

PROJETO DE PESQUISA APLICADA

APERFEIÇOAMENTO DE FERRAMENTAS ESTADUAIS DE GESTÃO
DE RECURSOS HÍDRICOS NO ÂMBITO DO PROGESTÃO

Relatório Institucional

*Modelo de previsão de cheias e determinação de áreas alagáveis na
bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio no estado de Sergipe*

Autor(es): Erick de Lima Sebadelhe Valério e Anne Caroline Negrão
Área temática: Gestão de eventos críticos

RESUMO

O projeto de pesquisa aplicada intitulado "Aperfeiçoamento de Ferramentas Estaduais de Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito do Progestão", desenvolvido pela parceria da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), tem como principal objetivo desenvolver ou aperfeiçoar ferramentas inovadoras que promovam a melhoria das atividades voltadas à gestão estadual dos recursos hídricos. O estado de Sergipe selecionou como tema a Gestão de Eventos Críticos, objetivando o desenvolvimento de um modelo de previsão de cheias e determinação de áreas alagáveis na bacia hidrográfica do rio Poxim. O sistema, desenvolvido em caráter experimental, tem por objetivo auxiliar os gestores de recursos hídricos na tomada de decisão durante a ocorrência de eventos extremos, permitindo um planejamento estratégico que contemple ações otimizadas e integradas. A metodologia utilizada contou com: 1) levantamento e análise de dados hidrológicos, hidráulicos e registros de inundações (documentos e fotografias); 2) modelagem hidrológica com o HEC-HMS e hidráulica com o HEC-RAS; 3) concepção do sistema; 4) desenvolvimento do sistema; e 5) sugestão de melhorias na rede de monitoramento hidrometeorológico. Os resultados apontaram o monitoramento precário da bacia, com escassez de dados em quantidade, qualidade e escala, principalmente em termos de vazão, limitando uma avaliação da performance dos modelos em representar a bacia em estudo e, conseqüentemente, a calibração. Apesar dessa limitação, foi construído um protótipo de sistema do tipo aplicativo para celular, através do qual gestores de recursos hídricos do estado podem carregar uma previsão e emitir um alerta com as possíveis áreas inundadas para os usuários. O aplicativo deverá ser utilizado pelos gestores e liberado para os usuários após um período de teste e validação. A ideia é que o sistema possa ser incrementado com dados observados ao longo do tempo, conforme sejam implantadas as melhorias no monitoramento hidrometeorológico sugeridas no escopo desse trabalho.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	4
2.	OBJETIVOS.....	5
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1.	Inundações e medidas de mitigação.....	5
3.2.	Modelagem hidrológica/hidráulica e sistemas de alerta.....	7
4.	METODOLOGIA EMPREGADA	9
4.1.	Levantamento e processamento de informações.....	10
4.2.	Modelagem hidrológica	12
4.2.1.	Processamento do modelo digital de elevação.....	13
4.2.2.	Processamento dos mapas de tipo e uso do solo	14
4.2.3.	HEC-HMS	18
4.2.1.	Simulação do evento extremo de julho de 2019 e calibração	20
4.3.	Modelagem hidrodinâmica	22
4.3.1.	Simulação do evento extremo de julho de 2019	24
4.4.	Sistema de previsão e alerta	25
5.	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	27
5.1.	Levantamento e processamento de dados.....	27
5.1.1.	Caracterização da bacia do rio Poxim	27
5.1.2.	Dados hidrometeorológicos	30
5.1.3.	Ajuste de curva-chave	33
5.1.4.	Geolocalização de registros fotográficos de inundação.....	36
5.1.5.	Visitas de campo.....	37
5.2.	Modelagem hidrológica	39
5.3.	Modelagem hidrodinâmica	44
5.3.1.	Simulação do evento extremo de julho de 2019	46
6.	SISTEMA DE ALERTA A INUNDAÇÕES NO POXIM – SAI POXIM	48
7.	SUGESTÃO DE APERFEIÇOAMENTO.....	53
7.1.	Melhoria na rede de monitoramento hidrometeorológico	54
7.1.1.	Equipamentos necessários.....	55
7.1.2.	Orçamento.....	56
7.2.	Demais sugestões para minimização do risco de inundações	56
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	AGRADECIMENTOS.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	APÊNDICE A – Informações sobre as estações de monitoramento	63
	APÊNDICE B – Domínios da simulação hidrológica e localização das estações pluviométricas	64
	APÊNDICE C – Domínio da simulação hidráulica e condições de contorno	65
	APÊNDICE D – Viagem de campo	66

1. INTRODUÇÃO

Firmado em dezembro de 2011, o Pacto Nacional pela Gestão das Águas tem como principal objetivo estabelecer compromissos entre os estados brasileiros na busca por superar desafios comuns e promover o uso múltiplo e sustentável dos recursos hídricos, fortalecendo os Sistemas Estaduais de Gerenciamento de Recursos Hídricos e intensificando o processo de articulação e ampliação dos laços de cooperação institucional no âmbito do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) (ANA, 2017b; IPEA, 2017).

O Programa de Consolidação do Pacto Nacional pela Gestão das Águas (Progestão), lançado no ano de 2013, constitui uma ferramenta prática para aplicação do Pacto. Nove estados aderiram ao primeiro ciclo do Progestão (2013-2016), dentre eles o estado de Sergipe, cuja adesão ocorreu por meio do Decreto Estadual no 29.412, de 15 de agosto de 2013, estabelecendo a Superintendência Especial de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (Serhma), antiga Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (Semarh), como entidade coordenadora do programa no estado (IPEA, 2017).

Em 2017 Sergipe aderiu ao segundo ciclo do Progestão, estabelecendo como principais metas: 1) Integração das bases cadastrais de águas superficiais e subterrâneas; 2) Capacitação em recursos hídricos; 3) Contribuição para difusão do conhecimento; 4) Prevenção de eventos hidrológicos críticos; e 5) Atuação para segurança de barragens (ANA, 2017a).

Dentro desse contexto, a ANA em parceria com o IPEA vem desenvolvendo o projeto de pesquisa aplicada intitulado "Aperfeiçoamento de Ferramentas Estaduais de Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito do Progestão", que tem como principal objetivo desenvolver ou aperfeiçoar ferramentas inovadoras que promovam a melhoria das atividades voltadas à gestão estadual dos recursos hídricos.

O estado de Sergipe escolheu o tema "Gestão de Eventos Críticos" (meta de número 4) objetivando o desenvolvimento de um modelo de previsão de cheias e determinação de áreas alagáveis na bacia hidrográfica do rio Poxim. Essa ferramenta visa auxiliar os gestores de recursos hídricos na tomada de decisão durante a ocorrência de eventos extremos, permitindo um planejamento estratégico que contemple ações otimizadas e integradas.

A bacia hidrográfica do rio Poxim é uma das responsáveis pelo abastecimento de água do município de Aracaju e região metropolitana. Em 2013 foi concluída a construção da barragem Jaime Umbelino de Souza no rio Poxim-Açu pela Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO), visando a regularização da vazão e atendimento da demanda de água.

A recorrente preocupação com as estiagens, e conseqüente comprometimento do abastecimento da cidade de Aracaju/SE, aliada à ocorrência de inundações na parte urbanizada da bacia, faz com que exista grande interesse pelo monitoramento hidrometeorológico e previsão de cheias para essa bacia. A DESO tem especial interesse nos estudos de operação de reservatório e na alocação de volume de espera. A Defesa Civil Municipal de Aracaju pela determinação das manchas de inundação na área urbana. A Serhma

está especialmente preocupada com a gestão da barragem e em como ela pode afetar as inundações em Aracaju. Para atender todas essas demandas, torna-se de grande importância um estudo mais detalhado da bacia.

2. OBJETIVOS

O objetivo finalístico desta pesquisa é propor um modelo de previsão de cheias e determinação de áreas alagáveis na bacia hidrográfica do rio Poxim, no estado de Sergipe. Para isso, buscou-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Análise de dados e informações hidrológicas, hidráulicas e de sistemas de informações geográficas existentes, para análises estatísticas e modelagens matemáticas hidrológicas e hidráulicas;
- Modelagem hidrológica (modelo chuva-vazão) e hidráulica (propagação de cheias na calha fluvial);
- Estudo de operação de reservatório com vistas a propor premissas de alocação de volume de espera para controle de inundação para o reservatório da barragem no rio Poxim-Açu, trabalhando com análise estatística e conceito de risco, tanto para o atendimento do abastecimento público como para o controle de inundações;
- Estudo piloto para um sistema de previsão hidrológica para a bacia do rio Poxim, incluindo possível operação de reservatório, utilizando softwares gratuitos e existentes no mercado;
- Elaborar mapas de risco de inundação e de níveis de alerta visando a mitigação dos efeitos de cheias do rio Poxim na cidade de Aracaju, utilizando os dados de campo disponíveis;
- Verificar a rede de monitoramento hidrometeorológico existente e, se necessário, sugerir aperfeiçoamentos para a aquisição de dados com vistas a atender o sistema de previsão.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Inundações e medidas de mitigação

A variabilidade temporal das precipitações e vazões tem como resultado visível a ocorrência de excessos hídricos nos períodos úmidos e a carência nos períodos secos. A qualificação desses processos depende da observação das variáveis hidrológicas que os descrevem ao longo do tempo. Essas variáveis possuem comportamento estocástico e necessitam de amostras confiáveis e representativas para sua estimativa. Assim, o conhecimento de como se apresentam os fenômenos hidrológicos extremos é subsídio para que os impactos decorrentes destes eventos sejam mitigados, diminuindo problemas socioeconômicos de grande escala (TUCCI, 1993; MONTE et al., 2015).

As inundações urbanas estão entre os desastres mais caros e prejudiciais, causando importantes impactos sobre a sociedade, como perdas de vidas humanas, danos materiais,

prejuízos econômicos, contaminação de fontes de água, propagação de doenças transmitidas pela água etc. (BARBI, 2015). Para mitigar os efeitos desses eventos extremos, podem ser adotados conjuntos de ações de ordem estrutural ou não estrutural.

As medidas estruturais são obras de engenharia implementadas para reduzir o risco de enchentes, como por exemplo a construção de reservatórios e diques. As ações não estruturais são aquelas relacionadas ao planejamento e gestão dos recursos hídricos a curto e longo prazo. Envolvem: análise da vulnerabilidade dos sistemas hídricos, considerando os cenários de mudança e variabilidade climática; planejamento e gestão de riscos; e elaboração de planos de contingência (TUCCI & BRAGA, 2003). Exemplos dessas ações são a regulamentação do uso do solo e a implementação de sistemas de previsão e alerta.

A melhor forma de combater os impactos das enchentes é a não ocupação urbana das áreas baixas naturalmente inundáveis, sendo essa a alternativa mais barata e eficaz para evitar os prejuízos com as inundações. Para que ocorra esta regulamentação, é necessário primeiro determinar os níveis de água máximos para diferentes locais e probabilidades de ocorrência, confeccionar os mapas das áreas inundáveis e por fim estabelecer o zoneamento das áreas de inundação.

O zoneamento consiste na definição das regras de ocupação das áreas mais susceptíveis à ocorrência de inundações. Geralmente, o zoneamento divide a área passível de inundação em zonas de alta, média ou baixa probabilidade de inundação, e aplica restrições altas, médias e baixas, respectivamente, para a ocupação de cada uma das zonas.

A zona de alta probabilidade de inundação é uma zona de restrição absoluta à construção de estruturas. Esta área normalmente é ocupada por parques, áreas de prática de esportes, ciclovias e passeios. A zona de alta probabilidade pode ser definida como a área inundável durante as cheias com tempo de retorno da ordem de 25 ou 50 anos.

Já a zona de média probabilidade é aquela atingida por cheias com tempo de retorno de 25 até 100 anos, podendo ser ocupada por estacionamentos, estradas, pontes, e habitações de mais de um piso, em que o piso superior deverá estar num nível superior ao das cheias de baixa probabilidade.

A zona de baixa probabilidade pode ser ocupada, desde que a população seja orientada a respeito dos riscos. Idealmente também devem ser adotadas construções de dois pisos, onde o piso superior possa ser utilizado durante os períodos críticos. A zona de baixo risco pode ser definida como a zona que é inundada por cheias com tempo de retorno superior a 100 anos (TUCCI, 1993).

Os sistemas de previsão e alerta contra cheias despontam como um importante instrumento para suporte às ações realizadas pela Defesa Civil, permitindo que procedimentos de emergência possam ser realizados de forma rápida e eficaz, sendo reconhecidos como ferramentas indispensáveis na proteção de vidas humanas. Como exemplos de ações proporcionadas por esses sistemas podemos citar a mobilização de equipes, alerta sobre local

e momento de ocorrência do evento, antecipação de medidas preparatórias, bem como evacuação e realocação dos habitantes localizados em áreas susceptíveis à inundação. Devido a sua importância, esses sistemas têm recebido grandes investimentos a nível internacional, contribuindo para a construção de cidades com capacidade de suportar impactos causados por desastres naturais (SIQUEIRA, 2015).

As ações a serem adotadas devem ser estudadas e analisadas cuidadosamente para determinar as técnicas mais adequadas. Porém, o problema das inundações é bastante complexo, devendo contemplar ações multidisciplinares e abrangentes sobre a bacia hidrográfica como sistema integrado e dinâmico (KRUMMENAUER et al., 2015).

3.2. Modelagem hidrológica/hidráulica e sistemas de alerta

Para prever os impactos que eventos extremos provocarão, busca-se associar os modelos hidrológicos aos modelos hidráulicos. Nesse contexto, os modelos hidrológicos fornecem as vazões simuladas considerando diferentes tempos de retorno. Essas vazões são aplicadas como dados de entrada no modelo hidráulico, obtendo como resultado o comportamento hidráulico do canal em um determinado cenário futuro, sendo possível avaliar seus efeitos nas manchas de inundação.

Existem diversos softwares, comerciais e não comerciais, desenvolvidos com base em conceitos físicos ou empíricos, visando a modelagem hidráulica-hidrológica. O *Hydrologic Engineering Center* (HEC) da *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) vem desenvolvendo e aperfeiçoando softwares voltados à engenharia hidrológica e planejamento desde 1964. Devido a sua disponibilização gratuita, bem documentada e interface amigável, esses softwares vêm sendo amplamente utilizados tanto no ambiente acadêmico como no empresarial (e.g. AZAM et al., 2017; CABRAL et al., 2016; HALWATURA & NAJIM, 2013; OLEYIBLO & LI, 2010; KNEBL et al., 2005; ...).

Entre os modelos disponíveis, o *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) busca representar todos os processos hidrológicos com base em equações físicas. O modelo hidrológico assume que a bacia hidrográfica é constituída por grupos de sub-bacias nas quais os processos hidrológicos são calculados considerando parâmetros que refletem as características e condições médias da região. Estes processos são: precipitação; interceptação; evapotranspiração; infiltração; escoamento superficial na área de drenagem; e propagação da onda de cheia na rede hidrográfica. Para cada processo existem variadas metodologias de cálculo que podem ser selecionadas e configuradas dependendo da disponibilidade de informações. Os resultados finais do processo de simulação são os hidrogramas de cheia nas seções de referência das sub-bacias e no exutório da bacia hidrográfica de estudo (USACE, 2010).

O *River Analysis System* (HEC-RAS) é um dos modelos hidráulicos mais populares para a delimitação das zonas inundáveis fluviais. Ele permite simular escoamento em superfície livre em regime permanente e não-permanente tanto na escala unidimensional (1D) como

bidimensional (2D). Também é possível realizar simulações de transporte de sedimentos e qualidade d'água (USACE, 2008).

Os dados de entradas tanto do HEC-HMS como do HEC-RAS podem ser preparados através do *Data Storage System* (HEC-DSS), que é um sistema de banco de dados que permite organizar e analisar de forma eficiente todos os dados utilizados pelos modelos através da sua interface gráfica HEC-DSSVue, baseada em Java. Já o processamento de entradas geoespaciais, tais como o Modelo Digital de Elevação (MDE), a rede de drenagem e a delimitação de sub-bacias, contam com o *Geospatial Hydrologic Modeling Extension* (HEC-GeoHMS) e o *Geospatial River Analysis Extension* (HEC-GeoRAS), que permitem o processamento de informações geográficas com base na extensão *Spatial Analyst* do ArcGIS-ESRI. Entretanto, é válido destacar alguns estudos que demonstraram certa dificuldade da ferramenta do ArcGIS na extração da rede de drenagem, principalmente em regiões planas (BUARQUE, 2009). Por isso, o processamento em outros softwares pode trazer melhores resultados.

Diversos autores estão utilizando um sistema de monitoramento de cheias com a integração dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS (e.g. KNEBL *et al.*, 2005; ...). O Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE) da CPRM pretende implementar os softwares HEC nas suas bacias hidrográficas, que atualmente são monitoradas com base em dados observacionais e modelos empíricos simples.

Quando se tem disponível um reservatório na bacia hidrográfica que tenha capacidade de conter cheias, a gestão de sua operação pode ser determinante durante eventos extremos. Para isso é de grande importância a definição de regras de operação considerando diferentes cenários. O software HEC-HMS é possível representar de forma simplificada o balanço de massa de um reservatório, permitindo a simulação de diferentes cenários de operação de uma barragem, considerando as curvas cota, área e volume do reservatório.

Apesar da robustez que todos esses softwares oferecem, de nada servem sem uma boa base de dados, representativa e consistente. Por isso, a grande importância da etapa de levantamento e consistência de dados, para que se tenha informações suficientes sobre a bacia que levem a uma boa calibração dos modelos. Um dos maiores desafios da hidrologia é lidar com bacias sem monitoramento.

Considerando essa realidade, algumas técnicas foram desenvolvidas, como, por exemplo, a regionalização que considera que bacias hidrográficas com algumas características em comum, também conhecido como comportamento hidrológico homogêneo, podem responder de forma parecida a eventos de chuva. Um exemplo de trabalho com bacia sem monitoramento é o de IBRAHIM-BATHIS & AHMED (2016) que através do HEC-HMS e de sensoriamento remoto obteve bons resultados de simulação para uma bacia sem monitoramento na Índia utilizando os parâmetros calibrados de uma bacia vizinha com características parecidas.

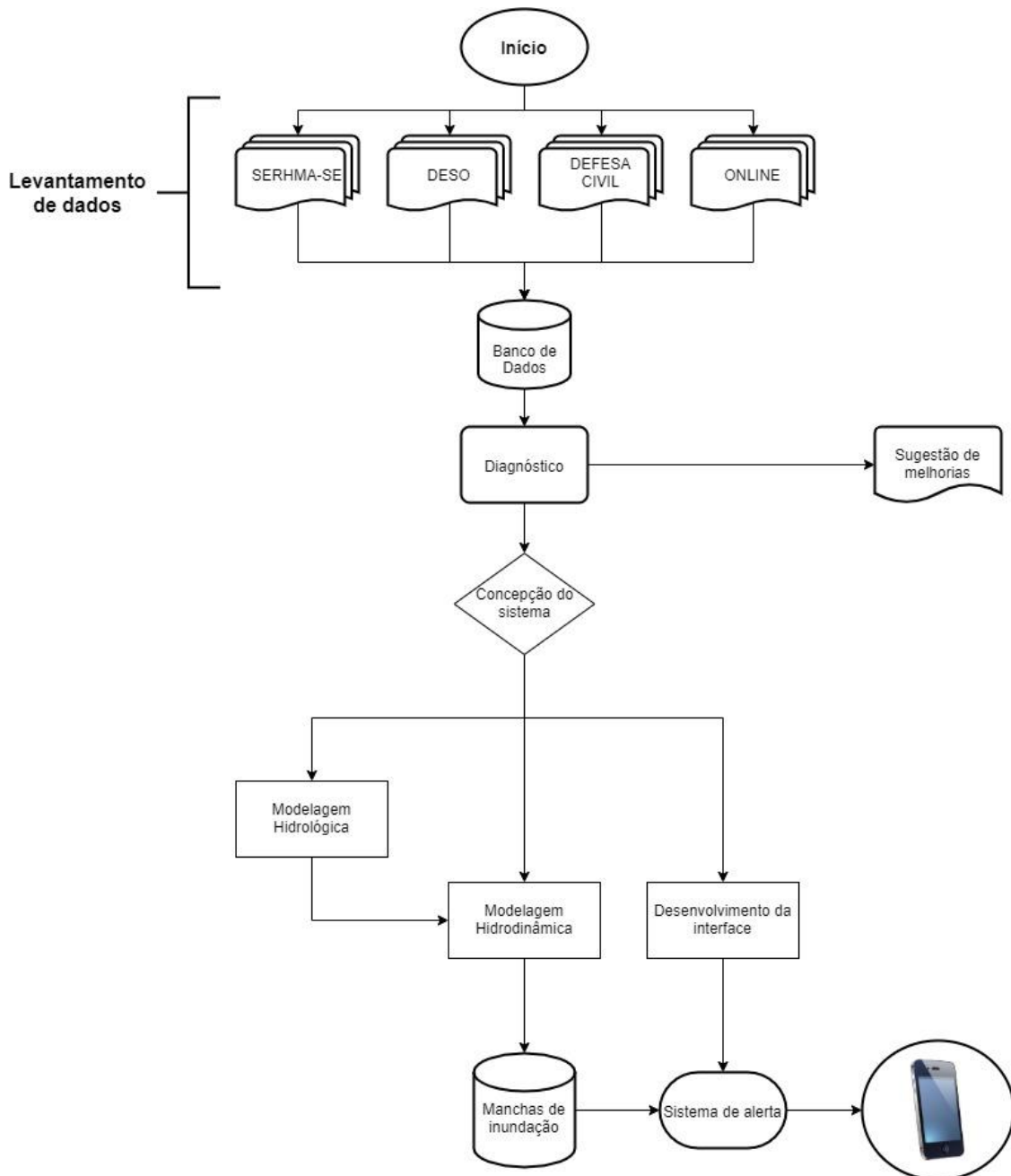
As técnicas disponíveis para trabalhar com bacias sem monitoramento, normalmente, servem para estudos isolados com maior foco para a estimativa de estatísticas e de vazões de

referência. Entretanto, a estruturação de uma rede monitoramento hidrometeorológico é essencial para o conhecimento da dinâmica de uma bacia, ainda mais quando se visiona a implementação de um sistema de alerta, que deve funcionar em tempo real e está atrelado a decisões que impactam a sociedade e a economia da região.

4. METODOLOGIA EMPREGADA

A metodologia foi desenvolvida seguindo o fluxograma apresentado na Figura 1 e será detalhada nas próximas seções.

Figura 1. Fluxograma da metodologia empregada.



4.1. Levantamento e processamento de informações

A primeira etapa do projeto teve o objetivo de levantar e analisar informações hidrológicas, hidráulicas e de sistemas de informações geográficas (SIG) necessárias para o desenvolvimento de um sistema de alerta a inundações para a bacia do rio Poxim. O banco de dados da Serhma foi a principal fonte de informações consultada. Nele foi obtido o Atlas Digital de Recursos Hídricos do estado de Sergipe, que é atualizado continuamente, contendo uma base robusta de dados geoespaciais, que foram bastante úteis para o desenvolvimento deste trabalho, além de concentrar informações de outros estudos que já foram realizados no estado.

Entre as diversas informações disponíveis, foram utilizadas: mapas georreferenciados de tipo e uso do solo do ano de 2004; localização das estações de monitoramento hidrometeorológico; hidrografia detalhada; e delimitação de sub-bacias. A Serhma também disponibilizou imagens de alta resolução e curvas de nível a cada 5 m cobrindo o município de Aracaju, levantadas em 2004 pela Secretaria de Estado do Planejamento Orçamento e Gestão de Sergipe (SEPLAG/SE); dados de chuva, cota e vazão; curvas-chave; batimetria de algumas seções transversais, realizadas no rio Poxim em 2010; relatórios de outorga; e estudos realizados na bacia pela Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Também foram realizadas reuniões e visitas à DESO, que disponibilizou o seu banco de dados com as seguintes informações: projeto executivo da barragem Jaime Umbelino de Souza no rio Poxim-Açu; dados de medições de vazão por molinete realizadas próximo do ponto de captação d'água da DESO (cerca de três dados por semana, desde 2014); dados de nível por sensor e leitura de réguas na barragem; e algumas fotos do ano de 2017 de pontos de interesse da barragem.

A Defesa Civil Municipal de Aracaju também contribuiu com a disponibilização de curvas de nível a cada 1 m, provenientes de um levantamento realizado pela Prefeitura em 2004; mapas de manchas de inundações, geradas com base na elevação do terreno e conferidas em campo; e contato com a Comunidade Jabotiana Viva, a qual forneceu informações sobre os eventos de inundações ocorridos no bairro de Jabotiana em Aracaju com registros fotográficos.

Além dos bancos de dados das instituições estaduais, também foram consultados bancos de dados online: Gestor PCD e Hidroweb da ANA; Mapa Iterativo do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN); Banco de Dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC); e Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

Foi realizada uma análise quali-quantitativa de dados e informações geoespaciais, hidrológicas e hidráulicas, com vistas à aplicação desses dados no ajuste dos modelos utilizados na concepção do sistema de alerta. Os dados hidrológicos foram avaliados em termos de extensão e continuidade da série histórica e inventariados através da construção de planilhas

contendo informações das estações (nome, código, latitude, longitude, altitude, operador, responsável), período e porcentagem de falhas. Para verificação dos períodos com falhas foram construídos diagramas de Gantt para as séries de precipitação e vazão. Essa etapa do trabalho foi apresentada em pôster no XII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe (VALÉRIO & NEGRÃO, 2019a).

Ferramentas foram desenvolvidas em macros do Excel ou programas em linguagem FORTRAN para processar e formatar os dados disponibilizados pelas diferentes fontes. Os dados telemétricos de chuva disponibilizados pelo Gestor PCD foram acumulados em intervalos horários, diários, mensais e anuais para facilitar as análises. Os dados fluviométricos, tanto das estações telemétricas como das convencionais, foram analisados e comparados entre si através de gráficos e cotogramas. Algumas informações fornecidas pela Serhma não estavam disponíveis no Hidroweb, como por exemplo: alguns dados de medição de descarga, perfil longitudinal e curva de descarga.

Foi observado que as curvas disponibilizadas pela Serhma apresentavam inconsistências e por isso novas curvas foram propostas. Para isso, o ajuste das curvas se baseou nas técnicas descritas por Jaccon & Cudo (1989) e a análise da extrapolação superior das curvas seguiu os métodos de extrapolação: Área x Velocidade; Stevens (Chézy); Stevens (Manning); Manning e Declividade-Conveyance, que consideram características geométricas e hidráulicas das seções (RANTZ et al. 1982), obtidas através do perfil longitudinal da estação.

Os registros fotográficos de inundações, disponibilizados pela Comunidade Jabotiana Viva, foram mapeados com auxílio do *Google Street View*. Esses pontos podem auxiliar a identificação de manchas de inundação e a calibração do modelo hidráulico. A metodologia empregada neste mapeamento foi bastante simples e consistiu basicamente em três etapas.

A primeira foi a obtenção de registros fotográficos de cheias históricas, foram utilizados registros de inundações ocorridas nos anos de 2010, 2011, 2015 e 2017. A segunda etapa foi a geolocalização dos registros fotográficos por meio da ferramenta *Google Maps* e *Google Street View*. Identificados os locais, para cada registro foi inserido um marcador em uma camada relativa ao evento, resultando em quatro camadas de pontos, uma para cada ano. A terceira e última etapa foi a geração do arquivo de pontos.

Por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) foram gerados arquivos vetoriais de pontos (*shapefile*), com as informações dos pontos levantados. Essa metodologia foi apresentada no XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (VALÉRIO & NEGRÃO, 2019b).

