



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

LARISSA DRESSLER PEREIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA HEC-HMS NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO MEARIM-MA**

Palhoça

2020

LARISSA DRESSLER PEREIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA HEC-HMS NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO MEARIM-MA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Gabriel Oscar Cremona Parma, Dr.

Palhoça

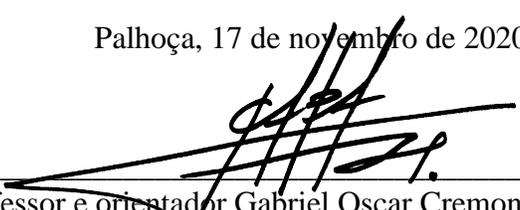
2020

LARISSA DRESSLER PEREIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA HEC-HMS NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO MEARIM-MA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 17 de novembro de 2020.


Professor e orientador Gabriel Oscar Cremona Parma, Dr.
Universidade do Sul de Santa Catarina

PEDRO GUILHERME DE
LARA:05147932950

Assinado de forma digital por PEDRO GUILHERME DE
LARA:05147932950
Dados: 2020.12.01 14:19:45 -03'00'

Eng. Sanitarista e Ambiental Pedro Sydorak De Lara
Universidade Federal de Santa Catarina

Assinado de forma digital por JOSE
GABRIEL DA SILVA:82440808920
'Dados: 2020.11.27 11:58:24 -03'00'


Criado por: AC VALID RFB v5 - e-CPF
Secretaria da Receita Federal do Brasil - RFB

Eng. Agrônomo José Gabriel da Silva, Dr.
Universidade do Sul de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha mãe, Nilce, minha maior inspiração, pelo apoio incondicional todos esses anos. Sou muito grata pelo incentivo, carinho e compreensão em todos os momentos, fazendo com que minha trajetória até aqui se tornasse possível.

Agradeço ao meu professor e orientador Gabriel Cremona, exemplo de profissionalismo e dedicação, pela atenção e disponibilidade, pela paciência e pelos ensinamentos passados durante esse processo.

Meus sinceros agradecimentos ao Pedro Sydorak, pela oportunidade de estágio que me permitiu conhecer melhor a área da hidrologia. Sou grata por acreditar em mim para realizar esse trabalho e por todo o suporte durante o processo de execução.

Gostaria de agradecer, também, às minhas amigas de profunda admiração Hellen, Jéssica e Rhamany, pessoas muito importantes na graduação e na minha vida. Sou grata pelo companheirismo e por se fazerem sempre presentes, oferecendo palavras de incentivo e motivação durante todos esses anos.

Por fim, de modo geral, agradeço a todos os professores, colegas e outros profissionais que de alguma forma participaram da minha graduação. Cada um influenciou positivamente na minha vida e foi fundamental para formar quem eu sou hoje como pessoa e como profissional.

RESUMO

A simulação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas consiste em uma das principais ferramentas na gestão dos recursos hídricos e a calibração eficiente dos parâmetros um dos obstáculos mais evidentes. O objetivo deste estudo foi simular hidrogramas sintéticos utilizando o método de Clark no *software* HEC-HMS. A bacia hidrográfica em estudo está localizada na região do Rio Mearim, no estado do Maranhão, com área de drenagem de 99000 km², constituindo uma das bacias fundamentais de drenagem para o estado. Neste contexto se objetivou compreender o comportamento hidrológico da bacia do Rio Mearim, com auxílio dos SIGs e sensoriamento remoto, disponibilizando uma ferramenta útil para o gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos na região. Foram inseridos dados de entrada de vazão e precipitação e selecionadas as precipitações máximas anuais para os anos 2009, 2010 e 2011. Neste contexto, a região de estudo registrou eventos extremos que causaram desastres por inundações e, para tanto, o objetivo foi calibrar e testar o HEC-HMS, avaliando seus resultados e estimativas. Os resultados encontrados proporcionaram valores de volume de escoamento superficial e de vazão de pico associados aos eventos, além de produzir hidrogramas sintéticos para a bacia hidrográfica do rio Mearim, que puderam ser comparados com os hidrogramas reais observados. Por fim, o estudo permitiu dar suporte para o conhecimento dos processos hidrológicos dentro do estado do Maranhão e entender como funciona a dinâmica hidrológica da bacia.

Palavras-chave: Simulação Hidrológica. Hidrograma unitário de Clark. HEC-HMS. Gestão de Recursos Hídricos.

ABSTRACT

The simulation of the hydrological behavior of hydrographic basins is one of the main tools in the management of water resources and the efficient calibration of parameters is one of the most evident obstacles. The aim of this study was to simulate synthetic hydrographs using the Clark method in the HEC-HMS software. The hydrographic basin under study is in the region of Rio Mearim, in the state of Maranhão, with a drainage area of 99000 km², constituting one of the fundamental drainage basins for the state. In this context, the objective was to understand the hydrological behavior of the Rio Mearim basin, with the help of GIS and remote sensing, providing a useful tool for the management and planning of water resources in the region. Flow and precipitation input data were entered and maximum annual rainfall for the years 2009, 2010 and 2011 was selected. In this context, the region of study recorded extreme events that caused flooding disasters and, therefore, the objective was to calibrate and test the HEC -HMS, evaluating its results and estimates. The results found provided values of volume's runoff and peak flow associated with the events, in addition to producing synthetic hydrographs for the hydrographic basin of the Mearim River, which could be compared with actual observed hydrographs. Finally, the study allowed to support the knowledge of the hydrological processes within the state of Maranhão and to understand how the hydrological dynamics of the basin works.

Keywords: Hydrological Simulation. Clark's unit hydrograph. HEC-HMS. Management of Water Resources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processos envolvidos no ciclo hidrológico.....	12
Figura 2 - Elementos da bacia hidrográfica.....	14
Figura 3 - Hidrograma típico no exutório de uma bacia hidrográfica.....	17
Figura 4 - Processo de calibração HEC-HMS.....	23
Figura 5 - Fases da modelagem do HEC-HMS.....	24
Figura 6 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do Mearim e identificação dos biomas.....	25
Figura 7 - Linhas de drenagem da bacia hidrográfica do Mearim-MA.....	26
Figura 8 - Mapa de precipitação pluviométrica anual do Rio Mearim.....	27
Figura 9 - Uso e Cobertura do solo da Bacia do Mearim.....	30
Figura 10 - Localização da área de estudo, bacia hidrográfica do Mearim e identificação das estações fluviométricas.....	32
Figura 11 - Modelos disponíveis no HEC-HMS.....	37
Figura 12 - Diagrama hierárquico de processos e cálculos utilizados na simulação hidrológica HEC-HMS.....	43
Figura 13 - Modelo da bacia hidrográfica exportado para o HEC-HMS.....	44
Figura 14 - Hidrograma da cheia de 2009 - período de 01/01/2009 a 31/10/2009.....	46
Figura 15 - Hidrograma da cheia de 2010 - período de 01/01/2010 a 30/09/2010.....	47
Figura 16 - Hidrograma da cheia de 2011 - período de 01/01/2011 a 30/09/2011.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estações de monitoramento utilizadas.	32
Tabela 2 - Coeficientes de eficiência Nash-Sutcliffe	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1 CICLO HIDROLÓGICO	12
3.2 BACIA HIDROGRÁFICA	13
3.3 MANEJO DE BACIA HIDROGRÁFICA	15
3.4 SÉRIES HISTÓRICAS E VAZÃO.....	16
3.5 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG).....	18
3.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA	18
3.7 HEC-HMS	21
3.7.1 Aplicação.....	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 ÁREA DE ESTUDO	25
4.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG).....	30
4.3 BASE DE DADOS	31
4.4 BALANÇO HÍDRICO	32
4.5 O MODELO HEC-HMS	35
4.5.1 Simulação Hidrológica	36
4.5.1.1 Modelo de Perdas	37
4.5.1.2 Modelo de Transformação.....	38
4.5.1.3 Modelo de Recessão	41
4.5.2 Procedimento.....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	49
6. CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

O estudo da hidrologia pode ser entendido como uma forma de conhecer os processos naturais e suas relações com o meio. Seus resultados auxiliam no entendimento do comportamento de bacias hidrográficas e, quando aliados a outras ferramentas, tal como a modelagem, podem ser utilizados para o gerenciamento de bacias hidrográficas e na previsão de eventos hidrológicos críticos.

Segundo Tucci (1998), modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Nesse contexto, a modelagem pode ser aplicada para diferentes propósitos, como a previsão de eventos naturais extremos, a previsão segura de dados que não estão disponíveis e de auxílio para o ajuste de parâmetros de dados obtidos já modelados. A modelagem, também, é passível de ser aplicada em diversas condições ambientais, podendo modelar e avaliar diferentes climas e variações de uso do solo.

A escolha da bacia hidrográfica do Mearim como área de aplicação deste estudo está relacionada a disponibilidade de dados de monitoramento, sendo possível obter dados informativos de nível e de vazão no site da ANA, que dispõe de dados de longos períodos. Além dos dados monitorados, a escolha leva em consideração a importância da bacia hidrográfica para os 83 municípios (IBGE, 2000) que o manancial abastece com água potável, sendo os maiores favorecidos as cidades ribeirinhas e as indústrias agropecuárias da região.

O estudo da área da bacia hidrográfica do Mearim também é de extrema relevância pelo potencial aproveitamento de seus resultados no gerenciamento e manejo dos recursos hídricos na região, que sofre com enchentes há várias décadas. Os municípios de Pedreiras e Barra do Corda são os mais afetados quando se trata de inundações, sendo as mais marcantes, com maior prejuízo para essas localidades, nos anos de 1974, 1985 e 2009.

Para que seja possível observar as transformações chuva-vazão, o modelo matemático HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*, dos Estados Unidos) é uma importante ferramenta que vem sendo amplamente utilizada no cenário da hidrologia. Dessa maneira, a aplicação desse modelo em simulações hidrológicas é significativa no sentido de elaborar hidrogramas que representem a relação chuva-vazão para a bacia do Mearim e fornecer informações válidas no que diz respeito ao volume de cheia esperado e ao pico de vazão em função da chuva.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar modelagem hidrológica utilizando o software HEC-HMS, na bacia hidrográfica do Mearim, localizada no estado do Maranhão.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Simular hidrogramas sintéticos do modelo chuva-vazão com base na série histórica de vazões da bacia hidrográfica do Mearim.
- b) Comparar a dinâmica hidrológica do comportamento real da bacia hidrográfica com os hidrogramas sintéticos em diferentes períodos de tempo.
- c) Ajustar os parâmetros utilizados de acordo com o desempenho do modelo na simulação.

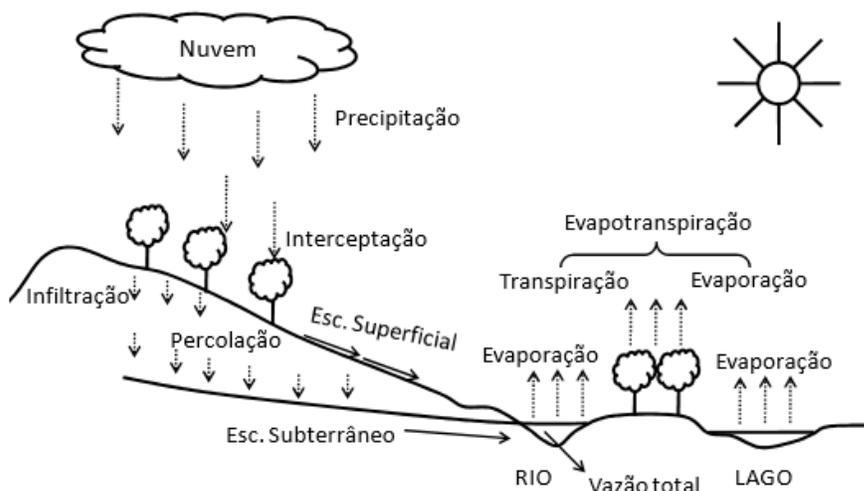
3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico, ou ciclo da água, é o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera (MMA, 2020). Seguindo essa mesma linha de pensamento, Silveira et al. (2007) descrevem o ciclo hidrológico como o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado principalmente pela energia solar, associada à gravidade e à rotação terrestre. O sistema completo é composto pelas três fases da água, e vários processos, dentre eles: precipitação, evaporação, interceptação, transpiração e infiltração.

Para a elaboração de estudos sobre o ciclo hidrológico, os fenômenos predominantemente abordados são os que ocorrem na superfície, na qual o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica. Na Figura 1 é representado, de forma simplificada, o ciclo hidrológico e seus elementos.

Figura 1 - Processos envolvidos no ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado de KOBAYAMA et al. (2011).

Segundo Von Sperling (2005), os seguintes mecanismos de transferência de água podem ser destacados:

- a) Precipitação: compreende toda a água que cai da atmosfera na superfície da Terra. As principais formas são a chuva, a neve, o granizo e o orvalho.
- b) Escoamento superficial: é o responsável pelo deslocamento da água sobre o solo, formando córregos, lagos e rios.
- c) Infiltração: a totalidade de água que penetra no solo com o potencial de formar lençóis subterrâneos de água, ou simplesmente ficando retida nos meios porosos por adesão e tensão superficial.
- d) Evapotranspiração: transferência de água para o meio atmosférico através da evaporação, que depende da temperatura e da umidade do ar; e transpiração através das folhas.

A precipitação pode ser entendida como a principal entrada de água no sistema de uma bacia hidrográfica, sendo que, a partir dela, resultam os demais processos hidrológicos (BERTONI & TUCCI, 2001). O sistema cíclico hidrológico é o elemento fundamental da hidrologia, representando a água em todas as suas fases independentes, desde a ocorrência das precipitações até seu retorno à atmosfera sob a forma de vapor. É possível destacar, ainda, o fato de o ciclo hidrológico só ser fechado em nível global, pois o volume evaporado em um ponto do globo terrestre pode vir a precipitar em um local distinto de sua origem, um fenômeno que é gerado pelas dinâmicas atmosféricas (PINTO; HOLTZ & MARTINS, 2003).

