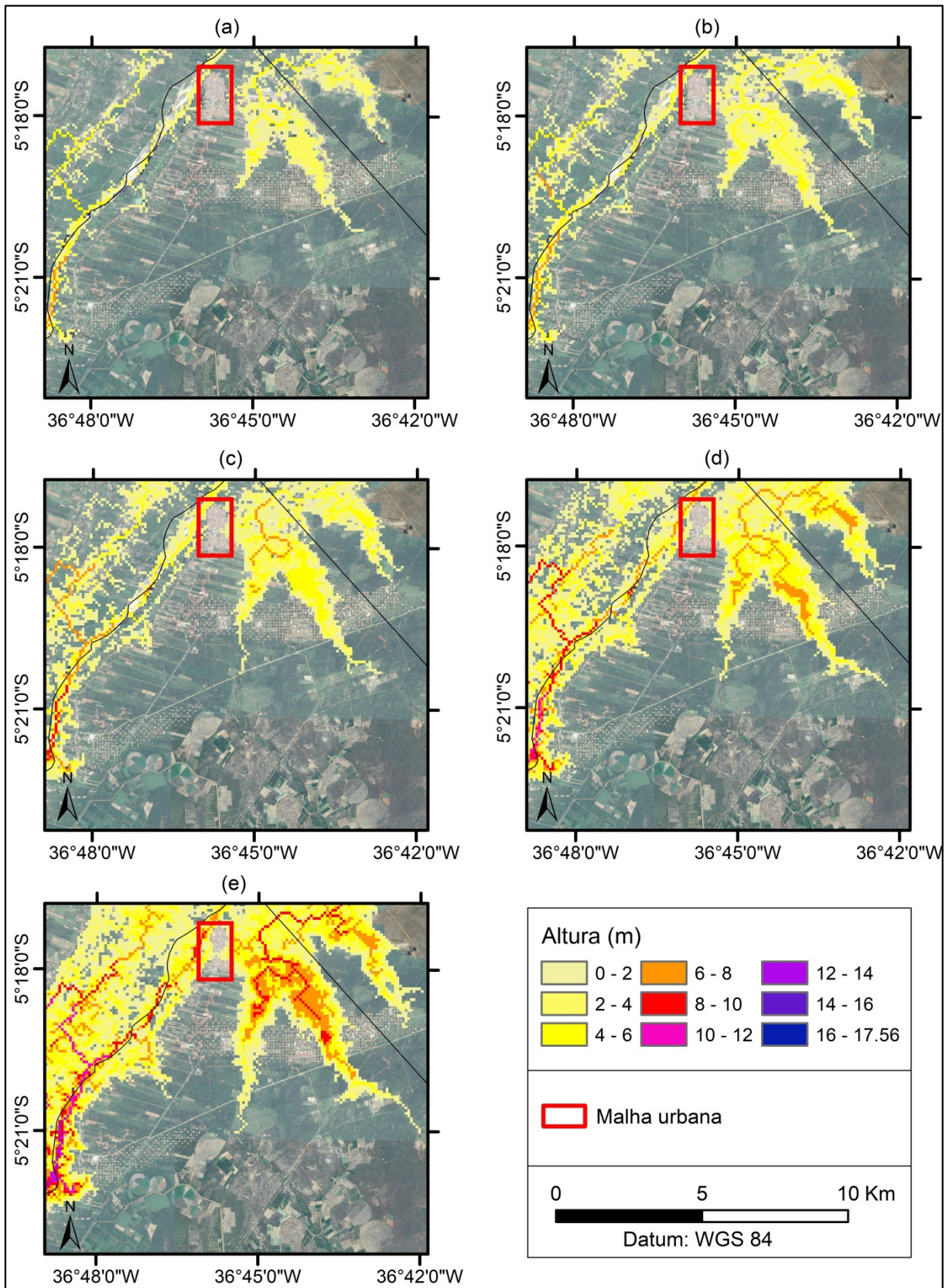


Figura 14 – Mapas de profundidade no município de Carnaubais para os tempos de retorno de
(a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.

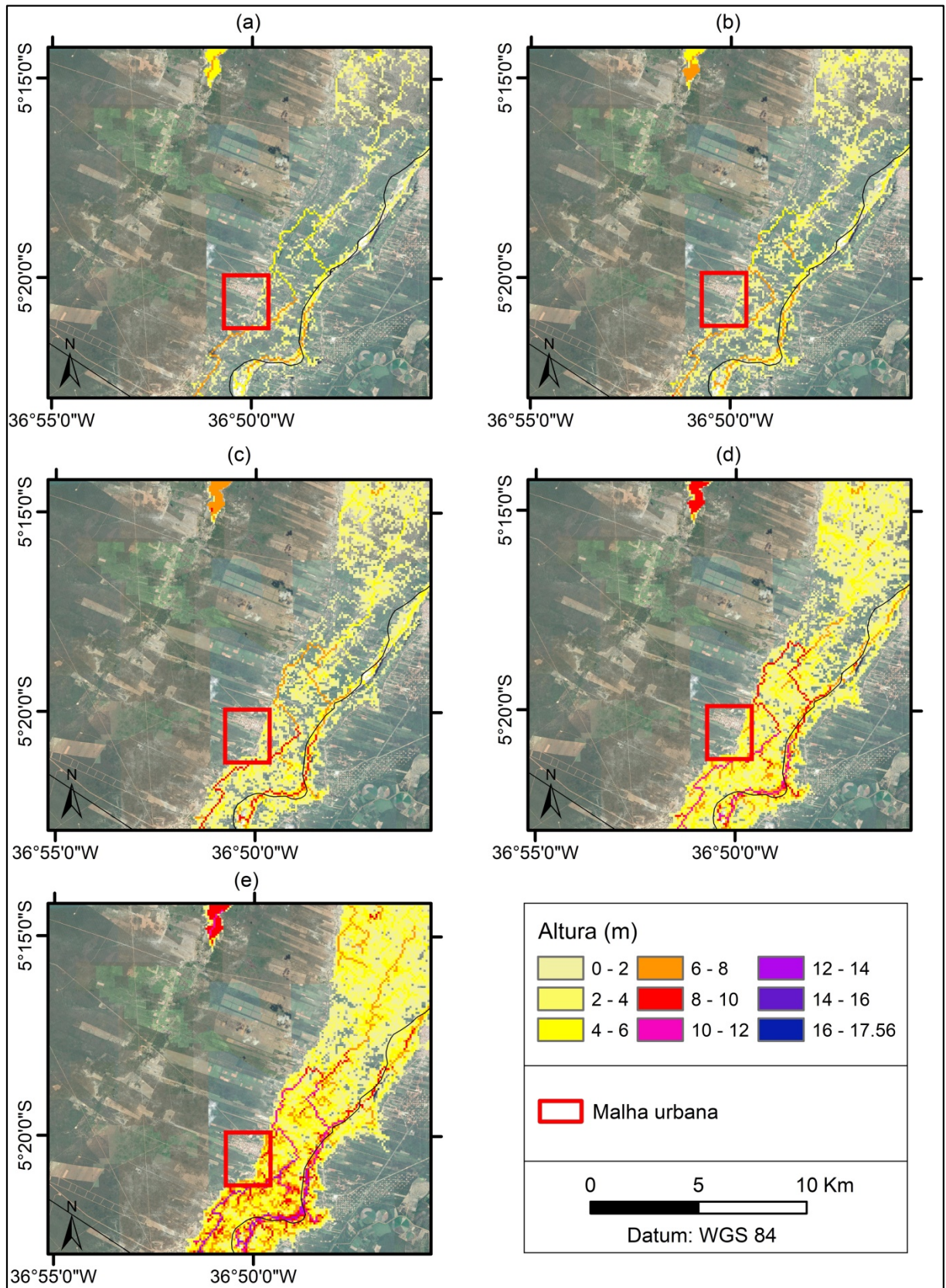


Figura 15 – Mapas de profundidade no município de Pendências para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.