As curvas de nível foram transformadas para os formatos GRID ou TIN para representarem o MDE da bacia e foram processadas dependendo das necessidades de cada modelo.

Visando um reconhecimento mais profundo da bacia do rio Poxim, foram realizadas visitas de campo percorrendo a bacia, nas quais foram visitadas as instalações da barragem, a nascente do rio Poxim-Açu e as áreas urbanas com problemas de inundação.

Também foram realizadas medições de vazão e de perfil transversal de alguns pontos de interesse. As saídas de campo ocorreram nos dias 12, 13 e 14/03/2019 e contaram com o apoio de técnicos da Serhma. Os objetivos foram: 1) levantar as seções das estações Colégio Agrícola (IFS) e Poxim BR-101 (telemétrica), utilizando o equipamento Nível Digital; e 2) realizar medições de vazões nas referidas seções, utilizando molinete hidrométrico.

A intenção de realização desses levantamentos foi melhorar a curva-chave que foi proposta para a estação Colégio Agrícola e transformar o nível registrado na estação telemétrica em vazão, permitindo assim realizar, ao menos, um ajuste da magnitude das vazões simuladas.

4.2. Modelagem hidrológica

Para realizar as simulações hidrológicas foi utilizado o software HEC-HMS, por apresentar configuração flexível e permitir uma representação simples, porém confiável, atendendo a realidade de escassez de dados.

Inicialmente, o projeto considerou a subdivisão da Bacia do Rio Poxim em pontos com monitoramento fluviométrico, tanto de estações telemétricas como convencionais. Esses pontos foram: a Barragem Jaime Umbelino de Souza; as estações convencionais nos rios Poxim-Açu e Poxim-Mirim; a estação telemétrica na BR-101; e a estação localizada próxima da captação da DESO, na ponte da UFS, local no qual existe um pequeno barramento construído para evitar a intrusão de água do mar.

Entretanto, como foi observado após o levantamento e processamento dos dados, os dados provenientes das estações fluviométricas, eram escassos, com diversas falhas e não contemporâneos. Além disso, as medições de vazão eram insuficientes para constituir curvas-chave confiáveis e obter séries de vazão, impedindo a calibração desses pontos.

Devido a essa grande incerteza dos dados fluviométricos, o modelo hidrológico foi ainda mais simplificado, desconsiderando as estações fluviométricas e dividindo as sub-bacias apenas nos afluentes Poxim-Açu e Poxim-Mirim e na Barragem, finalizando seu domínio no rio Poxim, antes da sua confluência com o rio Pitanga.

Visando a integração com o modelo hidráulico, também foram criados um projeto para representar o rio Pitanga e mais dois outros projetos para representar as sub-bacias de dois canais urbanos que desembocam próximo ao bairro Jabotiana, um na margem direita e outro na margem esquerda do rio Poxim. Dessa forma, os seguintes domínios de simulação foram criados:

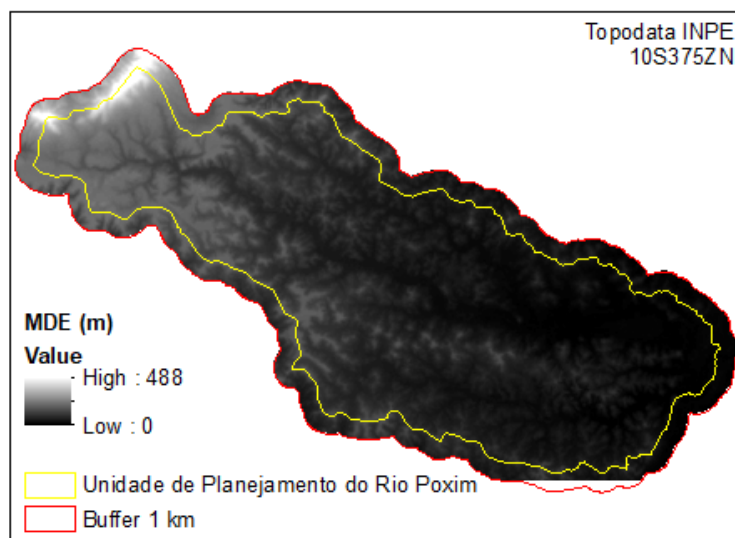
- Bacia do Rio Poxim;
- Bacia do Rio Pitanga;
- Bacia do Canal da Margem Direita;
- Bacia do Canal da Margem Esquerda.

A seguir serão descritos os procedimentos realizados para estruturar o modelo hidrológico no HEC-HMS para cada um dos domínios analisados.

4.2.1. Processamento do Modelo Digital de Elevação

Boa parte das informações utilizadas na modelagem hidrológica foram extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE utilizado nas bacias do rio Poxim, do rio Pitanga e do Canal da Margem Direita foi obtido através do projeto Topodata do INPE, o qual disponibiliza dados geomorfológicos locais, provenientes do SRTM/USACE, e que passaram por processos de aprimoramento (VALERIANO, 2008). Através do site do Topodata INPE (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>), foram baixados os arquivos de altitude (ZN) em GeoTiff 32 bits da folha de prefixo: “10S375ZN”. O MDE que possui resolução horizontal de 30m e resolução vertical de 1m, foi projetado para o Datum SIRGAS 2000 e sistema de coordenadas UTM 24S. Posteriormente, o MDE foi recortado considerando um buffer de 1km do contorno da Unidade de Planejamento do Rio Poxim (Figura 2).

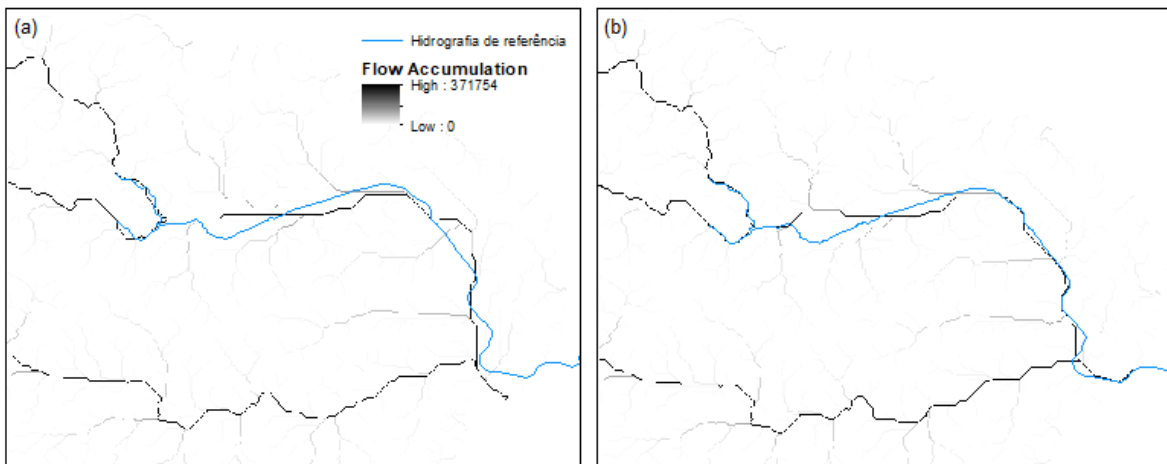
Figura 2. Modelo Digital de Elevação cobrindo a Unidade de Planejamento do Rio Poxim.



Esse MDE foi processado com auxílio do plug-in HEC-GeoHMS do ArcGIS (FLEMING *et al.*, 2013). No primeiro processamento foi verificado que algumas partes da rede de drenagem não seguia o percurso esperado e apresentavam paralelismo no percurso dos rios, dificultando a delimitação das sub-bacias (Figura 3a). A hidrografia disponível no Atlas Digital de Recursos Hídricos de SE, que foi traçada pela Serhma com base em imagens de satélite, foi utilizada como referência. Para “forçar” a direção de fluxo seguir o indicado pela hidrografia de referência, foi necessário utilizar a técnica DEM *Reconditioning*, que “afunda” o MDE da região (FLEMING *et al.*, 2013).

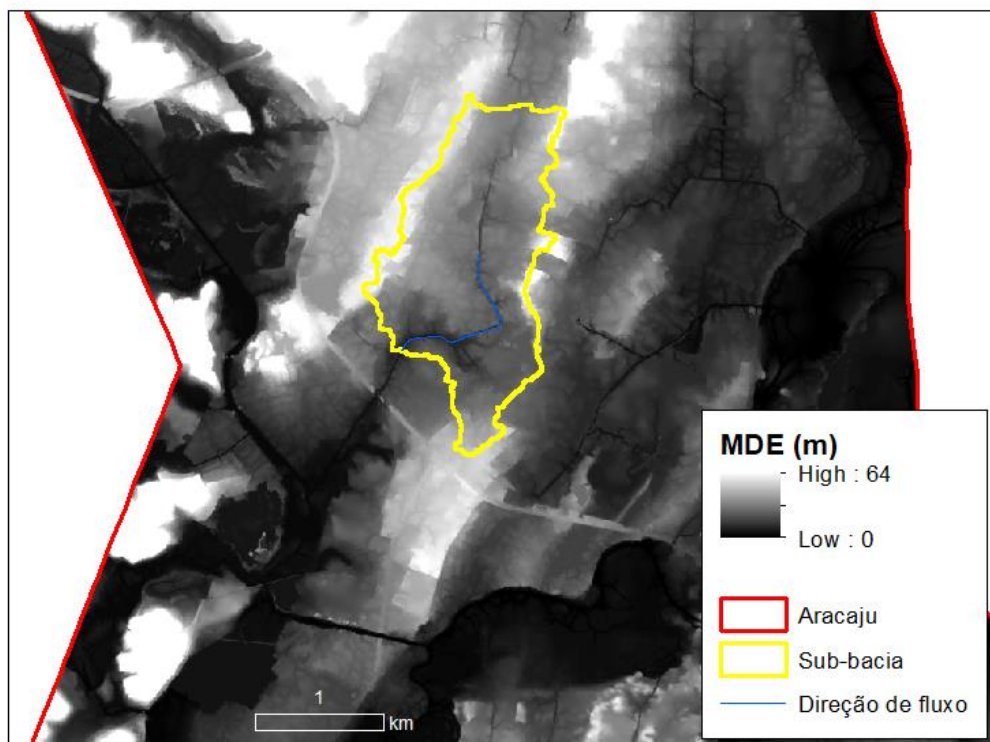
Para evitar muitas alterações no MDE, apenas os trechos de rio que apresentavam problemas foram considerados nesse processamento. Como parâmetros foram utilizadas dez células (300 m) entorno da hidrografia cuja elevação foi alterada (*Number of Cell for Stream Buffer*) em valores de 2m na profundidade suave (*Smooth Drop in Z Units*) e 3m na acentuada (*Sharp Drop in Z Units*). O resultado é apresentado na Figura 3b.

Figura 3. Processamento no HEC-GeoHMS da rede de drenagem da região plana da bacia, (a) processamento inicial e (b) após correção com a ferramenta DEM *Reconditioning*.



Já para a bacia do Canal da Margem Esquerda do rio Poxim, por ser uma bacia menor e mais urbanizada, foi utilizado o MDE de alta resolução, cedido pela Prefeitura de Aracaju e disponibilizado por Bahia (2017), com resolução horizontal e vertical de 1m (Figura 4).

Figura 4. MDE de alta resolução utilizado na delimitação da bacia do Canal da Margem Esquerda.

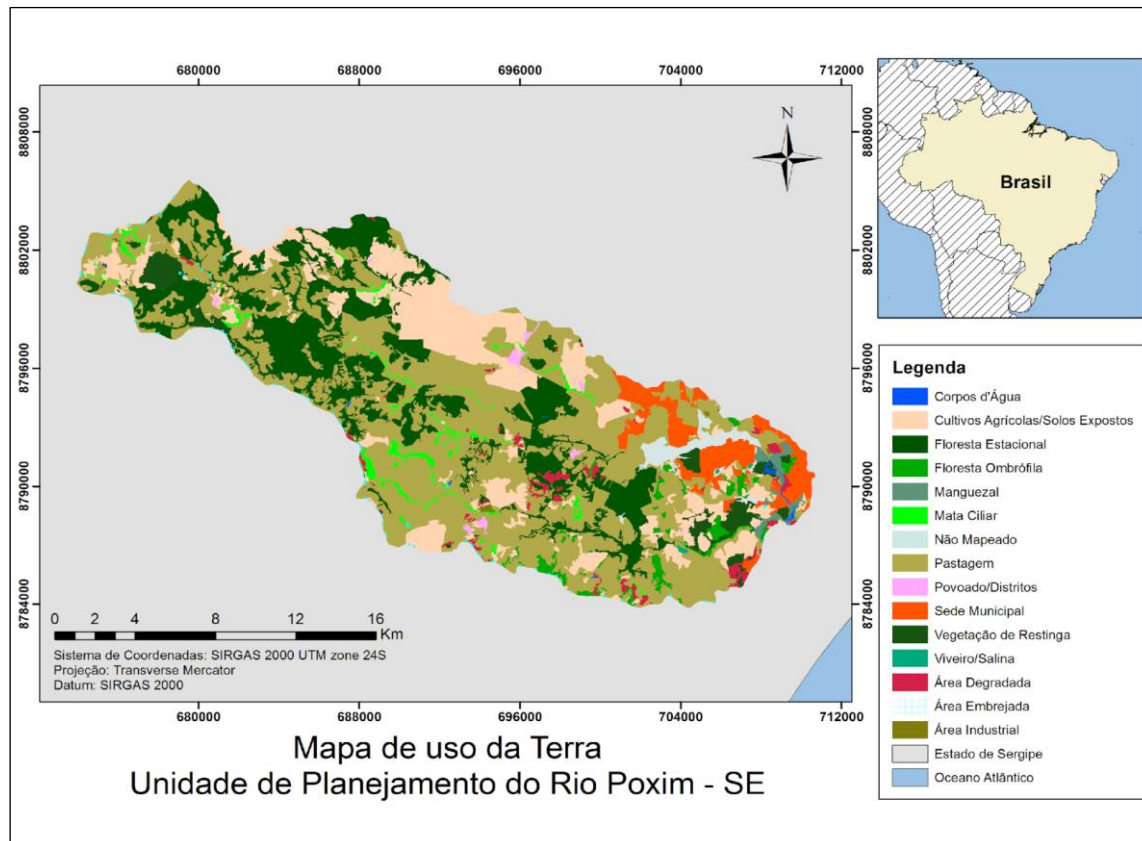


4.2.2. Processamento dos Mapas de Tipo e Uso do Solo

A extração de informações relacionadas ao tipo e uso do solo foi realizada com base na metodologia *SCS Curve Number*. Para gerar o mapa de *Curve Number* (CN) da área de estudo, seguiu-se metodologia apresentada por Merwade (2012), na qual combina o mapa de uso do solo com o mapa de tipo de solo e, considerando as características hidrológicas do solo, relaciona valores de CN para cada combinação.

O mapa de uso do solo, obtido através do Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe, foi elaborado pela Serhma em 2010 e seu fator de escala é de 0,9996. No mapa da Figura 5 são apresentados os usos do solo para a Unidade de Planejamento do Rio Poxim.

Figura 5. Mapa de uso do solo da Unidade de Planejamento do Rio Poxim.

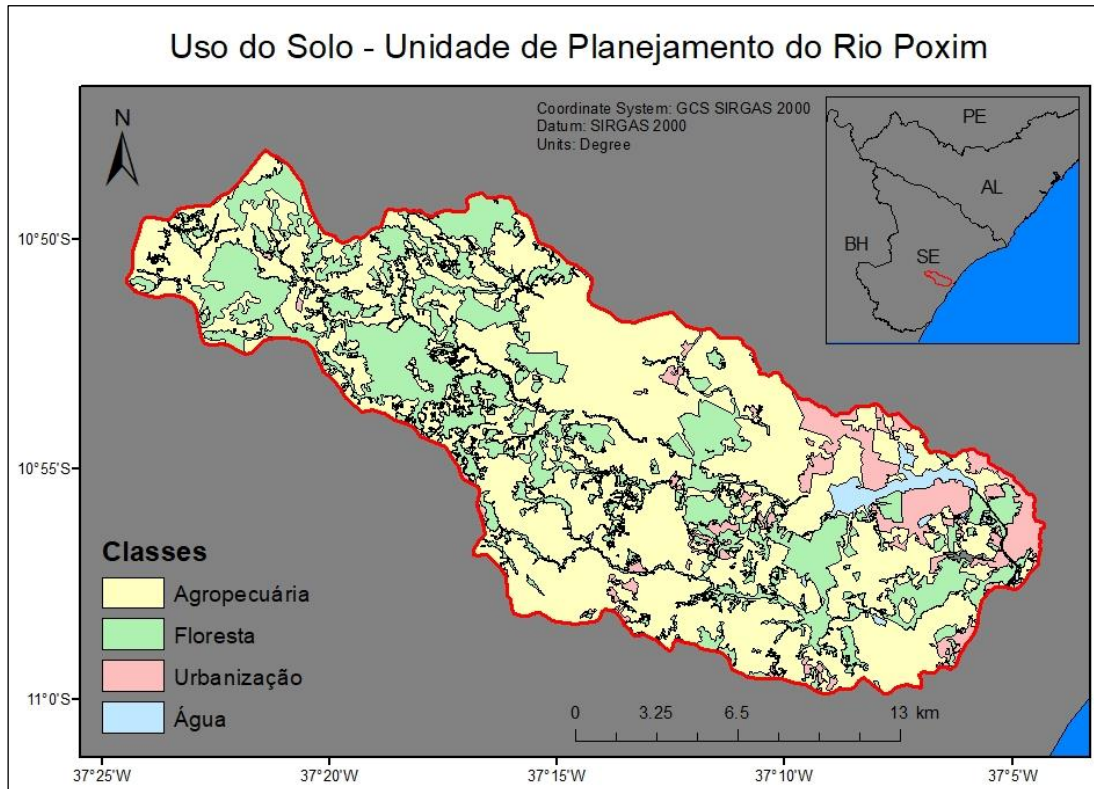


Visando a simplificação, os diferentes usos do solo foram reagrupados, reduzindo-se em quatro classes. Na Tabela 1 são apresentados os agrupamentos considerados e na Figura 6 é apresentado o mapa resultante.

Tabela 1. Reclassificação dos usos do solo.

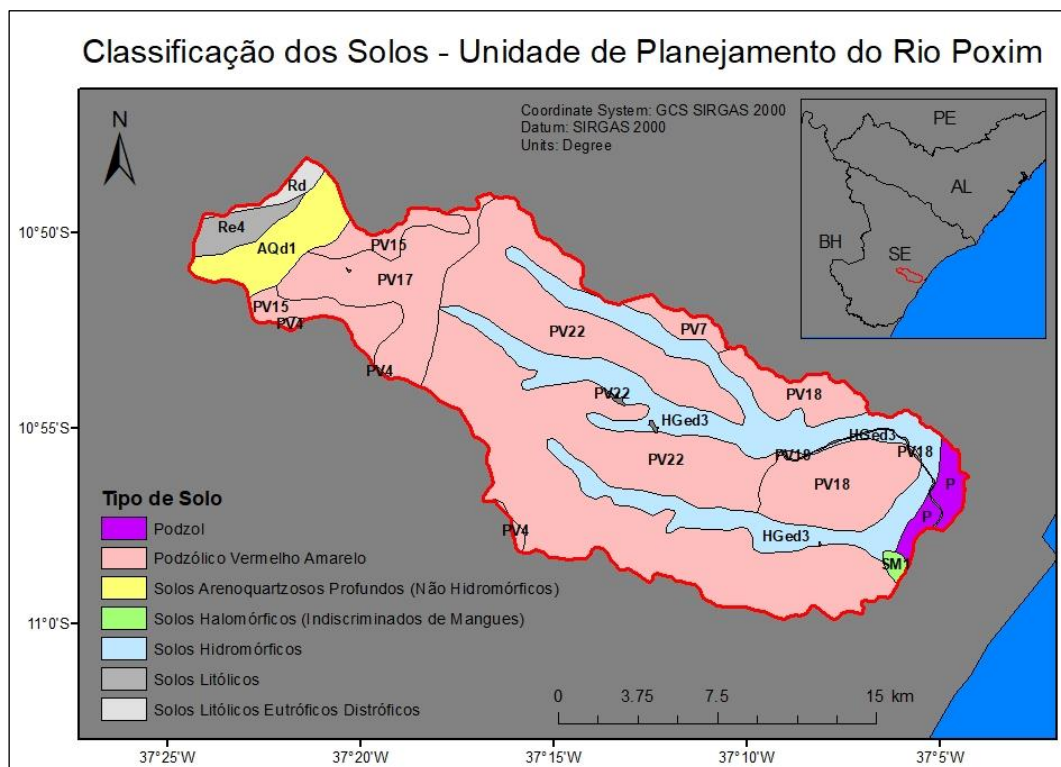
Classificação Original	Nova Classificação
Cultivos Agrícolas/Solos Expostos	Agropecuária
Pastagem	
Área Embrujada	Água
Corpos d'Água	
Viveiro/Salina	
Floresta Estacional	Floresta
Floresta Ombrófila	
Manguezal	
Mata Ciliar	
Vegetação de Restinga	
Área Degradada	Urbanização
Área Industrial	
Não Mapeado	
Povoado/Distritos	
Sede Municipal	

Figura 6. Mapa de uso do solo após reclassificação.



O mapa de tipo de solo, também obtido através do Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe, foi elaborado pela Embrapa e Sudene em 1975 e possui escala de 1/400.000 (Figura 7).

Figura 7. Classificação dos tipos de solo da Unidade de Planejamento do Rio Poxim.



Inicialmente, cada tipo de solo precisou ser associado a uma das quatro Classes Hidrológicas do Solo, que são estabelecidas para serem utilizadas na metodologia SCS. Essas classes estão relacionadas com o potencial de escoamento, sendo: A – baixo; B – moderado; C – alto; e D – muito alto. Seguindo o proposto por Sartori *et al.* (2005), na Tabela 2 são apresentadas as classes consideradas para cada tipo de solo.

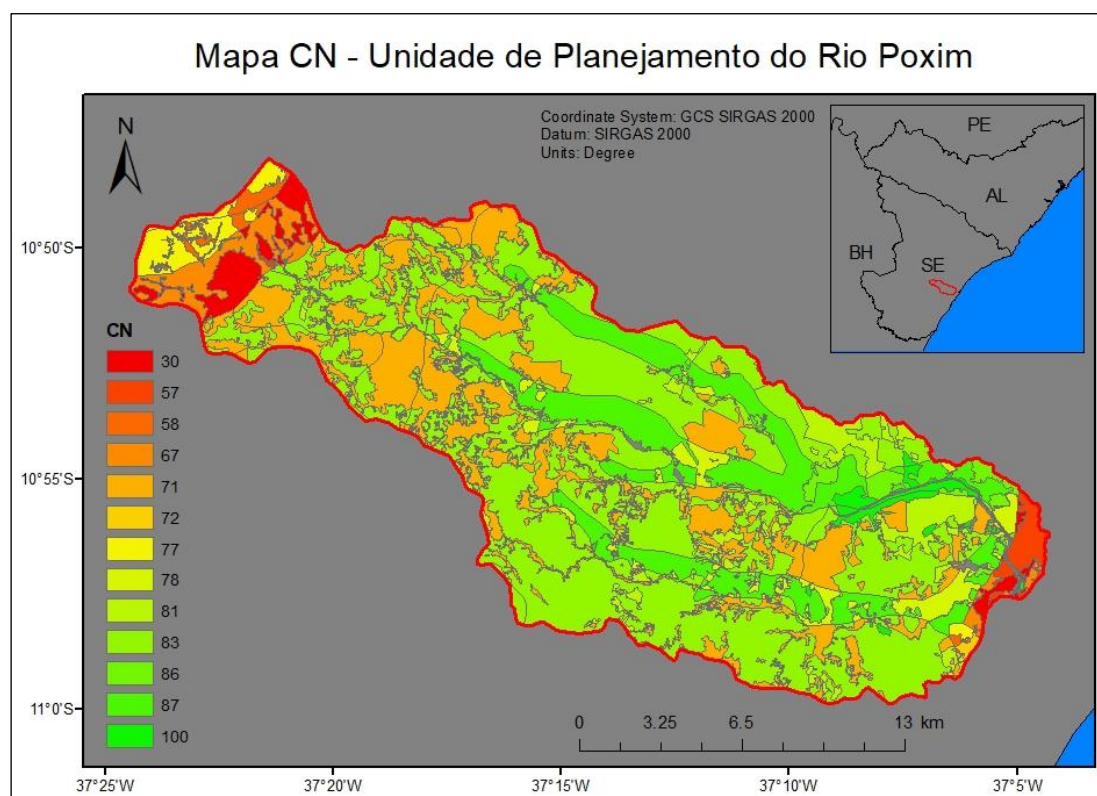
Tabela 2. **Classificação hidrológicas do solo.**

Tipo de Solo	Classe	Classe Hidrológica
Podzol	Espodossolos	C
Podzólico Vermelho Amarelo	Argissolos	C
Solos Arenoquartzosos Profundos (Não Hidromórficos)	Neossolos	B
Solos Halomórficos (Indiscriminados de Mangues)	Gleissolos	D
Solos Hidromórficos	Vertissolos	D
Solos Litólicos	Neossolos	D
Solos Litólicos Eutróficos Distróficos	Neossolos	D

Posteriormente, o mapa de tipo de solo e o mapa de uso do solo foram combinados seguindo as orientações de Merwade (2012), resultando em um mapa de CN (

Figura 8). Esse mapa de CN foi utilizado no HEC-GeoHMS, no qual foram extraídos alguns parâmetros necessários para os métodos aplicados na modelagem hidrológica, tais como CN médio e *Lag*.

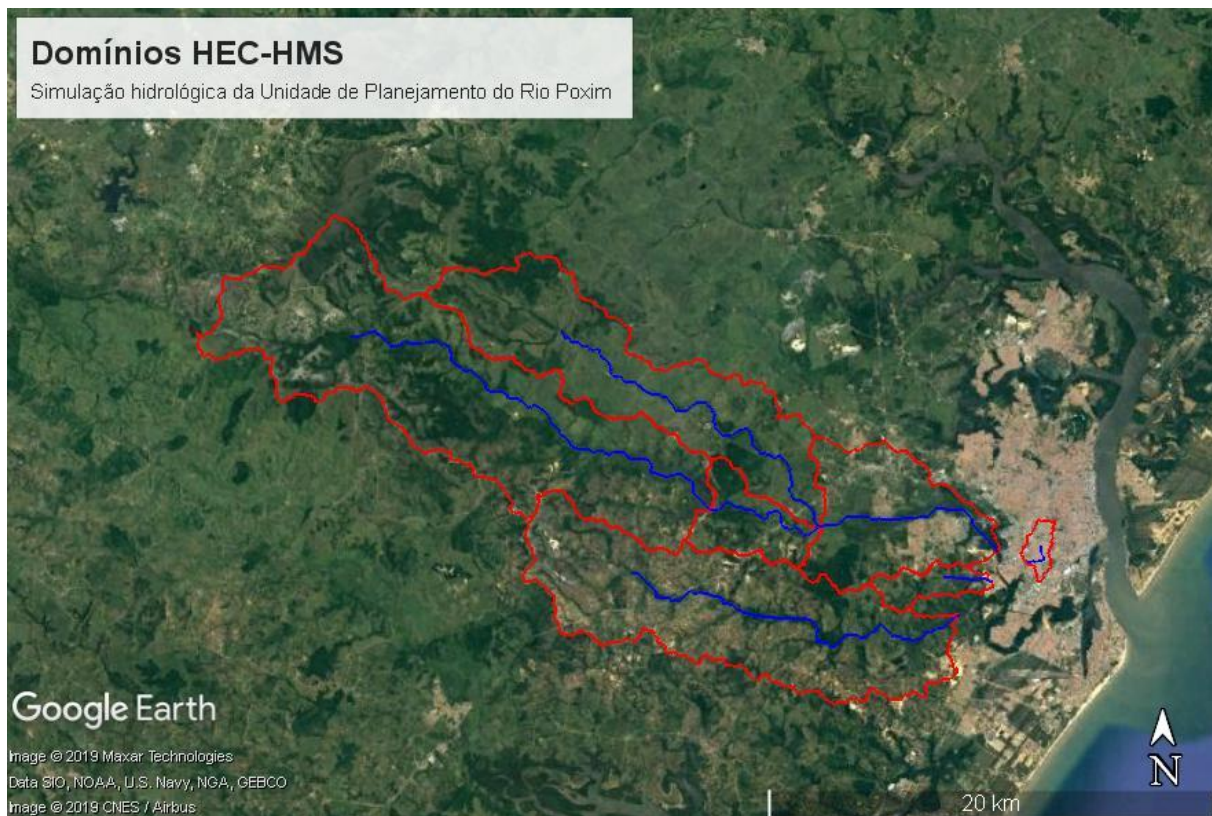
Figura 8. **Mapa de CN para a Unidade de Planejamento do Rio Poxim.**



A partir do MDE e do Mapa de CN, com auxílio do HEC-GeoHMS, informações relacionadas à geometria e uso do solo, tais como: área; declividade média; centroides das sub-bacias;

comprimentos dos trechos de rios; CN médio; e *Lag*, foram extraídas para cada sub-bacia e trecho de rio. Essas informações foram resumidas em um arquivo de texto “.basin” para serem importadas pelo HEC-HMS, onde o modelo hidrológico foi estruturado para cada domínio de simulação (Figura 9).