3.2 BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação da chuva que converge os escoamentos para um único ponto de saída, denominado exutório (Finkler, 2004). Para Rocha (2002), a bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema *input-output*, onde as entradas (*inputs*) são os volumes de água precipitados e as saídas (*outputs*) caracterizadas pela água escoada no exutório (superficial e subsuperficial), somada às perdas por evapotranspiração e percolação.

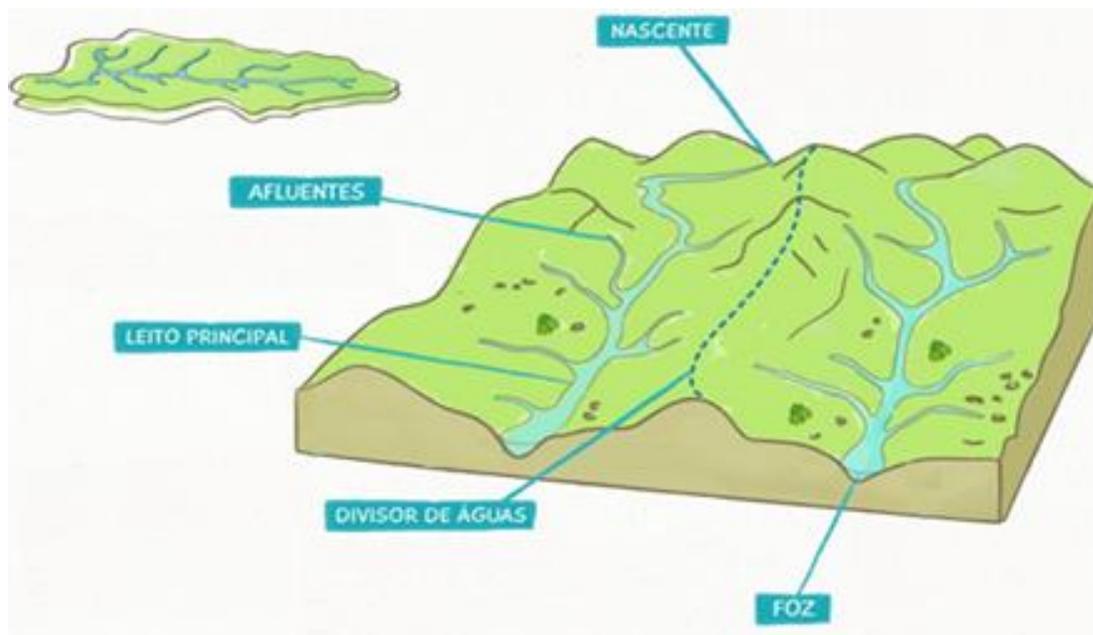
Outro passo a ser realizado em estudos hidrológicos é a separação dos escoamentos (Arnold et al., 1995). O escoamento total pode ser dividido em três diferentes tipos: escoamento superficial, subsuperficial e de base. Pelo fato da separação entre os escoamentos superficial e subsuperficial

ser de difícil observação, quando são ausentes medições específicas realizadas em campo, é comum que métodos desconsiderem essa separação (Nathan e McMahon, 1990) e, para este estudo, essa divisão também foi desconsiderada.

De acordo com Christofolletti (1976), a bacia hidrográfica tem sido há tempos utilizada como uma unidade geomorfológica de extrema importância para o entendimento dos sistemas hídricos, porque suas características governam, no seu interior, todo o fluxo superficial da água. Sendo assim, as bacias podem ser consideradas como unidades territoriais ideais para o planejamento integrado do manejo dos recursos naturais.

Para compreender melhor a formatação de uma bacia é necessária a observação dos diferentes fatores que se relacionam em um sistema ambiental, sejam eles ligados à aspectos de solo, vegetação, geologia e relevo, bem como climáticos e hidrológicos. A bacia pode apresentar também diferentes tamanhos, algumas apresentando milhões de quilômetros como a grande bacia do Amazonas, e outras de tamanhos bem menos representativos (SILVA; SCHULZ; CAMARGO, 2004). Alguns dos aspectos de uma bacia hidrográficas podem ser analisados na Figura 2, apresentada a seguir.

Figura 2 - Elementos da bacia hidrográfica



Fonte: Adaptado de Fernanda Bornancin Santos (2009).

Com base na observação do esquema, são notórios alguns elementos que compõe o sistema de uma bacia hidrográfica, sendo eles:

- a) Nascente: são as fontes de água, superficiais ou subterrâneas, responsáveis pela formação de um curso d'água.
- b) Afluentes: são os rios e cursos de água menores, também chamados de córregos, que deságuam em rios principais. Um afluente não flui diretamente para um oceano, mar ou lago.
- c) Leito principal ou rio principal: é o curso d'água que recebe água dos rios afluentes de uma determinada região. Concentra-se nas regiões mais baixas ao longo de uma bacia e, é ele que flui para os oceanos e lagos.
- d) Divisor de água: são as partes mais elevadas do relevo que compõe a bacia hidrográfica, como planaltos e montanhas, que separam os rios da rede hidrográfica pela direção dos fluxos de água delimitando as áreas da bacia.
- e) Foz: local onde desemboca o rio principal; aonde o rio vai de encontro ao corpo d'água de outro rio, oceano ou lago.

3.3 MANEJO DE BACIA HIDROGRÁFICA

Diante de inúmeras transformações diárias que acontecem no cenário atual paisagístico por conta da urbanização, o conceito de bacia hidrográfica também tem sido cada vez mais ampliado e suas características sendo vistas como unidade de gestão de paisagem no âmbito de planejamento ambiental. A influência antrópica sobre as bacias também é reconhecida, de modo a identificar potenciais efeitos negativos decorrentes das distintas formas de uso e ocupação realizados.

Segundo a Lei 9.433/1997, também conhecida como Lei das Águas, bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, conforme estabelecido que além de direcionar a gestão da água, influencia também na gestão urbana e regional, já que as bacias contêm os territórios municipais e regiões administrativas.

Problemas de âmbito ambiental, quando somados ao mau uso e ocupação do solo, principalmente quanto a sua impermeabilização, e associado a precariedade ou ausência de planejamento urbano acabam por ampliar a magnitude de seus danos, podendo-se transformar em

problemas socioambientais. Devido à vulnerabilidade exposta das regiões atingidas por esses processos, a probabilidade de uma determinada área se tornar área de risco é aumentada, ficando suscetível a processos naturais e/ou induzidos, tais como deslizamentos, inundações e enchentes.

3.4 SÉRIES HISTÓRICAS E VAZÃO

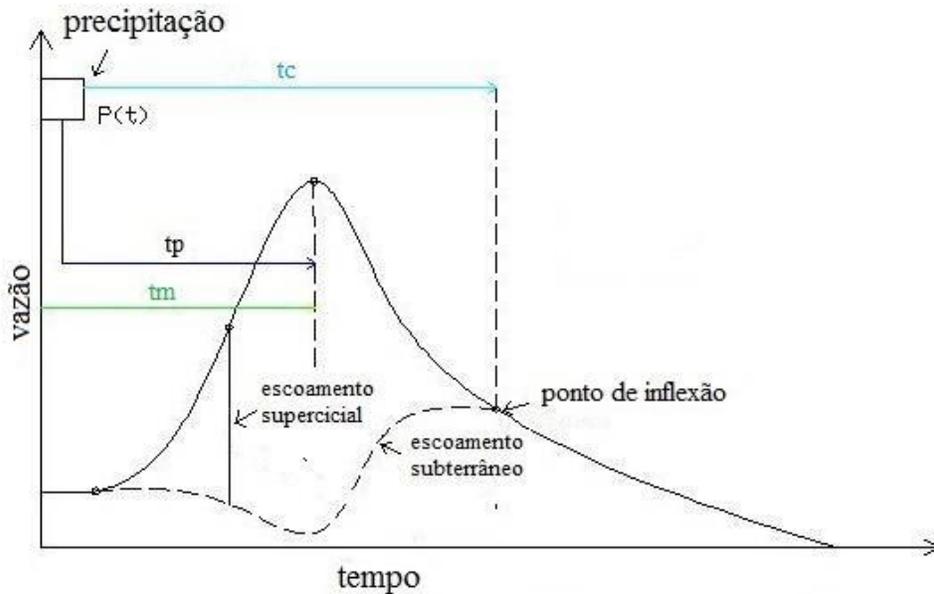
Os volumes de água no sistema e a velocidade com que circulam no solo no decorrer da bacia podem ser influenciados por diversos fatores, como a cobertura vegetal, o tipo de solo, a geologia e até a temperatura local. Esta junção de fatores, que atua conjuntamente no processo, caracteriza o fluxo hidrológico representado através do balanço de massas, sendo consideradas as entradas e as saídas de água do compartimento solo através do balanço hídrico.

Conforme Mendonça (2001), o planejamento de medidas de solução ou minimização de problemas relacionados aos recursos hídricos depende da avaliação da quantidade de água. Para que se execute a modelagem quantitativa da água, é necessária a representação precisa da distribuição das chuvas, como por exemplo os dados dos registros de estações pluviométricas de forma que, sem esses dados ou com a chuva não devidamente caracterizada, o modelo não será capaz de gerar previsões (Beven, 2001; Gálvan et al., 2014).

O abastecimento dos canais acontece a partir do escoamento superficial. Os volumes de água, quando compõem os canais, escoam até o exutório da bacia hidrográfica, por onde podem ser quantificados através de estações fluviométricas que servem para as mais variadas finalidades (SÁ, 2014). Além dos dados de chuva obtidos por medições pontuais nas estações pluviométricas, os mesmos podem ser obtidos via radares e satélites, sendo os dados de satélites geralmente recomendados quando não existe o monitoramento convencional ou auxiliando, por exemplo, no preenchimento de falhas na série histórica (Dile e Srinivasan, 2014).

A análise do escoamento superficial resulta na geração de hidrogramas, que são gráficos que sintetizam a vazão no tempo. De acordo com Tucci (2000), a vazão só começa a aumentar após algum tempo de início da chuva, fato que acontece devido as intercepções vegetais, das depressões no terreno e retardo de resposta da bacia. A curva do hidrograma sobe até atingir seu pico e depois desce (recessão) até chegar a um ponto de inflexão onde a contribuição do escoamento superficial termina. Um hidrograma típico no exutório de uma bacia após uma sequência de precipitações pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Hidrograma típico no exutório de uma bacia hidrográfica



Fonte: Pinheiro, 2014.

No hidrograma, o tempo de concentração (t_c) é tido como o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante na bacia se deslocar até a seção principal ou o tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma. O tempo de pico (t_p) é definido como o intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o tempo da vazão máxima. O tempo de ascensão (t_m) é o tempo entre o início da chuva e o pico do hidrograma. Já o tempo de base (t_b) é o tempo necessário para que o escoamento superficial termine.

O uso de tecnologias tem auxiliado na representação dos fenômenos em escala temporal e espacial e, para que o correto equacionamento dos processos hidrológicos seja executado, é de extrema importância que os dados de entrada que alimentarão as equações representativas sejam confiáveis. A disponibilidade de séries de dados hidrológicos confiáveis e válidos é fundamental para o desenvolvimento de modelagens hidráulicas. Registros longos de séries de vazões são de grande importância para a estimativa de períodos de retorno e para o planejamento de ações mitigadoras de efeitos de cheias e secas (MARCON, 2013).

3.5 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

A topografia aparece como fator importante no processo de transporte de materiais no solo. Como forma de auxiliar o mapeamento das características do de um determinado local de estudo, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) vêm sendo empregados de maneira a compor o conjunto de geoprocessamento.

Também conhecido como GIS, sigla que vem do inglês *Geographic Information System*, a ferramenta permite coletar, armazenar, recuperar, transformar e exibir informações espaciais do mundo real para diferentes finalidades (Burrough, 1998). A determinação do seu uso é feita com base em relações topográficas pré-existentes, sistemas de coordenadas que permitem definir as localizações exatas e atributos.

Dessa forma, um SIG pode ser aplicado em estudos de diversos campos, podendo ser relativos ao meio ambiente e aos recursos naturais, à estudos logísticos e a estudos comerciais, sendo na pesquisa da previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento, considerando a concepção de que os dados armazenados representam um modelo do mundo real, (Burrough, 1998).

Quando se trata de pesquisas voltadas aos recursos hídricos, as informações sobre localização geográfica e seu tratamento desde o princípio têm sido um impasse para os pesquisadores. Na maior parte das vezes é necessário encontrar a representação de superfícies terrestres, além de lidar com os fenômenos e variáveis que nelas ocorrem (MELO, 2010).

3.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA

De acordo com Christofolletti (1999), modelo é qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que possibilite prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução. Desta forma, o objetivo da modelagem é representar a realidade de forma sistemática para entendê-la e prevê-la, no entanto, a realidade é complexa e apenas parcialmente conhecida. Tal complexidade se deve à heterogeneidade da bacia em todos os seus aspectos, à natureza contínua e aleatória dos fenômenos hidrológicos cuja compreensão parcial é geralmente devida às limitações das técnicas de monitoramento no tempo e no espaço (GONTIJO, 2007).

Com a grande aplicabilidade que modelos hidrológicos tem tido na atualidade, gera-se a necessidade de métodos que possam identificar o quão bem representado o modelo está para a realidade desejada. A aplicabilidade de modelos hidrológicos será vantajosa somente se for possível prever com segurança dados que não estão disponíveis (Klemes, 1986; Xu, 1999) e, se aplicável, ao fazer a definição do modelo ideal ao estudo, é preciso ter a clareza dos dados que serão necessários para sua aplicação (entradas), bem como o objetivo e os resultados que se espera alcançar – as saídas (Merritt et al., 2003).

A modelagem hidrológica busca maneiras de melhorar o entendimento e a representação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, sendo que os modelos hidrológicos possuem grande potencial para caracterizar a disponibilidade hídrica em diversos fatores, como as condições de mudanças no clima ou no uso do solo. Segundo Oliveira (2003), a finalidade de um modelo hidrológico é determinar os componentes do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica e estimar o comportamento da água e a magnitude das variáveis envolvidas. Além disso, o uso de computadores nas simulações hidrológicas, permite uma economia significativa de custos e tempo de projeto (Moriasi et al., 2007). Os modelos hidrológicos podem, ainda, ser de diferentes tipos e desenvolvidos para diferentes propósitos, contudo, muitos modelos compartilham similaridades estruturais.