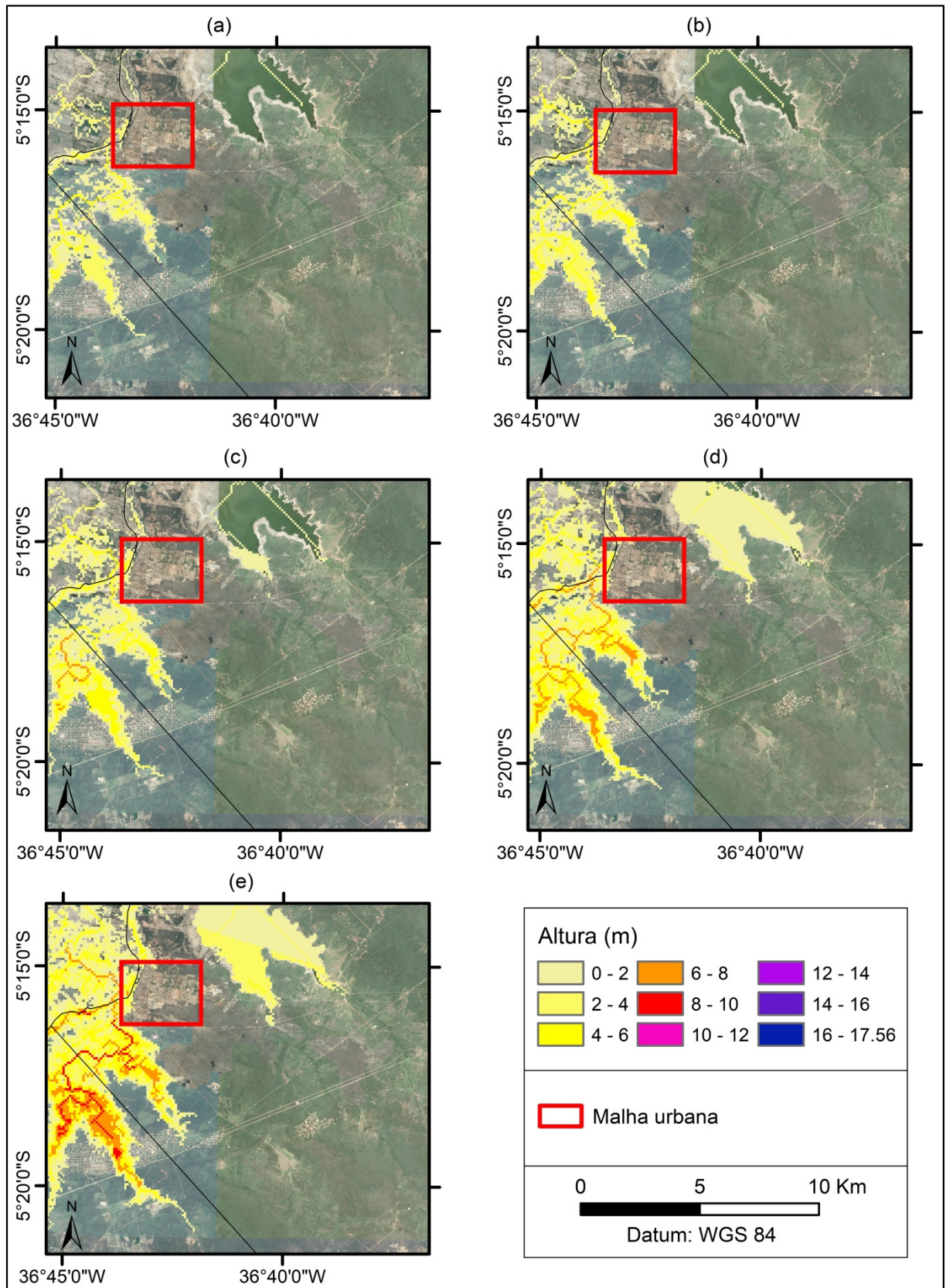
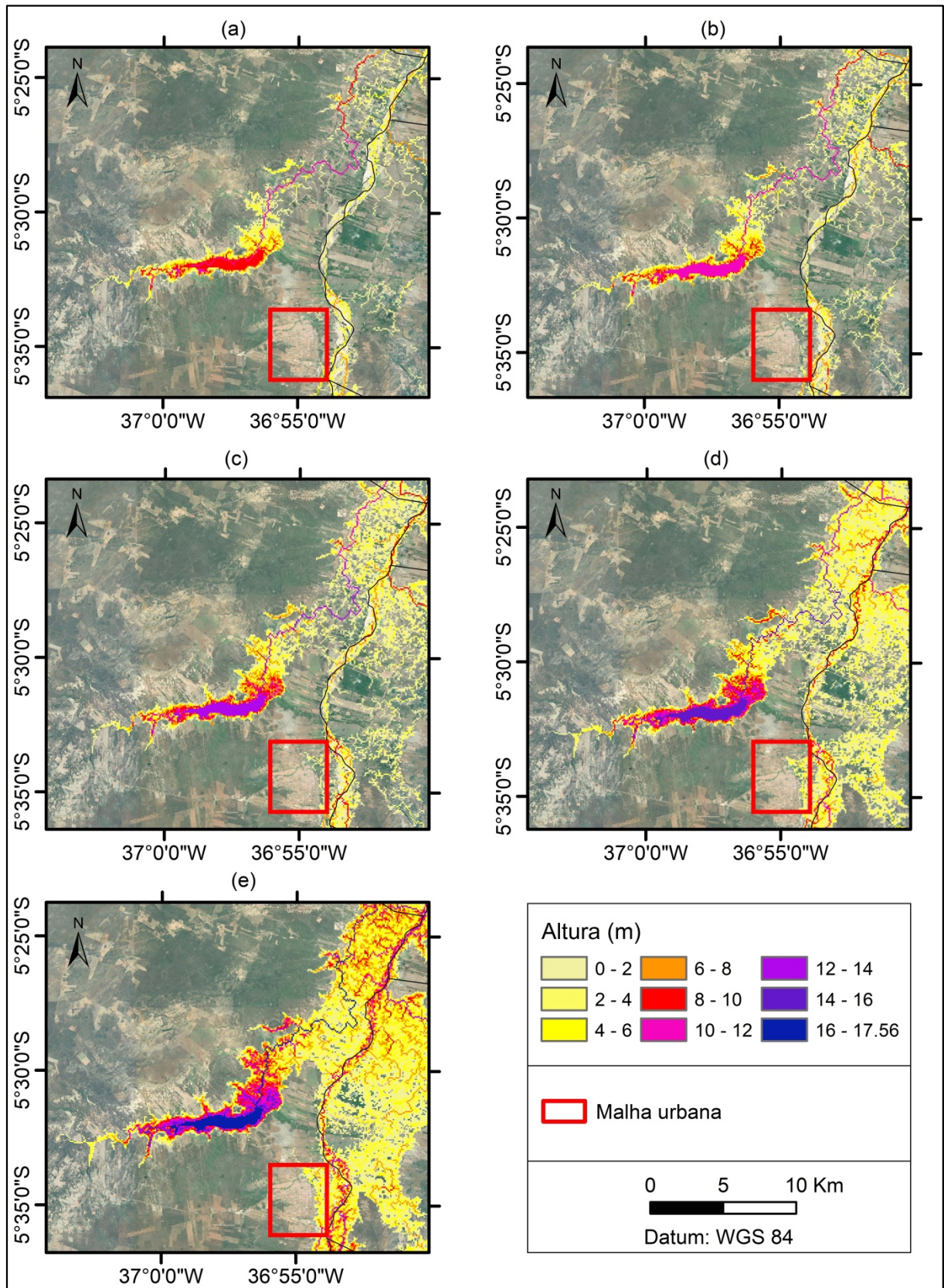


Figura 16 – Mapas de profundidade no município de Açu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.



3.3. MAPAS DE VELOCIDADE DE FLUXO

As velocidades de fluxo das inundações com tempos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos são mostradas na figura 17. É possível observar que para tempos de retorno de até 50 anos a velocidade máxima varia de 1,08 m/s a 2,61 m/s. No entanto, em eventos críticos, com tempo de retorno de 100 anos, a velocidade pode chegar até 3,17 m/s.

Estes valores de velocidade trazem perigo as construções e a infraestrutura. Segundo NSW (2005), em velocidades superiores a 2 m/s a estabilidade das fundações pode ser prejudicada pela erosão, que também afeta as superfícies de grama e terra tornando-as rugosas e instáveis. Além disso, a depender da profundidade, a evacuação da população por veículos grandes tornaria-se difícil e adultos fisicamente aptos teriam dificuldade de se colocar em segurança. McBean et al. (1988) reportam que fluxos de velocidade de 3 m/s com profundidade de 1 m podem provocar uma força suficiente para desmoronar uma parede residencial típica.