Figura 9. Domínios de simulação hidrológica do HEC-HMS para a Unidade de Planejamento do Rio Poxim.



4.2.3. HEC-HMS

Após criado o projeto no HEC-HMS, as informações já processadas pelo HEC-GeoHMS foram importadas através do arquivo “.basin” e algumas edições nos nomes e descrições foram realizadas para facilitar a identificação dos elementos do modelo. Na estrutura mais simplificada da bacia do rio Poxim, foram estabelecidos apenas os elementos: Barragem, que recebe a contribuição do rio Poxim-Açu; Confluência, que combina a contribuição do rio Poxim-Açu com a do rio Poxim-Mirim; e Outlet, com a contribuição incremental do rio Poxim, já próximo do bairro Jabotiana. O projeto do HEC-HMS reuniu todos os domínios das bacias pré-processadas no HEC-GeoHMS, incluindo, além da bacia do rio Poxim, a bacia do rio Pitanga, a bacia do Canal da Margem Direita e a bacia do Canal da Margem Esquerda (Figura 10 e Figura 11).

Figura 10. Sub-bacias hidrográficas do modelo HEC-HMS.

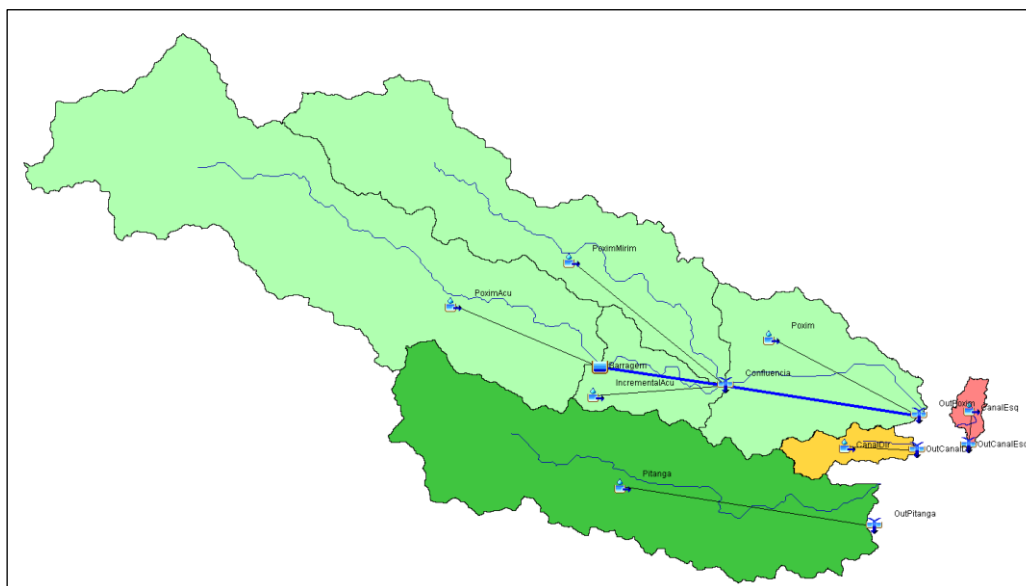
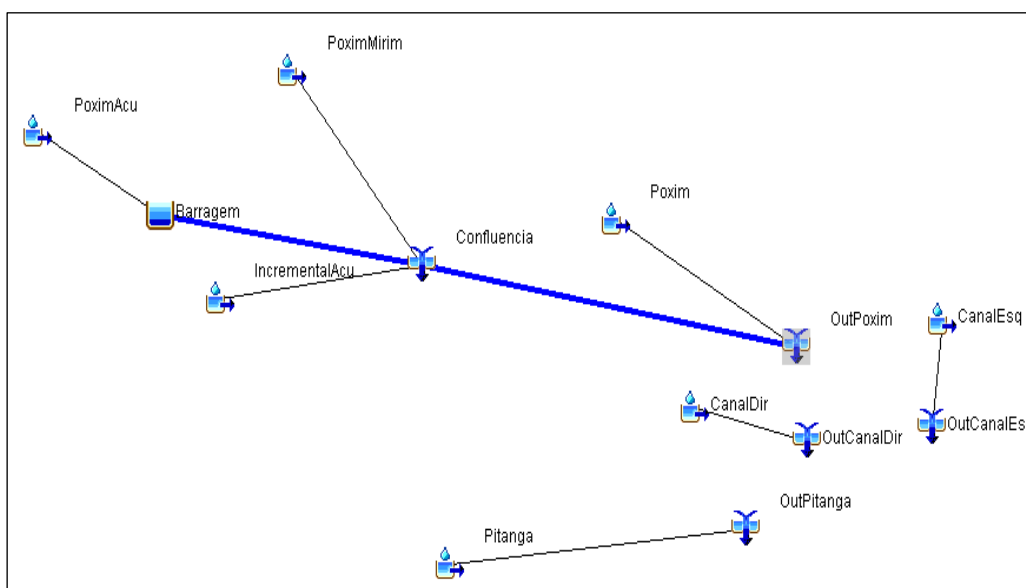


Figura 11. Estrutura dos elementos do modelo HEC-HMS.



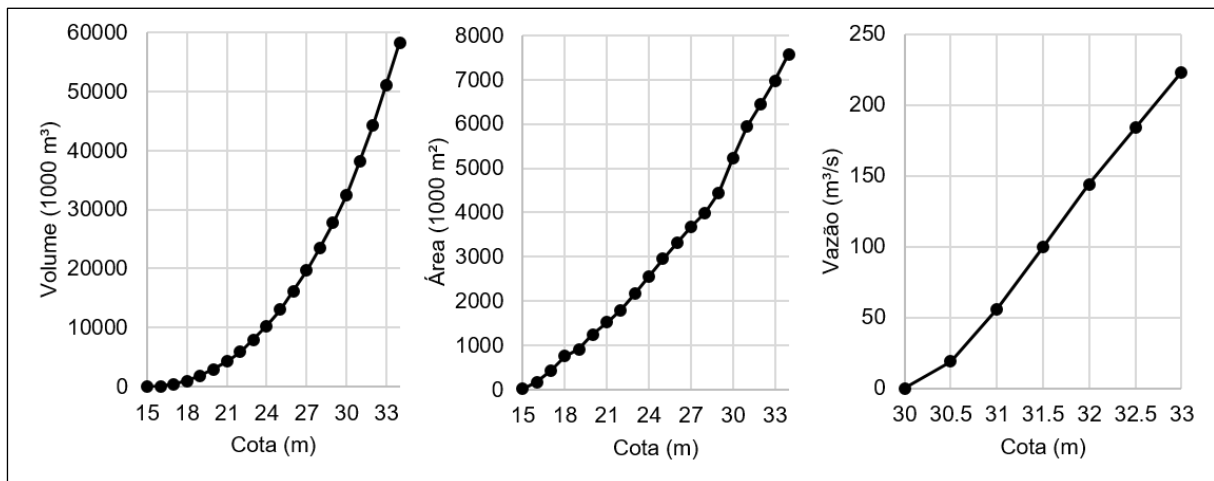
Os parâmetros de sub-bacia inicialmente considerados são apresentados na Tabela 3. Para os trechos de rio foi adotado o método *Lag* como *Routing Method* com valores de 120 min entre a Barragem e a Confluência e de 200 min entre a confluência e o *Outlet* do rio Poxim.

Tabela 3. Parâmetros iniciais de sub-bacia do modelo hidrológico.

Sub-bacia	Poxim-Açu	Poxim-Açu Incremental	Poxim-Mirim	Poxim	Pitanga	Canal Direito	Canal Esquerdo
Área (km ²)	121	15	68	38	93	6,4	2,4
Loss Method: SCS Curve Number							
Curve Number	74	79	81	83	81	80	90
Impervious (%)	0	0	0	0	0	0	0
Transform Method: SCS Unit Hydrograph							
Graph Type	PRF 484	PRF 484	PRF 484	PRF 484	PRF 484	PRF 484	PRF 484
Lag Time (min)	302	111	237	145	244	120	120

A Barragem foi representada por um elemento do tipo Reservatório, no qual foram associadas curvas cota-volume, cota-área e cota-vazão, extraídas do projeto executivo da Barragem Jaime Umbelino de Souza, conforme apresentado na Figura 12. Para cotas inferiores a 30m, ou seja, abaixo da cota de vertimento, manteve-se a vazão constante de 0,96 m³/s, que representa a vazão possível de ser extraída continuamente durante 24h.

Figura 12. Curvas cota-volume, cota-área e cota-vazão do projeto executivo da Barragem Jaime Umbelino de Souza.

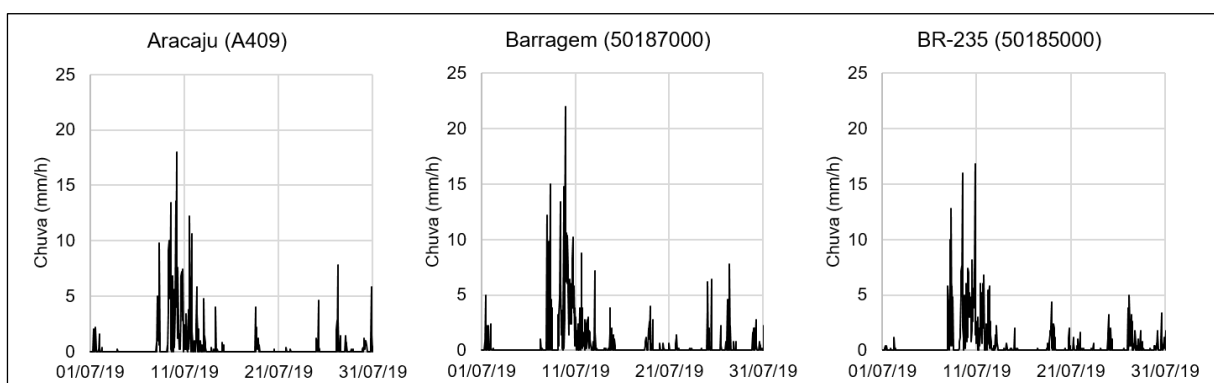


4.2.4. Simulação do evento extremo de julho de 2019 e calibração

Para analisar os modelos desenvolvidos, foi realizada uma simulação do último evento extremo ocorrido na região, entre os dias 09 e 13 de julho de 2019. Tal evento causou inundações no bairro Jabotiana e comunidades adjacentes, deixando centenas de desabrigados (TV SERGIPE, 2019).

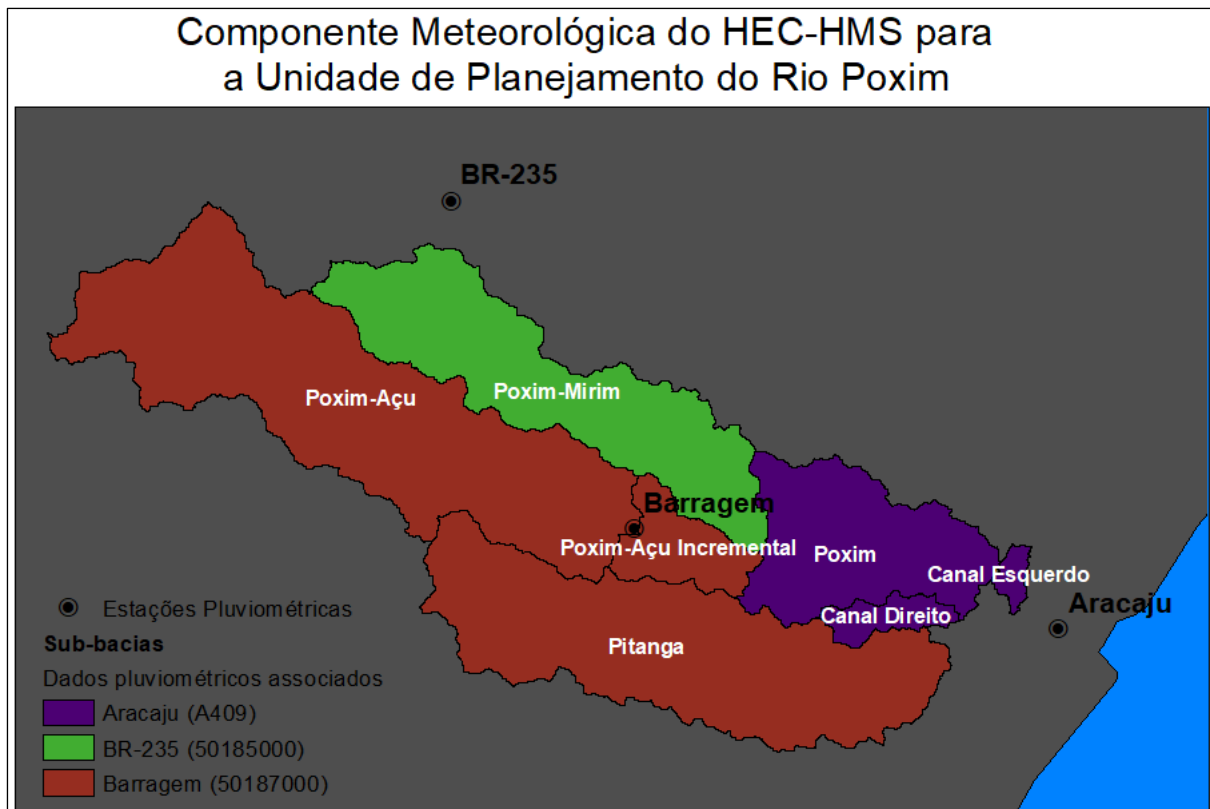
O período simulado foi entre os dias 01 e 31 de julho de 2019. Os dados horários de precipitação utilizados foram das estações: do INMET (A409), que fica localizada em Aracaju/SE; da Barragem (50187000); e da BR235 (50185000), que apesar de estar fora da bacia está relativamente próxima, como pode ser verificado na figura do Anexo B. Na Figura 13 são apresentados os hietogramas desse período.

Figura 13. Dados pluviométricos do evento de julho de 2019 utilizados na simulação do HEC-HMS.



Dessa forma, optou-se por configurar a componente meteorológica do HEC-HMS com o método *Specified Hyetograph*, no qual cada sub-bacia é associada aos dados de uma determinada estação pluviométrica. Nesse caso, as sub-bacias Poxim-Açu, Poxim-Açu Incremental e Pitanga foram associadas com a estação da Barragem; a sub-bacia do Poxim-Mirim com a estação da BR-235 e as sub-bacias Poxim, Canal Direito e Canal Esquerdo com a estação de Aracaju (Figura 14).

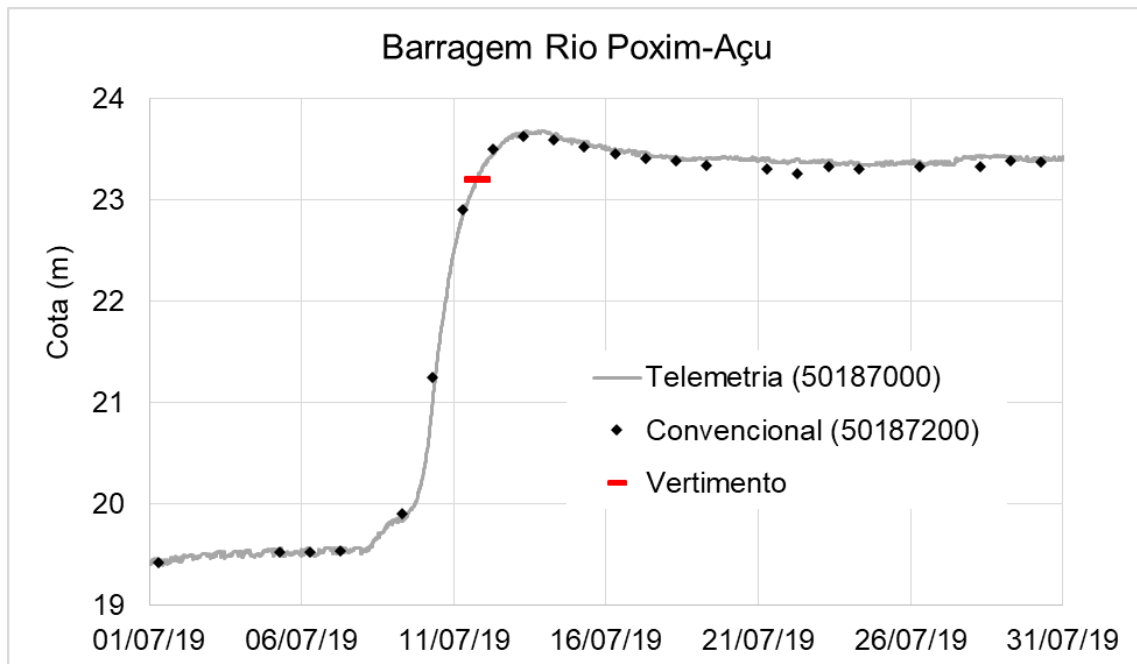
Figura 14. Localização das estações pluviométricas e associação com cada sub-bacia.



Analisando-se os dados de cota das estações localizada na barragem, um dos principais problemas encontrados foi a diferença entre as cotas de referência da estação telemétrica, da estação convencional e do projeto executivo da barragem. Para alinhar os dados da estação convencional com a estação telemétrica foi necessário subtrair 76,8m de cota. Já para alinhar os dados da estação telemétrica com o projeto executivo da barragem, tendo como referência que o vertimento ocorre a partir da cota de 30m, foi ainda necessário subtrair 6,8m dos dados de cota (Figura 15).

Válido destacar que o momento do vertimento foi mais bem verificado após as primeiras simulações do modelo hidrológico, a partir das quais foi possível alinhar os dados observados com os resultados das simulações. Com isso, foi possível determinar que o nível do reservatório antes do evento de precipitação era de aproximadamente 26,2m.

Figura 15. Alinhamento dos dados de cota da estação convencional com a estação telemétrica da Barragem do Rio Poxim-Açu e identificação do momento de vertimento.



Como o único elemento que possuía informações de vazão disponíveis era a Barragem, a calibração do modelo se ateu apenas ao elemento de sub-bacia do Poxim-Açu, cujos parâmetros foram ajustados por tentativa e erro, buscando-se aproximar o nível simulado do nível observado.

Posteriormente, levando em conta a pequena dimensão da Unidade de Planejamento do Rio Poxim, foi considerando que as demais sub-bacias do modelo apresentam comportamento semelhante à sub-bacia do Poxim-Açu. Por isso, os demais elementos de sub-bacias receberam os mesmos parâmetros calibrados para o Poxim-Açu. Apenas a Bacia do Canal da Margem Esquerda teve seus parâmetros diferenciados, para poder representar sua densa urbanização o valor de CN foi considerado como 90.

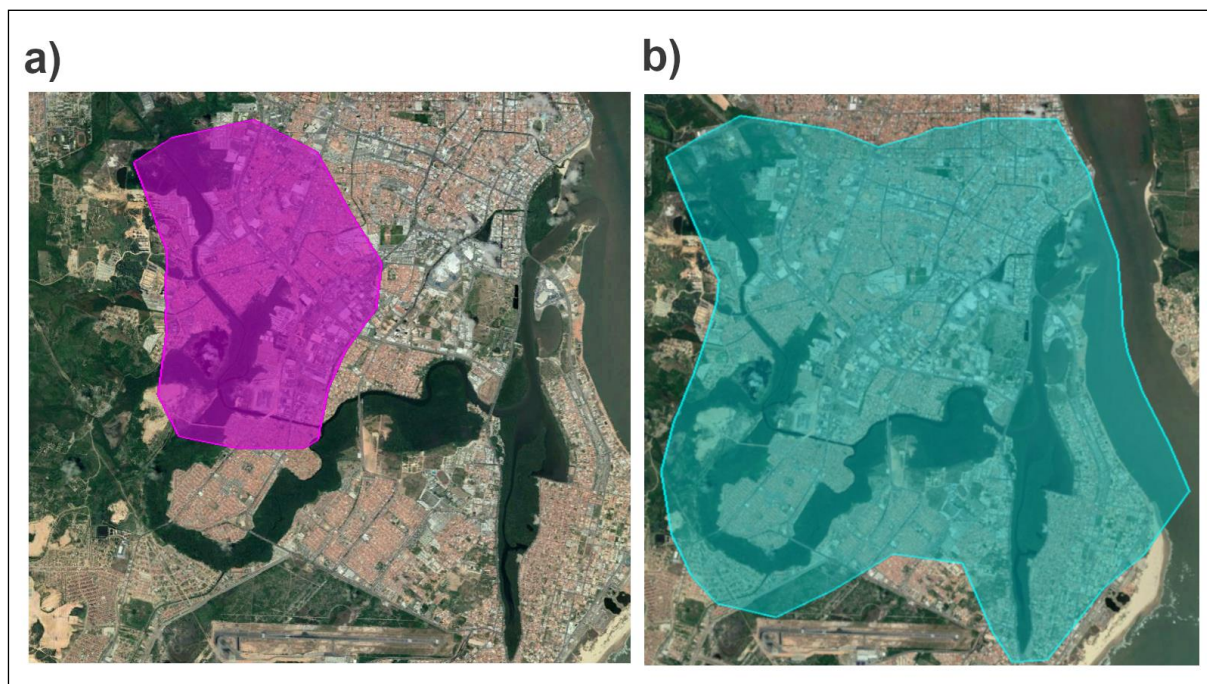
Válido destacar que essas medidas foram adotadas apenas pelo fato de não se ter informações de vazão nas demais sub-bacias e os parâmetros devem ser atualizados assim que se tenha disponível dados monitorados de vazão suficientes.

4.3. Modelagem hidrodinâmica

O modelo matemático escolhido para realizar as simulações hidráulicas foi o HEC-RAS em sua versão 5.0.6 (USACE, 2016). Foram realizados testes com as versões unidimensional (1D) e bidimensional (2D). Para simulações 1D, pode-se utilizar o plug-in HEC-GeoRAS do ArcGIS, que facilita a definição das seções e do domínio de simulação. Para simulações 2D, o HEC-RAS requer a inserção de um MDE através do RAS Mapper, a delimitação da área a ser simulada, a definição da resolução da malha de escoamento (tamanho da célula) e a definição de pelo menos duas condições de contorno, sendo uma de montante e outra de jusante.

A princípio, por se apresentar mais robusta, optou-se pela simulação 2D. Foram definidos dois domínios de simulação: a) cobrindo apenas o bairro do Jabotiana; b) do Jabotiana até a foz do rio Poxim (Figura 16). A divisão em dois domínios e projetos diferentes foi necessária para reduzir o tempo de simulação, principalmente durante a etapa de calibração, onde são realizados vários testes buscando um melhor ajuste do modelo.

Figura 16. Domínios de simulação no HEC-RAS 2D: a) cobrindo apenas o bairro Jabotiana; e b) do Jabotiana até a foz do Poxim.



Foi utilizado o MDE com resolução de 1 metro gerado a partir das curvas cedidas pela prefeitura de Aracaju, obtido de Bahia (2017). Devido a limitações computacionais, as simulações realizadas consideraram uma malha de escoamento com células de 25 m² (5m x 5m).

Inicialmente, considerou-se o coeficiente de Manning constante e igual a 0,06 (*default*), porém esse valor será alterado posteriormente no procedimento de calibração. Foram definidas como condição de montante as vazões de interesse e como condição de jusante a maré. O valor da declividade da linha de energia da condição de montante (*EG Slope*) adotado foi de 0,0048, referente à declividade do terreno calculada a partir do MDE. As simulações foram realizadas com intervalo de cálculo computacional ajustado a partir da metodologia de *Courant* para um valor máximo de 3 e mínimo de 1 (USACE, 2016).

Para definição das condições iniciais, foram realizadas simulações para determinação do tempo de preenchimento da área considerando uma vazão constante de 0,287 m³/s, que é correspondente a vazão remanescente no rio Poxim apresentada no Plano da Bacia Hidrográfica do rio Sergipe (SERGIPE, 2015). O tempo para preenchimento determinado através dessas simulações foi inserido utilizando a opção "*Initial Conditions Time*". A opção de *Ramp-up* foi ativada e definida como 0,5. Isso significa que o modelo vai considerar o

enchimento gradual ao longo de 50% do tempo de condições iniciais, mantendo as condições constantes nos 50% restantes, antes de iniciar as simulações.

Como não existem séries históricas de vazões observadas para o rio Poxim, a calibração do modelo hidrodinâmico será dificultada. Como comentado anteriormente, a ausência de dados de vazão também dificulta a calibração do modelo hidrológico, que poderia ser utilizado para gerar os hidrogramas de entrada do modelo hidrodinâmico. Portanto, a alternativa encontrada inicialmente foi realizar simulações considerando vazões constantes ao longo do tempo. Neste caso serão consideradas algumas vazões de referência como:

- Vazão remanescente no rio Poxim (SERGIPE, 2015): 0,287 m³/s;
- Vazão máxima de projeto para a barragem (DESO, 2006): 212,8 m³/s;
- Vazão máxima da válvula dispersora da barragem (DESO, 2006): 2,70 m³/s.

Além, desses valores de referência, definiu-se que seriam realizadas simulações de vazões constantes variando entre zero e a máxima de projeto (cheia decamilenar TR= 10000 anos), em incrementos de 1 m³/s a cada simulação, e condição de jusante considerando maré de sizígia, onde as marés são mais altas devido ao ciclo lunar.

As informações de maré foram obtidas da página online de Tábua de Marés para a cidade de Aracaju (<https://tabuademares.com/br/sergipe/aracaju>), variando entre 0 (maré baixa) e 2,3 m (maré alta). Não foi realizado nenhum procedimento de amortecimento das marés.

Após a calibração do modelo hidrodinâmico, o mesmo será rodado para todas as combinações de vazão e maré gerando um banco de manchas de inundação que servirá de base para o sistema de ábaco descrito a seguir.

4.3.1. Simulação do evento extremo de julho de 2019

A simulação hidráulica do evento extremo de julho de 2019, em um primeiro momento, considerou no HEC-RAS apenas o domínio do bairro Jabotiana (Apêndice C). Foram testados diferentes valores de tamanho de célula de computação, variando de 20 até 3 m, e de coeficiente de Manning, variando do padrão de 0,06 até 0,03.