Modelos hidrológicos podem ser vistos, portanto, como um conjunto de equações físicas e matemáticas utilizadas para auxiliar o entendimento do comportamento da água dentro de uma bacia hidrográfica. A modelagem hidrológica, mais especificamente os modelos chuva-vazão, fornecem o hidrograma de resposta de uma bacia para um evento de precipitação, por exemplo. Os modelos podem ser classificados seguindo diferentes critérios (USACE-HEC, 2000; GONTIJO, 2007), tais como: a forma de representar os dados (discretos ou contínuos); tipos de variáveis utilizadas (estocástico ou determinístico); tipo de relação entre essas variáveis (empírico ou conceitual); e a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos). Tais definições podem ser observadas com maiores detalhes no Quadro 1 apresentado abaixo:

Quadro 1 - Classificação dos modelos matemáticos.

Categoria	Descrição
Discreto ou contínuo	Um modelo é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo, e discreto em caso contrário. A maioria dos sistemas hidrológicos é contínuo, porém são representados por modelos discretos. Esta distinção se aplica essencialmente nos processos de escoamento superficial da bacia. Um modelo discreto simula um único evento de chuva, cuja duração pode variar de algumas horas a alguns dias. Um modelo contínuo simula um período mais longo, prevendo o comportamento da bacia tanto durante a chuva como entre os eventos de precipitação.
Estocástico ou determinístico	Esta é uma das principais classificações dentro da simulação hidrológica. Se a chance de ocorrência das variáveis é levada em conta, e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos (variáveis aleatórias). De outro lado, se a probabilidade de ocorrência das variáveis envolvidas no processo é ignorada, o modelo e o processo são ditos determinísticos. Nos modelos determinísticos existe uma relação direta entre causa e efeito, ou seja, a entrada define a saída do sistema.
Empírico ou conceitual	Modelo conceitual é aquele cujas funções utilizadas na sua elaboração consideram formulações físicas parametrizáveis e/ou empíricas e, portanto, pelo menos um parâmetro exige calibração. Os modelos empíricos são aqueles que ajustam os valores calculados aos dados observados através de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos. São úteis e simples, porém pouco robustos, pois são específicos para situação em que foram aferidos.
Concentrados ou distribuídos	Um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial (esta é representada por um único valor médio) e utiliza somente o tempo como variável independente. É aplicado em bacias pequenas, onde a distribuição espacial das variáveis não compromete os resultados do estudo. Um modelo é dito distribuído quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo. Somente o modelo distribuído permite estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema.

Fonte: USACE-HEC, 2000.

As dificuldades encontradas na modelagem ambiental estão associadas à própria complexidade sistêmica da natureza. Sistemas naturais, em escala de bacias, tendem a mostrar grande variação e, muitos dos modelos hidrológicos, por exemplo, sintetizam características topográficas, apresentam variabilidade dos sedimentos e possíveis fontes de interferência, o que pode acarretar previsões não representativas destes sistemas. Dessa forma, cada vez mais,

diferentes categorias de modelos são encontradas, em que seus mecanismos se diferenciam no nível de detalhamento dos processos e características envolvidas que podem dificultar, em alguns momentos, na escolha do modelo mais adequado para a modelagem específica que se deseja.

3.7 HEC-HMS

O modelo hidrológico HEC-HMS – *Hydrologic Modeling System*, desenvolvido pelo *United States Army Corps of Engineers* (USACE), foi projetado para simular o escoamento superficial em bacias hidrográficas. O *software*, que é disponibilizado gratuitamente (USACE-HEC, 2008a), pode ser caracterizado como um modelo matemático determinístico, discreto, concentrado e empírico.

Segundo Tavares & Castro (2005), a funcionalidade do modelo hidrológico no HEC-HMS requer inicialmente a entrada de dados da bacia hidrográfica e dados meteorológicos. De forma geral, o modelo HEC-HMS é constituído por três componentes: o modelo de bacia, o modelo meteorológico, e as especificações de controle (USACE-HEC, 2008a), operando com as configurações que podem ser descritas como:

(a) Modelo de Bacia: categoria em que são inseridos e manipulados os dados referentes à geometria da bacia hidrográfica, sendo representado o esquema hidrológico da área, com as sub-bacias, os trechos de rios, possíveis reservatórios, junções e divisões dos canais. Inclui, neste componente, a definição dos métodos e respectivos parâmetros referentes à perda por infiltração, evaporação, interceptação, os métodos de transformação chuva-vazão, de cálculo do escoamento de base e propagação em rios.

(b) Modelo Meteorológico: etapa em que é feita a entrada dos dados de precipitação e evapotranspiração, sendo selecionado o método de distribuição temporal destes.

(c) Especificações de Controle: refere-se aos períodos de tempo para os quais serão realizados os cálculos, incluindo data e horário de início e fim do determinado período, bem como o intervalo ou “passo” de computação dos dados.

Os hidrogramas produzidos pelo programa podem ser usados diretamente ou aliado a outros *softwares* para diversas funções, como estudos de disponibilidade de água, previsão de fluxo, impactos urbanos futuros, drenagem urbana, projeto do vertedouro do reservatório, redução de danos causados por eventos hidrológicos, regulação de várzea e operação de sistemas.

3.7.1 Aplicação

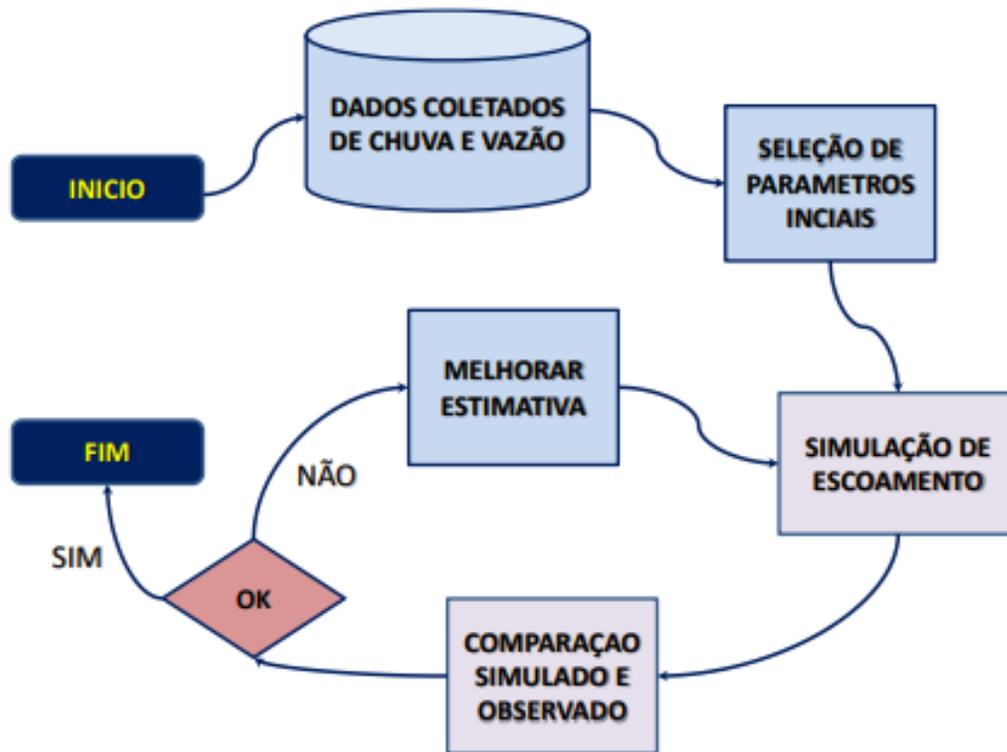
Os hidrogramas de saída das simulações do HEC-HMS podem ser facilmente utilizados para estudos de disponibilidade hídrica e no planejamento de ocupação urbana futura, impactos sobre a drenagem, influência da construção de reservatórios nos padrões de escoamento, além de alterações nos parâmetros de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica.

Como qualquer outro modelo hidrológico, o HEC-HMS necessita de entradas, como as precipitações e as vazões observadas. Esses dados de entrada podem ser inseridos no modelo por meio do próprio usuário, como também por meio um arquivo eletrônico, o que é possível com o auxílio de outro software de geoprocessamento.

Outros dados de entrada referem-se aos métodos de funcionamento do programa, ou seja, métodos para o cálculo da perda de precipitação, transformação da precipitação em vazão, cálculo do fluxo de base e método de propagação da onda de cheia.

Na modelagem hidrológica, a execução da calibração é feita de maneira iterativa para ajustar os valores dos parâmetros do modelo até que os resultados calculados coincidam aos dados observados e sejam obtidos valores aceitáveis. (COLLISCHONN; TUCCI, 2003). O entendimento dos processos de calibração do HEC-HMS pode ser compreendido na Figura 4 a seguir.

Figura 4 - Processo de calibração HEC-HMS

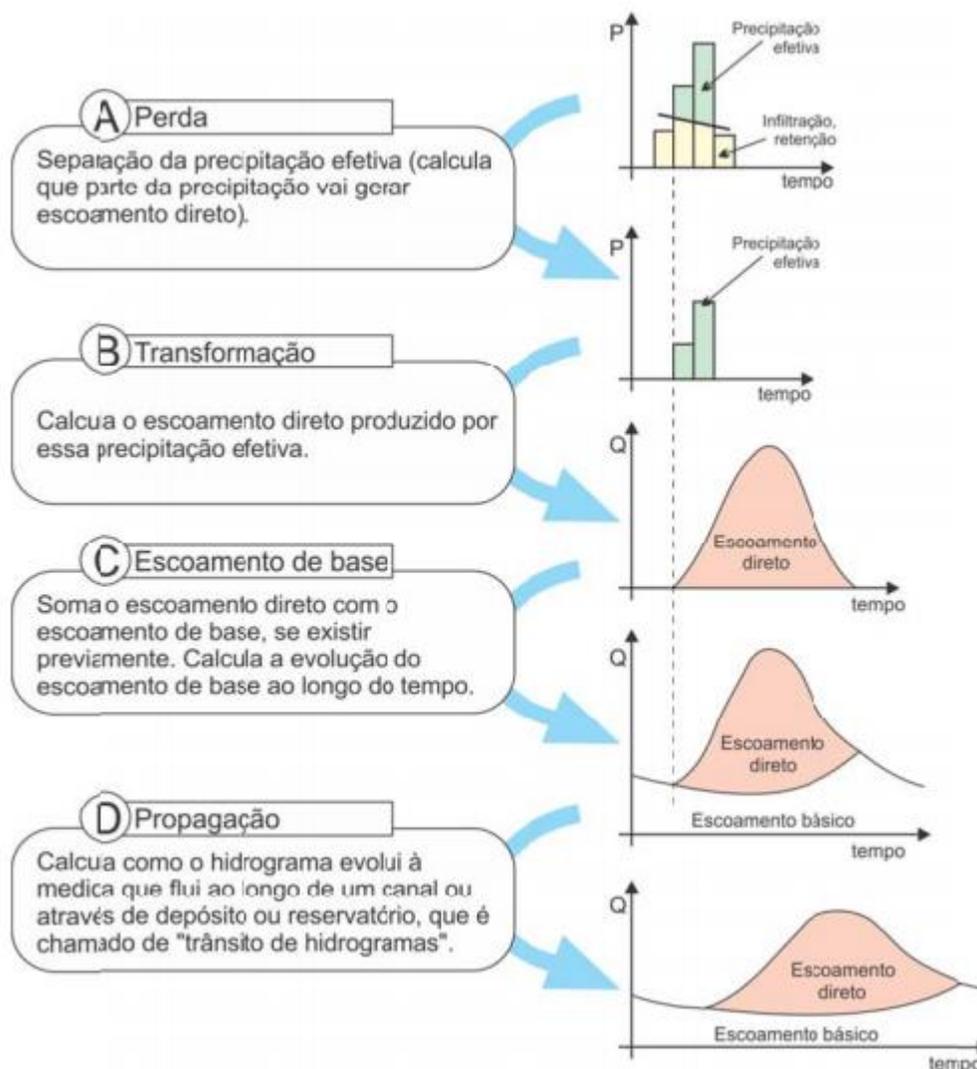


Fonte: Adaptado de USACE, 2000.

A modelagem no HEC-HMS é executada de maneira modular, em que conjuntos de dados podem ser manipulados de forma independente, mas que respeitam uma sequência de acionamento para a realização de simulações. Dessa maneira, as informações computadas são associadas às especificações de controle (MACEDO, 2010) a fim de que se realize a modelagem.

O modo de execução do HEC-HMS e suas etapas de escolha do modelo podem ser observados na Figura 5, a seguir, e são determinados de acordo com as especificações necessárias para cada tipo de resultado esperado. As fases do modelo HEC-HMS são divididas em perda, transformação, escoamento de base e propagação, sendo essas as etapas que resultam na formação do hidrograma final. O cálculo de cada uma das etapas é feito pelo próprio modelo de acordo com as especificações definidas e as necessidades de observação.

Figura 5 - Fases da modelagem do HEC-HMS



Fonte: Santos, Cirilo e Ribeiro Neto, 2012.

Segundo Milde et al. (2002), o modelo HEC-HMS possui limitações, como: as simulações devem ser de preferência para eventos de chuvas individuais, devido ao fato de que não é feita nenhuma previsão de recuperação da umidade do solo durante períodos sem precipitação. Sendo assim, os resultados do modelo são em termos de descarga e o direcionamento da onda de cheia é calculado por métodos de direcionamento hidrológico.

