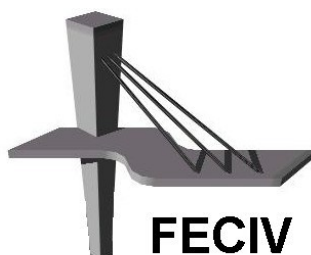


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ROMPIMENTO HIPOTÉTICO E DELIMITAÇÃO
DA ÁREA DE INUNDAÇÃO DA BARRAGEM
SALTO MORAES EM ITUIUTABA/MG**

KEVIN REINY ROCHA MOTA

Uberlândia, 30 de Maio de 2017



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Kevin Reiny Rocha Mota

ROMPIMENTO HIPOTÉTICO E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE INUNDAÇÃO DA BARRAGEM SALTO MORAES EM ITUIUTABA/MG

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira

Uberlândia, 30 de Maio de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M917r
2017 Mota, Kevin Reiny Rocha, 1991-
Rompimento e delimitação da área de inundação da barragem Salto
Moraes em Ituiutaba/MG / Kevin Reiny Rocha Mota. - 2017.
171 f. : il.

Orientador: Carlos Eugênio Pereira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Rompimento de barragem - Teses. 3.
Mapa de inundação - Teses. I. Pereira, Carlos Eugênio. II. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

CDU: 624



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE

ATA Nº: 183/2017

CANDIDATO: Kevin Reiny Rocha Mota

Nº. Matrícula: 11512ECV011

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira

TÍTULO: "Rompimento hipotético e delimitação da área de inundação da barragem de Salto Moraes – Ituitutaba/MG".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

PROJETO DE PESQUISA: Infraestrutura Urbana

DATA DA DEFESA: 30 de maio de 2017

LOCAL: Sala de Projeções, bloco 1Y. **HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO:** 14h00min - 17h00min.

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGE, assim composta: Professores Doutores: **Marcio Augusto Reolon Schmidt – FECIV/UFU; Masato Kobiyama – IPH/UFRGS e Carlos Eugênio Pereira** orientador do candidato. Ressalta-se que o **Prof. Dr. Masato Kobiyama** participou da defesa por meio de vídeo conferência desde a cidade de Porto Alegre/RS, e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato aprovado. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Professor Orientador: **Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof. Dr. Masato Kobiyama – IPH/UFRGS**

Membro interno: **Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt – FECIV/UFU**

Uberlândia, 30 de maio de 2017.