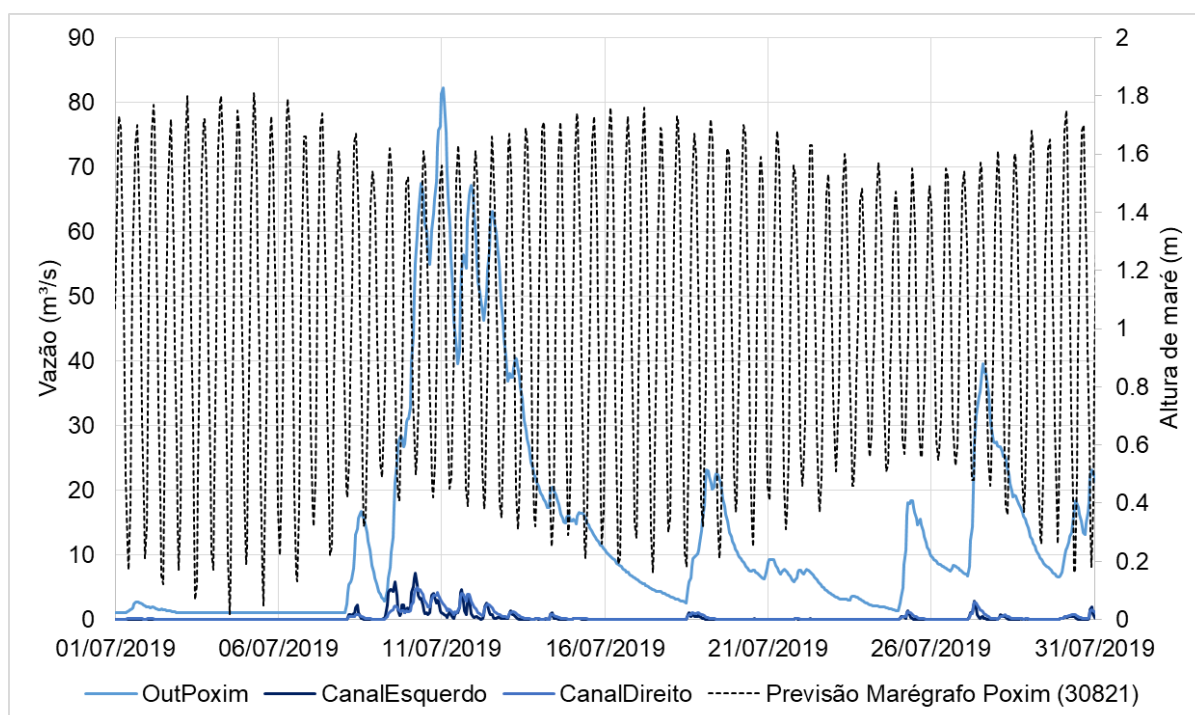
Os hidrogramas gerados pelo HEC-HMS foram utilizados como condições de contorno de montante do tipo *Flow Hydrograph*. Os parâmetros de declividade da linha de energia (*EG Slope*) foram considerados semelhantes às declividades do terreno, obtidas a partir do MDE, cujos valores estão apresentados na Tabela 4. Pelo fato do rio Pitanga se encontrar com o rio Poxim após o domínio de simulação, seu hidrograma não foi considerado como condição de contorno.

Tabela 4. **EG Slope das condições de contorno de montante.**

Condição de Contorno	EG Slope
Bacia do Rio Poxim	0,001
Bacia do Canal da Margem Direita	0,005
Bacia do Canal da Margem Esquerda	0,003

Já para a condição de contorno de jusante foram utilizados os dados de altura de maré (*Stage Hydrograph*) prevista para o Marégrafo Poxim (30821) para o período de julho de 2019. Os dados foram disponibilizados pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e estão na escala horária. Apesar de existir uma distância percorrendo o rio de aproximadamente 5 km entre o marégrafo e a condição de contorno de jusante, essa distância não foi considerada significativa, por isso, o nível de maré não foi amortecido. Na Figura 17 são apresentadas as entradas das condições de contorno.

Figura 17. Hidrogramas resultantes da simulação do HEC-HMS como condições de contorno de montante e altura de maré prevista como condição de contorno de jusante.



As simulações foram realizadas com intervalo de cálculo computacional ajustado a partir da metodologia de Courant para um valor máximo de 3 e mínimo de 1 (USACE, 2016). Como condição inicial, foi estabelecido em *Initial Conditions Time* um período de 96 horas de simulação para o preenchimento do domínio com água. A opção de *Ramp-up* foi ativada e definida como 0,1. Isso significa que o modelo vai considerar o enchimento gradual ao longo de 10% do tempo de condições iniciais, mantendo as condições constantes nos 90% restantes, antes de iniciar as simulações. As demais configurações do modelo mantiveram-se como padrão (*default*).

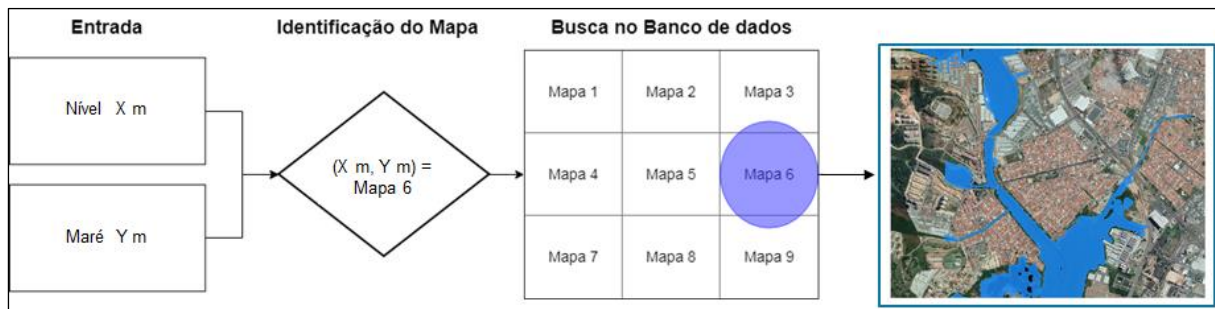
4.4. Sistema de previsão e alerta

A ferramenta proposta busca contornar a falta de dados existentes. Nesse sistema, todas as combinações possíveis entre nível do rio (X) e maré (Y) já teriam sido simuladas pelo modelo e os resultados (mapas) armazenados em um banco de dados online.

O funcionamento, bastante simples, é dividido em 4 partes: 1) o usuário deverá digitar os valores de vazão e maré previstos para o dia em que se deseja analisar; 2) o sistema

identificará a mancha de inundação correspondente a entrada fornecida; 3) o sistema buscará em seu banco de dados o mapa; e 4) o mapa resultante será exibido para o usuário. A Figura 18 apresenta um esquema da concepção do sistema.

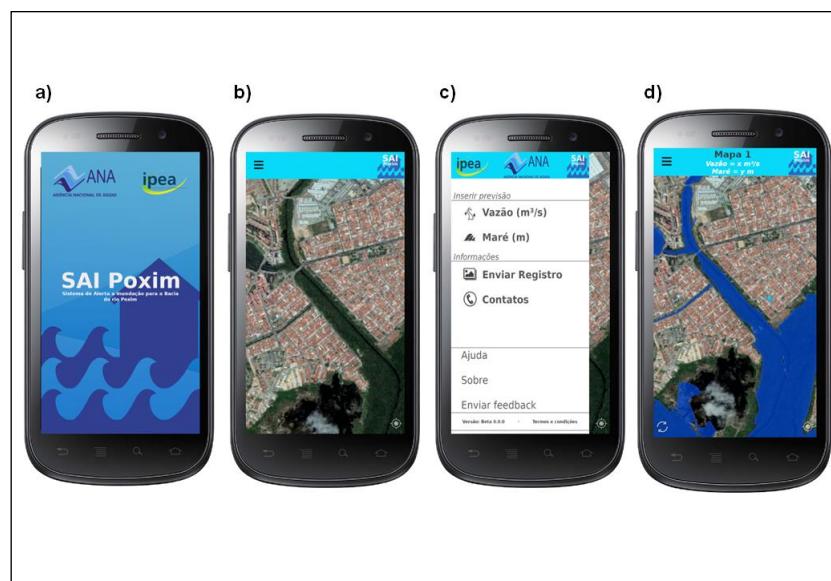
Figura 18. **Concepção do sistema de ábaco de manchas de inundação.**



A ideia principal é desenvolver um sistema confiável e que, ao mesmo tempo, seja simples e interativo, de modo que possa efetivamente ser utilizado no dia a dia. Também é necessário que o sistema possibilite a adição de melhorias à medida que novas funcionalidades sejam desenvolvidas e novas informações sejam observadas. Por isso, o sistema deve ser flexível para a inserção futura de novas variáveis de entrada, como a chuva prevista, por exemplo. Além disso, com a melhoria da rede de monitoramento e a maior disponibilidade de séries de vazão e nível, será necessário recalibrar o modelo e atualizar a base de dados do sistema.

Atualmente, uma das principais maneiras de atingir e dialogar com a população é através do celular. Assim, consideramos que uma das melhores formas de implementação da ferramenta seria através da criação de um aplicativo que possa ser facilmente baixado, instalado e utilizado por qualquer pessoa. A Figura 19 apresenta o primeiro do sistema de alerta para a bacia do Poxim.

Figura 19. **Esboço da ferramenta: a) tela de abertura; b) tela inicial; c) barra de menu lateral; e d) mapa resultante.**



O aplicativo deve ser bem simples e de fácil utilização, contendo:

- Tela de abertura (Figura 19a): constando o nome do sistema;
- Tela inicial (Figura 19b): onde será possível ver uma imagem aérea (Google Maps, Bing ou outra imagem disponível e gratuita) e a localização do usuário através do GPS do celular;
- Barra lateral (Figura 19c): contendo todas as opções do aplicativo, inclusive o local onde inserir a vazão e a maré prevista. É prevista também uma opção chamada “Sobre”, dentro da barra lateral, onde deverá constar informação de como os mapas foram elaborados e limitações do sistema;
- Mapa resultante (Figura 19d): a mancha de inundação será exibida sobreposta a imagem aérea na tela inicial, permitindo a visualização das áreas afetadas. O título do mapa e os valores digitados pelo usuário deverão ser exibidos no cabeçalho.

A princípio, a ferramenta deve ser disponibilizada como uma versão em fase de testes, com acesso limitado aos órgãos gestores, devendo ser aberta para a comunidade após determinado período de testes e ajustes.

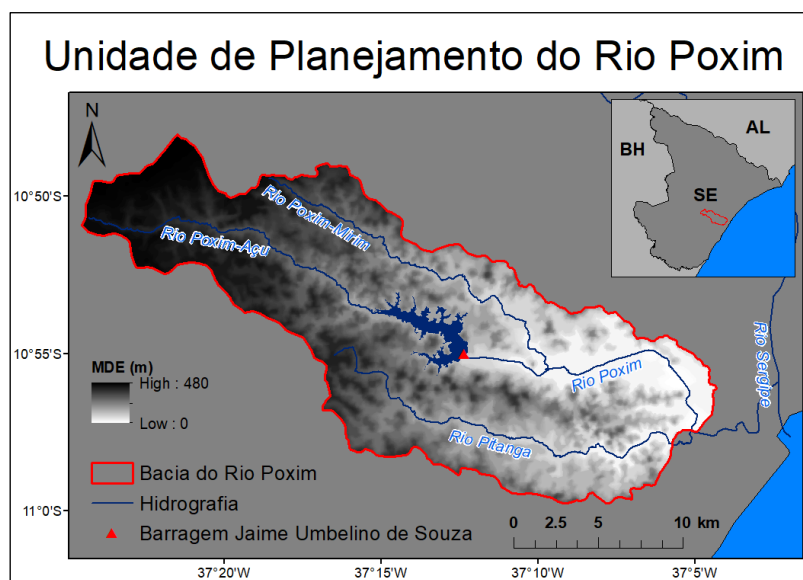
5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

5.1. Levantamento e processamento de dados

5.1.1. Caracterização da bacia do rio Poxim

A bacia do rio Poxim está localizada próximo à região litorânea do estado de Sergipe e drena uma área de 357 km². Seus dois principais formadores, são o rio Poxim-Açu, com área de drenagem de 135 km², e o rio Poxim-Mirim, com área de drenagem de 68 km², que nascem na Serra Comprida e percorrem em sentido oeste-leste até se encontrarem e formarem o rio Poxim, que por sua vez recebe as águas do rio Pitanga e posteriormente, já em região litorânea, deságua no rio Sergipe no município de Aracaju, SE (Figura 20).

Figura 20. Localização da bacia do rio Poxim.



O regime pluviométrico na bacia é caracterizado pela concentração das chuvas entre os meses de março a agosto. O total precipitado nesse período corresponde a cerca de 76% da média anual calculada, que é de aproximadamente 1350 mm/ano. Em termos espaciais, a bacia do rio Poxim apresenta a precipitação média anual variando entre 1300 mm (região próxima à cabeceira) a 1700 mm (região sudeste da bacia), sendo que a maior parte de sua área se encontra na faixa dos 1500 mm/ano.

A bacia do rio Poxim conta com a Barragem Jaime Umbelino de Souza da DESO, localizada no rio Poxim-Açu no município de São Cristóvão/SE, a cerca de 30 km de Aracaju/SE, tem uso preponderante para o abastecimento público de água, cobrindo cerca de 30% do abastecimento de Aracaju/SE e região metropolitana. O Projeto Básico e Executivo da barragem foi realizado pela Consultora OAS Ltda. e a execução pela Vector Projetos Ltda. As obras tiveram início em 2001, mas só foram finalizadas em 2013, quando também começou a operar. Trata-se de uma barragem de terra, com vertedouro tipo labirinto de 11,8m de extensão, altura do barramento de 25m, capacidade de 32,73 hm³ e área de espelho d'água de 5,22 km².

A barragem recebe contribuição de uma bacia de área de 119 km² e foi projetada com base na vazão de projeto de 10.000 anos de tempo de retorno, possuindo descarga máxima de 212,8 m³/s e descarga normal de 1,2 m³/s. A avaliação de disponibilidade hídrica foi baseada em séries de vazões mensais obtidas por modelo chuva-vazão de correlação empírica, utilizando dados de precipitação de janeiro de 1945 a maio 1975.

A operação da barragem ocorre sem uma regra de operação formalmente estabelecida, sendo influenciada, quase que inteiramente, pela disponibilidade hídrica na captação de água da DESO, a jusante do barramento. Em termos de níveis de alerta, existe uma regra definida de forma arbitrária, com base nas cotas de projeto da barragem. Esta definição foi realizada pela DESO em conjunto com a Semarh e considera como alerta para inundação níveis entre as cotas de projeto 31,43 a 32,85 m, e estado de emergência níveis entre o máximo maximorum (32,85 m) e a cota do coroamento (34,00 m).

No ano de 2010 foi realizado o levantamento da batimetria do rio Poxim pela Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO) em conjunto com a Serhma (antiga Semarh). Foram levantadas 44 seções localizadas na parte baixa da bacia. A primeira seção corresponde à ponte próxima a UFS, em um ponto próximo a captação de água da DESO, e a última seção localizada na foz do rio Poxim.

Através desse estudo foi possível verificar a existência de diversos pontos de assoreamento ao longo do curso d'água. Porém, nos últimos anos tem se verificado o aumento da impermeabilização do solo na parte baixa da bacia e o avanço dos empreendimentos em direção as margens do rio. Por meio de visitas de campo foi possível observar vestígios do lançamento de resíduos de construção e demolição nas margens e na calha do rio, de modo que o perfil batimétrico levantado no ano de 2010 pode não ser representativo da situação atual.

Em termos de inundação, a cidade de Aracaju encontra-se em região litorânea extremamente plana, sendo que boa parte da ocupação está próxima ao nível do mar. A rápida e desordenada expansão da cidade levou a ocupação de áreas vulneráveis através da transformação do ambiente com aterramentos, canalizações de rios e impermeabilização do solo, expondo a população à eventos cada vez mais recorrentes de inundações, intensificadas com a combinação de eventos extremos de precipitação com níveis de maré alta.

O bairro Jabotiana é o principal bairro dentro da bacia do rio Poxim que sofre com as inundações. Segundo a Sociedade Jabotiana Viva, foram registrados eventos nos anos 2008, 2010, 2011, 2015 e 2017 e a principal causa para o aumento da recorrência desses eventos foi relacionada à grande pressão imobiliária no bairro sem planejamento socioambiental adequado. Recentemente, o evento chuvoso ocorrido no mês de julho de 2019 deixou centenas de moradores desabrigados (TV Sergipe, 2019).

Fazendo uma breve análise da chuva ocorrida em julho de 2019, na Figura 21 é apresentado o hietograma da chuva registrada pelos pluviômetros do INMET (409), localizado em Aracaju, e acumulada por dia. A chuva máxima diária ocorreu no dia 10 de julho, chegando a 111 mm. Em apenas 8 dias choveu o acumulado de 305 mm. O acumulado mensal foi de 376 mm, superando consideravelmente o esperado para o mês de julho, que segundo o histórico entre os anos de 1951 e 2018 da estação Aracaju (1037004) seria em torno de 154 mm, como pode ser observado na Figura 22. Considerando o histórico de chuva máxima diária anual, a chuva ocorrida em 10 de julho de 2019, segundo o ajuste da distribuição Gumbel, tem tempo de recorrência de 5 anos (Figura 23).

Figura 21. Hietograma do evento chuvoso ocorrido em Aracaju em julho de 2019.

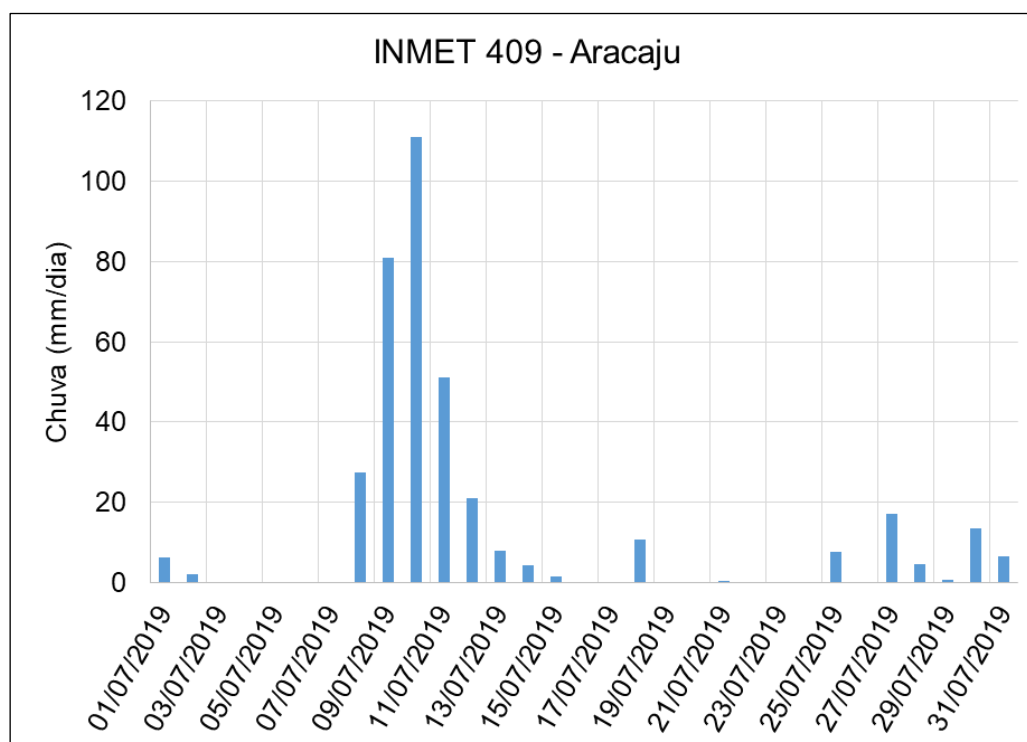


Figura 22. Acumulado mensal médio da precipitação para Aracaju comparado com o acumulado do mês de julho de 2019.

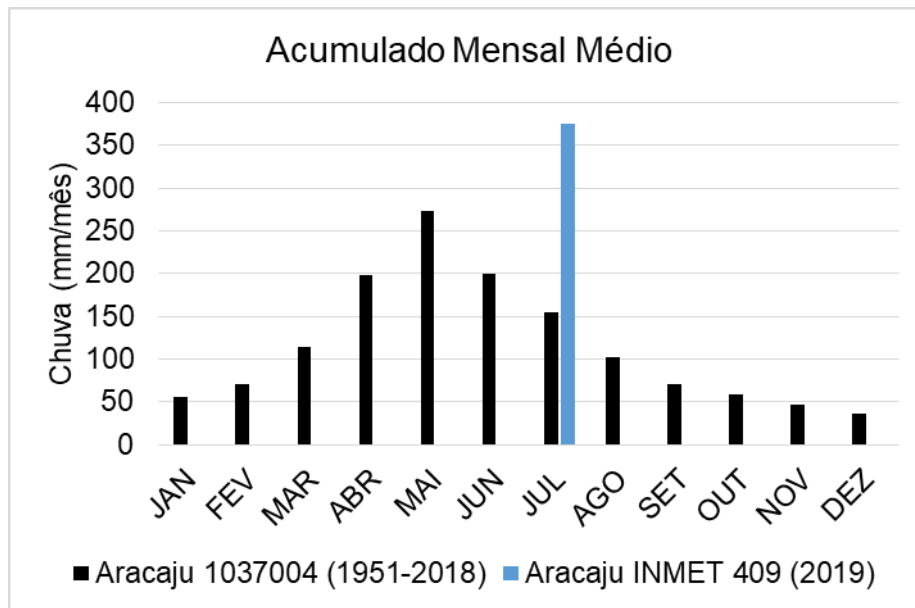
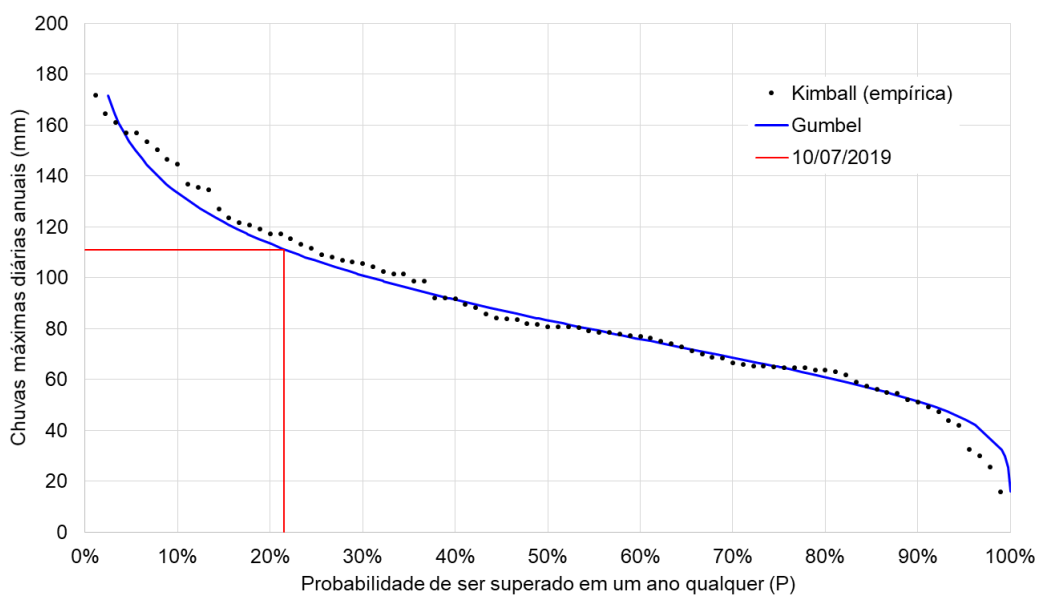


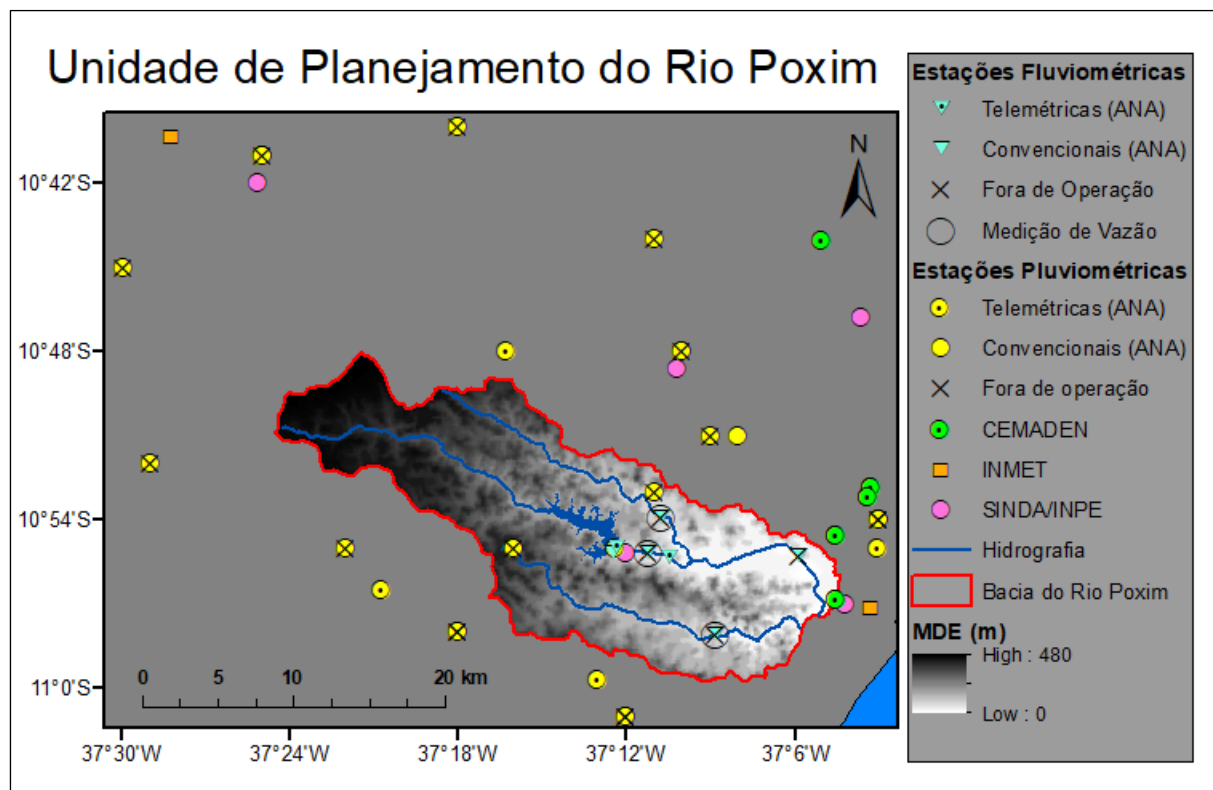
Figura 23. Ajuste da distribuição Gumbel ao histórico de chuvas máximas diárias anuais de Aracaju e identificação da chuva de 10/07/2019.



5.1.2. Dados hidrometeorológicos

Na Figura 24 é apresentada a localização da Unidade de Planejamento do rio Poxim, o MDE obtido a partir das curvas de nível de 10 m, as estações pluviométricas e fluviométricas disponíveis e o reservatório da barragem Jaime Umbelino de Souza. No Apêndice A encontram-se as principais informações sobre as estações utilizadas.

Figura 24. Estações de monitoramento dentro e próximas da Unidade de Planejamento do Rio Poxim.