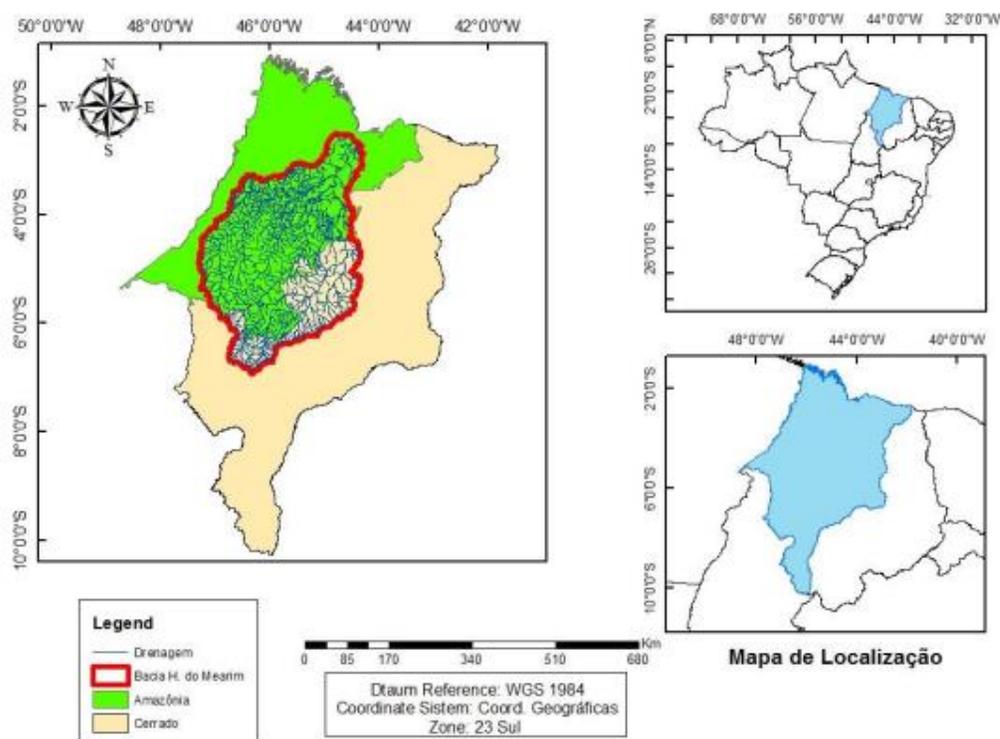
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio Mearim (BHRM) está localizada no estado do Maranhão, na região nordeste do Brasil. Segundo o Plano Nacional de Recursos Hídricos – Caderno da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental, a bacia hidrográfica do Mearim apresenta área de aproximadamente 99 mil km², ocupando 30% da área do estado do Maranhão e englobando 83 municípios. A bacia conta com três rios principais, Grajaú, Pindaré e o próprio Mearim.

Na Figura 6, é possível observar os limites da bacia hidrográfica, os biomas nela inseridos, bem como o sistema de drenagem da bacia, que corre no sentido sul-norte (MARANHÃO, 2014; Sematur, 1991). A nascente do bacia encontra-se na Serra Menina, compreendida entre os municípios de Formosa da Serra Negra, Fortaleza dos Nogueiras e São Pedro dos Crentes, seguindo para o norte, onde deságua na baía de São Marcos (BRASIL. Ministério dos Transportes, 2003), entre a capital São Luiz e o município de Alcântara (UEMA/NUGEO, 2009).

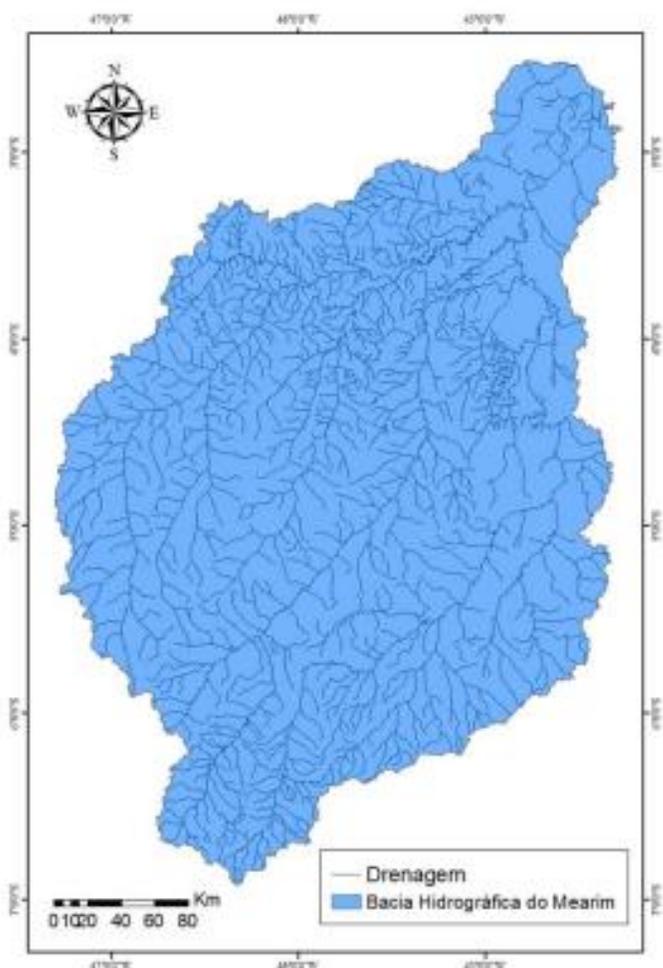
Figura 6 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do Mearim e identificação dos biomas



Fonte: Silva (2017).

Como representado na Figura 6, dois biomas compõem a bacia do Mearim e são responsáveis pela ampla diversidade de espécies e composição de fitofisionomias, sendo eles o Cerrado e o bioma Amazônia. Segundo a classificação da vegetação brasileira (IBGE, 2012), na bacia hidrográfica do Mearim são encontradas as fitofisionomias e ambientes definidos como floresta ombrófila densa, floresta ombrófila aberta, floresta estacional decidual, floresta estacional semidecidual e mangue. Na foz do Mearim, também, é possível encontrar a maior área contínua de mangues do país, um local de aproximadamente 30 mil hectares, conhecido como Ilha dos Caranguejos. Na Figura 7 estão destacadas as linhas de drenagem da bacia, que englobam os três principais rios que a compõe, sendo eles Grajaú, Pindaré e Mearim.

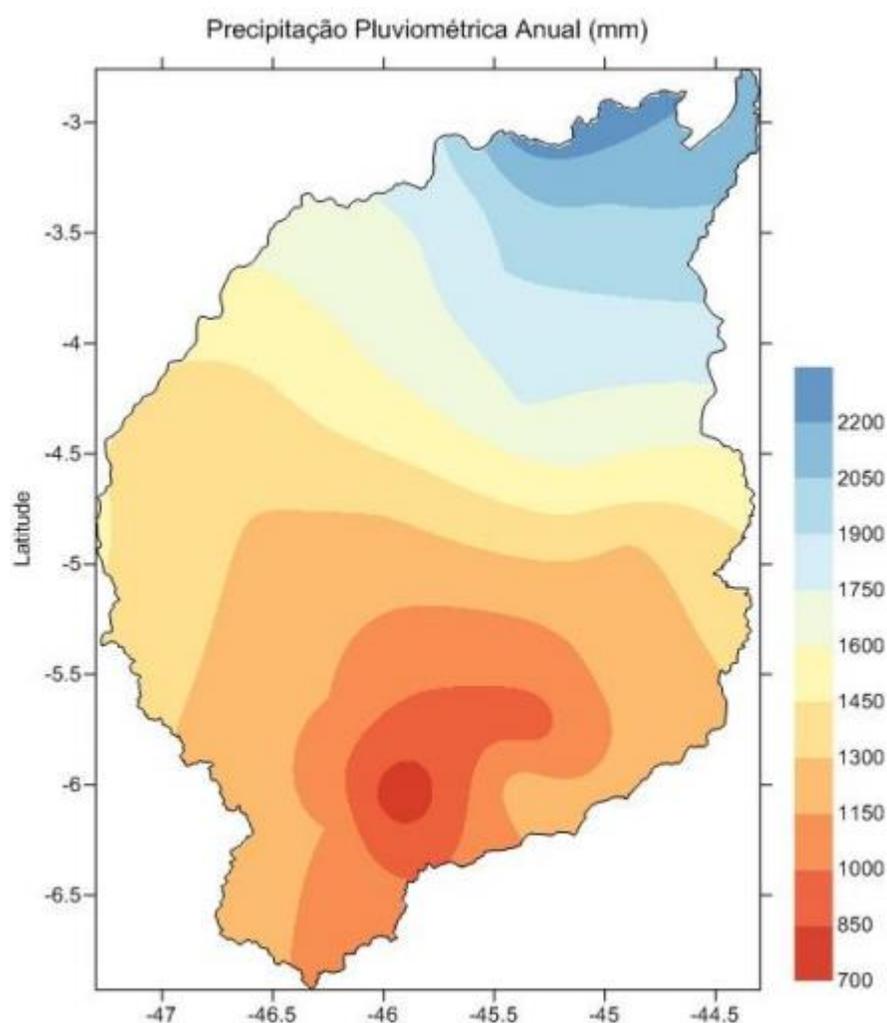
Figura 7 - Linhas de drenagem da bacia hidrográfica do Mearim-MA



Fonte: Adaptado de Silva, 2017

Com extensão de 900 km, o a bacia do Mearim possui altimetria que varia de -34,00 [m] a 668,00 [m] entre a nascente e a foz, apresentando declividade de 0,752 [m/km]. Com vazão média total de 557 m³/s em sua foz (MARANHÃO, 2014) e precipitados anuais que variam de 700 a 2200 mm em algumas regiões, a região apresenta período chuvoso de janeiro a maio, quando ocorrem as inundações. Na Figura 8 está representada a distribuição dos precipitados de acordo com a localização da bacia.

Figura 8 - Mapa de precipitação pluviométrica anual do Rio Mearim.



Fonte: Núcleo Geoambiental (UEMA/NUGEO, 2013)

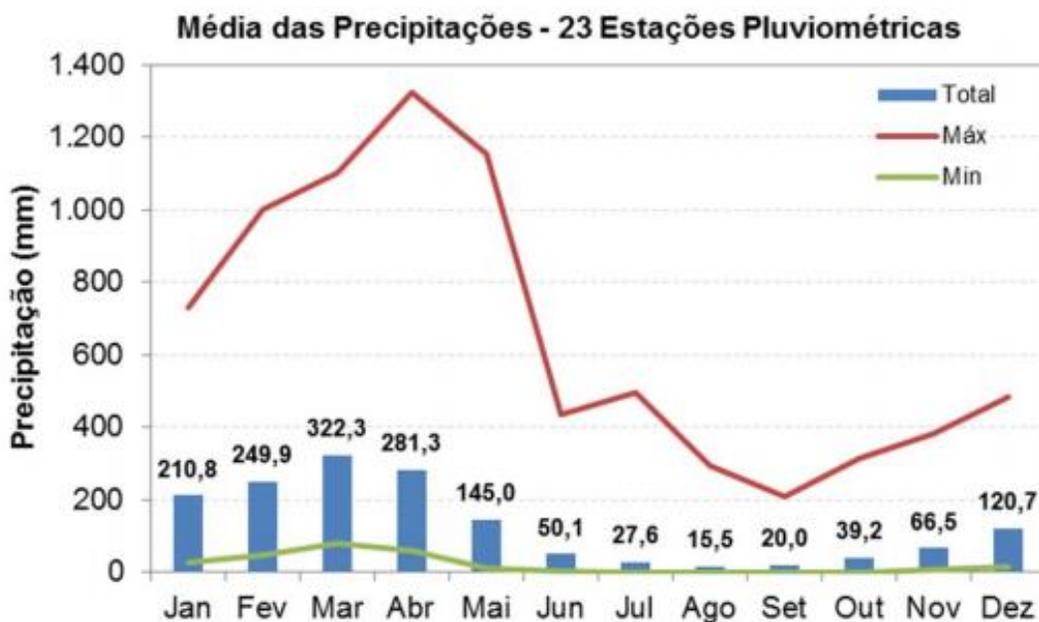
Em nível de bacia hidrográfica, a ocorrência de impactos e desastres está associada a fatores físicos e naturais, sendo que a contribuição do homem se torna agravante dos eventos e processos

naturais. Configurada como área de risco por seus médios e baixos leitos dos rios, aliado às cheias periódicas e a falta de estrutura populacional, a BHRM possui fatores que causam grande recorrência desses fenômenos ou processos naturais que trazem efeitos adversos sobre a integridade física do ambiente, do material e das pessoas.

Dados obtidos no Plano Diretor da BHRM (MARANHÃO, 2014) mostram que entre os anos de 1981 e 2014 foram registrados 132 desastres naturais provocados por seca e/ou estiagem nos municípios da bacia do rio Mearim. Segundo CEPED (2013), o município de Pedreiras foi um dos mais atingidos por inundações, apresentando cinco ocorrências de inundação e três ocorrências classificadas como enxurradas. Ainda, segundo CEPED (2013), o município de Barra do Corda sofreu com inundações apenas no ano de 2009, sendo um município que sofre, também, com episódios de seca e estiagem.

No Gráfico 1 estão representadas as médias de precipitação mensais com base em 23 estações pluviométricas dispostas ao longo da bacia do Mearim. O gráfico apresenta ainda as precipitações médias máxima e mínima para cada mês.

Gráfico 1 - Média das precipitações mensais de 23 estações pluviométricas da Bacia do Mearim



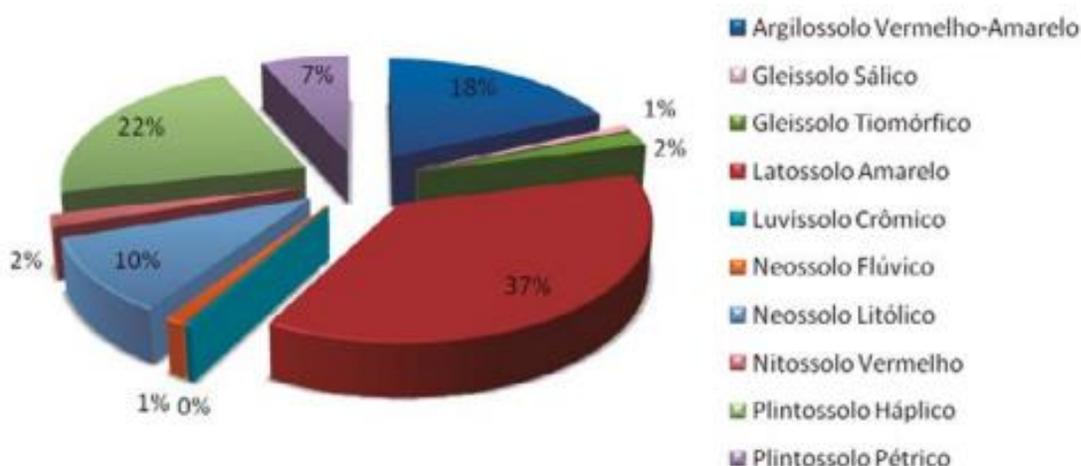
Fonte: MARANHÃO, 2014

O Gráfico 1 permite, ainda, observar a variação dos volumes de precipitação anuais, consequência de estações do ano bem definidas, sendo uma bem seca e outra chuvosa. O clima do

estado do Maranhão é caracterizado como quente, sendo composto pelo ar superúmido proveniente da Amazônia e o Semiárido do Nordeste. A temperatura média anual é 25,5°C (UEMA, 2016), com mínima de 25,8°C e máxima de 27,4°C, variando pouco ao longo do ano.