RESUMO

Este trabalho visa simular matematicamente o rompimento hipotético da barragem Salto Moraes no Rio Tijuco por galgamento, e através de resultados gráficos como hidrogramas de vazão a jusante da barragem e mapa de inundação analisar o impacto causado nas imediações do canal à jusante da barragem. Como objetivo específico o mesmo visa calibrar o coeficiente CN em cada sub - bacia à montante da barragem Salto Moraes, investigar a influência dos parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura sobre o hidrograma de vazão imediatamente a jusante da barragem, investigar a influência das equações empíricas de parâmetros definidores da formação de brechas sobre o hidrograma de vazão imediatamente a jusante da barragem e identificar o nível de risco que o rompimento da barragem causa às vidas humanas e edificações próximas ao canal a jusante da barragem. A Barragem Salto Moraes em Ituiutaba-MG foi escolhida como objeto de estudo devido a presença de edifícios, estação de tratamento de esgoto e vidas humanas na vizinhança no canal à jusante da mesma, sendo que, o rompimento hipotético da barragem pode impactar vidas humanas, edifícios e o abastecimento da água da cidade. Na metodologia foi estudado o canal a jusante da barragem Salto Moraes com o uso do Hec-GeoRas, a bacia hidrográfica a montante da barragem foi estudada de modo a determinar o hidrograma de vazão que afluí a barragem sendo que para isso foi necessário identificar todas as sub-bacias e fazer o estudo de uso e ocupação do solo, calcular a precipitação média em uma data específica pelo método de Thiessen e com o uso do Hec-Hms calibrar o coeficiente CN de modo que a vazão máxima na barragem seja igual a vazão da estação fluviométrica indicada. Com o CN calibrado e com a maior precipitação da bacia dos últimos 50 anos fez-se três simulações no Hec-Hms para determinar o hidrograma de vazão que hipoteticamente romperia a barragem. Ainda na metodologia usou-se o Hec-Ras para simular o rompimento da estrutura em regime não permanente. Nas simulações do Hec-Ras criou-se 14 cenários para investigar a influência dos parâmetros formadores da brecha no hidrograma de vazão imediatamente a jusante da barragem. Investigou-se a influência de quatro equações empíricas dispostas no Hec-Ras na vazão de pico do hidrograma imediatamente a jusante da barragem. Com a equação que gerou maior vazão de pico elaborou-se um mapa de inundação e de posse de parâmetros dispostos na literatura analisou-se a área inundada causada pelo rompimento da barragem. No canal a jusante da barragem foi criada 277 seções transversais em 50 km de comprimento. Na bacia hidrográfica a montante da barragem foram identificadas 4 sub-bacias e foram criadas 12 sub-bacias fictícias para levar em consideração a elevada contribuição difusa no Rio Tijuco. O estudo de uso e ocupação do solo foi feito considerando 4 classes e identificou-se que a bacia tem maior ocupação de pastagem. Analisando mapas de solo da região identificou-se que o solo é Latossolo vermelho distrófico, que está enquadrado no grupo de solo A. As simulações no Hec-Hms geraram uma vazão máxima de 1227 m³/s na barragem Salto Moraes. No Hec-Ras, as simulações mostraram que com o aumento da altura da brecha a vazão diminui, com o aumento da largura da brecha a vazão de pico aumenta, com o aumento da declividade lateral da brecha a vazão de pico diminui e que a progressão da onda senoidal gera uma maior vazão de pico que a progressão linear. As simulações comparando as quatro equações empíricas mostraram que a equação de “Xu and Chang (2009)” gerou maior vazão de pico. O mapa da área inundada foi elaborado e constatou-se que o rompimento da barragem impacta os arredores da cidade de Ituiutaba-MG.

Palavras chave: rompimento de barragem, mapa de inundação, Hec-Ras, Hec-GeoRas, Hec-Hms.