Os fluxos mais lentos estão em Ipanguaçu, município no qual a inundação se espalha mais no território. Já as velocidades maiores concentram-se próximas à barragem Armando Ribeiro Gonçalves, uma vez que a significativa diferença de nível entre o leito do rio e o vertedouro do reservatório, cuja soleira está na cota 55 m (DNOCS, 2019), contribui para a transformação da energia potencial em energia cinética.

3.4. MAPAS DE TEMPO DE DURAÇÃO

O tempo de duração das inundações representa o tempo em que a água permanece no local, assim a calha do rio apresenta tempo de duração máximo, o que significa que essas áreas estão sempre molhadas, como já era esperado.

Com tempo de retorno de 20 anos, a parte da cheia que extrapola a calha do rio geralmente apresenta tempo de duração entre 30 e 50 dias. Já com 50 anos, em geral o tempo de duração fica entre 50 e 60 dias. Ao passo que para um tempo de retorno de 100 anos, o tempo de duração se aproxima do valor máximo de 98 dias (figura 18).

Tempos de inundação muito elevados impactam diretamente sobre as atividades humanas, principalmente na agricultura (JAGER, THOMSEN, YIN, 2016; KIMBERLEY et al, 2012; KWAK et al, 2015). A região do Vale do Açu é conhecida por ser um importante polo de agricultura irrigada no Estado (ANA, 2016), de forma que a inundação atinge muitas áreas agrícolas e como as cheias apresentam duração elevada, essas trazem enormes prejuízos para a região. A figura 19 mostra um exemplo de área agrícola que fica completamente

inundada com tempo de retorno de 100 anos e o tempo de duração em torno de 50 dias.

Figura 17 – Mapas de velocidade de fluxo de inundação na região do Baixo-Açu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.

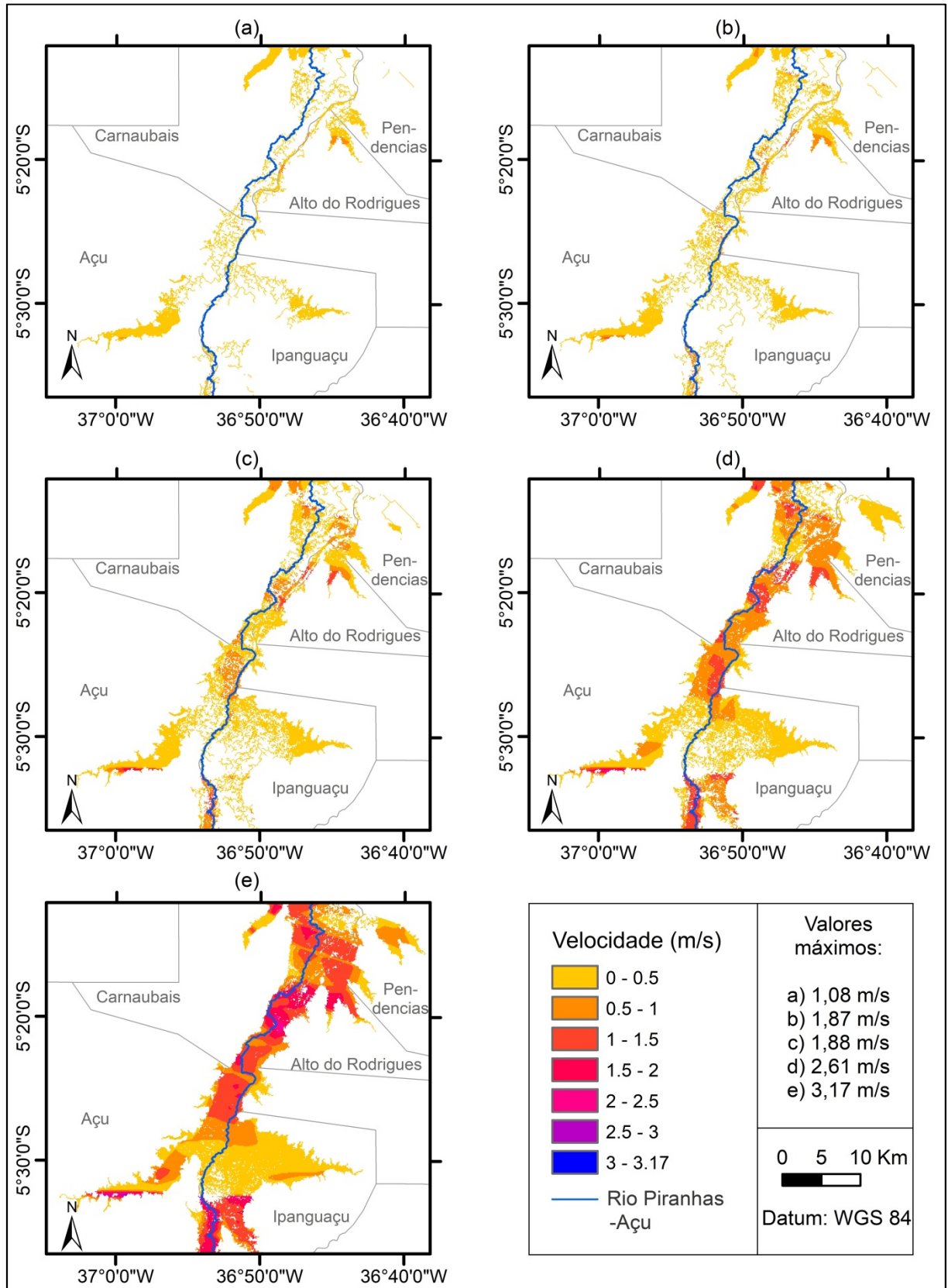


Figura 18 – Mapas de tempo de duração de inundação na região do Baixo-Açu para os tempos de retorno de (a) 5 anos; (b) 10 anos; (c) 20 anos; (d) 50 anos e (e) 100 anos.