A maior parte do monitoramento pluviométrico está concentrado na área urbanizada de Aracaju. Pode-se também observar que dentro da bacia do rio Poxim, não existe nenhuma estação pluviométrica na sua cabaceira. Também, ainda não é realizado monitoramento fluviométrico a montante da barragem. Além disso, as poucas medições de vazão, realizadas apenas nas estações fluviométricas convencionais que já estão fora de operação, dificultam a definição de curvas-chave confiáveis para a conversão dos dados de cota em vazão, necessários tanto na modelagem hidrológica como na hidráulica.

Apesar do entorno da bacia estar aparentemente bem coberto por estações pluviométricas, grande parte das estações convencionais já foram desativadas. O monitoramento telemétrico é recente, iniciado em 2012, cobrindo apenas um período de estiagem da região, e apresenta diversos períodos de falhas, como pode ser observado no diagrama de Gantt da Tabela 5. Esse panorama de disponibilidade de dados de precipitação gera grande incerteza nas análises estatísticas de tempo de retorno.

Utilizando-se também do diagrama de Gantt da Tabela 6, pode-se observar falhas consideráveis no monitoramento fluviométrico da bacia do rio Poxim. Até mesmo as estações telemétricas apresentam inconstâncias. Além disso, os períodos de monitoramento das estações convencionais e telemétricas não são contemporâneos.

Tabela 5. Diagrama de Gantt das estações pluviométricas indicando a porcentagem de dias com monitoramento por ano.

Código	Nome	ANO																																
		1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1037004	Aracajú	83	99	89	15		99	83	100	100	99	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	41	
1037007	Fazenda Belém	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	16
1137007	São Cristóvão (SUDENE)						100						8		33	100	100	100	8															
1037083	Ponte BR-235																											69	96	17	53	99	96	10
1037085	Barragem do Rio Poxim																												4	100	100	85	25	24
50187300*	Rio Poxim BR-101																														72	64	72	
1037081	São Cristóvão																										76	100	99	38	56	96	25	
1037086	Aracajú01 (CEMADEN)																														35	99	98	99
1037087	Aracajú02 (CEMADEN)																													35	100	100	100	
1037088	Aracajú03 (CEMADEN)																													35	99	98	99	
1037089	Aracajú04 (CEMADEN)																													35	99	88	99	
A409	Aracajú (INMET)																	88	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

* Código da estação fluviométrica de mesma localização.

Tabela 6. Diagrama de Gantt das estações fluviométricas indicando a porcentagem de dias com monitoramento por ano.

Código	Nome	Ano						
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
50080700	Assentamento Moacir Wanderley	19	33					
50187000*	Barragem do Rio Poxim			65	93	79	19	98
50187200	Açude Sind. Jaime Umbelino de Souza	28	33					17
50080800	Colégio Agrícola	28	20					
50187300*	BR-101					42	72	
50188000	DESO	28	33					
50192500	Povoado Cabrita	27	33					

* Estações telemétricas

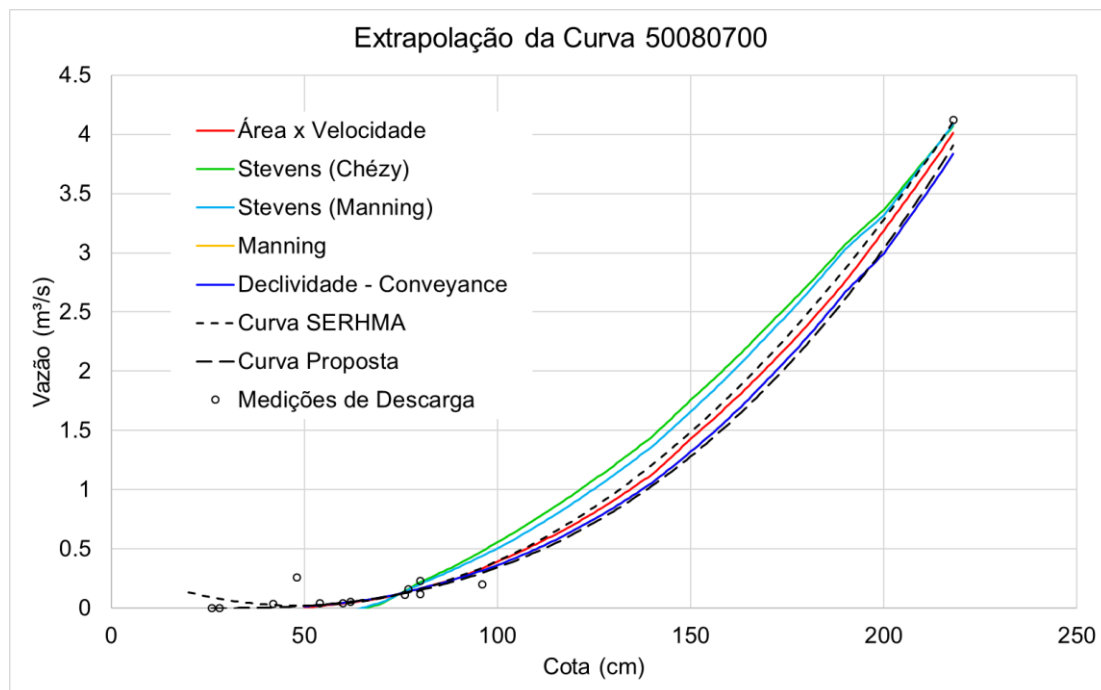
5.1.3. Ajuste de curva-chave

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros das equações da curva-chave disponibilizada pela Semarh e da curva-chave proposta para a estação Assentamento Moacir Wanderley (50080700), que fica localizada no rio Poxim-Mirim. Na Figura 25 essas curvas são comparadas com diferentes métodos de extrapolação superior, que levaram em conta o perfil longitudinal da estação.

Tabela 7. Parâmetros da equação de curva-chave da estação Assentamento Moacir Wanderley.

Curva-chave	Validade	Início da Validade	Fim da Validade	Cota Máxima	Cota Mínima	Tramo	Coef. a	Coef. b	Coef. c
SERHMA	1	01/10/2012	30/06/2015	218	26	01/01	1.421	-1.377	0.3541
Curva-chave	Validade	Início da Validade	Fim da Validade	Cota Máxima	Cota Mínima	Tramo	Coef. a	Coef. H ₀	Coef. n
Proposta	1	01/09/2012	31/12/2018	218	26	01/01	0.74	0.26	2.55

Figura 25. Análise de extrapolação superior de curva-chave para a estação Assentamento Moacir Wanderley (50080700).



A curva-chave utilizada pela Serhma é um polinômio de segundo grau, representada pela equação $Q = aH^2 + bH + c$, sendo Q a vazão em m^3/s ; H a cota em m; e a , b e c os coeficientes da equação apresentados na Tabela 7. Apesar da curva acompanhar bem os métodos de extrapolação superior, especialmente o método Área x Velocidade, ela apresenta problemas na sua extrapolação inferior. Quando as cotas são menores que 50 cm as vazões começam a aumentar, fazendo com que para uma mesma vazão sejam possíveis duas cotas diferentes. Além disso, existem diversas problemáticas relacionadas ao uso de polinômios no ajuste de curvas-chaves, principalmente relacionadas a extrapolação.

Por esses motivos, está sendo proposta uma nova curva de descarga com base em equação potencial, que possui significado físico para o ajuste de curvas-chave e é representada pela equação:

$$Q = a(H - H_0)^n, \text{ sendo}$$

a , H_0 e n os coeficientes apresentados na Tabela 7.

O ajuste da curva acompanhou o método de Extrapolação Declividade-Conveyance (Figura 25). Válido destacar que foram realizadas poucas medições de vazão na estação e todas elas durante cotas baixas, o que causa grande incerteza, principalmente na extrapolação superior da curva. Os desvios das medições realizadas entre outubro de 2012 e maio de 2013 em relação a curva proposta ficaram significativos, o que poderia justificar uma quebra de validades a partir de junho de 2013.

Entretanto, nesse período foram realizadas apenas quatro medições de descarga, sendo três delas muito próximas de zero, o que envolve grande incerteza nas medições. Por isso, optou-

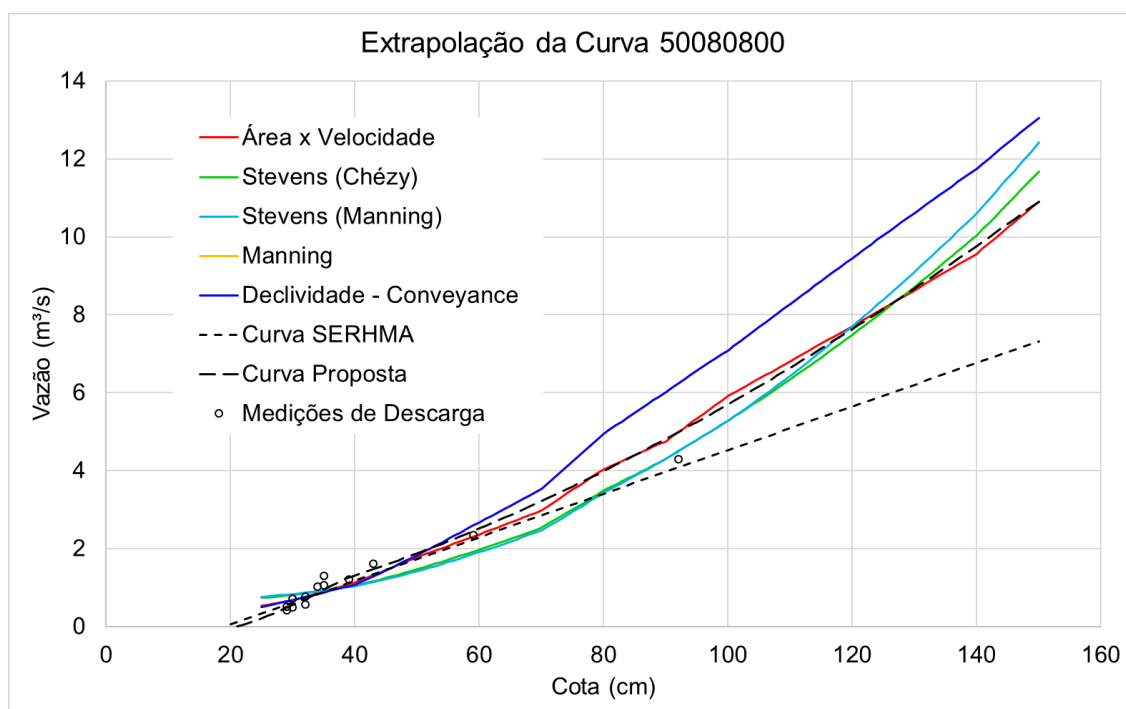
se por uma curva de validade única que possa ser atualizada no futuro, quando novas medições de descarga forem realizadas.

Na Tabela 8 são apresentados os parâmetros das equações da curva-chave disponibilizada pela Serhma e da curva-chave proposta para a estação Colégio Agrícola (50080800), que fica localizada no rio Poxim-Açu após a barragem. Na Figura 26 essas curvas são comparadas com diferentes métodos de extrapolação superior, que levaram em conta o perfil longitudinal da estação.

Tabela 8. Parâmetros das equação de curva-chave da estação Colégio Agrícola (50080800).

Curva	Validade	Início da Validade	Fim da Validade	Cota Máxima	Cota Mínima	Tramo	Coef. a	Coef. H ₀	Coef. n
SERHMA	1	01/09/2012	31/12/2018	150	28	01/01	5.59	0.19	1
Proposta	1	01/09/2012	31/12/2018	38	28	01/02	10	0.21	1.2
				150	38	02/02	5.7	0	1.6

Figura 26. Análise de extrapolação superior de curva-chave para a estação Colégio Agrícola (50080800).



A curva-chave utilizada pela Serhma é uma reta e apresenta problemas na sua extrapolação superior. A utilização de uma reta para representar curva-chave é bastante incomum e ocorre em casos muito específicos, não sendo justificado para essa estação. Por isso, está sendo proposta uma nova curva-chave com base em equação potencial. O ajuste da curva buscou seguir o método de extrapolação Área x Velocidade. Foi necessário dividir a curva em dois tramos, pois as cotas baixas aparentam uma relação com a vazão sutilmente diferente das cotas mais altas. Também para essa estação, poucas medições de vazão foram realizadas e a maior parte durante cotas baixas. Além disso, essa estação sofre influência da operação da barragem, dificultando o ajuste da curva-chave.

5.1.4. Geolocalização de registros fotográficos de inundação

Com base nas fotografias de inundações obtidas com a Comunidade Jabotiana Viva, foi possível identificar 26 pontos de inundação. A Figura 27 apresenta dois exemplos da aplicação da metodologia e a Figura 28 apresenta o arquivo vetorial com todos os pontos identificados.

Figura 27. Exemplos da geolocalização de registros fotográficos.

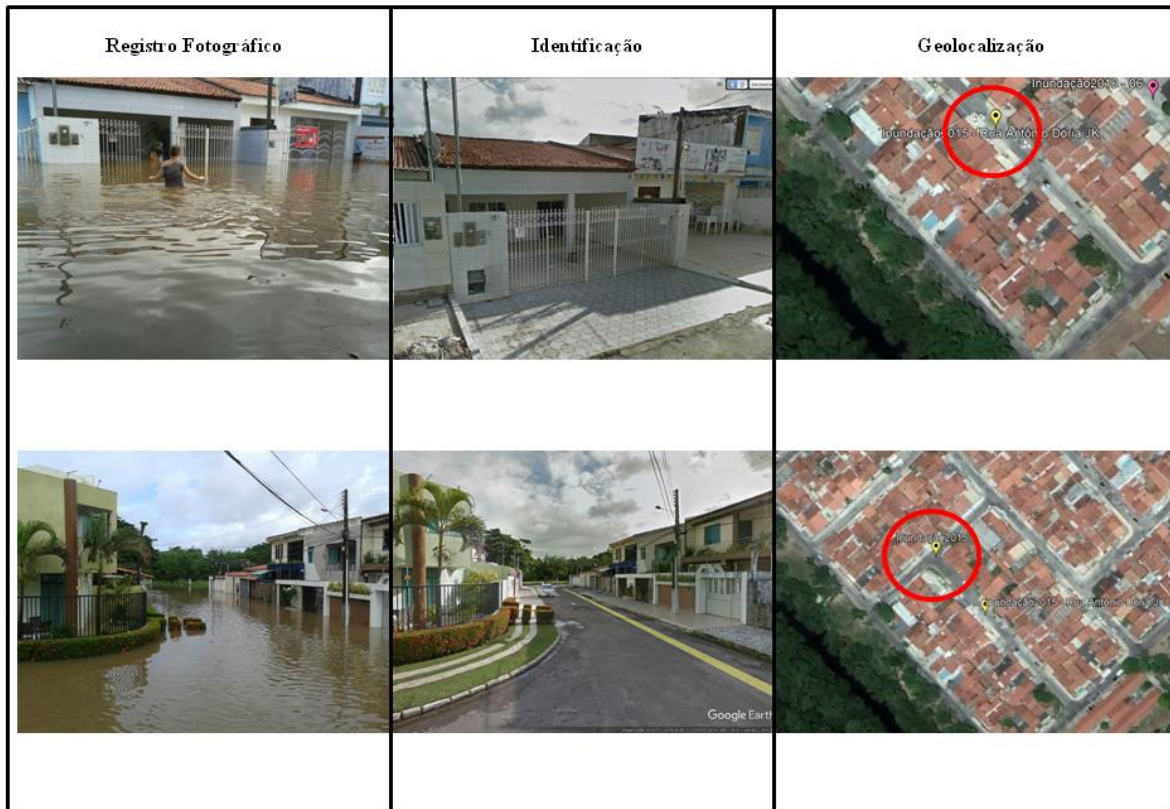
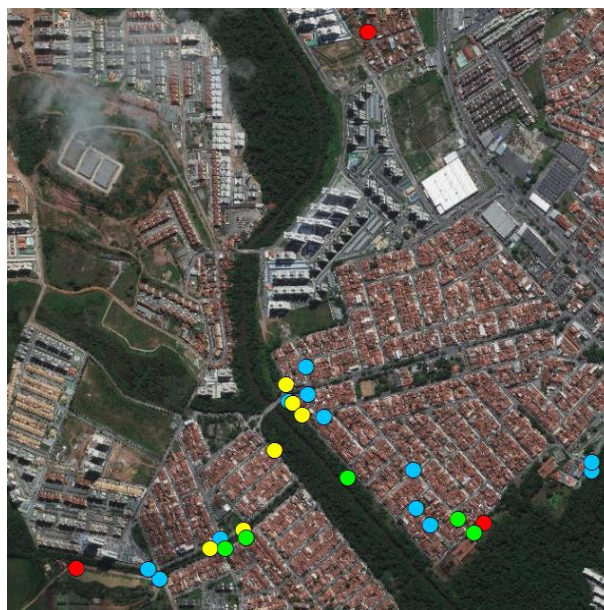


Figura 28. Pontos mapeados para os registros fotográficos dos anos de 2010 (verde), 2011 (amarelo), 2015 (azul) e 2017 (vermelho).



Algumas das fotos disponibilizadas possuíam indicações de nome da rua ou da esquina ou de algum empreendimento próximo, o que facilitou a localização da imagem. Entretanto, outras fotos não possuíam nenhuma indicação, sendo necessário fazer uma busca através do *Google Street View* para identificar os locais exatos.

A metodologia empregada apresentou muitas vantagens, mas também algumas limitações. Por ser um mapeamento através de fotografias pontuais, é possível determinar alguns locais atingidos pela água, porém não é possível afirmar com precisão a abrangência de toda a área inundada. Outra questão importante é o fato de que a identificação dos locais pode ser bastante difícil, dependendo da diferença entre a data de ocorrência do evento e a data das imagens disponíveis no *Google Street View*, exigindo assim um maior conhecimento da área por parte do profissional. Por outro lado, a principal vantagem diz respeito à facilidade e a rapidez de aplicação, uma vez que o levantamento depende apenas de um computador ou celular com acesso à internet.

A metodologia empregada, apesar de simples, apresenta-se como uma alternativa de ótimo custo-benefício, permitindo o levantamento de informações importantes com o uso de poucos recursos. Considerando-se a baixa disponibilidade de imagens de satélites e aerolevantamentos que cubram toda a extensão da inundação. As informações obtidas através da metodologia apresentada podem auxiliar o processo de calibração de modelos hidráulicos, propiciando aumento na acurácia das simulações. Além das opções apresentadas neste trabalho, pode-se também agregar fotos de outras fontes, como, por exemplo, notícias de jornais, para enriquecer o número de pontos mapeados.

5.1.5. *Visitas de campo*

A primeira visita de campo foi realizada no começo do projeto e teve como objetivo o reconhecimento da área estudada. Detalhes da expedição estão descritas no Apêndice B. As saídas de campo com foco na medição de vazão e levantamento de seções transversais são mostradas nas Figuras 29 a 31. Também foram realizados levantamentos com drone.

Figura 29. Reconhecimento dos locais das medições (12/03/2019).



Figura 30. Levantamento da seção e medição de vazão na estação Colégio Agrícola (13/03/2019).



Figura 31. Levantamento da seção e medição de vazão na estação BR-101 (14/03/2019).



5.2. Modelagem hidrológica

Os resultados das primeiras simulações no HEC-HMS do evento de julho de 2019 são apresentados nas Figura 32 e Figura 33 para o elemento Barragem, na Figura 34 para o domínio da Bacia do Rio Poxim (OutPoxim) e na Figura 35 para o domínio da Bacia do Rio Pitanga (OutPitanga).

Figura 32. **Nível d'água observado e inicialmente simulado pelo HEC-HMS para o elemento Barragem.**

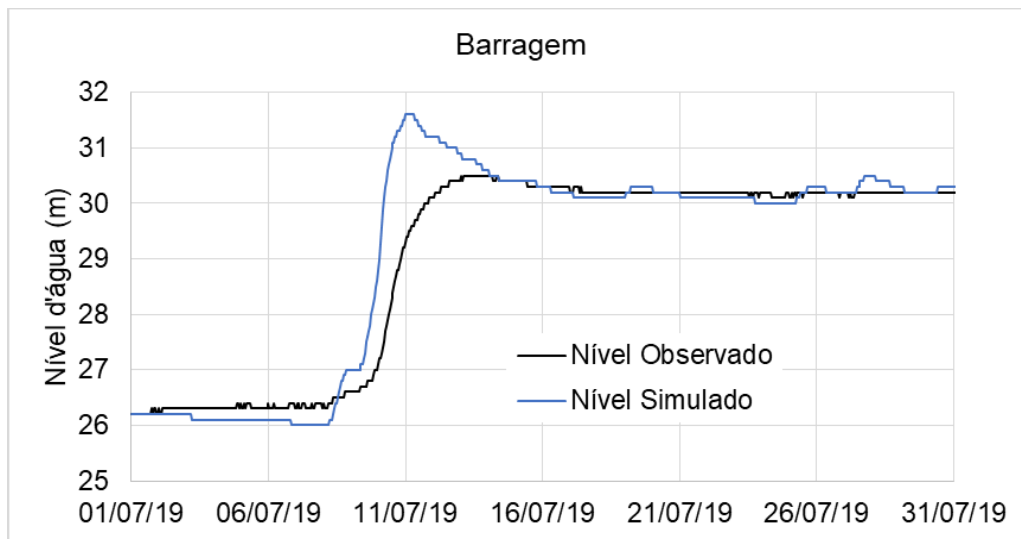


Figura 33. **Vazão afluente e defluente inicialmente simuladas pelo HEC-HMS para o elemento Barragem.**

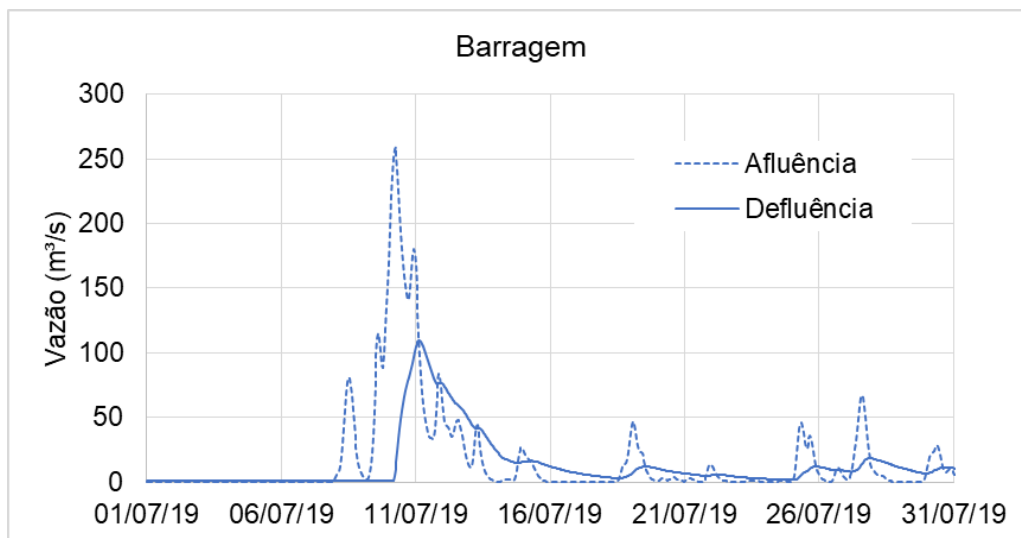


Figura 34. Vazão inicialmente simulada pelo HEC-HMS para o elemento OutPoxim.

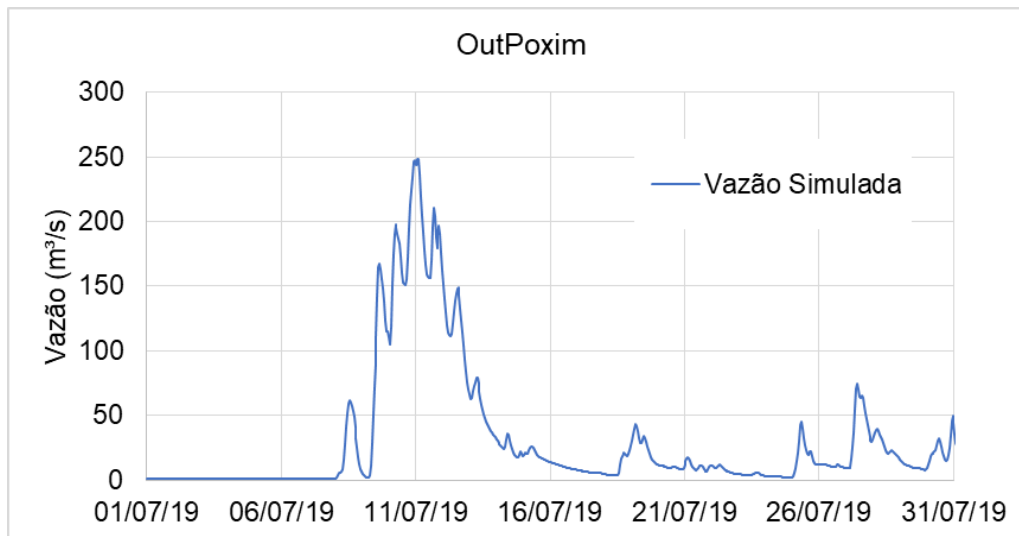
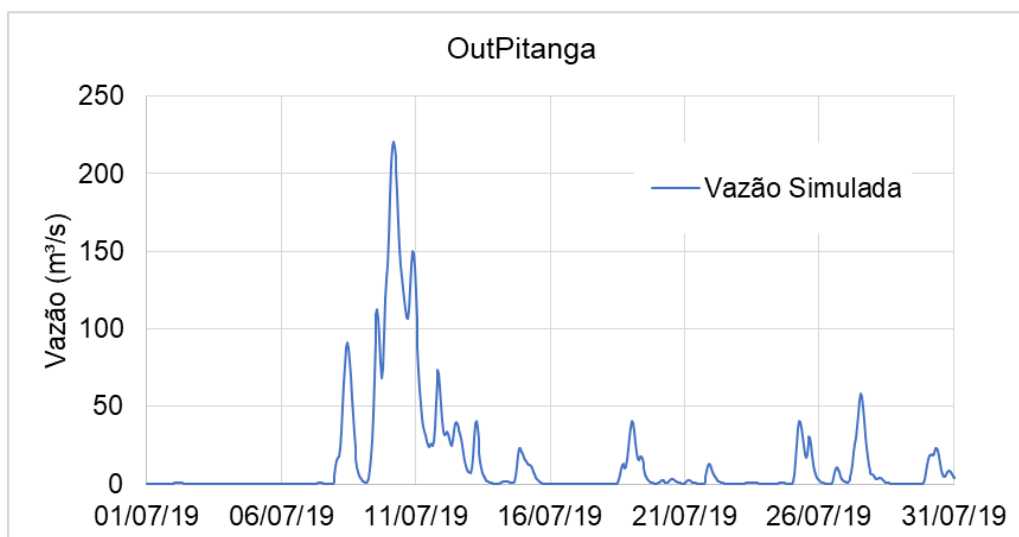


Figura 35. Vazão inicialmente simulada pelo HEC-HMS para o elemento OutPitanga.



Na Figura 33 é possível verificar que boa parte da vazão defluente da sub-bacia do Poxim-Açu é amortecida pela Barragem. Porém, houve um exagero na simulação do vertimento da Barragem quando comparado com a observação, apesar do valor de Nash-Sutcliffe obtido ser de 0,885. Também foi possível observar que foram simuladas vazões consideravelmente acima do esperado, acima de 200 m³/s, tanto para o rio Poxim como para o rio Pitanga. Entretanto, não se tem dados de vazão observada para comparação.

Como a única informação de vazão disponível era da Barragem, a calibração foi realizada apenas para o elemento de sub-bacia do Poxim-Açu. Os parâmetros ajustados são apresentados na Tabela 9.