Quanto aos tipos de solo, a pedologia da bacia do Rio Mearim apresenta dez tipologias distintas, entre as quais destacam-se o Latossolo, ocupando uma grande extensão da área de estudo, como também o Plintossolo e o Argilossolo (MARANHÃO, 2014). Na Gráfico 2 é possível observar a representação de abrangência dos tipos de solo para a bacia do Mearim.

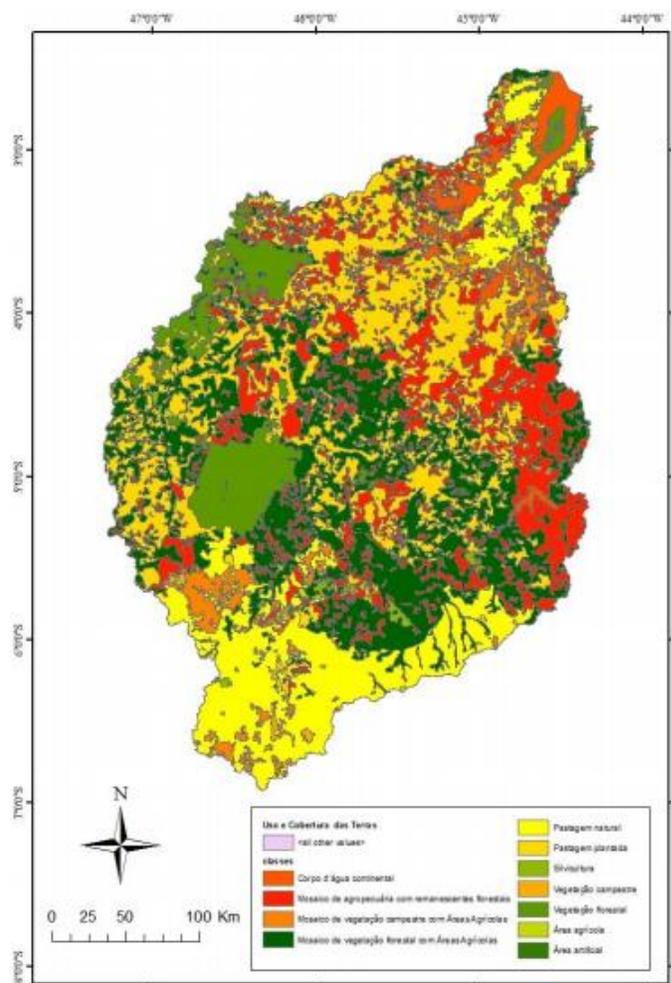
Gráfico 2 - Classes de solo da Bacia do Mearim



Fonte: MARANHÃO, 2014.

A vegetação e cobertura do solo possuem como principais funções a proteção do solo contra os impactos das chuvas a fim de que se atenuem o escoamento superficial. Para a bacia do Mearim, as fontes predominantes de uso do solo da bacia são para estabelecimentos agrícolas e sistemas agroflorestais e, sendo assim, há abundância de vegetação rasteira e pastagem, dos tipos natural e plantada. A área de abrangência da bacia do Mearim também concentra boa parte do setor industrial do estado do Maranhão, compreendendo aproximadamente 20% das indústrias cadastradas no estado. Na Figura 9 estão representadas as áreas de uso e cobertura do solo para a área da bacia do Mearim, retratando em mosaicos os principais componentes observados.

Figura 9 - Uso e Cobertura do solo da Bacia do Mearim



Fonte: Silva, 2017.

4.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

O Sistema de Informações Geográficas foi utilizado no processo de forma a realizar o georreferenciamento do local de estudo. Para tal, o auxílio do software de geoprocessamento QGIS 3.10 foi essencial no tratamento e processamento dos dados geográficos.

Para que a bacia hidrográfica pudesse ser delimitada, foram obtidas as cartas topográficas em MDE (Modelo Digital de Elevação) com escala 1:250.000, no *site* da EMBRAPA, que abrangessem toda a área da bacia e, posteriormente, foram inseridas no software a fim de que se obtivesse o mosaico da região. Após esse processo inicial, houve a necessidade de projetar o MDE

que inicialmente estava em coordenadas geográficas, datum WGS84, para coordenadas planas UTM (Universal Transversa de Mercator).

A partir de então, com o auxílio da extensão GRASS, ferramentas de hidrologia puderam ser utilizadas para que se corrigissem falhas no mosaico e realizar a delimitação da bacia, dividindo a mesma em sub-bacias. O mapa digitalizado foi executado com base em cálculos de direção de escoamento, acúmulo de vazão e da rede de drenagem e segmentação, sendo esses passos determinados por funções do próprio software.

4.3 BASE DE DADOS

Na bacia do rio Mearim foram identificados diversos postos de monitoramento para a caracterização do regime fluvial. Os dados diários de vazão utilizados no estudo foram coletados da estação fluviométrica Bacabal (código 33290000) e puderam ser obtidos no *site* da Agência Nacional de Águas – ANA, na plataforma *Hidroweb*. Essa estação foi definida como sendo a mais adequada para a utilização no presente estudo pela abrangência da área de drenagem, sendo totalizado 25000km², por se encontrar em operação e por possuir dados diários atualizados e disponíveis.

Quase as mesmas justificativas apresentadas anteriormente podem ser fundamentadas para a escolha da estação de coleta de dados de precipitação. Por estar localizada no rio Mearim e abranger grande área da bacia, foi feita a escolha pela estação pluviométrica Santa Vitória (444008). Os dados diários de chuva foram coletados, também, na plataforma *Hidroweb* e são disponibilizadas séries históricas desde 1976.

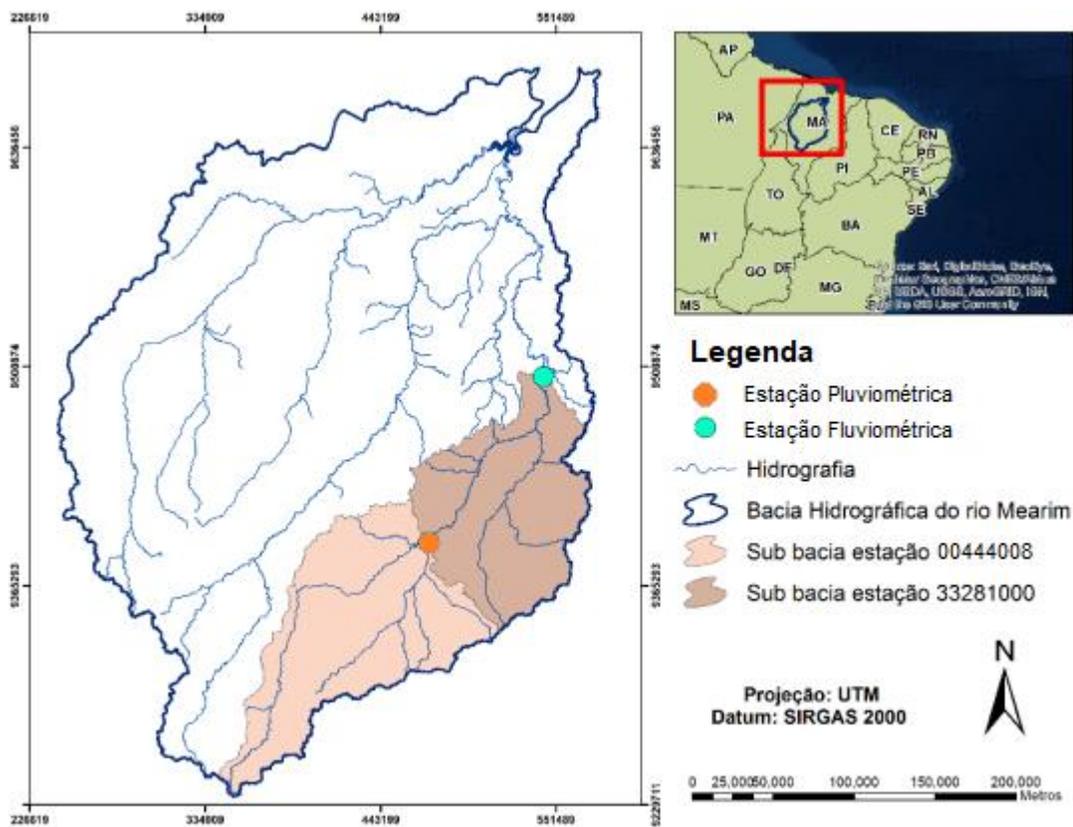
Na *Tabela 1* estão apresentadas as coordenadas das estações, o período de dados disponibilizados, a altitude e a área de drenagem dos postos e na Figura 10 está representada a localização das estações de monitoramento na bacia do Mearim.

Tabela 1 - Estações de monitoramento utilizadas.

Tipo	Código da estação	Posto	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km ²)
Fluviométrica	33281000	Bacabal	-4.2194	-44.7653	25500
Pluviométrica	00444008	Santa Vitória	-5.1018	-44.9616	15400

Fonte: ANA- Portal HidroWeb/Séries Históricas, 2020.

Figura 10 - Localização da área de estudo, bacia hidrográfica do Mearim e identificação das estações fluviométricas



Fonte: Adaptado de Franciele Zanandrea, 2017

4.4 BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico é compreendido como o resultado da quantidade de água que entra e sai de um sistema em um determinado intervalo de tempo. Esse recurso também pode ser entendido

como o princípio de conservação de massa em um determinado volume de controle, podendo ser uma bacia hidrográfica, um reservatório ou outro sistema delimitado artificialmente. Em escala global, a ideia de balanço hídrico pode ser definida como o próprio ciclo hidrológico, cujo resultado nos mostra a quantidade de água disponível no sistema, ou seja, na biosfera. Em um estudo hidrológico diversas escalas espaciais podem ser analisadas para se contabilizar o balanço hídrico.

Dentre as diversas variáveis do balanço hídrico, a precipitação e a vazão são as mais frequentemente medidas, com medições relativamente fáceis. Em contrapartida, a evapotranspiração é mais onerosa e difícil medição (TUCCI, 1997; BRUTSAERT, 1982; PEREIRA, 2012). Segundo TUCCI (1993), a bacia hidrográfica é o melhor espaço de avaliação do comportamento hídrico, pois tem definido o espaço de entrada, a bacia, o local de saída e a seção de rio que define a bacia hidrográfica e suas limitações.

Brutsaert (2005) sugere a equação diferencial (1) para o balanço hídrico sobre uma superfície terrestre de área como:

$$\frac{dS}{dt} = P + [(Q_{ri} + Q_{gi}) - (Q_{ro} + Q_{go})] - E_a \quad (1)$$

Onde:

P é a precipitação média no intervalo de tempo considerado;

Q_{ri} e Q_{ro} representam as taxas totais de entrada e saída de escoamento superficial;

Q_{gi} e Q_{go} representam as taxas totais de entrada e saída de escoamento subterrâneo;

E_a é a taxa de evaporação, todos por unidade de área;

S é o volume de água reservado por unidade de área, de modo que $\frac{dS}{dt}$ é a variação no armazenamento de água por unidade de tempo.

O autor apresenta simplificações para o cálculo do balanço hídrico, considerando sua aplicação em grandes bacias, de modo que o fluxo de entrada e saída de água subterrânea (Q_{gi} e Q_{go}) se tornam desprezíveis, e a equação (1) pode ser simplificada, passando a ser representada pela equação (2):

$$\frac{dS}{dt} = P - Q - Ea \quad (2)$$

Onde,

$$Q = Q_{ro} - Q_{ri} \quad (3)$$

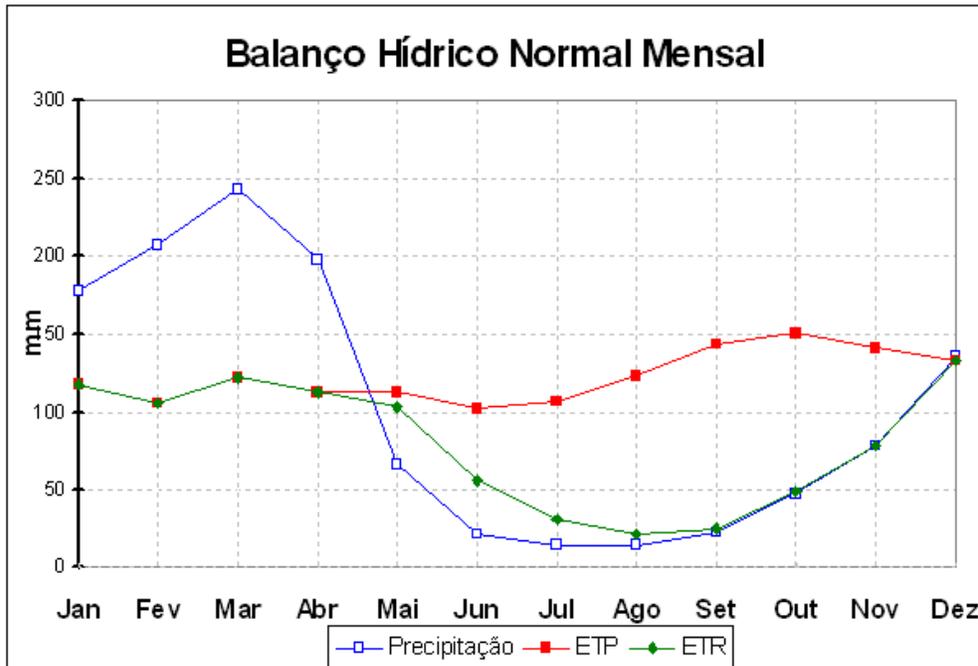
Sendo Q a taxa média de escoamento superficial por unidade de área.