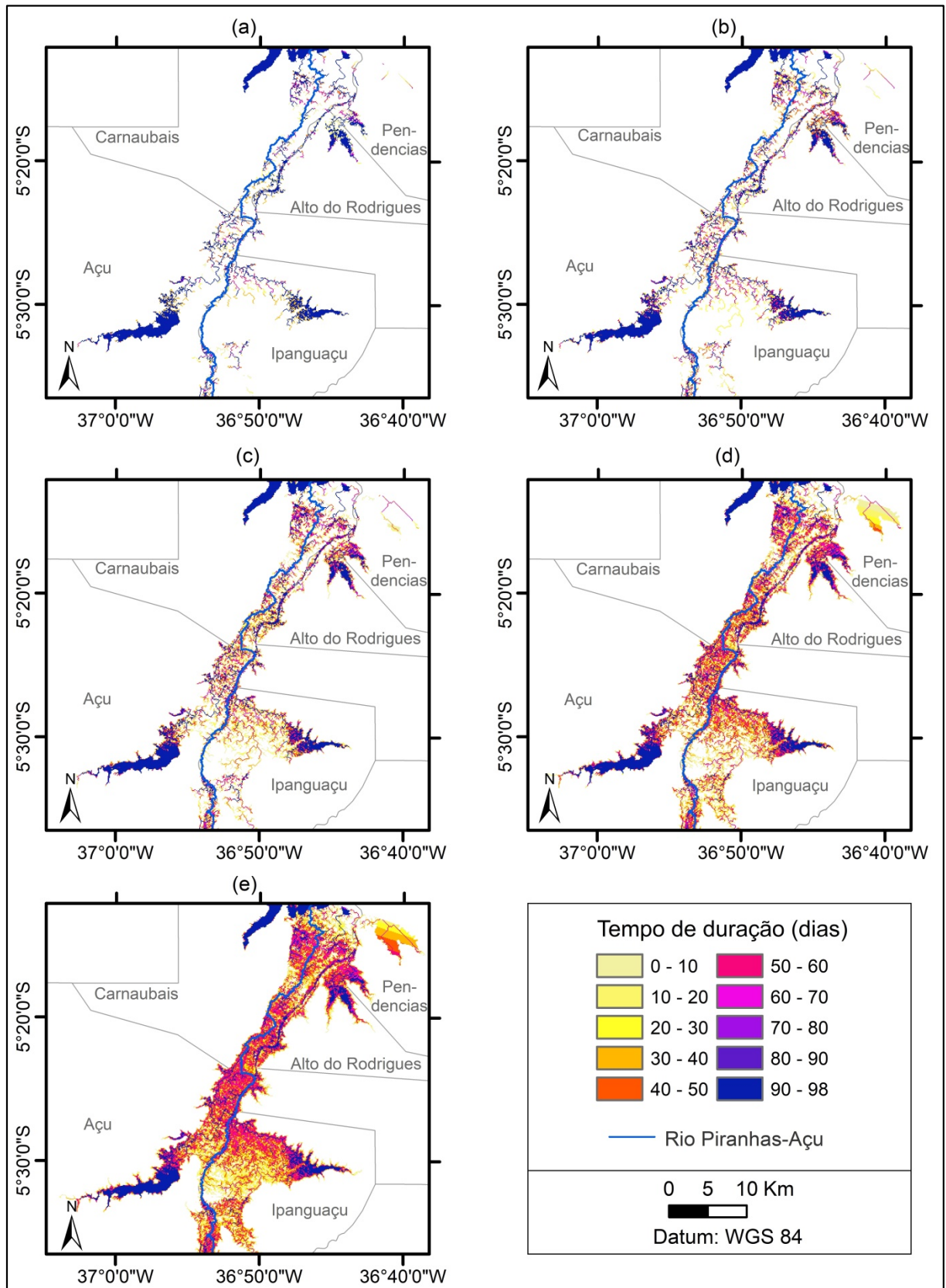
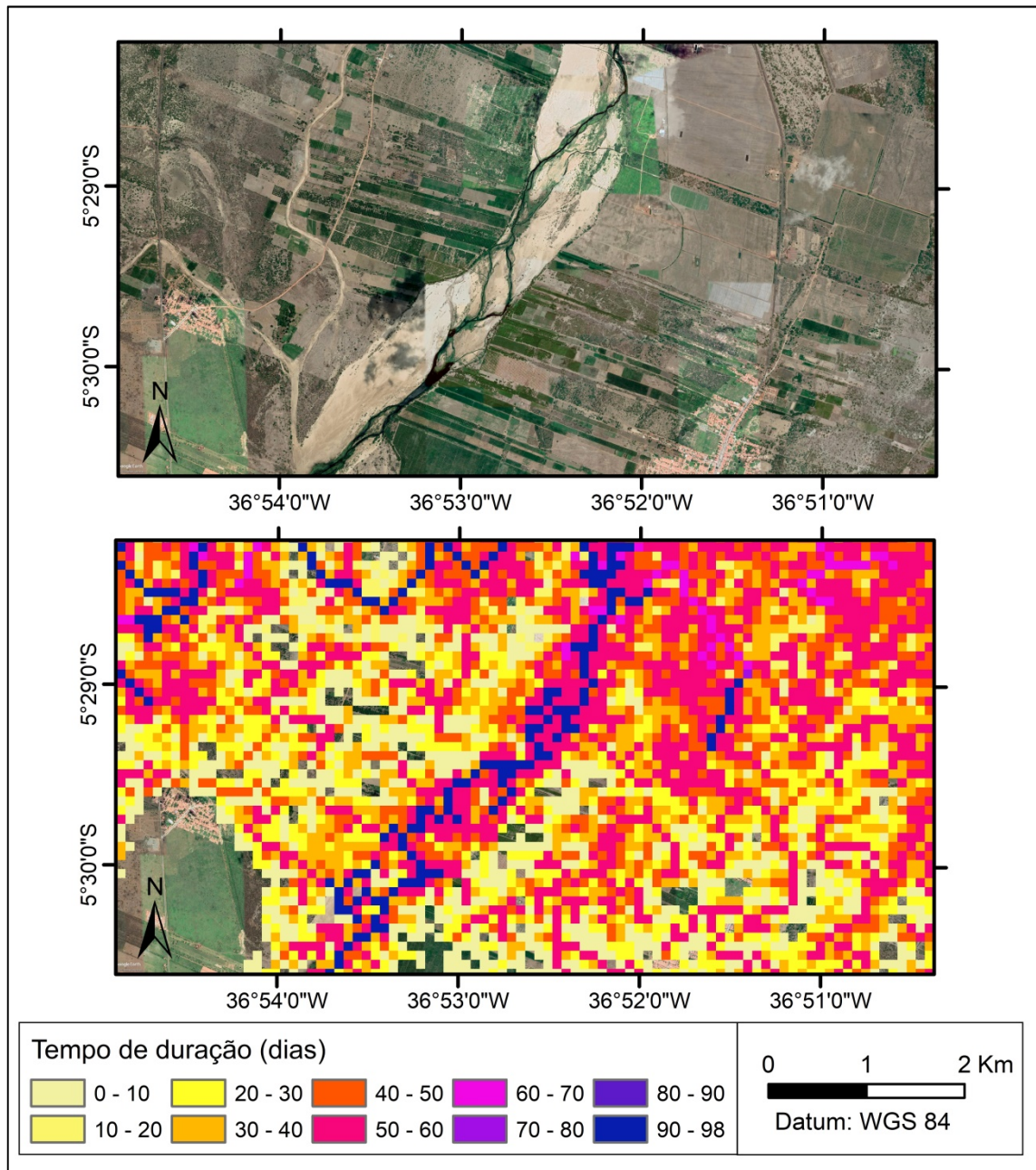


Figura 19 – Áreas agrícolas nos municípios de Açu e Ipanguaçu atingidas por cheia de tempo de retorno de 100 anos, com elevado tempo de duração.



3.5. MAPAS DE PERIGO

Os mapas dos indicadores reclassificados em perigo baixo, médio e alto, (figuras 20 a 24), apresentam predominantemente perigo alto nos indicadores altura da lâmina de água e tempo de duração da inundação, indicado que as cheias no Vale alcançam profundidades elevadas e escoam lentamente, fazendo com que a água permaneça mais tempo nas áreas inundadas. Como a onda de cheia demora a passar, a velocidade da água é relativamente baixa

e, com isto, o mapa de perigo deste indicador apresenta perigo baixo para os TRs de 5 e 10 anos. Somente para os TRs maiores, de 50 e 100 anos, é que este indicador passa a apresentar perigo alto. Quando se considera o perigo de inundação, que engloba os três indicadores, é possível observar que em nenhum tempo de recorrência há áreas consideráveis de perigo baixo. O mapa de tempo de retorno de 5 anos indica predominantemente perigo médio. O perigo vai aumentando com o tempo de recorrência e para o tempo de retorno de 100 anos o perigo alto predomina, com exceção de Ipanguaçu que indica perigo médio (figuras 20 a 24).

3.6. MAPA DE PERIGO GERAL DA REGIÃO DO BAIXO-AÇU

O mapa de perigo global da região do Baixo-Açu, obtido com base na média ponderada dos mapas de perigo para cada tempo de recorrência (figura 25) apresenta predominantemente perigo baixo. Isso acontece porque os pesos usados na média ponderada são as frequências de ocorrência de cada tempo de retorno, então o valor do perigo tende a tornar-se mediano.

Alguns autores preferem indicar espacialmente o perigo de inundação através de mapas que contemplem apenas um período de retorno, geralmente elevado, como 100 ou 10.000 anos (DERDOUS et al., 2015; RIBEIRO NETO, BATISTA, COUTINHO, 2016).

Outros, para gerar o mapa de perigo global da região, utilizam uma matriz de probabilidade e intensidade, sendo esta última o produto dos indicadores escolhidos. Assim, os mapas são classificados de acordo com essa matriz, de forma que quanto maior for a intensidade e a frequência, maior é o perigo; e quanto menor for a intensidade e a frequência, menor é o perigo. Essas matrizes normalmente são determinadas de acordo com modelos de danos estatísticos e os trabalhos não relatam que o resultado final amortece o perigo (GONÇALVES et al., 2015; MONTEIRO; KOBAYAMA, 2013).

Figura 20 – Mapas de perigo dos indicadores (a) profundidade; (b) velocidade; (c) duração; e (d) mapa de perigo geral para tempo de retorno de 5 anos.