A área de drenagem manteve-se, o CN foi consideravelmente reduzido, perdendo inclusive seu significado físico, e foi necessário considerar uma porcentagem de área impermeável (*Impervious*). Também foi alterado o formato padrão do hidrograma (*Graph Type*) e reduzido o *Lag Time*.

Tabela 9. Parâmetros calibrados para a sub-bacia Poxim-Açu.

Sub-bacia	Poxim-Açu
Área	121
<i>Loss Method: SCS Curve Number</i>	
Curve Number	35
Impervious	15
<i>Transform Method: SCS Unit Hydrograph</i>	
Graph Type	PRF 200
Lag Time (min)	250

Nas Figura 36 e Figura 37 são apresentados os resultados da simulação após a calibração, podendo-se verificar a aproximação do nível simulado com o nível observado no reservatório, chegando-se a um valor de Nash-Sutcliffe de 0,988. Para se chegar a esse ajuste, a vazão afluente, proveniente da sub-bacia do Poxim-Açu, foi reduzida consideravelmente, mais da metade no seu valor de pico (Figura 37).

Figura 36. Nível d'água observado e simulado pelo HEC-HMS após a calibração do elemento Barragem.

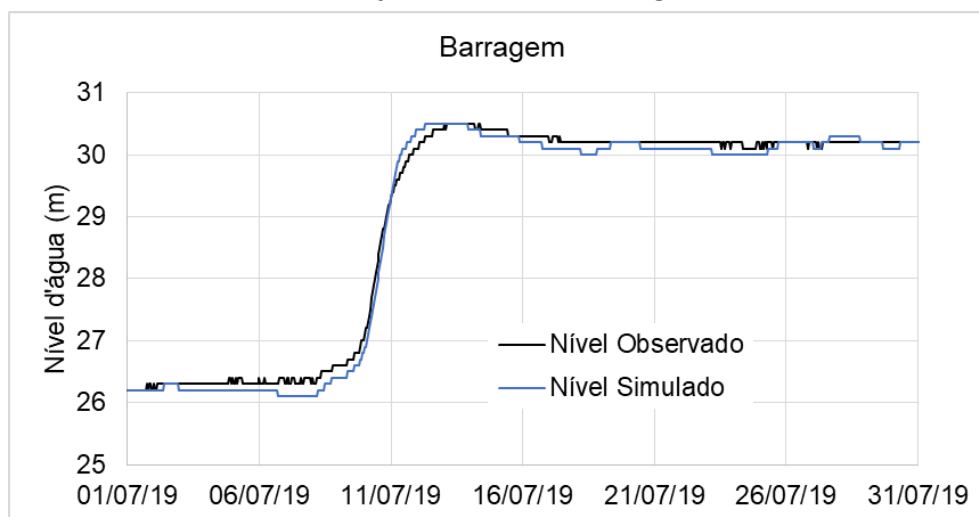
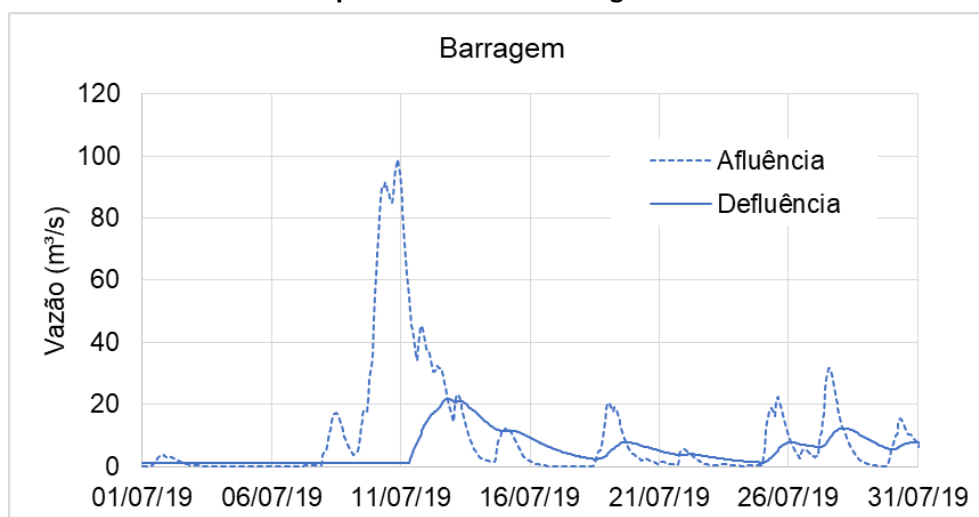


Figura 37. Vazão afluente e defluente simuladas pelo HEC-HMS após a calibração para o elemento Barragem.



Na falta de dados de vazão para a calibração das demais sub-bacias do modelo, os seus parâmetros foram ajustados com base nos parâmetros obtidos para o Poxim-Açu. No caso dos parâmetros CN e *Lag Time*, foi adotada uma mesma proporção linear de redução entre os parâmetros iniciais e os calibrados para o Poxim-Açu, ou seja, 0,47 (35/74) para o CN e 0,83 (250/302) para o *Lag Time*. Já para os parâmetros *Impervious* e *Graph Type* foram utilizados os mesmos valores do Poxim-Açu. Apenas na sub-bacia do Canal Esquerdo os valores de CN, *Impervious* e *Graph Type* foram mantidos, para representar a densa urbanização, e o valor de *Lag Time* foi reduzido de forma subjetiva. Os valores adotados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Parâmetros de sub-bacia adotados após a calibração do modelo hidrológico.

Sub-bacia	Poxim-Açu	Poxim-Açu Incremental	Poxim-Mirim	Poxim	Pitanga	Canal Direito	Canal Esquerdo
Área (km ²)	121	15	68	38	93	6,4	2,4
Loss Method: SCS Curve Number							
<i>Curve Number</i>	35	37	38	39	38	39	90
<i>Impervious (%)</i>	15	15	15	15	15	15	0
Transform Method: SCS Unit Hydrograph							
<i>Graph Type</i>	PRF 200	PRF 200	PRF 200	PRF 200	PRF 200	PRF 200	PRF 484
<i>Lag Time (min)</i>	250	92	196	135	202	90	70

Na Figura 38 e Figura 39 são apresentados os resultados após o ajuste dos parâmetros, nos quais é possível observar uma significativa redução na vazão, chegando a valores mais coerentes para a bacia. Porém, é válido destacar as fragilidades do ajuste utilizado. Primeiro, a relação entre os processos hidrológicos está longe de ser linear e a proporção linear entre os parâmetros foi utilizada por simplicidade e por tampouco se saber sobre os processos hidrológicos da bacia. Segundo, sem dados de vazão observada não se pode afirmar com nenhuma certeza se essas vazões simuladas são realmente representativas. Porém, o esforço teórico aqui demonstrado busca estudar pelo menos a grandeza das vazões que podem ocorrer na bacia.

Figura 38. Vazão simulada pelo HEC-HMS após ajuste de parâmetros para o elemento OutPoxim.

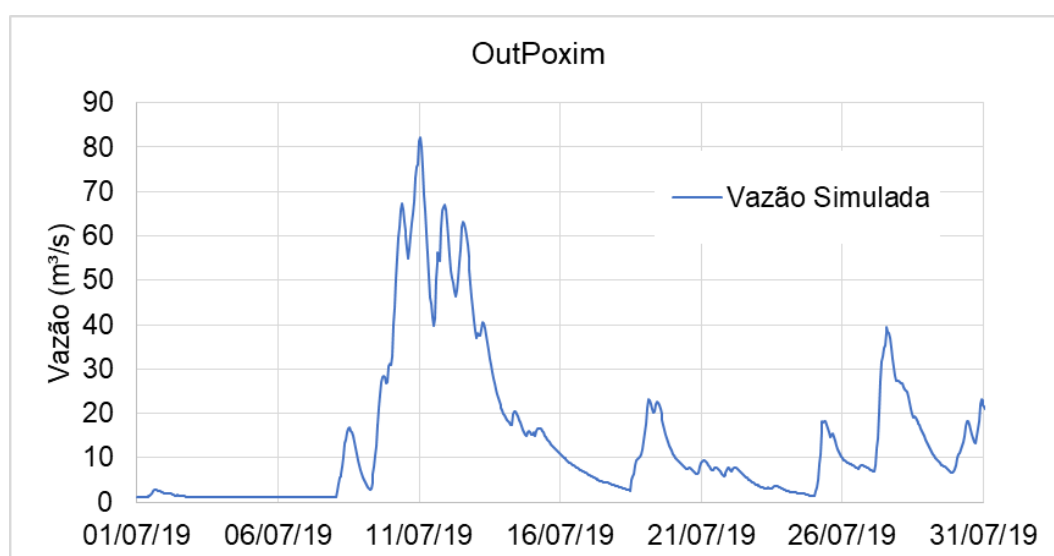
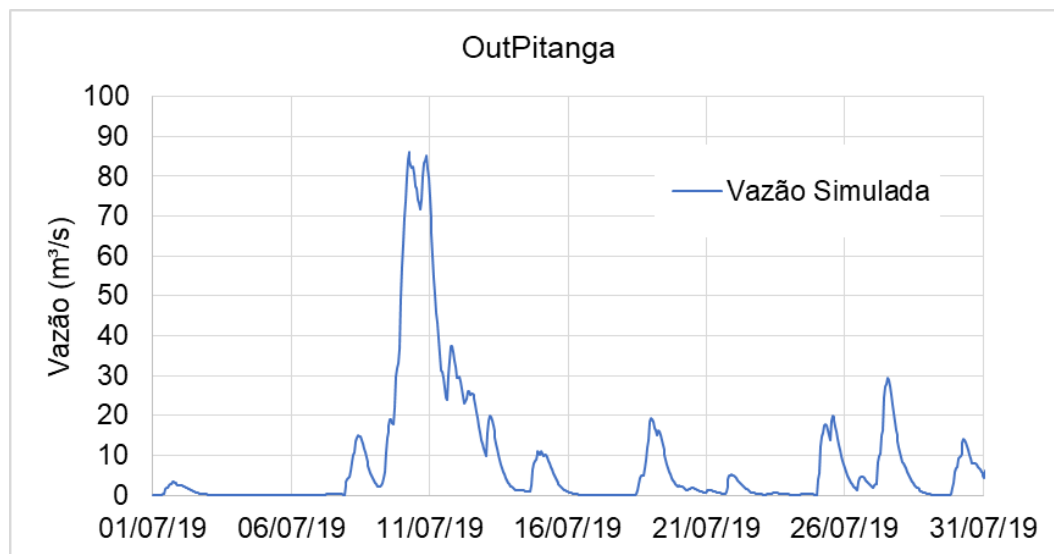


Figura 39. Vazão simulada pelo HEC-HMS após ajuste de parâmetros para o elemento OutPitanga.



O modelo simulou um pico de vazão próximo de 80 m³/s para o rio Poxim e de cerca de 90 m³/s para o rio Pitanga. Válido destacar que a contribuição do rio Poxim é significativamente maior que do rio Pitanga, considerando as áreas drenadas por cada sub-bacia, que são de 254 km² e 93 km², respectivamente. Nessa simulação, a sub-bacia do rio Pitanga resultou em maior vazão do que a do rio Poxim devido ao armazenamento de água pela barragem.

Na Figura 37 é possível observar que a maior parte da vazão afluyente, proveniente da contribuição do rio Poxim-Açu, é amortecida pela barragem e uma pequena parte é vertida, cerca de 20 m³/s de pico. A vazão resultante do rio Poxim é ainda alimentada pelo Poxim-Mirim e pela vazão gerada pela área incremental do Poxim-Açu após a barragem e do próprio Poxim.

Nas Figura 40 e Figura 41 são apresentados os resultados da simulação para a bacia do Canal da Margem Direita e da Margem Esquerda, respectivamente. Apesar das bacias serem pequenas, a contribuição em termos de vazão para o bairro Jabotiana é significativa, porém são cerca de 10 vezes menores que as vazões do rio Poxim. Por ser uma bacia mais urbanizada, a vazão do Canal da Margem Esquerda, mesmo possuindo menor área drenada, ficou maior que a vazão do Canal da Margem Direita.

Figura 40. Vazão simulada pelo HEC-HMS após ajuste de parâmetros para o elemento OutCanalDir.

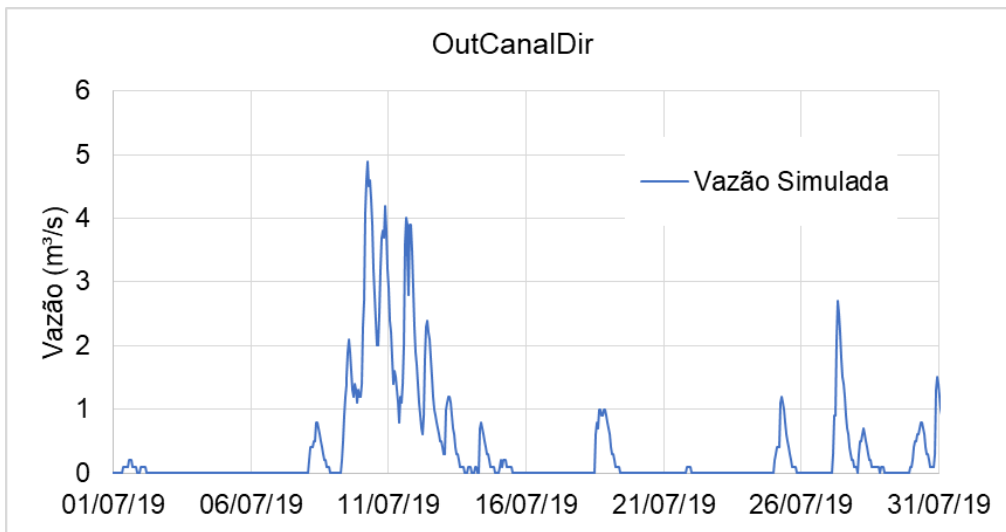
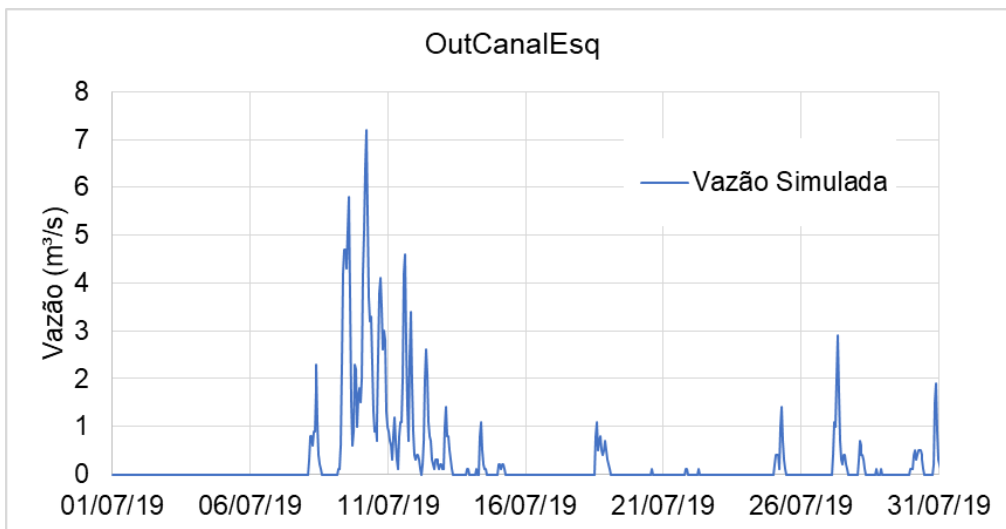


Figura 41. Vazão simulada pelo HEC-HMS após ajuste de parâmetros para o elemento OutCanalEsq.



A modelagem hidrológica do evento de julho de 2019 demonstrou a importância da calibração do modelo. Mesmo com poucas informações, foi possível observar que os parâmetros iniciais, mesmo sendo determinados com base física, ou seja, considerando o MDE e o uso do solo, levavam a um exagero nas vazões simuladas - mais que o dobro quando comparado com a vazão afluente da barragem. A princípio, o modelo está calibrado tendo como referência os dados da barragem. Porém, para validar a calibração é necessária a simulação de outros eventos e a medição de vazão nas outras sub-bacias, para se ter dados suficientes para confrontar os resultados.

5.3. Modelagem hidrodinâmica

Os resultados das primeiras simulações realizadas para o bairro Jabotiana (domínio a) são apresentados na Figura 42.

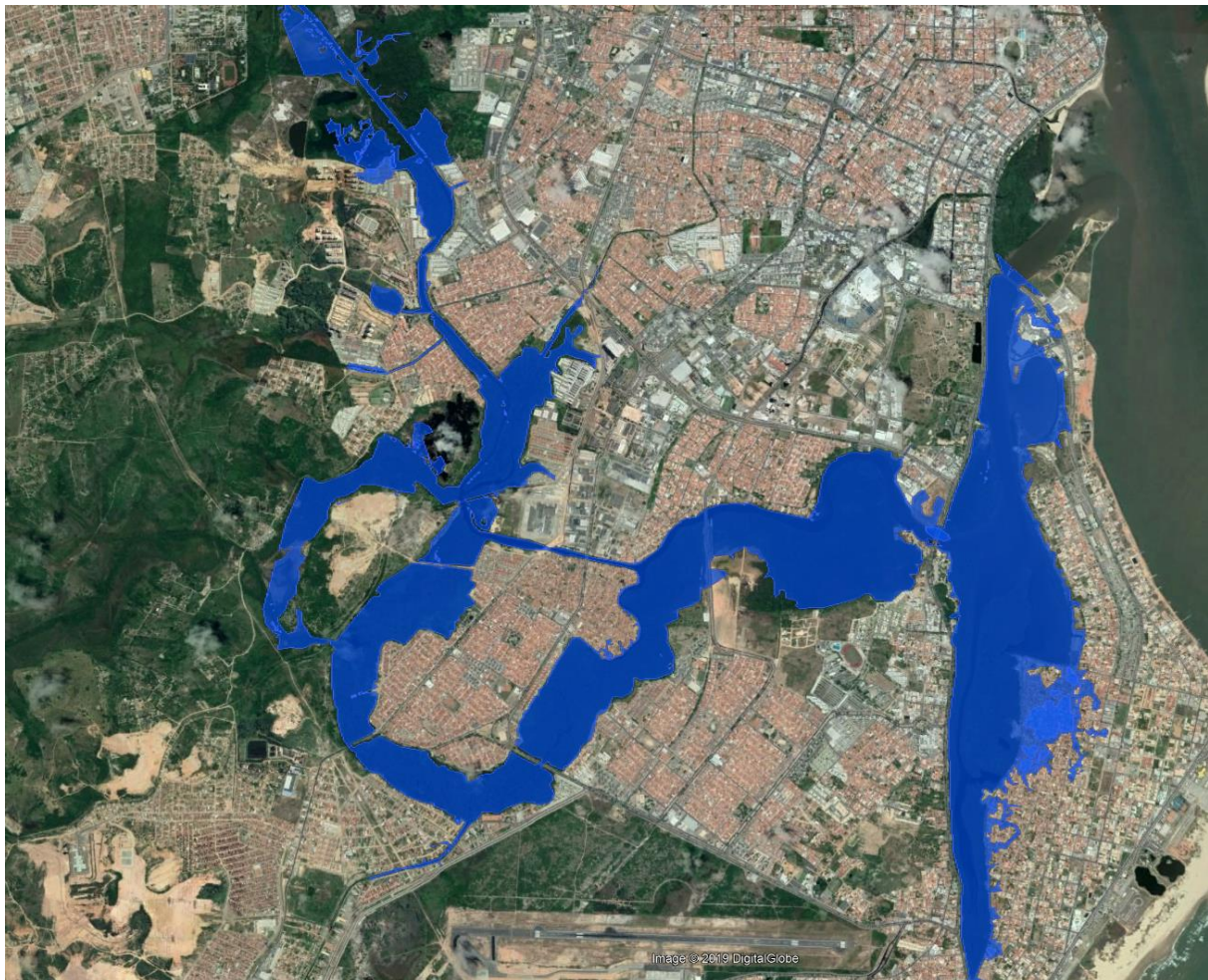
Figura 42. Resultado das primeiras simulações no HEC-RAS (domínio a): teste da influência da maré.



Verificou-se que o tempo de enchimento do canal é de cerca de 240 horas (10 dias) para o recorte do bairro e de 360 horas (15 dias) do bairro até a foz, considerando a vazão remanescente. Esses valores estão sendo utilizados na definição das condições iniciais das simulações para criação do ábaco de vazões.

A Figura 43 apresenta o primeiro resultado para o projeto até a foz (domínio b). É possível observar que o modelo está extravasando demais na região próxima à foz, inundando áreas que não são comumente afetadas. A primeira alternativa que está sendo testada para corrigir esse problema é a calibração do coeficiente de Manning. Caso não seja possível corrigir através desse procedimento, será realizado um ajuste do MDE no leito do rio nos trechos próximos à foz, usando as informações das seções transversais levantadas pela DESO em 2010.

Figura 43. Resultado da simulação até a foz (domínio b).



As simulações realizadas até o momento demoraram em torno de 6 horas para o recorte do Jabotiana e cerca de 40 horas para o projeto até a foz. Os resultados indicaram a necessidade de redução no tamanho da célula da malha de escoamento, o que aumentará consideravelmente o tempo de simulação. O ideal, seria trabalhar com a célula de 1 m² (1m x 1m), coincidindo com o tamanho da célula do MDE. Porém, devido à limitação de recursos computacionais disponíveis, não é possível realizar as simulações nessa escala.

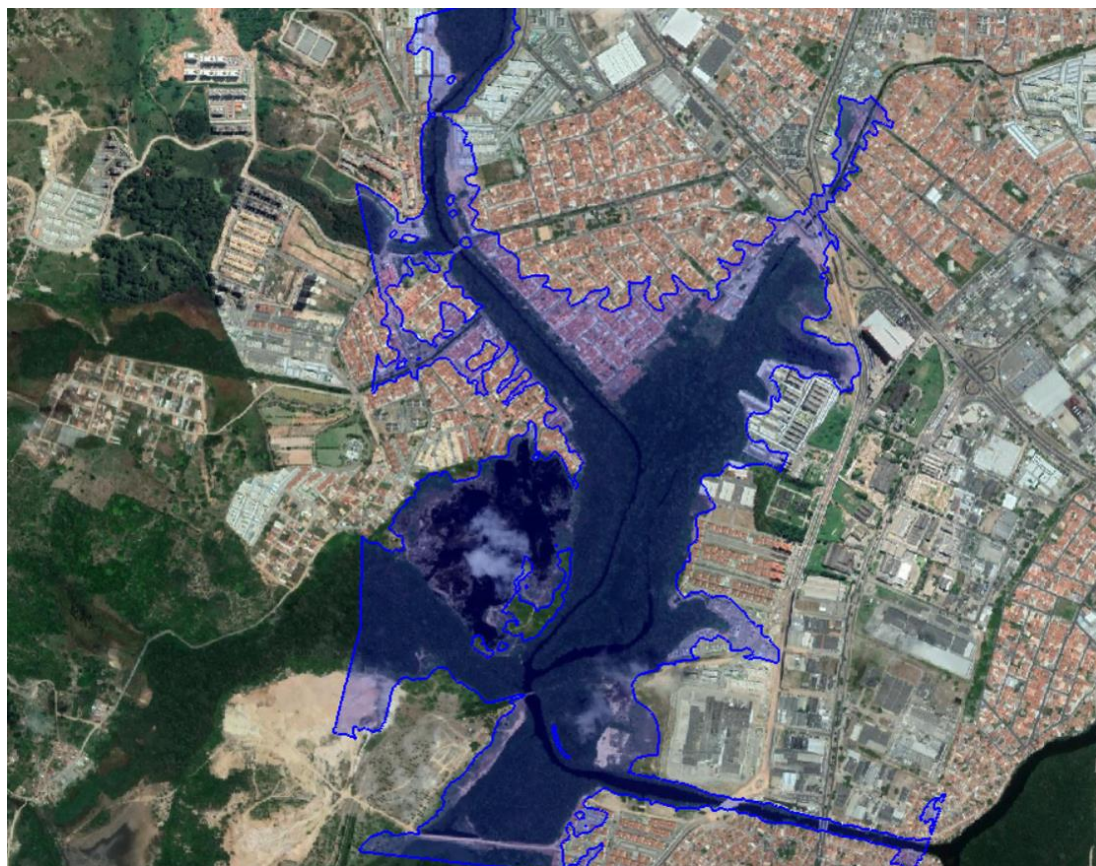
Dessa forma, a solução encontrada é realizar um upgrade no computador, com adição de memória RAM e de um *Solid State Driver* (SSD), de forma a atender os requisitos mínimos recomendados pelo manual do HEC (USACE, 2016). Esse upgrade deverá ocorrer em breve e permitirá trabalhar na escala adequada e reduzir o tempo necessário para cada simulação.

5.3.1. Simulação do evento extremo de julho de 2019

Na Figura 44 é apresentada a mancha de inundação máxima simulada no HEC-RAS para o evento extremo de julho de 2019 cobrindo o domínio do bairro Jabotiana. As melhores representações foram obtidas com coeficiente de Manning igual a 0,03 e 5 m de tamanho da célula de computação. A mancha ficou próximo com o que foi observado, com

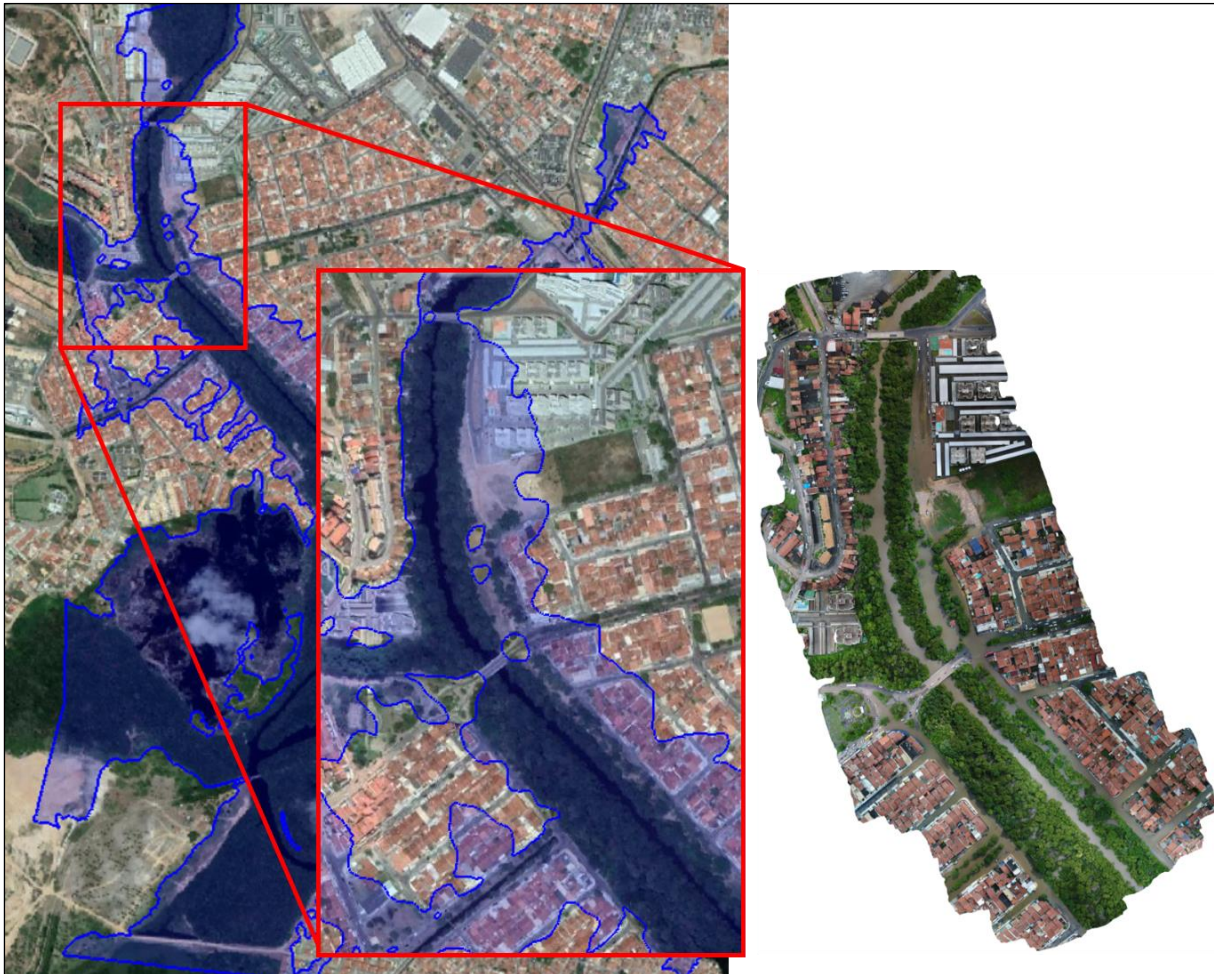
certo exagero da área inundada próximo do Canal da Margem Direita. Entretanto, o resultado ainda precisaria ser confrontado com a Defesa Civil e os moradores das áreas atingidas.