Quando a equação (3) é aplicada em bacias hidrográficas, o valor correspondente à Q_{ri} , é nulo ou, em casos de entrada de água artificial, conhecido em valores exatos. A equação (2) ainda possui dois termos usualmente desconhecidos, o armazenamento e a evapotranspiração. Para resolver a equação, torna-se necessário aplicá-la a períodos longos (sazonal ou anual), onde a variação do armazenamento seja desprezível ou aplicar equações adequadas para a determinação de S (BRUTSAERT, 2005). Deste modo, na aplicação para um longo intervalo de tempo (sazonal ou anual) a equação (2) resume-se a:

$$P = Q + Ea \quad (4)$$

Informações a respeito da evapotranspiração foram obtidas através do Banco de Dados Climáticos do Brasil, plataforma de EMBRAPA que permite selecionar a região que mais se enquadra na localização desejada e computa as médias de evapotranspiração para cada mês a partir de informações do INMET. Para este trabalho, foram utilizados os dados de evapotranspiração real (ETR) obtidos do município de Barra do Corda. Conforme o Gráfico 3 é possível observar os índices obtidos no balanço hídrico e a evapotranspiração real para os 12 meses do ano.

Gráfico 3 - Balanço hídrico mensal no município de Barra do Corda



Fonte: EMBRAPA, 2020

4.5 O MODELO HEC-HMS

Estudos que envolvem o emprego HEC-HMS descrevem a utilização de MDE (Modelo Digital de Elevação) aliado ao software (Moore et al., 1991) para fins de melhor desempenho, bem como o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como procedimentos de manipulação de dados anteriores ao mesmo. Esse fato acontece pois o HEC-HMS requer a entrada de determinados parâmetros para sua execução, sendo que estes que podem ser obtidos por meio de programas de geoprocessamento. A determinação dos parâmetros necessários é identificada de acordo com a escolha dos métodos de cálculo que estão disponíveis no HEC-HMS, podendo variar entre métodos de perdas, transformação, fluxo base, propagação e armazenamento.

Uma das vantagens da utilização dos programas de SIG é a possibilidade de determinar com maior facilidade e precisão informações geográficas distribuídas quanto à caracterização geológica e quanto ao tipo de uso e ocupação do solo – dados importantes na determinação das perdas por infiltração. Segundo Tavares e Castro (2005), os bancos de informações gerados no SIG tornam automáticas tarefas exaustivas de entrada de dados em programas computacionais de estudos hidrológicos e, por isso, são altamente recomendados.

4.5.1 Simulação Hidrológica

O método a ser empregado no trabalho para determinar a relação chuva-vazão seguirá três etapas: simular hidrogramas sintéticos, compará-los com os respectivos hidrogramas observados e ajustar os parâmetros de simulação.

Para que se faça a escolha do modelo de cálculo e dos diferentes processos dependerá dos objetivos do estudo e dos dados que o usuário tiver disponíveis. A escolha será baseada também no tipo de simulação a ser feita, sendo as escolhas diferentes quando a modelagem representa um evento pontual ou um processo contínuo. Quatro são os métodos a serem definidos, sendo eles o volume de escoamento (perdas), o escoamento direto (transformação), o escoamento de base e o modelo de escoamento em canais (propagação). Com o objetivo de organizar os dados da melhor forma possível para inseri-los no modelo, é nessa fase que se faz necessário o conhecimento do usuário sobre hidrologia, a fim de que sejam escolhidas as melhores opções para a determinada bacia hidrográfica.

De forma a otimizar a utilização dos modelos, alguns parâmetros são requeridos no HEC-HMS, dentre eles pode-se citar: tempo de concentração (t_c); coeficiente de armazenamento; percentual impermeável da bacia; condutividade hidráulica; e tempo de escoamento de base. Na Figura 11 são apresentados os modelos disponíveis para a escolha no modelo HEC-HMS.

No presente trabalho o modelo chuva-vazão HEC-HMS foi configurado utilizando-se os métodos:

- i) Déficit e Constante: para o balanço hídrico na bacia.
- ii) Hidrograma Unitário de Clark: para a propagação na superfície da bacia;
- iii) Recessão: para a propagação da água subterrânea; e
- iv) Lag (tempo de retardamento): para a propagação nos rios.

Figura 11 - Modelos disponíveis no HEC-HMS

Modelos que calculam o volume de escoamento	
1	Taxa Constante de Perdas
2	Curva Número (CN) do SCS
3	Green e Ampt
4	Taxa de Deficit Constante
5	Modelo SMA (Soil Mixture Accounting)
Modelos de Escoamento Direto	
1	Hidrograma Unitário (do Usuario)
2	Hidrograma Unitário de Clark
3	Hidrograma Unitário de Snyder
4	Hidrograma Unitário SCS
5	Modelo de Clark Modificado (ModClark)
6	Modelo da Onda Cinemática
Modelos de Escoamento de Base	
1	Modelo Mensal
2	Modelo de Recessão Exponencial
3	Modelo do Reservatório Linear
Modelos de Escoamento em Canais	
1	Modelo da onda cinemática
2	Lag (modelo de retardamento)
3	Modelo de Pulz
4	Modelo de Muskingum
5	Modelo Muskingum Cunge
6	Modelo de Confluência
7	Modelo de Bifurcação

Fonte: Andrade, 2014

4.5.1.1 Modelo de Perdas

Para o método de perdas foi utilizado o Déficit e Constante. Esse modelo é diferente do modelo de infiltração Inicial e Constante porque as perdas iniciais podem ser consideradas novamente depois de longos períodos. Neste caso, o modelo funciona como se o solo se recuperasse da saturação.

O conceito básico do método para a infiltração é que a máxima taxa potencial de infiltração é constante durante o evento. Dessa forma, a expressão para o cálculo do escoamento superficial para o método Déficit e Constante pode ser escrita de acordo com a equação (5):

$$p_{ei} = \begin{cases} p_t - f_c & \text{se } p_t > f_c \\ 0 & \text{se } p_t \leq f_c \end{cases} \quad (5)$$

Sendo:

p_t : precipitação média ocorrida numa dada área considerada durante um período $t + \Delta t$ (mm);

p_{ei} : altura de escoamento superficial num intervalo i que considera um período $t + \Delta t$ (mm);

f_c : infiltração constante durante um incremento de tempo $t + \Delta t$ (mm).

FELDMAN (2000) salienta que um montante de chuva deve ser considerado pelo modelo para representar a interceptação, consequência do absorvimento pela cobertura superficial, evapotranspiração e outras possíveis irregularidades do terreno. Vale dizer que esses processos ocorrem antes de se iniciar a formação do escoamento superficial e são chamados de perdas iniciais.

Para usar esse modelo, as perdas iniciais e a taxa constante de infiltração devem ser especificadas. O déficit é calculado continuamente, computado como os volumes de perdas iniciais menos os volumes de precipitação somados aos volumes de recuperação durante períodos sem ocorrência de precipitação. A taxa de recuperação pode ser estimada como a soma da taxa de evapotranspiração e da taxa de infiltração, ou como alguma fração dela (FELDMAN, 2000).

4.5.1.2 Modelo de Transformação

Também conhecidos como modelos de chuva-vazão, o modelo de transformação é responsável pela tentativa de prever a relação entre as precipitações e a vazão de uma bacia hidrográfica. O modelo escolhido foi o Hidrograma Unitário de Clark.

O modelo de Clark representa dois processos críticos de transformação do excesso de precipitação em escoamento, que podem ser descritos como a vazão, em todos os seus contribuintes no processo de drenagem, desde sua origem até o exutório da bacia, bem como, a diminuição das lâminas d'água observadas no sistema causadas pelo escoamento superficial, infiltração e perdas por evapotranspiração simulados em um reservatório linear como representação de toda a extensão da bacia (USACE, 2000).

Segundo FELDMAN (2000), o curto período de armazenamento da água na bacia hidrográfica tem um papel importante na transformação do excesso de chuva em escoamento

superficial. O modelo de reservatório linear é uma representação comum dos efeitos desse armazenamento. Para o entendimento dessa modelagem, o conceito preliminar é visto como o descrito na equação (4), já descrita neste trabalho, e nesta seção a mesma pode ser compreendida como a equação (6), diferindo somente na consideração das entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) no armazenamento do sistema em determinado período de tempo, porém ambas as equações com a mesma finalidade.

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (6)$$

Sendo:

$\frac{dS}{dt}$: taxa de transferência de água do armazenamento no tempo;

I_t : *input*, é o escoamento médio que entra no armazenamento em determinado tempo;

O_t : *output*, é o escoamento médio das saídas do armazenamento em determinado tempo.

Como o armazenamento é linear, o armazenamento no tempo t pode ser estimado pela equação (7):

$$S_t = RO_t \quad (7)$$

Na expressão anterior, R representa a constante linear do armazenamento. Combinando as equações (6) e (7) e resolvendo-as utilizando as aproximações das diferenças finitas, obtêm-se a equação (8):

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad (8)$$

Na equação (8), C_A e C_B são coeficientes de direcionamento, sendo calculados por meio das equações (9) e (10):

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0,5\Delta t} \quad (9)$$

$$C_B = 1 - C_A \quad (10)$$

O valor médio da vazão de saída durante o período t é dado pela equação (11):

$$\overline{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad (11)$$

Com o modelo de Clark, o armazenamento linear representa o somatório dos efeitos de todo armazenamento da bacia sobre o escoamento superficial. Dessa maneira, de forma conceitual, o armazenamento passa a ser considerado como se estivesse no exutório da bacia (FELDMAN, 2000).

No modelo de Clark é admitido, também, o tempo necessário para que o excesso de chuva se desloque para o exutório da bacia, considerando um modelo de canal linear de escoamento (Dooge, 1959), onde o escoamento é guiado de pontos remotos para os reservatórios lineares localizados no exutório da bacia, sendo considerados os atrasos, mas sem atenuações pelo ambiente. Esse atraso é representado de maneira implícita com o histograma de tempo-área, que especifica que a área da bacia contribui para a vazão no exutório em função do tempo. Se a área for multiplicada pela altura unitária e dividida pelo intervalo Δt , o resultado é o afluente do reservatório linear localizado no exutório (I_t) (FELDMAN, 2000).

Resolvendo-se as equações (8) e (11) recursivamente, com o afluente já calculado, obtém-se o resultado de \overline{O}_t . Porém, se a ordenada afluente na equação (8) é o escoamento superficial gerado pela altura unitária de excesso, o efluente desse reservatório é, na verdade, U_t , o hidrograma unitário (FELDMAN, 2000).

As aplicações envolvendo o modelo unitário de Clark requerem: (i) propriedades do histograma área-tempo e (ii) o coeficiente de armazenamento, R . O coeficiente de armazenamento da bacia (R) é dado em função do armazenamento temporário do excesso de precipitação na bacia hidrográfica que vai para o exutório. Este também pode ser estimado por meio de calibração se dados de chuva e vazão estiverem disponíveis. Como R possui unidades de tempo, existe apenas um significado qualitativo para isso no sentido físico e Clark (1945) indicou que R pode ser calculado como a vazão no ponto de inflexão da hidrografia dividido pela derivada temporal do fluxo.

4.5.1.3 Modelo de Recessão

O método de recessão foi projetado para aproximar comportamentos típicos observados em bacias quando o canal de fluxo recua exponencialmente depois do evento chuvoso. Ele foi planejado, principalmente, para simulações eventuais. Porém, por possuir a habilidade de se restabelecer automaticamente depois de cada evento chuvoso, pode ser usado para simulações contínuas.

O modelo simula o comportamento da bacia quando a vazão diminui e calcula a vazão inicial através de descarga por área. A constante de recessão (k), parâmetro deste método, depende das características da bacia devido à capacidade de infiltração da mesma e descreve a razão na qual o fluxo de base diminui entre as chuvas. Para as simulações será adotado um valor de k , que será escolhido de acordo com as características que mais se encaixarem à bacia hidrográfica, e a equação (12) pode ser usada para melhor compreensão do descrito:

$$Q_t = Q_0 k^t \quad (12)$$

Sendo,

Q_t : o escoamento de base em um tempo t ;

Q_0 : o escoamento de base inicial;

k : constante de escoamento de base

A compilação dos resultados gerados formará um hidrograma unitário, onde será possível observar a curva de vazão conforme os dados forem computados, sendo o Q_0 a condição inicial de vazão do modelo implementada na unidade de m^3/s ou, ainda, podendo ser escrita na forma $m^3/s/km^2$, considerando a vazão por área da bacia hidrográfica.