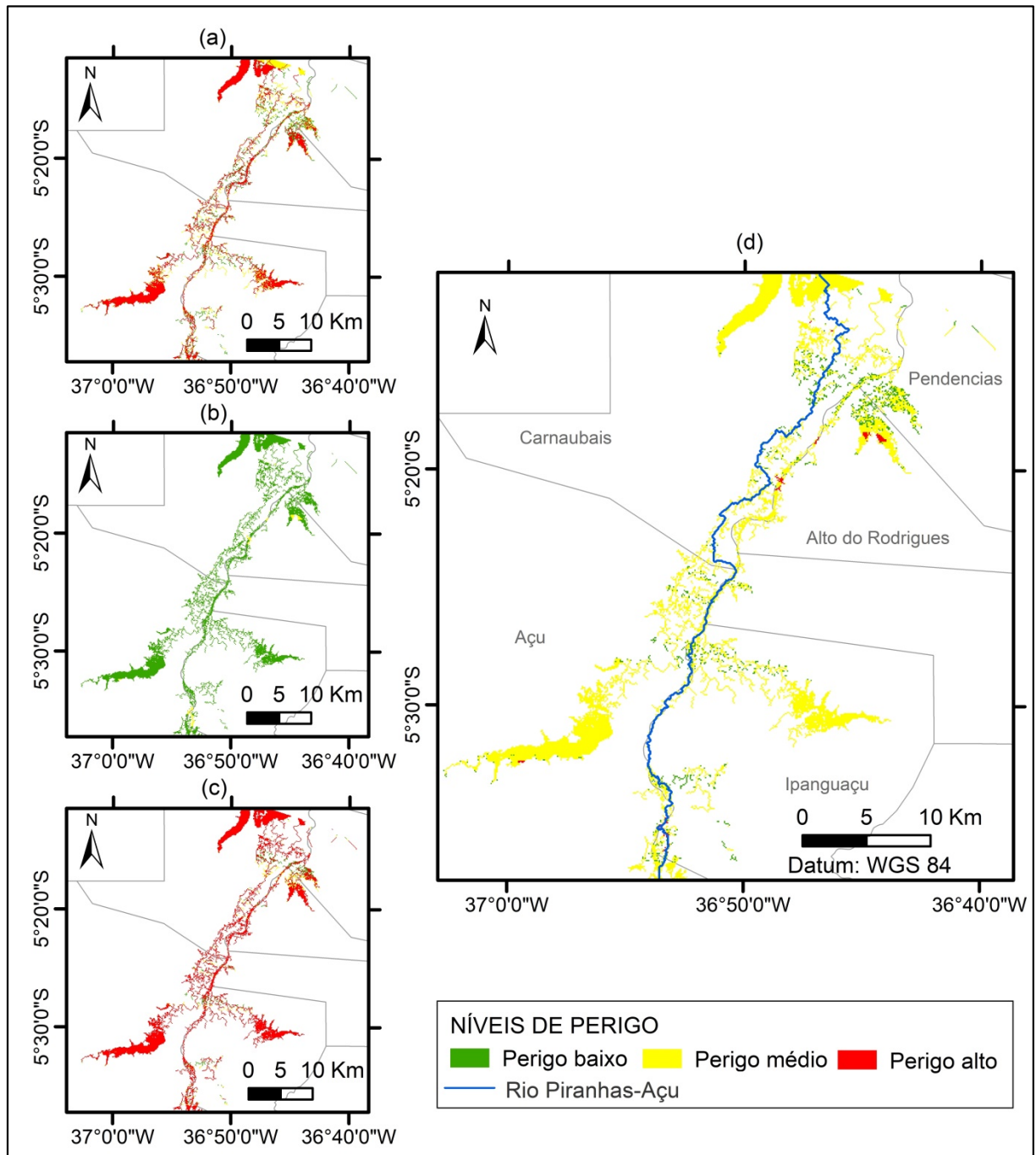


Figura 21 – Mapas de perigo dos indicadores (a) profundidade; (b) velocidade; (c) duração; e (d) mapa de perigo geral para tempo de retorno de 10 anos.

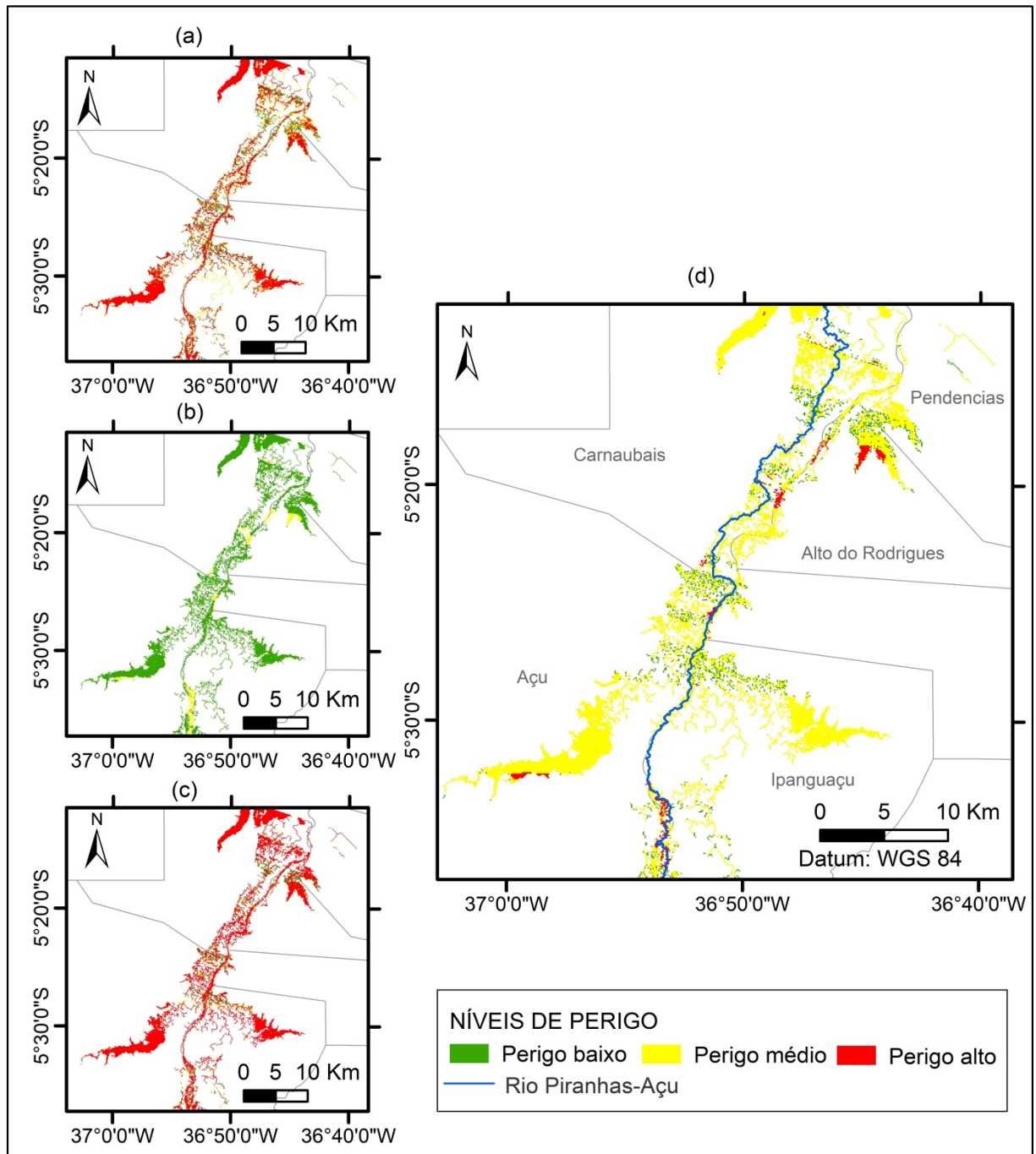


Figura 22 – Mapas de perigo dos indicadores (a) profundidade; (b) velocidade; (c) duração; e (d) mapa de perigo geral para tempo de retorno de 20 anos.