Figura 44. Mancha de inundação máxima gerada pelo HEC-RAS para o evento extremo de julho de 2019.



Na Figura 45 é comparada a simulação com o levantamento de drone realizado em um trecho do rio durante o dia.

Figura 45. Comparação entre a simulação da mancha de inundação e a imagem obtida com drone durante o evento extremo de julho de 2019.



Analisando-se a simulação dinamicamente, é possível observar o efeito da maré no aumento e na diminuição da mancha de inundação conforme maré alta e baixa. Entretanto, tal efeito é amenizado durante as vazões altas provenientes do rio Poxim. Também é possível observar que as contribuições dos canais urbanos, tanto da margem direita como da margem esquerda, não são muito significativas, de forma que a maior parte da inundação está relacionada com a grande vazão proveniente da bacia do rio Poxim. Válido destacar, que o pico de vazão ocorreu durante a Maré de Quadratura, como pode ser observado na Figura 17. Logo, a extensão da inundação poderia ter sido intensificada se o evento ocorresse durante a Maré de Sizígia.

6. SISTEMA DE ALERTA A INUNDAÇÕES NO POXIM – SAI POXIM

Devido à situação atual do monitoramento hidrometeorológico na bacia do rio Poxim, foi necessário o desenvolvimento de duas versões do aplicativo para o sistema *Android*: versão Gestor (Figura 46) e versão Usuário (Figura 47).

Figura 46. Telas do aplicativo na versão Gestor: a) tela de abertura; b) tela de login; c) tela inicial; d) entrada de dados; e) pré-visualização do mapa.

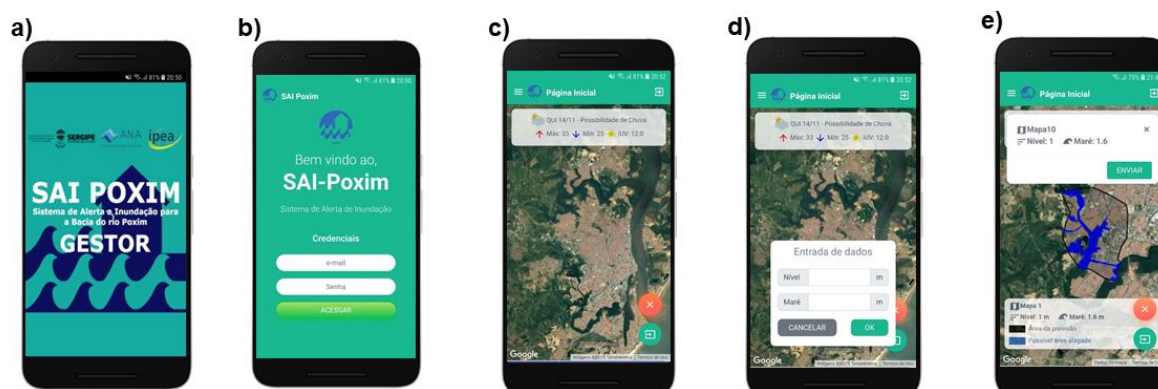
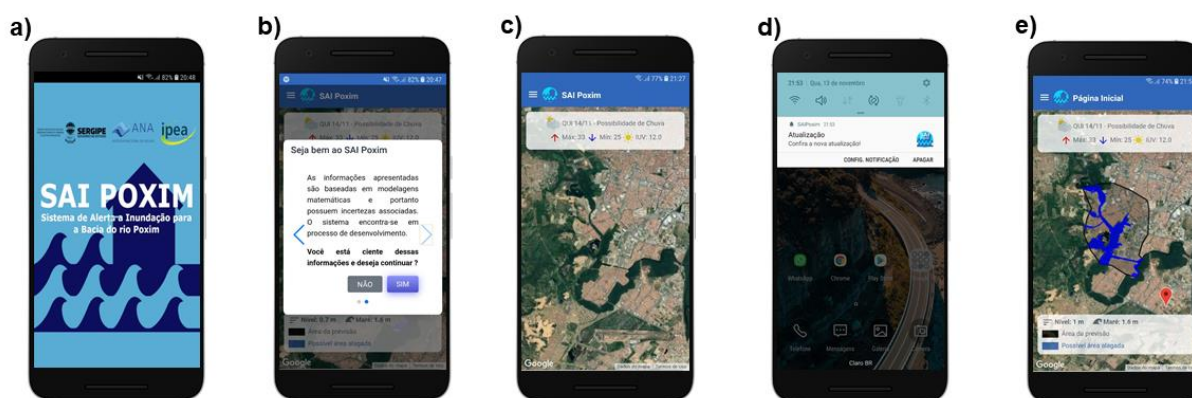


Figura 47. Telas do aplicativo na versão Usuário: a) tela de abertura; b) tela de boas-vindas; c) tela inicial; d) notificação de atualização no sistema; e) visualização do mapa.



A versão Gestor possui acesso limitado aos “gestores” de recursos hídricos do estado, que serão os responsáveis por carregar a previsão. Ao iniciar o aplicativo, o gestor visualizará a tela de abertura (Figura 46a) seguida pela tela de *Login* (Figura 46b), onde será necessário inserir usuário e senha para ter acesso ao sistema.

A tela inicial (Figura 46c) da versão Gestor é composta pela imagem de satélite da região, uma barra superior onde é possível verificar a previsão do tempo para o dia do acesso, e dois botões no canto inferior direito: carregar previsão (botão verde) e excluir previsão (botão vermelho). Ao clicar no botão para carregar dados será exibida uma tela com os campos Nível (m) e Maré (m) (Figura 46d), onde o gestor deverá inserir a previsão do nível e de maré máxima. Clicando no botão “Ok”, o mapa será pré-carregado na tela inicial, juntamente com os valores de nível e maré digitados e uma legenda na porção inferior da tela. As informações devem ser conferidas cuidadosamente. Ao clicar no botão Enviar o alerta será emitido e o mapa disponibilizado para todos os usuários das duas versões.

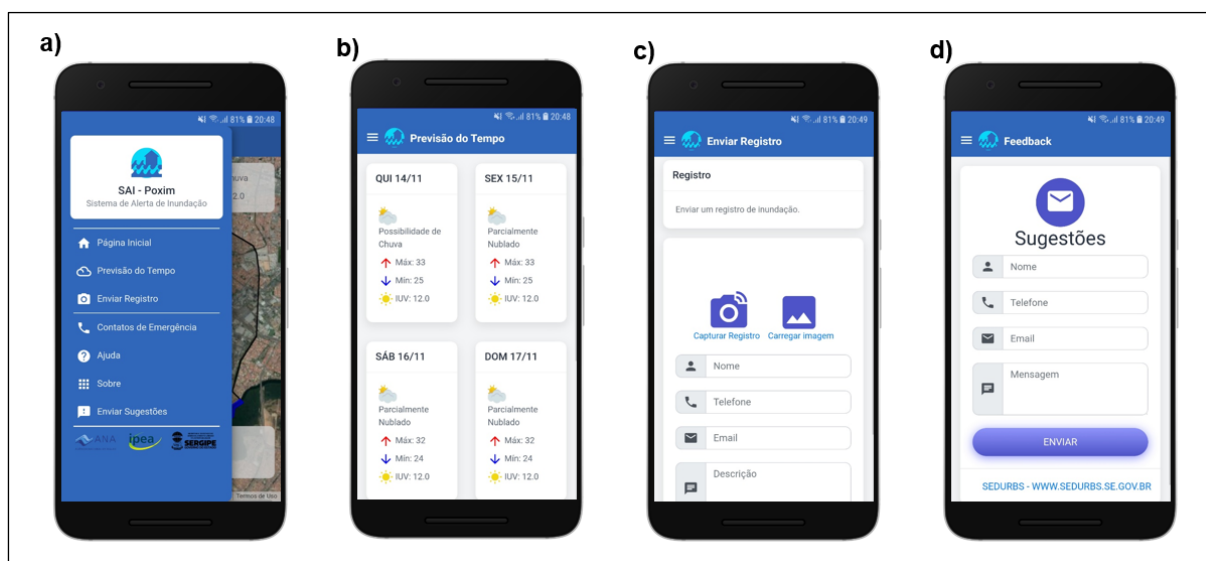
A versão Usuário deverá ser aberta ao público após um período de testes e validação. Através dessa versão, os usuários irão receber o alerta emitido, visualizando a possível área atingida. Ao abrir o aplicativo será exibido a tela de abertura (Figura 47a), seguida de uma tela de boas-vindas (Figura 47b), onde são exibidas informações importantes sobre o sistema. Para

continuar e acessar o a tela inicial (Figura 47c), o usuário deverá confirmar que leu as informações exibidas. A tela inicial é bem similar à da versão Gestor, porém sem os botões para carregar e excluir a previsão. Quando um alerta é emitido, o usuário é notificado que existe uma atualização no sistema (Figura 47d). Isso ocorre mesmo se o aplicativo não estiver aberto. Uma vez notificado, o usuário deverá abrir o aplicativo para visualizar as possíveis áreas atingidas (Figura 47e).

Na Figura 49 são apresentados alguns dos mapas que compõem o SAI Poxim. Além da exibição dos mapas com as áreas inundadas, existem outras funcionalidades dos sistemas listadas no menu lateral (Figura 48a), que pode ser acessado ao clicar no botão Menu, no canto esquerdo da barra superior, ou deslizando o dedo da esquerda para a direita. O menu é composto pelas opções:

- Página inicial: navega para a tela inicial;
- Previsão do tempo: exibe a previsão do tempo para os próximos sete dias;
- Enviar registro: possibilita o envio de registros fotográficos pelo usuário, contendo as coordenadas do local da fotografia registradas pelo celular. Essa funcionalidade permite não só uma rápida ação de órgãos como a Defesa Civil, como produz informações que podem ser utilizadas na calibração dos modelos e melhoria do próprio sistema;
- Contatos de emergência: lista de telefones importantes para que a população entre em contato em caso de emergência;
- Ajuda: exibe um tutorial de como utilizar o aplicativo;
- Sobre: exibe informações sobre o desenvolvimento do sistema, a metodologia utilizada para gerar os mapas e as limitações existentes;
- Enviar sugestões: possibilita que o usuário envie sugestões de melhorias e/ou reporte problemas identificados.

Figura 48. Demais funcionalidades: a) Menu lateral; b) Previsão do tempo; c) Enviar registro; e d) Enviar sugestões.

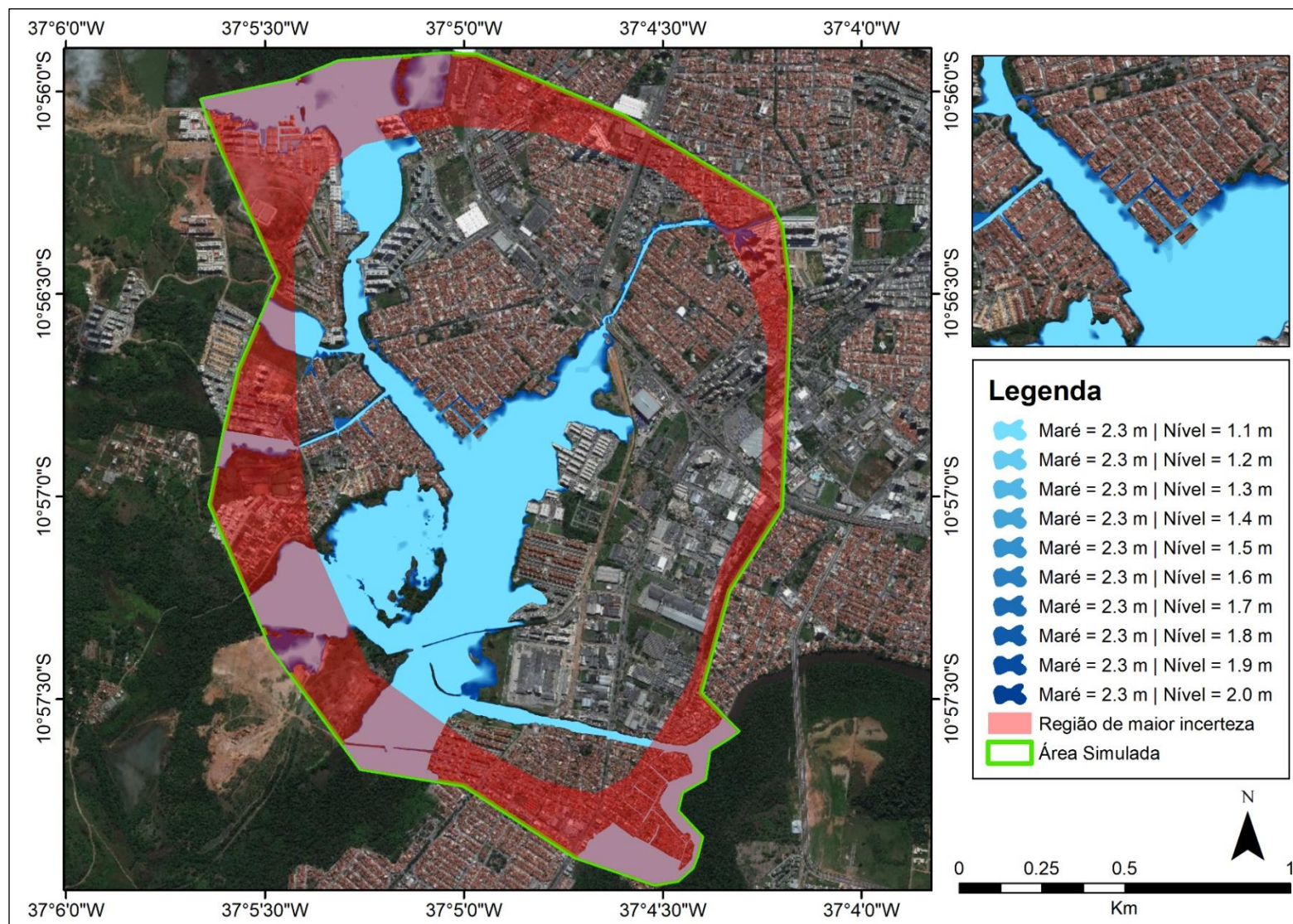


Existem muitas outras possibilidades para expansão da ferramenta através da adição de diferentes funcionalidades, como por exemplo:

- Apresentar situação dos principais reservatórios do Estado;
- Exibir mapa com áreas afetadas pela seca;
- Emitir alertas automáticos caso seja prevista a ocorrência de um evento climático, relacionado ou não com o rio.

Para o futuro, havendo o monitoramento adequado da bacia, espera-se que o sistema seja automatizado e consiga fornecer a previsão de áreas atingidas por inundações em tempo real, baseando-se nos dados provenientes das estações a serem instaladas. Nesse caso, a versão do Gestor deixaria de existir.

Figura 49. Exemplo de mapas do SAI Poxim.

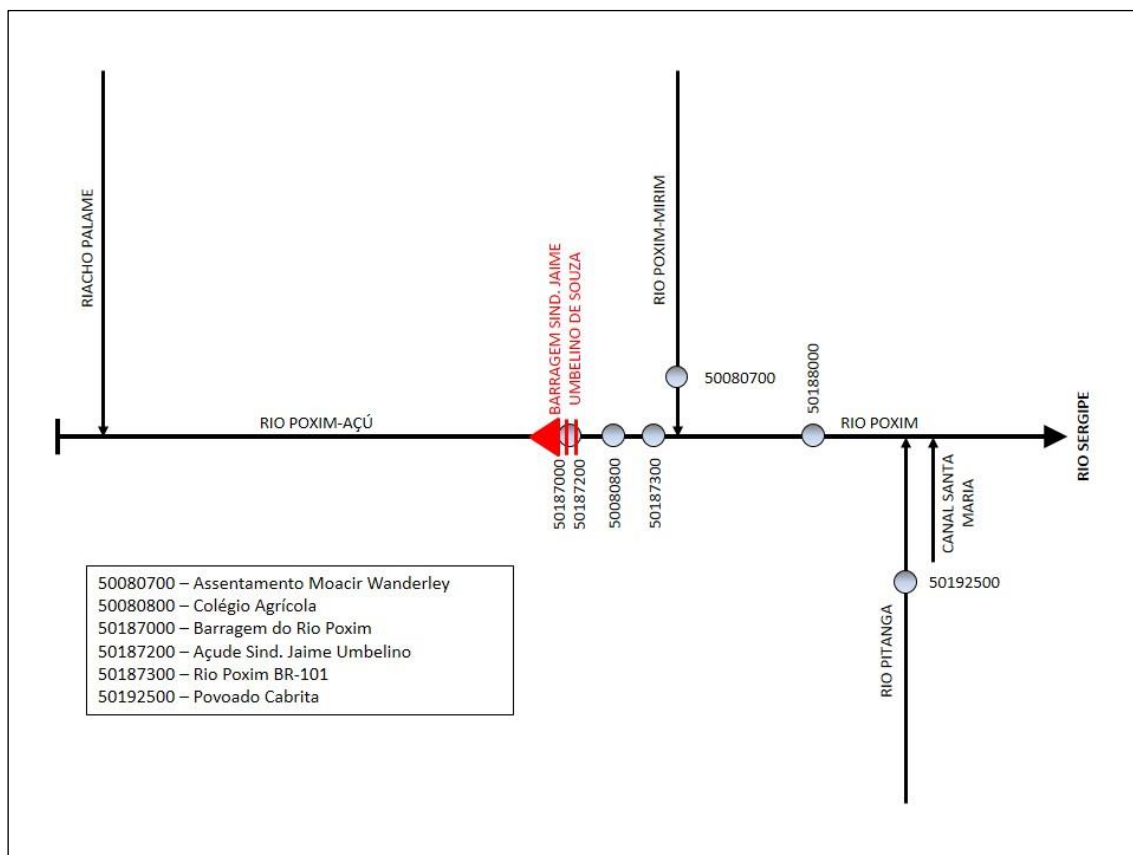


7. SUGESTÃO DE APERFEIÇOAMENTO

Uma rede de monitoramento hidrometeorológica bem estabelecida, além de disponibilizar informações de qualidade para a modelagem numérica da bacia hidrográfica, é uma importante ferramenta de um sistema de alerta efetivo. Visando a estruturação de um sistema para a bacia do Rio Poxim, foram realizados o levantamento e a análise quali-quantitativa dos dados hidrológicos existentes, resultando no seguinte diagnóstico:

- Dados hidrológicos: verificou-se a falta de dados hidrológicos observados em quantidade, qualidade e escala adequada. Este fator desponta como a maior limitação à implantação do sistema.
- Estações pluviométricas: as poucas estações telemétricas existentes estão concentradas a jusante da bacia, não existindo pluviômetro na região da cabeceira.
- Estações fluviométricas convencionais: verificou-se a existência de cinco estações: 50187200 – Açude Sind. Jaime Umbelino, localizada no reservatório da barragem no Poxim-Açu; 50080800 – Colégio Agrícola, localizada no Poxim-Açu; 50080700 – Assentamento Moacir Wanderley, no Poxim-Mirim; 50188000 – DESO-Aracaju, localizada no rio Poxim; e 50192500 – Povoado Cabrita, localizada no rio Pitanga. Todas apresentam poucas medições de descarga e apenas para vazões baixas, trazendo grande incerteza no ajuste de curvas-chave, principalmente para vazões máximas. Além disso, apenas a estação 50187200 ainda está operando, sendo as demais desativadas.
- Estações fluviométricas telemétricas: existem duas estações telemétricas: 50187000 – Barragem do Rio Poxim, localizada no reservatório da barragem; e 50187300 – Rio Poxim BR 101, localizada imediatamente a jusante da barragem, aferindo nível em uma porção do rio que é controlada pelo fluxo descarregado pela barragem.
- Tamanho da bacia: por ser uma bacia pequena (346 km²), apresentando um curto tempo de resposta diante de um evento crítico, o sistema ideal deveria contar com uma previsão de curto prazo, baseada em dados de radar ou de uma rede bem estabelecida de monitoramento telemétrico de chuva e vazão em escala temporal horária ou sub-horária.

Figura 50. Diagrama unifilar da atual rede de monitoramento da Unidade de Planejamento do Rio Poxim.



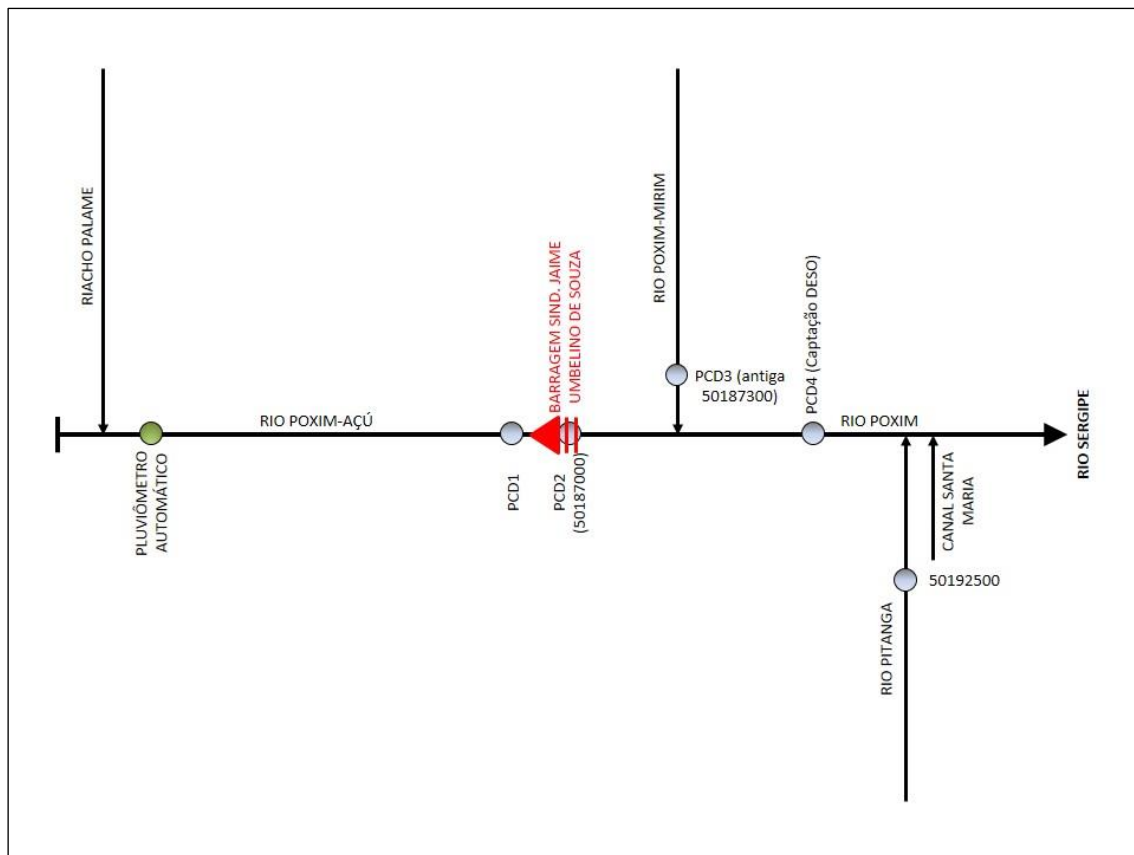
7.1. Melhoria na rede de monitoramento hidrometeorológico

Com base no diagnóstico efetuado, sugere-se:

- Instalar uma estação automática (PCD1) a montante do reservatório: a função dessa estação é monitorar o volume de água que chega no reservatório;
- Manter a estação 50187000 (PCD2): essa estação irá monitorar o nível do reservatório e volume de chuva que cai diretamente sobre o espelho d'água;
- Transferir a estação 50187300 (PCD3) para o rio Poxim-Mirim: essa estação tem o objetivo de monitorar o comportamento do rio Poxim-Mirim, auxiliando no acompanhamento da quantidade de vazão contribuída para a bacia;
- Instalar uma estação automática (PCD4) no rio Poxim, após a confluência dos rios Poxim-Açu e Poxim-Mirim: essa estação será instalada no local da captação da Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO), próximo ao campus da Universidade Federal de Sergipe (UFS), com o propósito de quantificar o volume de água que converge para o bairro Jabotiana;
- Instalar um pluviômetro automático na região da cabeceira: essa estação permitirá monitorar o volume de chuva que cai na parte alta da bacia hidrográfica.

A Figura 51 apresenta a configuração da rede conforme as melhorias sugeridas. As PCDs foram numeradas de montante para jusante (1 a 4). Deverão ainda ser realizadas visitas de campo para escolha dos locais exatos de implantação das estações.

Figura 51. Diagrama unifilar da rede de monitoramento da Unidade de Planejamento do Rio Poxim sugerida.



Além da sugestão de instalação de equipamentos, sugere-se também manter uma equipe técnica capacitada, responsável pela manutenção dos equipamentos e recepção dos dados, garantindo, assim, a disponibilização de dados em tempo real e a redução de grandes períodos de falhas, como são observados na rede atual.

Após atualização da rede, sugere-se contato com a ANA visando a atualização das informações no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e disponibilização de todos os dados monitorados na bacia.

7.1.1. Equipamentos necessários

- PCDs 1 e 4 - Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) Hidrometeorológicas com sensores de chuva e nível d'água a serem adquiridos.
- PCDs 2 e 3 - A PCD2 já está instalada no local adequado. A PCD3 deverá ser transferida para o rio Poxim Mirim, em local a ser definido.
- Pluviômetro automático - em conversa com o Sr. Overland Amaral Costa, responsável pela Sala de Situação da Superintendência Especial de Recursos Hídricos e Meio Ambiente – Serhma de Sergipe, foi informado que já existe

um equipamento disponível para instalação, não sendo necessário adquirir um novo. Local de instalação a ser definido.