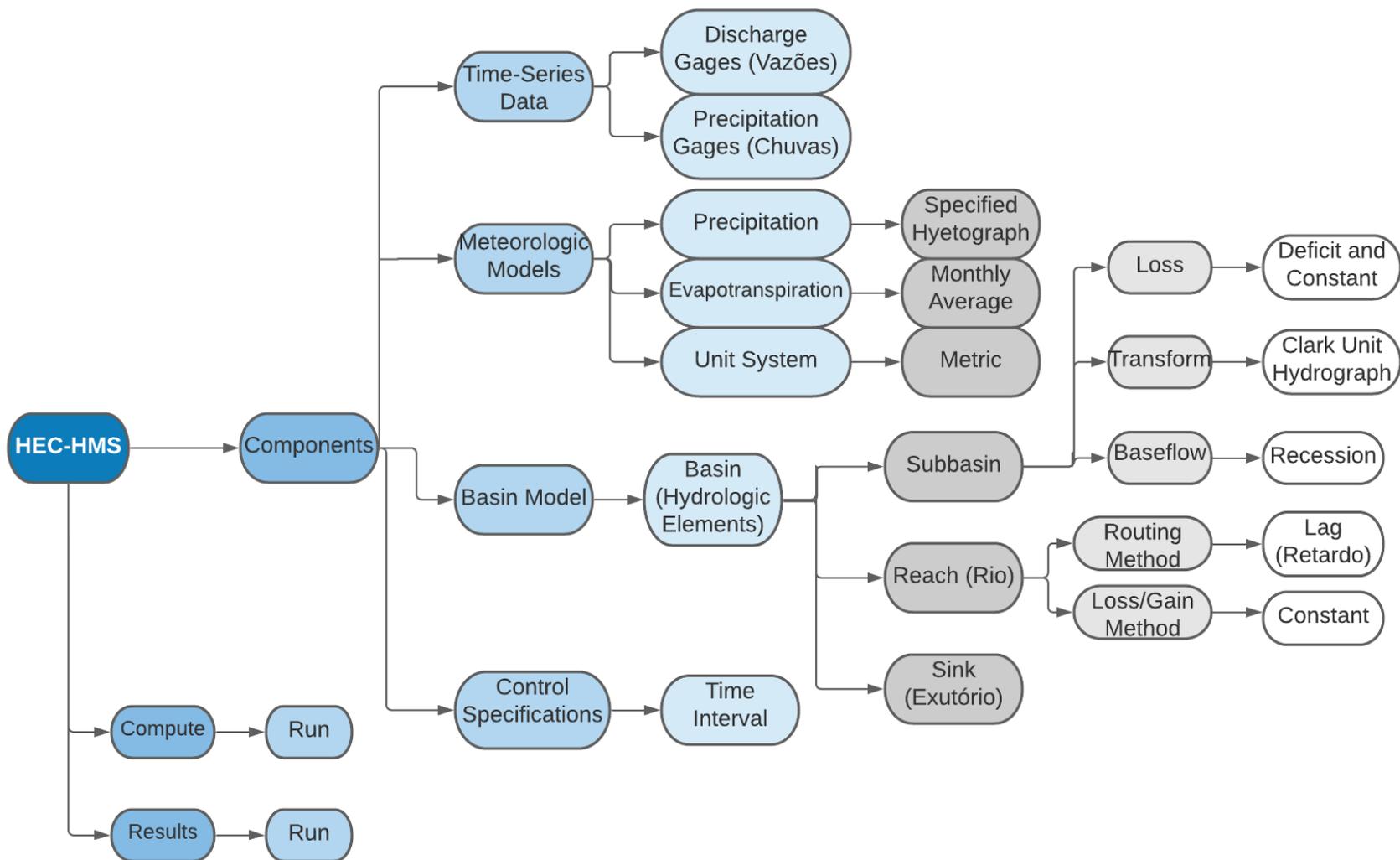
4.5.2 Procedimento

Após o processo de delimitação da bacia hidrográfica no software QGIS, e terminada a etapa de pré-processamento, o projeto pôde ser inserido no programa HEC-HMS para iniciar o processo de modelagem hidrológica.

Para uma melhor compreensão do funcionamento do HEC-HMS a Figura 12 apresenta um diagrama hierárquico com toda a estrutura e as opções de cálculo utilizadas no programa para este projeto. Como é possível observar, a etapa *Components* apresenta 4 seções, cujas partes precisam

ser desenvolvidas com embasamento hidrológico para a elaboração do modelo. As outras duas etapas possuem a função de iniciar a simulação (*Compute*) e apresentar os resultados da mesma (*Results*).

Figura 12 - Diagrama hierárquico de processos e cálculos utilizados na simulação hidrológica HEC-HMS



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Procurando determinar a relação chuva-vazão, a metodologia aplicada nessa simulação hidrológica buscou construir hidrogramas sintéticos a fim de compará-los com hidrogramas reais observados e calibrar os parâmetros posteriormente.

Para tal, o primeiro - e mais importante - passo foi inserir a delimitação da bacia hidrográfica e seus elementos hidrológicos. Para que a bacia fosse fisicamente bem representada, foram inseridos os elementos *subbasin* (sub-bacia), *reach* (canais) e *sink* (exutório). Por não haver disponibilidade de dados que abranjam toda a área da bacia, foi forçada a seleção de uma área de sub-bacia do rio Mearim para análise. Na Figura 13 está representada a delimitação da bacia e da sub-bacia do Mearim inserida no modelo HEC-HMS, juntamente com suas linhas de drenagem e os elementos hidrológicos do programa, que sempre seguem a direção montante-jusante.

Figura 13 - Modelo da bacia hidrográfica exportado para o HEC-HMS



Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Nas configurações do elemento *subbasin* se fez necessário definir 3 modelos diferentes (perdas, transformação e fluxo base), cada um contendo diversos métodos de cálculo. As opções escolhidas para cada um foi respectivamente: Déficit e Constante, Hidrograma Unitário de Clark e, método da Recessão. A escolha dos métodos foi motivada pelo fato dos mesmos não serem

inteiramente sintéticos, visto que pelo menos uma observação de um hidrograma do escoamento superficial deve ser feita.

Na aba *Transform*, na qual o Hidrograma Unitário de Clark foi selecionado, o tempo de concentração (t_c) é um dos parâmetros requeridos. O valor estimado para o tempo de concentração no modelo teve como base o método de cálculo de Kirpich, descrito na Equação (13):

$$t_c = 57 \cdot L^{1,155} \cdot H^{-0,385} \quad (13)$$

Em que t_c é o tempo de concentração, em minutos; L é o comprimento do talvegue principal, em km; H é o desnível entre a nascente do córrego e a seção de controle da bacia, em m.

O passo seguinte no modelo HEC-HMS foi adicionar as séries históricas de chuva e vazão. Os dados puderam ser obtidos no site da ANA através do código das estações pluviométricas e fluviométricas. Para a observação dos dados diários de vazão, a estação selecionada foi Bacabal e para os dados pluviométricos, a estação de análise foi Santa Vitória, e ambas se encontravam a montante da área da bacia hidrográfica, para que fosse possível interpretar a modelagem da melhor maneira. As séries de dados foram inseridas na seção *Time-Series Data*, sendo preenchidos os dados diários de chuva na aba *Precipitation Gages* e os de vazão na aba *Discharge Gages*, respectivamente.

Foram analisados 10 anos de dados (2009-2019) e selecionadas três precipitações máximas anuais (2009, 2010 e 2011) para que fossem simuladas. A escolha dos eventos se dá pelo fato de possuírem as bases de dados mais condizentes com a realidade, onde as curvas dos picos de vazão se encontram com os hietogramas observados. Também foi levado em conta o fato de 2009 ter sido um período de chuvas intensas para a região, tendo sido relatadas cheias e enchentes em diversos municípios. Dessa forma, o estudo pode observar as curvas de chuva-vazão do ano em si e dos anos posteriores, buscando entender melhor o comportamento da bacia hidrográfica.

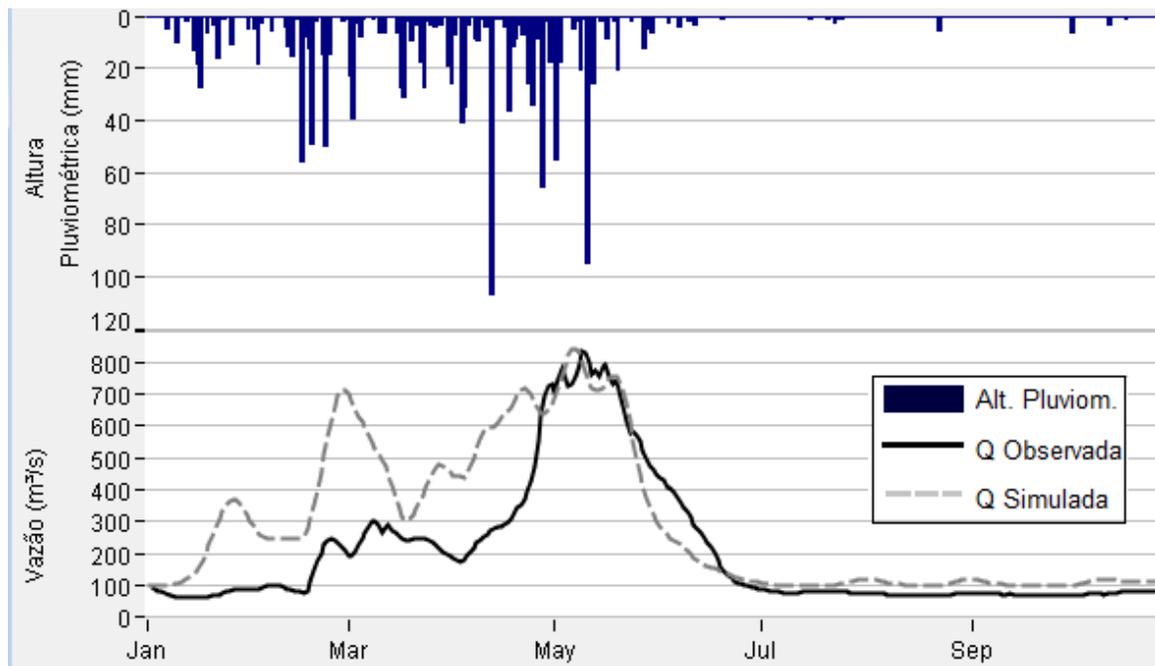
Na seção *Meteorologic Model* foram inseridas as preferências de observação de chuva - sendo selecionada a opção *Specified hyetograph* para que fosse gerado um hietograma - de evapotranspiração, sendo esta observada com base em dados mensais.

Para que fosse possível computar os resultados foi necessário especificar o intervalo de tempo dos eventos a serem observados. Essas informações foram inseridas na seção *Control Specifications*, tendo sido utilizado o intervalo de tempo de 1 dia.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo como tema a aplicação de modelagem hidrológica a uma bacia hidrográfica, o esperado deste trabalho era que se obtivessem hidrogramas chuva-vazão para diferentes períodos no mesmo local. Estes hidrogramas foram analisados a partir da comparação de dados reais de chuvas ocorridas na região da bacia hidrográfica do rio Mearim com modelos simulados que utilizaram parâmetros aplicáveis para a observação. Buscou-se identificar eventos chuvosos extremos que causaram aumento significativo da vazão no local de estudo. As Figura 14, Figura 15 e Figura 16 apresentam os hidrogramas resultantes dos eventos estudados.

Figura 14 - Hidrograma da cheia de 2009 - período de 01/01/2009 a 31/10/2009

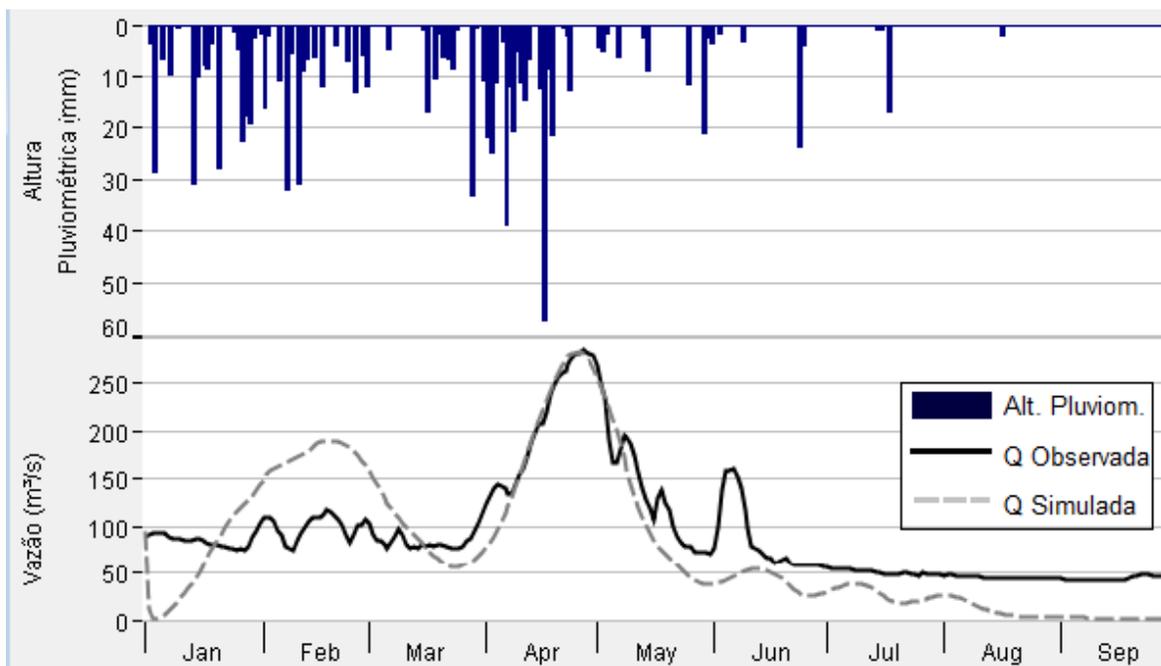


Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O hidrograma da Figura 14 é o resultado de sete meses de precipitação intensa de um total de 10 meses de observação, somando uma altura pluviométrica de 1477 mm. O pico do hidrograma ocorreu em função de seis dias consecutivos de chuvas intensas, somando 171,9 mm, cujos valores de vazão observada e simulada foram, respectivamente, 835,7 e 841,6 m³/s. É notório ressaltar que a motivação do estudo ser realizado a partir de 2009 aconteceu em decorrência de notificações de enchentes na região no referido período. A simulação apresentou um ajuste consideravelmente bom

no pico, no início da recessão e no fluxo de base final, sendo que os resultados de fluxo de base inicial e o final da recessão não foram bem representados.