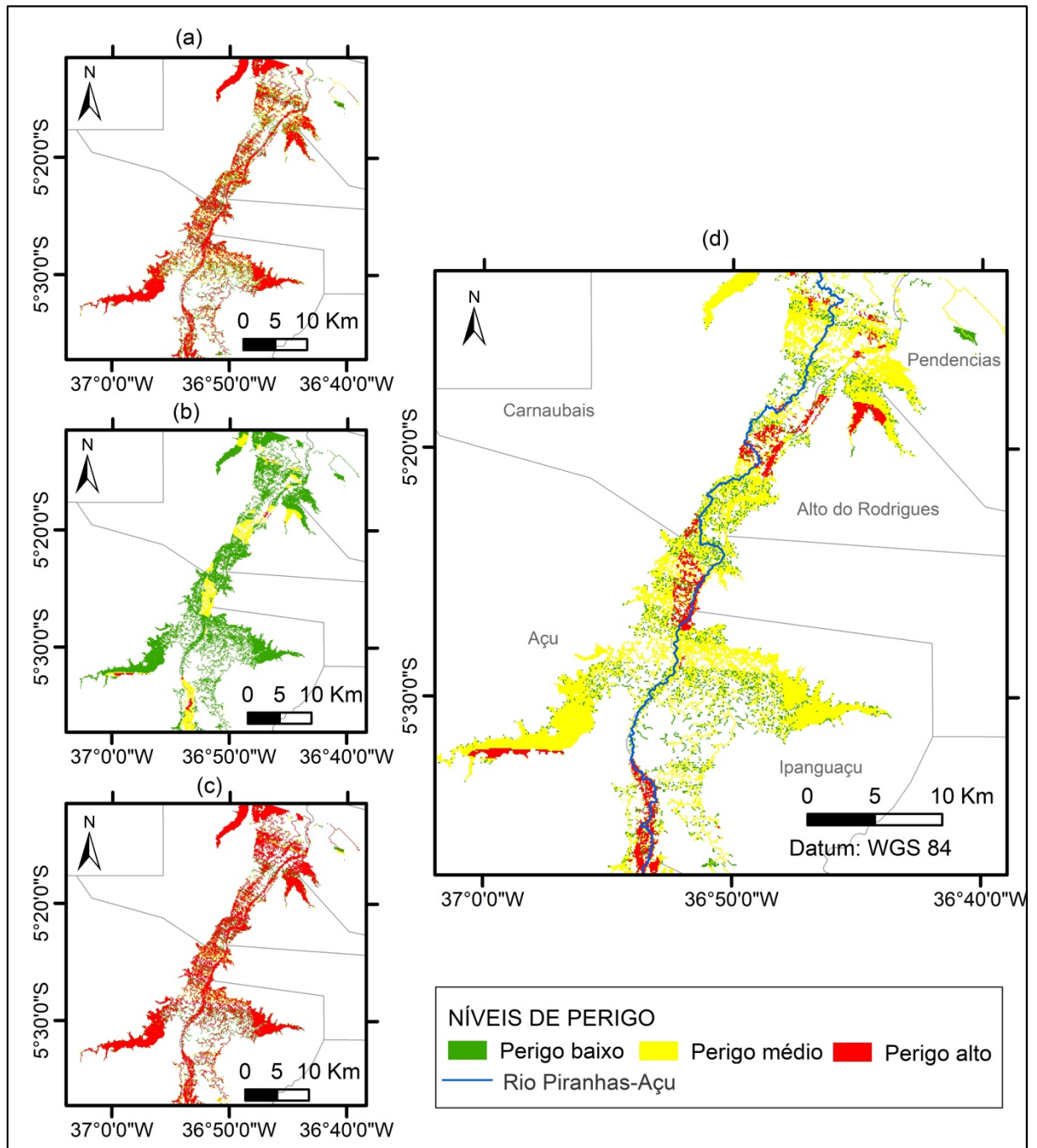


Figura 23 – Mapas de perigo dos indicadores (a) profundidade; (b) velocidade; (c) duração; e (d) mapa de perigo geral para tempo de retorno de 50 anos.

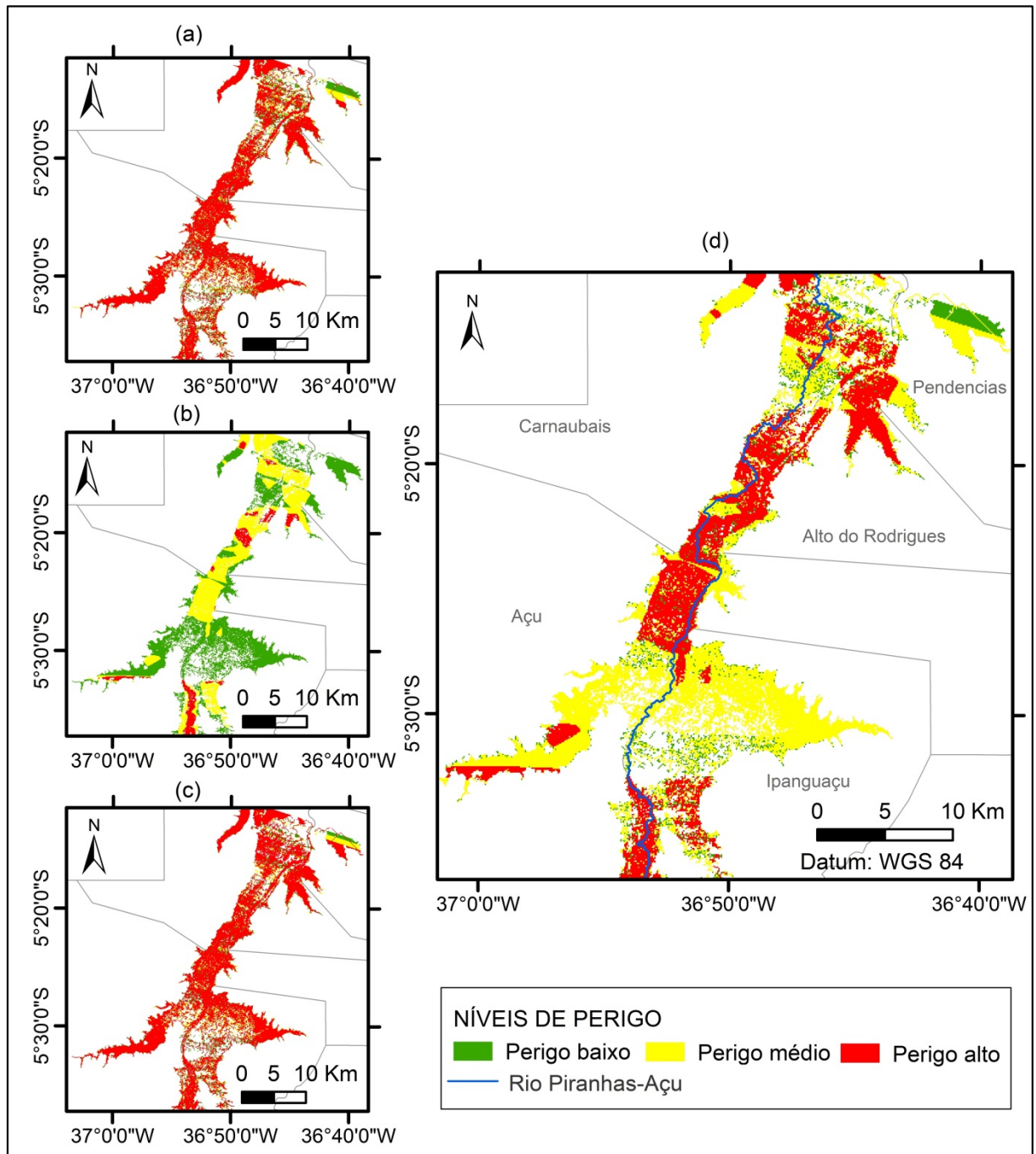


Figura 24 – Mapas de perigo dos indicadores (a) profundidade; (b) velocidade; (c) duração; e (d) mapa de perigo geral para tempo de retorno de 100 anos.