7.1.2. Orçamento

O Sr. Overland Amaral solicitou um orçamento do equipamento a ser adquirido (em Anexo) e o valor e a descrição do equipamento são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. **Orçamento.**

Item	Qtde.	Descrição	IPI	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
PCD	2	Plataforma de Coleta de Dados – PCD, marca Hobeco/Vaisala modelo MAWS-55	5%	66.922,00	133.844,00

7.2. Demais sugestões para minimização do risco de inundações

Para minimizar o risco de inundações, principalmente no bairro Jabotiana e adjacências, sugere-se as seguintes ações de curto/médio prazo:

- Melhoria na rede de monitoramento: o primeiro passo é conhecer a região de interesse, para isso sendo necessário um monitoramento confiável e contínuo, fornecendo subsídios para uma melhor tomada de decisão;
- Desenvolvimento de aplicativo para alerta das comunidades potencialmente atingidas por inundações (em elaboração);
- Estudo de viabilidade da construção de uma barragem para contenção de cheias no rio Poxim-Mirim: além de analisar a viabilidade técnica e econômica, a principal finalidade desse estudo seria verificar se a construção de um barramento no rio Poxim-Mirim é suficiente para mitigar os efeitos das cheias na parte baixa da sub-bacia;
- Realização de novo levantamento batimétrico do rio Poxim;
- Dragagem do rio Poxim: a limpeza da calha permitirá aumentar a capacidade de escoamento do rio;
- Realização do Plano de Ação de Emergência (PAE) para a barragem Sindicalista Jaime Umbelino de Souza, em atendimento à Lei nº 12.334/2010;
- Elaboração de Mapa de Risco de Inundação das áreas urbanizadas, a partir de Modelo Digital de Elevação (MDE) / levantamento aéreo por drone;
- Estudo de viabilidade para instalação de comporta na barragem localizada na captação da DESO (ponte de acesso à UFS), visando o amortecimento de cheias;
- Empreender um programa de educação ambiental voltado à população residente na sub-bacia hidrográfica do rio Poxim.

Como ações de longo prazo, sugere-se:

- Adoção de medidas não estruturais visando diminuir o escoamento superficial das águas pluviais, considerando inclusive um valor limite para contribuição das águas aduzidas ao rio Poxim a partir dos empreendimentos habitacionais;
- Disciplinamento do uso do solo na sub-bacia do rio Poxim;
- Elaboração de Plano Diretor de Drenagem Urbana;
- Elaboração do Plano Municipal de Resíduos Sólidos.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao tamanho da bacia do rio Poxim (aproximadamente 346 km²) e ao curto tempo de concentração, o sistema ideal deveria contar com uma previsão de curto prazo, baseada em dados de radar ou de uma rede bem estabelecida de monitoramento telemétrico de chuva e vazão em escala temporal horária ou sub-horária, o que não é uma realidade para o estado no momento.

A bacia possui apenas medições esporádicas de vazão realizadas em algumas estações fluviométricas convencionais, que já se encontram desativadas, e as curvas-chave foram estabelecidas com grande incerteza, principalmente para vazões máximas. As duas estações fluviométricas telemétricas disponíveis possuem diversas falhas de monitoramento. As estações pluviométricas estão concentradas a jusante da bacia na área urbanizada, não existindo monitoramento pluviométrico na região da cabeceira. O estado não possui radar meteorológico e o alcance dos radares existentes em Alagoas e na Bahia não é satisfatório.

Durante todo o desenvolvimento do trabalho ficou muito claro que o principal fator que limita o desenvolvimento de um sistema de previsão e alerta para a bacia do rio Poxim é a escassez de dados hidrológicos observados. Levanta-se então o seguinte questionamento: como fazer uma boa gestão de recursos hídricos, buscado atender múltiplos interesses, se não se consegue realizar o monitoramento adequado dos mananciais? É evidente que o primeiro passo é conhecer a região de interesse, sendo para isso necessário um monitoramento confiável e contínuo, fornecendo subsídios para uma melhor tomada de decisão.

A pouca disponibilidade de dados dificultou o andamento do trabalho de modo que grande parte do esforço foi direcionada na busca e análise de novas informações e/ou buscas por métodos alternativos para contornar a falta de dados, reduzindo o tempo de desenvolvimento da ferramenta em si.

Considerando o quadro encontrado, porém ainda com o objetivo de desenvolver uma ferramenta, a concepção do sistema foi baseada na estruturação dos modelos disponibilizados pelos softwares HEC, principalmente do modelo hidráulico HEC-RAS. A utilização de um aplicativo para celular apareceu como uma alternativa de ferramenta simples, de fácil aplicação e atual. Porém, essa ferramenta ainda precisa ser alimentada com dados mais representativos e aprimorada com o passar do tempo.

A modelagem é uma ferramenta muito útil e que pode fornecer bons resultados. Entretanto, sempre será dotada de incertezas associadas, principalmente devido a forma simplificada como os modelos buscam representar fenômenos naturais complexos. É muito importante destacar que a resposta de um modelo vai depender fundamentalmente dos dados que o modelador fornecer como entrada, de forma que dados confiáveis geram respostas mais confiáveis. Os modelos apenas serão representativos quando alimentados com dados consistentes e calibrados adequadamente, com dados em quantidade, qualidade e escala adequadas. Assim, a precisão e eficiência das ferramentas desenvolvidas irão depender muito do aperfeiçoamento da rede de monitoramento.

Apesar de toda a limitação de dados, acreditamos que essa ferramenta contribuirá bastante para que os gestores possam atuar de forma mais acertada, contribuindo para uma melhoria na gestão de recursos hídricos no estado, principalmente na Unidade de Planejamento do Poxim.

Existe uma grande preocupação por parte da comunidade, da Serhma, da Defesa Civil Municipal e da DESO com o monitoramento do rio Poxim. Isso porque, além da recorrente preocupação com as estiagens e o comprometimento do abastecimento na cidade de Aracaju, existe também a ocorrência de inundações a jusante da bacia. Assim, através do sistema, os gestores poderão buscar um planejamento que contemple ações otimizadas e integradas.

Devido ao tamanho, o estado de Sergipe tem o potencial de ser referência na gestão de recursos hídricos no Brasil. O programa Progestão é uma excelente oportunidade para que o estado possa realmente avançar nessa direção. Para tal, é preciso começar pelo básico indispensável: monitoramento contínuo e de qualidade.

Espera-se que, com a organização das poucas informações disponíveis e com a estruturação de um sistema de previsão, essa pesquisa venha a motivar o aperfeiçoamento da rede de monitoramento hidrometeorológico da bacia, com instalação de estações telemétricas e radar meteorológico. Além de incentivar a manutenção contínua das estações, a realização de medições de descarga com maior frequência, buscando os extremos de vazão, e recepção de dados observacionais em tempo real.

Válido também destacar a importância do contato com os moradores e a comunidade das áreas de risco a inundação e com a Defesa Civil Municipal para obter informações sobre os eventos extremos ocorridos. Conhecer a susceptibilidade da área estudada auxilia o mapeamento das áreas de risco a inundação e a calibração efetiva de modelos hidrodinâmicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IPEA e à ANA, que através do projeto “Aperfeiçoamento de Ferramentas Estaduais de Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito do Progestão” fomentaram o desenvolvimento desse trabalho. Os autores também agradecem os gestores da Serhma/SEDURBS, por disponibilizarem prontamente todas as informações necessária para o desenvolvimento do projeto e estarem abertos para esclarecimentos, além da Associação Jabotiana Viva que forneceu algumas informações importantes e atuou ativamente na divulgação do trabalho desenvolvido.

REFERÊNCIAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2017a). **Contrato Nº 065/2017/ANA — PROGESTAO II**. Anexo III - Quadro de Metas de Cooperação Federativa no âmbito do SINGREH.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2017b). **O Progestão em Sergipe: síntese do primeiro ciclo do programa (2013 – 2016)**.
- AZAM, M.; KIM, H.S.; MAENG, S.J. (2017). **Development of flood alert application in Mushim stream watershed Korea**. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 21, p. 11–26.
- IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (2017). **Programa de Consolidação do Pacto Nacional pela Gestão de Águas (1º ciclo): Estado de Sergipe**. Avaliação do Progestão.
- BAHIA, D. S. G. (2017). **Determinação de áreas naturalmente suscetíveis à inundações no município de Aracaju – Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.
- BARBI, F. (2015). **Mudanças climáticas e respostas políticas nas cidades: os riscos na Baixada Santista**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2015.
- BUARQUE, D.C.; FAN, F.M.; DA PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W. (2009). **Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação**. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 14, n. 2, p. 91-103.
- CABRAL, S.L.; CAMPOS, J.N.B.; SILVEIRA, C.S.; TEIXEIRA, F.A.A. (2016). **Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no Mapeamento de Área de Inundação Urbana: Aplicação à Bacia do Rio Granjeiro-CE**. Geociências, UNESP, v. 35, n. 1, p.90-101, São Paulo.
- DESO. (2006). **Revisão Final dos Estudos Hidrológicos e Hidráulicos – Projeto Executivo da Barragem de Poxim Açú**.
- FLEMING, M.J.; DOAN, J.H. (2013). **HEC-GeoHMS: Geospatial Hydrologic Modeling Extension. Version 10.1**. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Davis.
- HALWATURA, D.; NAJIM, M.M.M. (2013). **Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment**. Environmental Modelling & Software, v. 46, p. 155-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>.
- IBRAHIM-BATHIS, K.; AHMED, S.A. (2016). **Rainfall-runoff modelling of Doddahalla watershed - an application of HEC-HMS and SCN-CN in ungauged agricultural watershed**. Arab. J. Geosci. 9:170. DOI 10.1007/s12517-015-2228-2.
- JACCON, G.; CUDO, K.J. (1989). **Curva-chave: Análise e Traçado**. DNAEE, Brasília.
- KNEBL, M.R.; YANG, Z.-L.; HUTCHISON, K.; MAIDMENT, D.R. (2005). **Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event**. Journal of Environmental Management, v. 75, p. 325–336.

KRUMMENAUER, A. DORNELLES, F.; GOLDENFUM, J. A. (2015). **Avaliação do efeito de amortecimentos de cheias pelos reservatórios no rio Taquari-Antas/RS**. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília-DF.

MERWADE, V. (2012). **Creating SCS Curve Number Grid using HEC-GeoHMS**. School of Civil Engineering, Purdue University.

MCID-IPT. Ministério das Cidades - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (2007). **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília, 176 p. Organizadores: Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura.

MONTE, B. E. O.; GOLDENFUM, J. A.; VALÉRIO, E. L. S. (2015). **Eventos extremos de vazão por análise de frequência na bacia hidrográfica do Taquari-Antas**. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília-DF.

OLEYIBLO, J. O.; LI, Z. (2010). Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. *Water Science and Engineering*, v. 3(1), p. 14-22. doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2010.01.002.

RANTZ, S. E. et al. (1982). **Measurement and Computation of Streamflow - Volume 2. Computation and Discharge**. USGS Water Supply Paper 2175.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A.M. (2005). **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v.10 n.4 p. 5-18.

SERGIPE. (2015). **Elaboração dos planos das bacias hidrográficas dos rios Japaratuba, Piauí e Sergipe - Relatório Final: Bacia hidrográfica do rio Sergipe**.

SERHMA/SRH. (2010). **Atlas Digital sobre Recursos Hídricos de Sergipe**, v10.16.

SIQUEIRA, V. A. (2015). **Previsão de cheias por conjunto em curto a médio Prazo: bacia do Taquari-Antas/RS**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS.

TUCCI, C.E.M (1993). **Hidrologia Ciência e Aplicação**, organizado por Carlos E.M. Tucci. Porto Alegre. Editora da Universidade. ABRH-EDUSP.

TUCCI, C. E. M., BRAGA, B. (organizadores) (2003). **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Editora ABRH. Porto Alegre, 348p.

TV SERGIPE (2019). Municípios de Sergipe têm chuvas acima do previsto para o mês de julho. G1. Disponível em: <<https://g1.globo.com/se/sergipe/noticia/2019/07/12/municipios-de-sergipe-tem-chuvas-acima-do-previsto-para-o-mes-de-julho.ghtml>>.

USACE. (2008). **HEC-RAS. Hydrologic Modeling System – User's Manual (version 2.1.2)**. Hydrologic Engineering Center, Davis.

USACE (2010). **HEC-HMS. River Analysis System – User’s Manual (version 3.5)**. Hydrologic Engineering Center, Davis. Disponível em: < http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/hechms_users_manual_3.5.pdf>.

USACE (2016). **HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, Version 5.0**. Brummer, G. W.: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

VALÉRIO, E.L.S.; NEGRÃO, A.C. (2019a). **Panorama do Monitoramento Hidrometeorológico da Unidade de Planejamento do Rio Poxim no estado de Sergipe**. XII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe, Aracaju/SE.

VALÉRIO, E.L.S.; NEGRÃO, A.C. (2019b.). **Mapeamento de pontos de inundação em áreas urbanas usando o Google Street View**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu/PR.

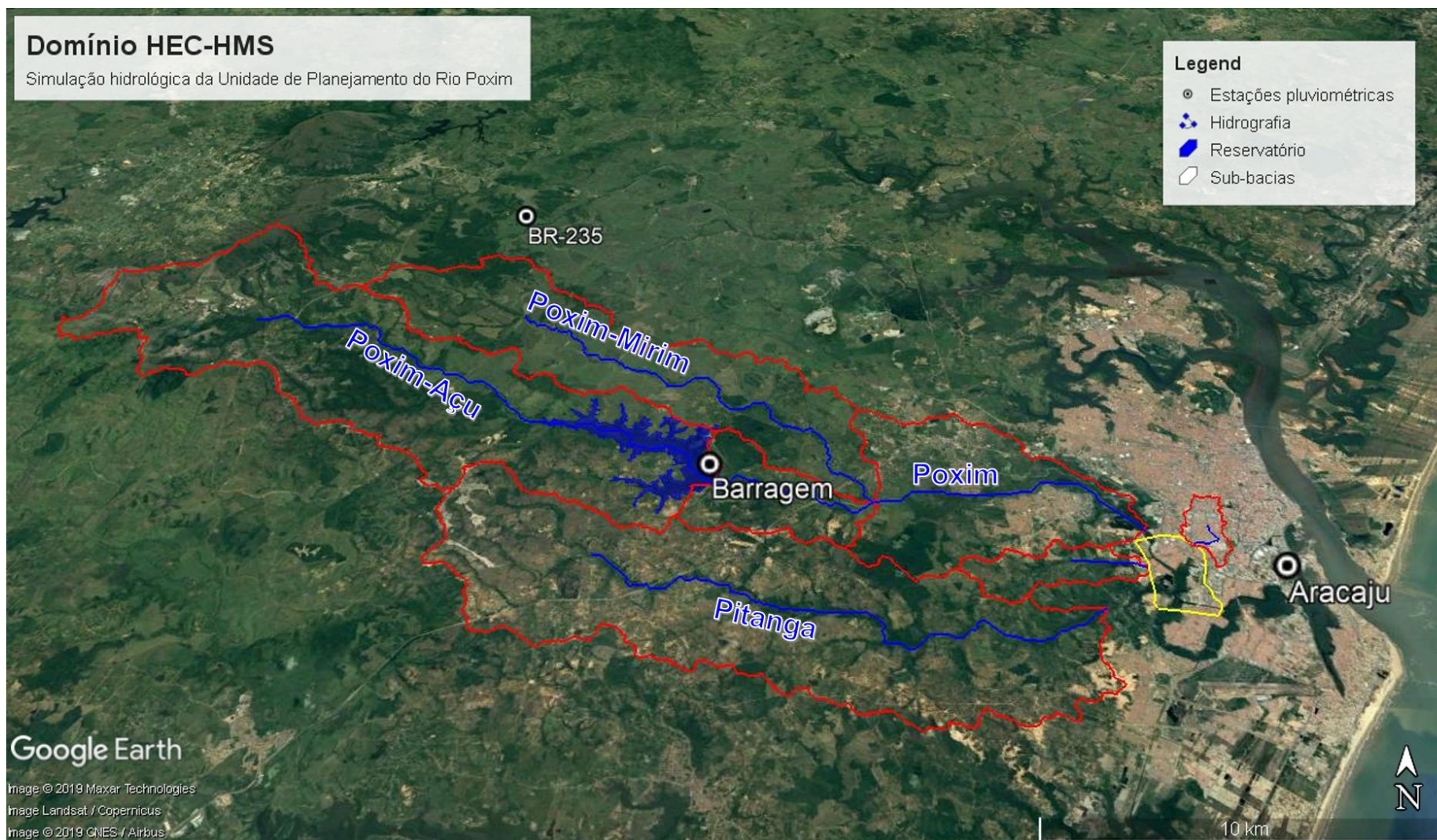
XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. (2016). **Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013)**. International Journal of Climatology, DOI: 10.1002/joc.4518.

APÊNDICE A – Informações sobre as estações de monitoramento

Código Fluviometria	Código Pluviometria	Nome da Estação	Nome do Rio	Responsável/Operador	Latitude	Longitude
50187200		AÇUDE SIND. JAIME UMBELINO DE SOUZA	Rio Poxim Açú	SEMARH-SE	-10.9197	-37.2078
	31783*	Aracaju		SINDA/INPE	-10.9500	-37.0700
	1037004/A409*	ARACAJÚ		INMET	-10.9167	-37.0500
	1037086*	ARACAJÚ_Aracaju01		CEMADEN	-10.8808	-37.0533
	1037087*	ARACAJÚ_Aracaju02		CEMADEN	-10.9478	-37.0742
	1037088*	ARACAJÚ_Aracaju03		CEMADEN	-10.8869	-37.0558
	1037089*	ARACAJÚ_Aracaju04		CEMADEN	-10.9092	-37.0744
50080700		ASSENTAMENTO MOACIR WANDERLEY	Rio Poxim Mirim	SEMARH-SE/COHIDRO-SE	-10.8986	-37.1789
50187000*	1037085*	BARRAGEM DO RIO POXIM	Rio Poxim Açú	SEMARH-SE	-10.9169	-37.2058
	280400301A*	Centro de Atividades Augusto Franco		CEMADEN	-37.0830	-10.7340
50080800		COLÉGIO AGRÍCOLA	Rio Poxim Açú	SEMARH-SE/COHIDRO-SE	-10.9197	-37.1867
50188000		DESO - ARACAJU	Rio Poxim	SEMARH-SE/COHIDRO-SE	-10.9217	-37.0975
50191000*	1037007*	FAZENDA BELÉM	Rio Vaza Barris	ANA/CPRM	-10.9417	-37.3450
	1037073	IBURA (HORTO FLORESTAL)		FASE	-10.8500	-37.1333
	31802*	Itabaiana		SINDA/INPE	-10.7000	-37.4200
	A451*	ITABAIANA		INMET	-10.6718	-37.4715
	31790*	Laranjeira		SINDA/INPE	-10.8100	-37.1700
50185000*	1037083*	PONTE BR-235	Rio Cotinguiba	SEMARH-SE	-10.8000	-37.2711
50187300*	1037092*	RIO POXIM BR-101	Rio Poxim Açú	SEMARH-SE	-10.9225	-37.1744
	31794*	Santo Amaro		SINDA/INPE	-10.7800	-37.0600
	31795*	Sao Cristovao		SINDA/INPE	-10.9200	-37.2000
50192000*	1037081*	SÃO CRISTÓVÃO	Rio Paramopama	SEMARH-SE	-10.9953	-37.2161

* Estações telemétricas

APÊNDICE B – Domínios da simulação hidrológica e localização das estações pluviométricas



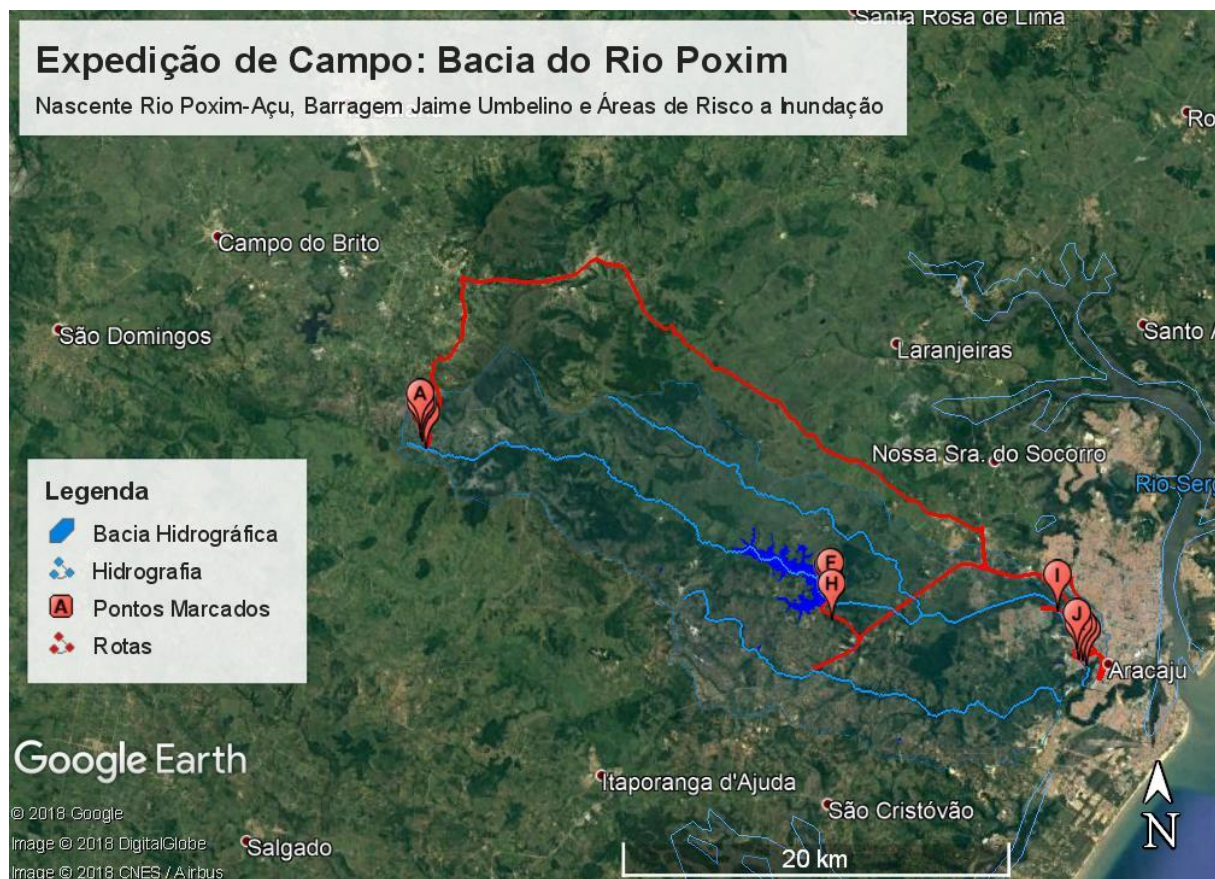
APÊNDICE C – Domínio da simulação hidráulica e condições de contorno



APÊNDICE D – Viagem de Campo

No dia 14 de setembro de 2018 foi realizada uma viagem de campo, visando o reconhecimento da área estudada, com carro e motorista da Serhma. Participaram da expedição os bolsistas, o técnico de geoprocessamento Carlos e o estagiário João Paulo. Na Figura 52 é apresentada a rota percorrida e os pontos visitados.

Figura 52. Rotas percorridas e pontos visitados durante a expedição de campo na bacia do rio Poxim.



Na Figura 53 é apresentada com mais detalhes a área da nascente. No primeiro ponto visitado (Ponto A), por ser o início do período seco na região, o rio encontrava-se seco. Também foi possível avistar a Serra da Ribeira (Figura 54), onde nascem os rios que formam o rio Poxim-Açu. No Ponto B o rio também se encontrava seco. Questionando as moradoras locais elas indicaram o local onde o rio dificilmente secava (

Figura 55). Percorrendo a pé até o local indicado, encontramos o Ponto C, onde o rio começava de um afloramento de água protegido pela vegetação (Figura 56). No Ponto D já era possível ver o rio com água fluindo (

Figura 57).

Figura 53. Detalhe da área percorrida próximo à nascente do rio Poxim-Açu.

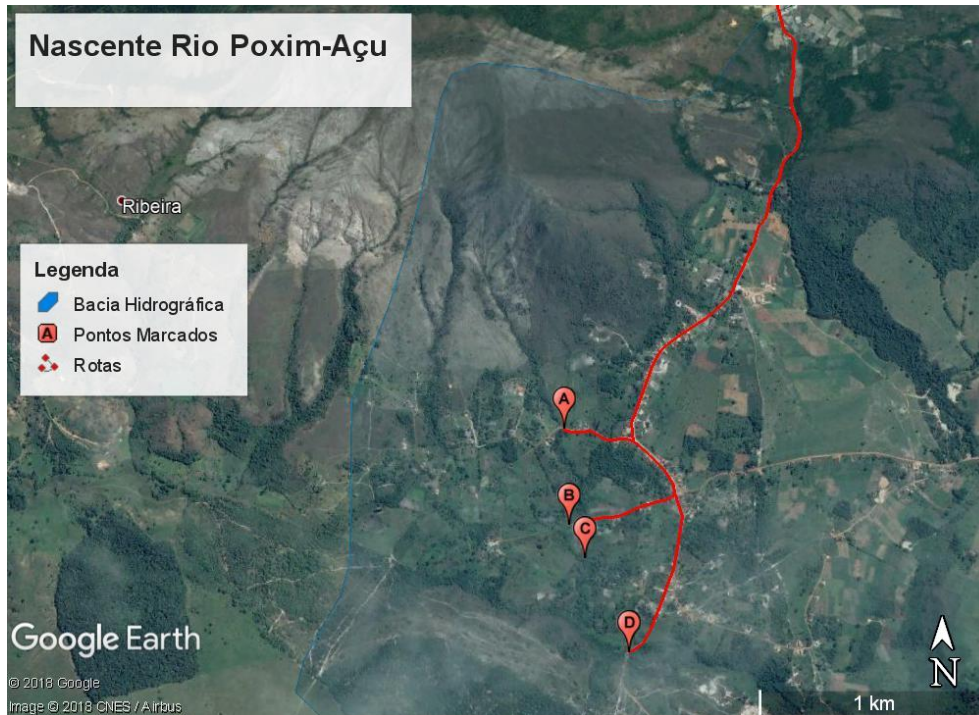


Figura 54. Ponto A: vista da Serra da Ribeira.



Figura 55. Ponto B: local indicado pelas moradoras onde o rio não costuma secar.



Figura 56. Ponto C: afloramento de água no rio Poxim-Açu.



Figura 57. Ponto D: rio Poxim-Açu próximo da nascente.



Na

Figura 58 é apresentada com mais detalhes a área percorrida próximo da Barragem Jaime Umbelino de Souza.

No Ponto E encontra-se a estação de monitoramento hidrométrico, com sensor de nível e pluviômetro (Figura 59), o Ponto F é vertedouro da barragem (

Figura 60) e o Ponto G a saída da válvula dispersora, que no dia encontrava-se aberta (Figura 61).

Foi possível observar que nessa área a água é límpida e parece ter boa qualidade. Próximo a barragem, no Ponto H, encontra-se a seção de monitoramento da microbacia experimental do Prof. André Quintão de Almeida da Universidade Federal de Sergipe (UFS), que conhecemos com o acompanhamento de um dos seus alunos (

Figura 62).

Na Figura 63 é apresentada com mais detalhes a área com problemas de inundação que foi percorrida.

O Ponto I é a ponte da UFS, onde é feito o barramento próximo à captação da DESO (

Figura 64).

Nessa área já é possível observar que qualidade d'água do rio estava prejudicada, a água aparentava estar eutrofizada e provavelmente recebendo lançamentos consideráveis de esgoto e lixo. Do Ponto J até o Ponto N é a área que apresenta problemas de inundação no bairro do Jabotiana (Figura 65).

Figura 58. Detalhe da área percorrida próximo à barragem Jaime Umbelino.



Figura 59. Ponto E: estação de monitoramento da barragem Jaime Umbelino.



Figura 60. Ponto F: vertedouro da barragem Jaime Umbelino.



Figura 61. Ponto G: saída da válvula dispersora da barragem Jaime Umbelino.



Figura 62. Ponto H: microbacia experimental da UFS.



Figura 63. Detalhe da área com risco a inundação que foi percorrida.



Figura 64. Barramento próximo à captação da DESO.



Figura 65. Ponto 10: área com risco de inundação no bairro do Jabotiana.