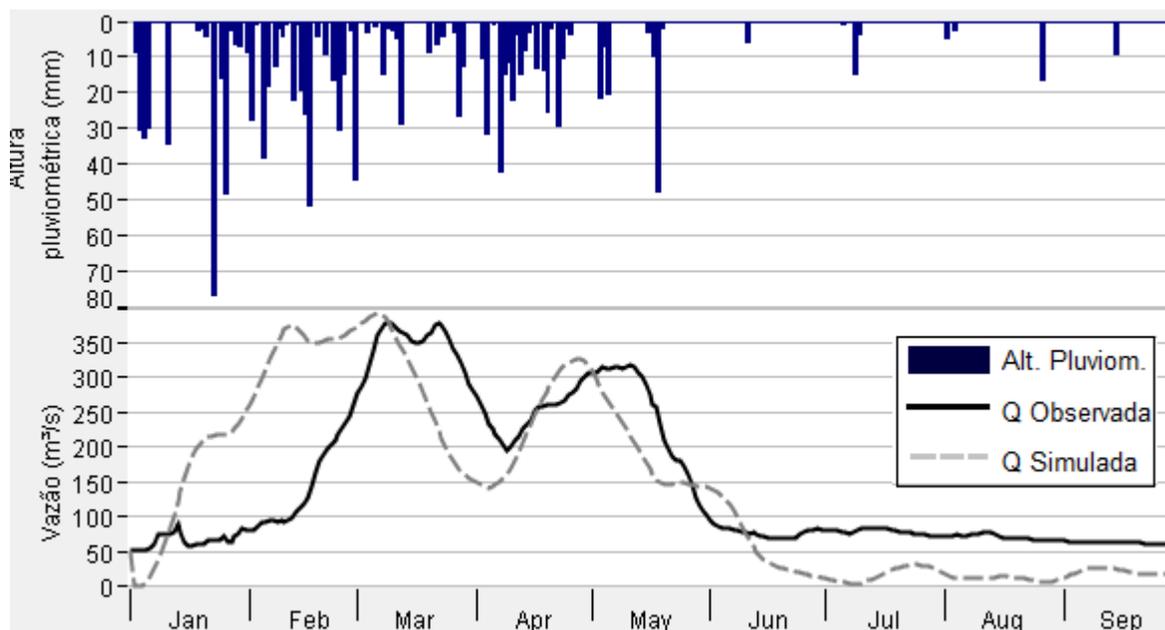
Figura 15 - Hidrograma da cheia de 2010 - período de 01/01/2010 a 30/09/2010



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O hidrograma da Figura 15, compreendido entre os meses de janeiro e setembro de 2010, é resultado um período chuvoso que somou 855,5 mm precipitados. O dia de maior valor de pico ocorreu em 26 de abril, sendo que o mesmo aconteceu em decorrência do acúmulo de precipitado um período de 20 dias. O valor da vazão máxima atingiu 284 m³/s e a vazão de pico simulada 281,9 m³/s, sendo obtidos resultados bem representativos. Além disso, o hidrograma simulado apresentou fluxo base inicial – especialmente na subida do pico - com bom resultado quando comparado ao hidrograma observado, diferentemente do fluxo de base final, que não se adequou muito bem aos dados observados.

Figura 16 - Hidrograma da cheia de 2011 - período de 01/01/2011 a 30/09/2011



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Dentre os eventos estudados, o hidrograma da Figura 16 foi o que apresentou o pior ajuste. É preciso considerar, no entanto, a maior incidência de chuvas que ocorreram de forma mais espaçada, de forma a dificultar a simulação à medida que os valores de recessão oscilavam continuamente. Provavelmente o HEC-HMS não foi capaz de computar corretamente as perdas pluviométricas e, por esse motivo, atrasou o tempo de escoamento em relação ao hidrograma observado. O hidrograma apresentado resulta de um período de observação de dez meses, compreendidos entre janeiro e setembro, em que se somaram 1231,4 mm precipitados. Entre os meses de janeiro e abril, período chuvoso da região, ocorreram precipitações frequentes que geraram acumulação na bacia, resultando num pico com características de base e topo largas. Analisando o hidrograma é possível observar, ainda, a ocorrência de um segundo pico de vazão no mês de maio, apresentando as mesmas peculiaridades do primeiro pico.

O maior pico de vazão da bacia foi observado no dia 6 de março, onde foram obtidos 379,3 m³/s, enquanto a curva simulada apresentou 391,8 m³/s. No segundo pico, os valores de vazão observados foram 318,9 m³/s, contrastando com o valor simulado de 326,5 m³/s. É de fácil percepção que os picos simulados não se ajustaram à curva observada mesmo após a calibração, ainda que os traços das mesmas apresentem similaridades.

5.1 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Para que a simulação ocorra, os parâmetros utilizados também devem ser compreendidos de forma correta. Dessa forma, os valores das variáveis foram testados até que se encontrassem resultados justificáveis para a aplicação.

Com base nos métodos utilizados nesse estudo, os principais parâmetros que influenciavam na determinação das curvas eram o tempo de concentração (t_c), a impermeabilidade do solo, o coeficiente de armazenamento e a constante de recessão. Foi mantido fixo o valor do tempo de retardo (parâmetro Lag time), pois além de não ter grande sensibilidade na calibração, também poderia atingir valores sem significado físico.

Para definir a eficiência do modelo foi analisado o coeficiente de Nash. Segundo Ale et al. (2012), o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) realiza uma avaliação estatística do desempenho de modelos hidrológicos. O NSE varia de $-\infty$ até 1, sendo o valor 1 indicativo de um ajuste perfeito. O NSE é descrito pela Equação 14 a seguir:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i^n [y_i^{obs} - y_i^{sim}]^2}{\sum_i^n [y_i^{obs} - y_i^{med}]^2} \quad (14)$$

Para as simulações realizadas, os seguintes valores de Nash-Sutcliffe foram encontrados:

Tabela 2 - Coeficientes de eficiência Nash-Sutcliffe

PERÍODO	COEFICIENTE NASH
2009	0,373
2010	0,412
2011	0,179

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Para os parâmetros diretamente relacionados com as características físicas da bacia hidrográfica, já eram esperados que fossem encontrados valores semelhantes entre os diferentes eventos estudados. O tempo de concentração (t_c) foi fundamental para análise física da bacia, sendo necessário estimar valores altos devido a geometria da sub-bacia, que possuía ampla área de drenagem totalizando 25000km². Foram encontrados valores de tempo de concentração de 282h, 498h e 487h para os períodos de 2009, 2010 e 2011, respectivamente.

Para que se obtivesse resultados mais representativos foi necessário levar em conta as condições climáticas da bacia. Fatores climáticos como a ausência ou presença de precipitação antecedente na região são pontos importantes para a determinação do evento, uma vez que a não ocorrência de precipitação sobre o solo seco implica na maior dificuldade de escoamento, levando à estimativa de tempo de concentração superior ao determinado para o solo úmido.

Também foi necessário considerar o uso do solo da bacia e as intervenções associadas ao uso humano, uma vez que as alterações causadas no solo influenciam no tempo de escoamento e na direção do mesmo, fazendo com que os parâmetros pudessem ser alterados em função dessas características.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Mearim realizada através o uso do software HEC-HMS e visou comparar o desempenho do modelo quando aplicado à sub-bacia do Rio Mearim. A escolha desse estudo se deu em virtude das recorrentes notificações de enchentes da região, atrelado à importância econômica da bacia para as cidades inseridas na mesma e das transformações de cobertura vegetal observadas no último século.

Os objetivos principais deste estudo foram cumpridos e foi possível constatar que dados diários são parte significativa de estudos hidrológicos, sendo as medições de variáveis hidrológicas como altura pluviométrica e vazão dados muito importantes, uma vez que, como verificado na modelagem, representaram de maneira real o comportamento hidrológico da bacia do Rio Mearim, que apresenta um tempo de concentração elevado.

O modelo mostrou-se eficiente para a simulação dos hidrogramas, apresentando resultados próximos aos valores reais observados. É notório, a partir dos resultados, que o HEC-HMS foi capaz de construir hidrogramas sintéticos bem ajustados aos hidrogramas observados quando empregados os métodos déficit e constante para o cálculo de perdas, de Clark para transformação chuva-vazão, e de recessão para o escoamento de base. Tanto a vazão de pico como o volume do escoamento obtiveram resultados satisfatórios, apresentando poucas diferenças quanto as vazões de pico. Em contrapartida, foi observado que a configuração deste modelo não conseguiu calcular corretamente eventos com precipitações de longo prazo e com mais de um pico de vazão.

A partir da comparação entre os hidrogramas simulados e os observados obtiveram-se bons índices de desempenho, sendo que após a calibração os modelos apresentaram ajustes consideravelmente bons quando contrapostos com os observados e, dessa forma, demonstrando que o modelo pode auxiliar na previsão de vazões máximas e na operação hidráulica principalmente em épocas de cheias.

Uma recomendação é que seja feito o ajuste do hidrograma de forma a considerar toda a seção da bacia para observar como a mesma se comporta, visto que como os dados coletados são apenas considerando uma sub-bacia representando uma área maior, o modelo tem dificuldades para interpretar da melhor forma. Também se faz interessante realizar o experimento utilizando outros métodos, como o do Hidrograma Unitário de Snyder ou Hidrograma Unitário SCS para averiguar qual método se adequa mais à modelagem da BHRM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de águas. **HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <hidroweb.ana.gov.br>

USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Reference Manual**. Davis, California, USA: U.S. Army Corps of Engineers, 2000. Disponível em: <[http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HECHMS_Technical%20Reference%20Manual_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HECHMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf)>

Halwatura, Devanmini & M.M.M., Najim. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. **Environmental Modelling and Software**. 2013.

De Silva, M. M. G. T. & Weerakoon, S. & Herath, Srikantha. Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC-HMS: Case Study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. **Journal of Hydrologic Engineering**. 2014.

PORTELA, Maria Manuela. Modelação Hidrológica. **DECivil, SHRHA**, Portugal 2005/2006, 2º Semestre. Disponível em: http://www.civil.ist.utl.pt/~mps/Mod_hid/Teoria/teoria%202007%20para%20jpg.pdf

MACEDO, R. L. **Estudo Hidrológico da Bacia do Rio Negrinho-SC utilizando o HEC-HMS**. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC, Florianópolis, 2010.

FELDMAN, A. D. **Technical reference manual**. Computer software Technical Reference Manual. Davis, CA, EUA: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000.

CARLOS, LUIZ & Milde, Luiz & Groppo, Juliano. Modelo Espaço-temporal HEC-HMS: avaliação na Bacia de Drenagem de Analândia HEC-HMS. **Revista de Ciência & Tecnologia**. 2002.

ABATTI, Bruno H.; PAUL, Leonardo R.; Tschoke, Gabriele V.; MICHEL, Gean P. Modelagem hidrológica da bacia do rio Itajaí do Sul. **27º SIC UDESC**. 2017.

ESTADO DO MARANHÃO - SECRETARIA DE ESTADO DAS CIDADES E DESENVOLVIMENTO URBANO – SECID. **PLANO DIRETOR DA BACIA HIDROGRÁFICA DO MEARIM**. Outubro/2014.

FALCÃO, Lorena. C; SANTOS, Ilana K.de S; NETO, Alfredo R.; SILVA, Tayanne G. N.; COSTA E SILVA, Itallo D.; SANTOS, Jessflan R. N. A APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DO GEOPROCESSAMENTO PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MEARIM- MA. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis, 2017.

PRUSKI, Fernando F.; RODRIGUES, Lineu N.; SILVA, Demetrius D. da. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Rev. bras. eng. agríc. Ambiente**. Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 301-307, maio/2001.

ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P.; ESPINOSA, Héctor R. M. ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE VOLUMES, DURAÇÕES E PICOS DE INUNDAÇÕES NA BACIA DO RIO MEARIM-MA. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis, 2017.

MENDES, T. A.; FORMIGA, Klebber T. M.; BARBALHO, F. D.; DE FÁTIMA VILELA, L. MODELAGEM DO ESCOAMENTO NA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DA USINA DE ROCHEDO-GO UTILIZANDO O HEC-HMS. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo, 2007.

ANDRADE, Claudia. D. Avaliação de escala de monitoramento e do comportamento hidrológico na bacia do rio Piabanha/RJ– **Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE**, 2016.

BRIGHENTI, T. M. **MODELAGEM HIDROLÓGICA E AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO PARA O MODELO SWAT**. Dissertação de Pós-Graduação. 2015.

KOBIYAMA, M., GRISON, K. MOTA, A. M. **Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS/Labhidro, 3ªed. 242p, 2011.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: 2ª ed. UFRGS - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

Ministério do Meio Ambiente – MMA. Ciclo Hidrológico. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/420-ciclo-hidrológico.html>

SPERLING, M. VON. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 2005.

SILVEIRA, A. L. L. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia, Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: 4ª ed. UFRGS/ABRH, 2013.

CHRISTOFOLETTI, A. A dinamica do escoamento fluvial. **Boletim Geografico**, abr./jun. 1976.

Arnold, J. G., and P. M. Allen. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. **J. Hydrol.** 1996.

SILVA, Alexandre Marco da; SCHULZ, Harry Edmar; CAMARGO, Plínio Barbosa de. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. 2003.

MENDONÇA, L. A. R. Recursos hídricos da Chapada do Araripe. **Centro de Tecnologia**, 2001.

MENDONÇA, L. A. R., FRISCHKORN, H., SANTIAGO, M. F. e MENDES FILHO, J. Isotope measurements and ground water flow modeling using MODFLOW for understanding environmental changes caused by a well field in semiarid Brazil. *Environmental Geology*, 2005.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: The primer**. Chichester: John Wiley & Sons Ltda. 1ªed. 2001.

GALVÁN, L. A.; OLÍAS, M. A.; IZQUIERDO, T. B.; CERÓN, J. C. A.; VILLARÁN, R. C. F. Rainfall estimation in SWAT: An alternative method to simulate orographic precipitation. **Journal of Hydrology**, 2014.

DILE, Y. T.; R. SRINIVASAN. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**. 2014.

GONTIJO, N. T. **Avaliação das Relações de Frequência entre Precipitações e Enchentes Raras por Meio de Séries Sintéticas e Simulação Hidrológica**. Belo Horizonte: UFMG – Tese de Mestrado, 2007.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal** v. 31. 1986.

XU, C. Y. Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts. **Agricultural and Forest Meteorology**. 1999.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. de. Simulação de Perfis D'água e Planícies de Inundação Relacionados a Diferentes Cenários de Urbanização. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. João Pessoa/PB, 2005.

Santos, Keyla Almeida dos. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude: estudo de caso, bacia do Rio Mundaú**. Dissertação de Mestrado. Recife, 2013.

Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012 / **Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres**. 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B. & LADSON, A.R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrol**. 1991.

LEITÃO, Francisco Libério. **MODELAGEM HIDROLÓGICA: PROPOSTA DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL AMIGÁVEL PARA MODELAGEM INTEGRADA DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS**. São Paulo, 2010.