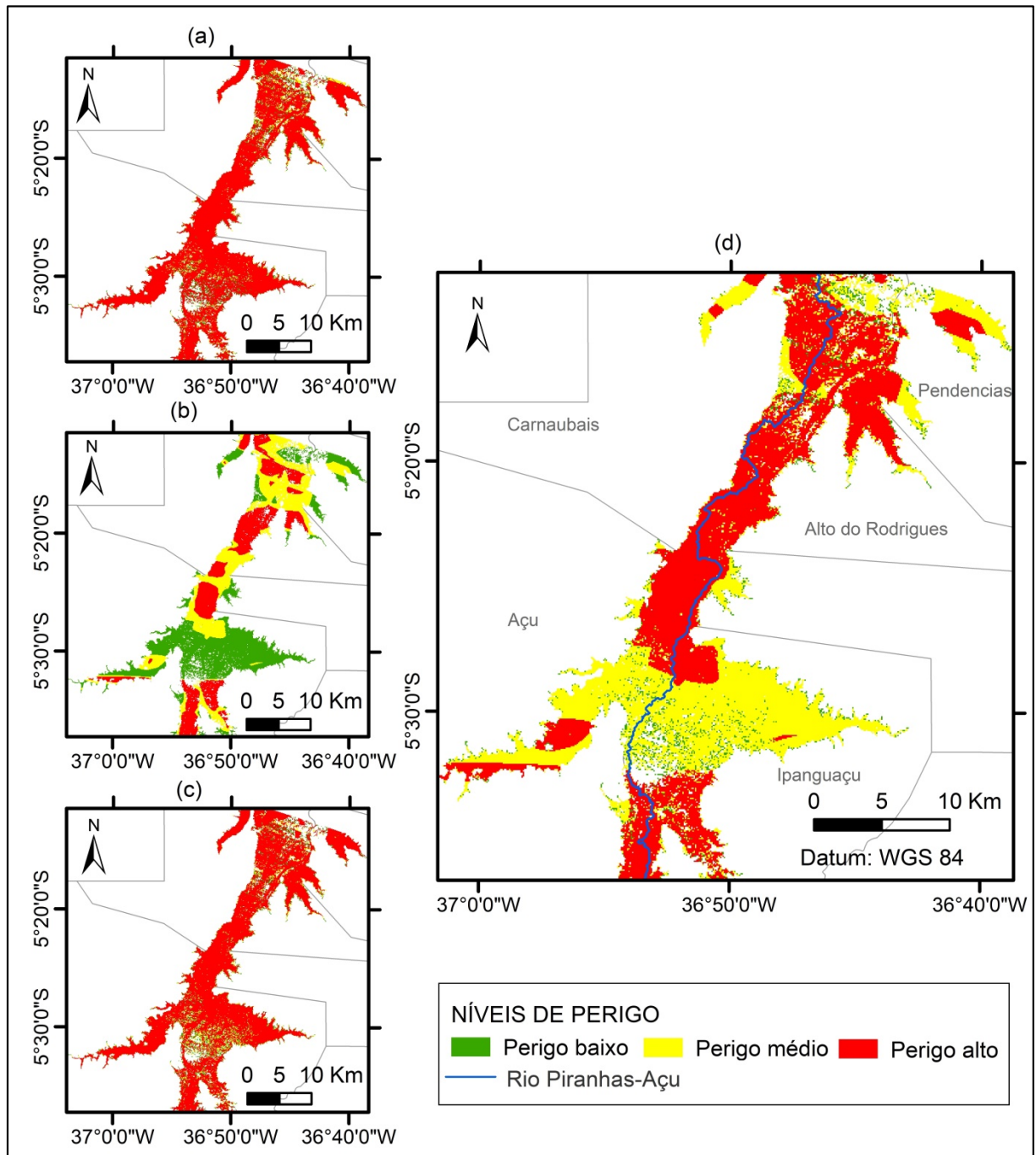
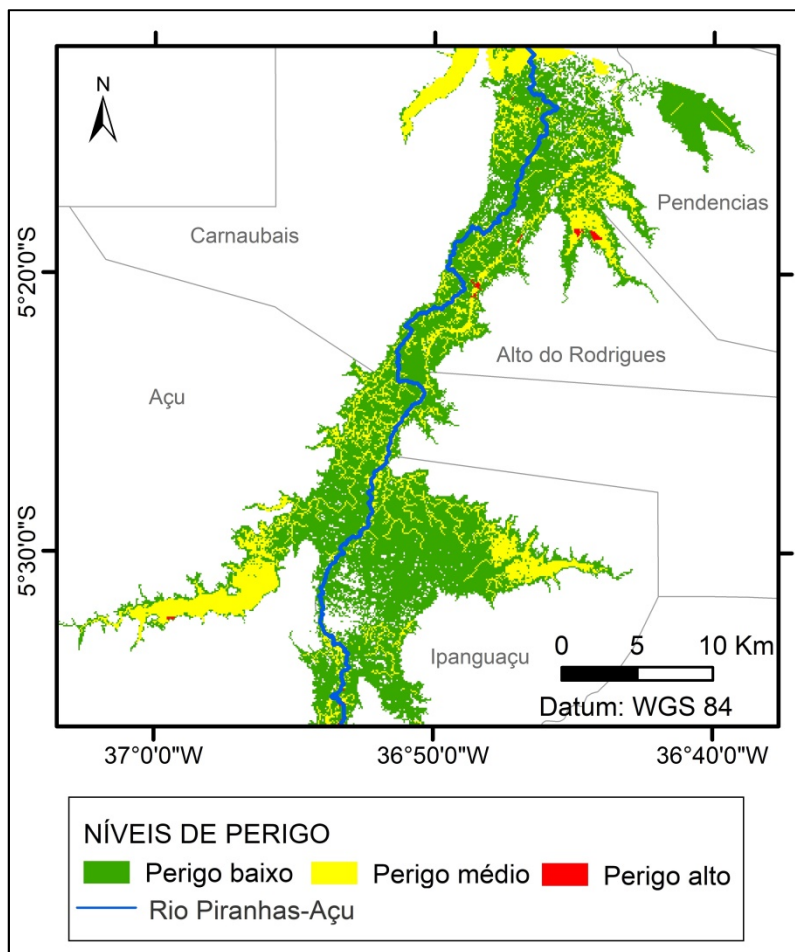


Figura 25 – Mapa de perigo de inundação da região do Baixo-Açu



4 CONCLUSÕES

O mapeamento de inundação realizado neste trabalho permite avaliar o perigo de cheia numa região, empregando como indicadores a profundidade, a velocidade da água no local e o tempo de duração da cheia.

O uso da média aritmética dos mapas com indicadores reclassificados para obter os mapas de perigo para cada tempo de retorno mostra-se adequado e coerente. No entanto, o mapa de perigo global da região, obtido com base na média ponderada dos mapas de perigo para cada tempo de recorrência, não se mostrou adequado, uma vez que amorteceu o perigo de inundação. Portanto, é mais apropriado visualizar espacialmente o perigo de inundação através dos mapas para cada tempo de retorno, já que estes mostram com mais coerência a influência de cada indicador no resultado final.

O hidrograma de projeto apresentou elevado tempo de base, o que é coerente com as características hidrológicas da área de estudo, resultando em alto tempo de permanência da

cheia. Este resultado confirma a hipótese inicial de que este indicador é fator importante para mensurar o perigo de inundação no local de estudo escolhido, já que este possui grandes áreas agrícolas cujos cultivos são sensíveis ao excesso de água prolongado.

A modelagem hidráulica mostrou que as cheias inundam grandes áreas na região do Vale do Açu. Os resultados apontam que as inundações alcançam grandes profundidades, que as águas escoam lentamente e que o tempo de duração da cheia é elevado, resultando em mapas com perigo de inundação médio para tempos de retorno pequenos (5 anos) e perigo alto para tempos de retorno maiores (100 anos).

Por fim, fica como sugestão para trabalhos futuros que se adicione a esta metodologia indicadores como distribuição populacional no espaço, classe econômica dos habitantes, tipos de edificações, tipos de cultivo agrícola, presença de ativos ambientais ou econômicos. Dessa forma, se acrescentaria ao mapa de perigo informações sobre os prejuízos que a inundação causa numa determinada área, a fim de obter um mapa de risco da região.

REFERÊNCIAS

- ADGER, W.N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, v.16, p. 268-281, 2006.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piancó-Piranhas-Açu**. Resumo Executivo. Brasília, p.167, 2016.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 01 de jun 2018.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 01 de out 2019.
- ANGELIM, L. A. de A (org). **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte** - Escala 1:500.000. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2006.
- ARAÚJO, P. V. N.; AMARO, V. E.; ALCOFORADO, A. V. C.; SANTOS, A. L. S. Acurácia Vertical e Calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açu, Rio Grande do Norte, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v.41(1), 2018.
- BALICA, S. F.; POPESCU, I.; BEEVERS, L.; WRIGHT, N.G. Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: A comparison. **Journal of Environmental Modelling & Software**, vol. 41, p. 84-92, 2013.
- BIRKMANN, J.; CARDONA, O.D.; CARREÑO, M.L.; BARBAT, A.H.; PELLING, M.; SCHNEIDERBAUER, S.; KIENBERGER, S.; KEILER, M.; ALEXANDER, D.; ZEIL, P.; WELLE, T. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. **Natural Hazards**, v. 67, p. 193-211, fev., 2013.
- BÜCHELE, B.; KREIBICH, H.; KRON, A.; THIEKEN, A.; IHRINGER, J.; OBERLE, P.; MERZ, B.; NESTMANN, F. Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, vol.6, p. 485-503, jan, 2006.
- CBH Piancó-Piranhas-Açu – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu. **A Bacia: Perfil Socioeconômico**. Disponível em: <<http://www.cbhpiancopiranhasacu.org.br/portal/a-bacia/>>. Acesso em 24 de set 2019.
- CHOW, V. T. **Open-channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.
- CHUVA causa prejuízo na região do Vale do Açu. **Tribuna do Norte**, Natal, 03 abr. 2008. Natal, p. 4.
- DERDOUS, O.; DJEMILI, L.; BOUCHEHED, H.; TACHI, S.E. A GIS based approach for the prediction of the dam break flood hazard – A case study of Zardezas reservoir “Skikda, Algeria”. **Journal of Water and Land Development**, n. 27, p. 15–20, nov, 2015.
- DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Fichas Técnicas dos Reservatórios: Barragem Armando Ribeiro Gonçalves**. Disponível em: <https://www.dnocs.gov.br/php/canais/recursos_hidricos/fic_tec_estado.php?sigla_estado=RN>. Acesso em: 01 de out 2019.

DUTTA, S; MEDHI, H; KARMAKER, T; SINGH, Y; PRABU, I; DUTTA, U. Probabilistic flood hazard mapping for embankment breaching. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 16, n. sup1, p. 15-25, 2010.

FERNANDES JUNIOR, S. A história se repete: Ipanguaçu sofre com mais uma inundação. **Rabiscos do Samuel Junior**. 29 abr. 2009a. Disponível em: <<http://rabiscosdosamueljunior.blogspot.com/2009/04/historia-se-repete-ipanguacu-sofre-com.html>>. Acesso em: 01 jul. 2019.

FERNANDES JUNIOR, S. Enchentes do Vale do Açu atingem mais de 30 mil pessoas. **Rabiscos do Samuel Junior**. 04 mai. 2009b. Disponível em: <<http://rabiscosdosamueljunior.blogspot.com/2009/05/enchentes-no-vale-do-acu-atingem-mais.html>>. Acesso em: 01 jul. 2019.

FRANCISCO, P. Chuvas matam cinco pessoas e deixam 10 mil sem-teto no Rio Grande do Norte. **Uol Notícias**, Natal, 07 abr. 2008. Últimas Notícias. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/ultnot/2008/04/07/ult23u1761.jhtm>>. Acesso em: 01 jul. 2019.

GICHAMO, T. Z.; POPESCU, I.; JONOSKI, A.; SOLOMATINE, D. River Cross Section Extraction from ASTER Global DEM for Flood Modeling. **Journal of Environmental Modelling & Software**, vol. 31, p. 37-46, 2012.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M.; PELLEIN, J. R. G. M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: Estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC. **Boletim de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 81-100, 2012.

GONÇALVES, P; MARAFUZ, I; GOMES, A. Flood hazard, Santa Cruz do Bispo Sector, Leça River, Portugal: a methodological contribution to improve land use planning. **Journal of Maps**, v. 11, n. 5, p. 760-771, 2015.

HARTANTO, I. M.; BEEVERS, L.; POPESCU, I; WRIGHT, N. G. Application of a coastal modelling code in fluvial environments. **Journal of Environmental Modelling & Software**, vol. 26, p. 1685-1695, 2011.

IDEMA – Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. **Relatório de sobrevoo: Rio Piranhas-Açu (Executado em 12-05-2009)**. Natal, p. 28, 2009.

JAGER, N. R.; THOMSEN, M.; YIN, Y. Threshold effects of flood duration on the vegetation and soils of the Upper Mississippi River floodplain, USA. **Forest Ecology and Management**, v. 270, p. 135-146, 2012.

KIMBERLEY, S.; NAUGHTON, O.; JOHNSTON, P.; GILL, L.; WALDREN, S. The influence of flood duration on the surface soil properties and grazing management of karst wetlands (turloughs) in Ireland. **Hydrobiologia**, v. 692, n. 1, p. 29-40, ago, 2012.

KWAK, Y.; SHRESTHA, B. B.; YOROZUYA, A.; SAWANO, H. Rapid Damage Assessment of Rice Crop After Large-Scale Flood in the Cambodian Floodplain Using Temporal Spatial Data. **IEEE Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 7, jul, 2015.

MACEDO, T. Falta folego para municípios alagados do Vale do Açu. **Nominuto.com**, 10

mai. 2009. Cidades. Disponível em: <<http://www.nominuto.com/noticias/cidades/falta-folego-para-municipios-alagados-do-vale-do-acu/31597/>>. Acesso em: 01 jul. 2019.

MCBEAN, E. A.; GORRIE, J.; FORTIN, M.; DING, J.; MOULTON, R. Adjustment Factors for flood damage curves. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 114, n. 6, p. 635–646, 1988.

MEDEIROS, M. D. **Eventos hidroclimáticos extremos e vulnerabilidade socioambiental a inundações no Baixo-Açu – RN**. Tese (Doutorado em Geografia) – UFC. Fortaleza, 209 f, 2018.

MERZ, B.; HALL, J.; DISSE, M.; SCHUMANN, A. Fluvial flood risk management in a changing world. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 10, p. 509-527, mar, 2010.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 01 Jun. 2018.

MOEL, H.; VEN ALPHEN, J.; AERTS, J.C.J.H. Flood maps in Europe – methods, availability and use. **Natural Hazards**, vol.9, p. 289-301, mar, 2009.

MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **REGA**, v. 10, n.2, p. 13-25, jul/dez, 2013.

MORRIS, J., HESS, T.M. Agricultural flood alleviation benefit assessment: A case study. **Journal of Agricultural Economics**, v. 39, p. 402–412, set. 1988.

NSW – New South Wales Government. **Floodplain development manual: the management of flood liable land**. Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources. Australia, 2005.

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; SILVA, E. R. Characterization of flood formation in the Una river basin, Pernambuco: hydrological-hydrodynamic simulation. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 20, n. 2, abr/jun, p. 394 – 403, 2015.

RIBEIRO NETO, A.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p.377-390, abr, 2016.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. H.; BELZ, J. E. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n.3, p. 249-260, mar, 2006.

SARHADI, A.; SOLTANI, S.; REZA, M. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. **Journal of Hydrology**, v. 458-459, p. 68-86, jun, 2012.

SCHANZE J. Flood risk management – a basic framework. In: Schanze J.; Zeman, E.; Marsalek, J. (eds) **Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures**. NATO Science Series, vol 67. Springer, Dordrecht, 2006.

SEMARH – Secretaria Estadual de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. **Projeto Básico para Planejamento da Macrodrenagem da Ilha de Ipanguaçu e Desobstrução da Calha do Rio Pataxós, nas Proximidades da Sede do Município de Ipanguaçu.** Natal, dez, 2009.

SEMARH – Secretaria Estadual de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. **Atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte – PERH-RN.** Tomo II – Estudos de Cheias. Natal, jul, 2013.

SILVINO, A. N. O.; SILVEIRA, A.; MUSIS, C. R.; WYREPKOWSKI, C. C.; CONCEIÇÃO, F. T. Determinação de vazões extremas para diversos períodos de retorno para o Rio Paraguai utilizando métodos estatísticos. **Geociências**, São Paulo, UNESP, v. 26, n. 4, p. 369-378, 2007.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology aquisition in open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 274-287, 2016.

THIEKEN, A.H.; MULLER, M.; KREIBICH, H.; MERZ, B. Flood damage and influencing factors: new insights from the August 2002 flood in Germany. **Water Resources Research**, v. 41, dez, 2005.

TUCCI, C. E. M. Vazão Máxima e Hidrograma de Projeto. In: **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2015. 944 p.

USACE HEC, 2016. **HEC RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0**, Hydrologic Engineering Center, United States Corps of Engineer, Davis, California, USA.

VIGLIONE, A.; DI BALDASSARRE, G.; BRANDI-MARTE, L.; KUIL, L.; CARR, G.; SALINAS, J.L.; SCOLOBIG, A.; BLÖSCHL, G. Insights from socio-hydrology modelling on dealing with flood risk: Roles of collective memory, risk-taking attitude and trust. **Journal of Hydrology**, v. 518, p. 71-82, jan, 2014.

XIA, J; FALCONER, R. A.; LIN, B.; TAN, G. Numerical assessment of flood hazard risk to people and vehicles in flash floods. **Journal of Environmental Modelling & Software**, vol. 26, p. 987-998, 2011.