ABSTRACT

This study aims to simulate a hydraulic hypothetical rupture of the Salto Moraes dam on the Tijuco Rio by overtopping and through graphic results such as streamflow-hydrographs downstream of the dam and flood maps to analyze the impact caused in the vicinity of the downstream channel of the dam. The main objective of the study is to analyze the calibration of the coefficient CN in each sub-basin upstream of the Salto Moraes dam, to investigate the influence of the parameters defining the rupture gap formation on the streamflow hydrograph immediately downstream of the dam, to investigate the influence of the empirical equations of gap formation parameters on the streamflow hydrograph immediately downstream of the dam and to identify the risk level that dam rupture causes to human density and buildings close to the canal downstream of the dam. The Salto Moraes Dam in Ituiutaba-MG was chosen as the object of study as a result of the presence of buildings, treatment plants and human density in the vicinity of the downstream channel, and how the hypothetical rupture of the dam can impact human lives, buildings and the water supply to the city. In the methodology, the downstream channel of the Salto Moraes dam with the use of Hec-GeoRas was object of study, the streamflow hydrographic basin upstream of the dam was studied in order to determine the streamflow hydrograph that flows into the dam, and for this it was necessary to identify all the sub-basins and produce the study of land use and planning, calculate the mean precipitation at a specific date by applying the Thiessen method and with the use of Hec-Hms, calibrate the coefficient CN so that the maximum flow in the dam is equivalent to the flow of the indicated fluviometric station. With the calibrated CN and the highest precipitation of the basin of the last 50 years, three Hec-Hms simulations were performed to determine the instream flow that hypothetically, would break the dam. In addition, the Hec-Ras methodology was used to simulate the rupture in a non-permanent structure. In the Hec-Ras simulations, 14 scenarios were created to investigate the influence of breach-forming parameters on the streamflow hydrograph immediately downstream of the dam. An assessment was made on the influence of four empirical equations arranged in the Hec-Ras on the peak flow of the streamflow hydrograph immediately downstream of the dam. With the equation that generated the highest peak flow, a flood map and the parameters available in research, the flooded area caused by the rupture of the dam was analyzed. After the methodology, the results were presented. In the downstream channel of the dam, 277 cross sections of 50 km in length was created. In the catchment area of the dam, 4 sub-basins were identified and 12 fictitious sub-basins were created to take into account the high diffuse contribution in the Tijuco River. The land use planning was done considering 4 classes and it was identified that the basin has greater pasture occupation. In addition, by analyzing soil maps of the region it was identified that the soil is Dystrophic Red Latosol, which is framed in the group of soil A. The Hec-Hms simulations generated a maximum flow of 1227 m³ / s in the Salto Moraes dam. In the Hec-Ras, the simulations demonstrated that with an increase in height of the gap, the flow decreases, with an increase in the width of the gap the peak flow increases, with an increase of the lateral slope of the gap the peak flow decreases and that the progression of the sine wave generates a higher peak flow than the linear progression. The simulations comparing the four empirical equations showed that the equation of "Xu and Chang (2009)" generated a higher peak flow. A map of the flooded area was devised and it was verified that the rupture of the dam impacts the outskirts of the city of Ituiutaba-MG.

Keywords - dam rupture, flood map, Hec-Ras, Hec-GeoRas, Hec-Hms.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREVIATURAS

B	- largura média da brecha (m);
C_b	- Coeficiente empírico característico do material;
h	- Altura
h_b	- Altura da brecha (m);
H_f	- Pressão hidrostática
H_j	- Solicitação imposta a jusante pelo nível de água
h_w	- altura de água acima do fundo da brecha (m);
K_o	- Coeficiente empírico dependente do tipo de material ($k_0=1,4$ para galgamento e $k_0=1,0$ para outros casos) ;
P	- Peso da barragem
P_T	- Precipitação máxima
Q_p	- Vazão de pico (m^3/s);
T_c	- Tempo de concentração
T_r	- Tempo de retorno;
t_f	- Tempo de formação da brecha (h);
U	- Subpressão na fundação da barragem.
V_{er}	- Volume de material erodido (m^3);
V_{out}	- Volume de água descarregado através da brecha (m^3).

V_w - Volume de água acima da brecha (m^3);

SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens

CN - Coeficiente de escoamento superficial ou número deflúvio

HEC – RAS - Hydrologic Engineering Centers River Analysis System

HEC – GEORAS

HEC – HMS - Hydrologic Modelling System

MCS - Simulação Monte Carlo

MDT - Modelo Digital de Terreno

MDE - Modelo Digital de Elevação

MW - Megawatts

LHS - Amostragem hypercubo latino

SRTM - Missão Topográfica Radar Shuttle

TIN - Triangulation Interpolated Network

USGS - Instituição de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista de montante de um vale de um rio a jusante de um reservatório de água	15
Figura 2 - Causas de rompimento de barragens	26
Figura 3- Sub-causas de rompimento de barragens.....	26
Figura 4- Representação de uma ruptura através do “piping”	27
Figura 5- Processo de abertura de brecha em uma barragem de terra por “piping”	29
Figura 6- Galgamento em Barragem de Terra.....	29
Figura 7- Evolução de uma brecha provocada por galgamento	30
Figura 8- Solicitações de uma barragem de concreto (aumentar as letras legível)	31
Figura 9 - Probabilidade de galgamento usando o MCS	33
Figura 10- Probabilidade de galgamento usando o hypercubo latino	33
Figura 11- Alteração de uma seção de um rio a jusante de uma barragem com o decorrer do tempo	35
Figura 12- Parâmetros geométricos da brecha	36
Figura 13- Influência da cota da base inferior da brecha no hidrograma de cheia a jusante da barragem	37
Figura 14- Influência da declividade das paredes laterais no hidrograma de cheia a jusante da barragem	38
Figura 15 - Hidrograma de cheia a jusante da barragem Orós	41
Figura 16 - Hidrograma de cheia a jusante da barragem Banqiao.....	41
Figura 17- Modelagem do rio bald eagle creek no Hec-Ras	44
Figura 18- Seção transversal da barragem Faster Joseph Sayers modelada no Hec-Ras	45
Figura 19- Resultados de Seção imediatamente a montante da barragem	45
Figura 20: Resultados de uma seção imediatamente a jusante da barragem	46
Figura 21- Mapa de Inundação	47
Figura 22- Usina Hidrelétrica Salto Moraes.....	53
Figura 23 - Fluxograma da metodologia	54
Figura 24- Fixação de projeção	56
Figura 27- Bacia Hidrográfica do Rio Tijucu (Montante da Barragem Salto Moraes).....	76
Figura 28 - Topologia da bacia hidrográfica a montante da barragem Salto Moraes	77
Figura 29- Uso e Ocupação do solo na bacia hidrográfica a montante da barragem	83

Figura 30 - Polígonos de Thiessen	85
Figura 31 – Precipitação média discretizada em 6 horas.....	86
Figura 32 - Precipitação máxima discretizada em 6 horas	87
Figura 33 - Hidrograma de vazão de entrada da Barragem Salto Moraes.....	95
Figura 34- Seção transversal da barragem.....	96
Figura 35- Curva elevação - volume do reservatório	97
Figura 36 - Hidrograma de vazão a jusante dos cenários 01 a 04	98
Figura 37 - Hidrograma de vazão a jusante dos cenários 05 a 08	99
Figura 38 - Hidrograma de vazão a jusante dos cenários 09 a 12	101
Figura 39 - Hidrograma de vazão a jusante dos cenários 13 e 14	102
Figura 40 - Influência das equações empíricas no hidrograma de vazão a jusante da barragem	103
Figura 41 – Altura de água no canal a jusante da Barragem Salto Moraes	104
Figura 42 – Velocidade no canal a jusante da Barragem Salto Moraes	105
Figura 43 - Risco hidrodinâmico ao longo do canal.....	105
Figura 44 - Mapa de inundação do rompimento da barragem Salto Moraes	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados históricos da evolução de barragens.....	18
Tabela 2- Falhas de Barragens no exterior e em Minas Gerais (Brasil).....	20
Tabela 3- Causas da ruptura de barragens	24
Tabela 4- Categorias das causas de falha em barragens	25
Tabela 5- Relação entre a resistência à erosão interna com tipos de solo e métodos de construção (Ordem decrescente de Resistência à erosão)	28
Tabela 6- Relação entre o tipo de barragem e a forma de ruptura.....	32
Tabela 7- Equações empíricas para dimensões de brecha e vazão de pico	39
Tabela 8 - Resultados obtidos por Ferreira e Andrzejewski (2015) através de equações empíricas.....	42
Tabela 9 – Comparação entre as áreas de inundação obtidas pelos modelos simplificados MS-20S e MS-50S.....	48
Tabela 10 - Valores das áreas de inundação obtidas pelo modelo simplificado MS-50S e pelo modelo	48
Tabela 11 – Número esperado de vítimas em função do tempo de alerta.	49
Tabela 12 – Consequências do Risco Hidrodinâmico	50
Tabela 13 – Nível de perigo para seres humanos	50
Tabela 14 – Nível de perigo para edificações.....	51
Tabela 15- Atributos do <i>Stream Centerline</i>	57
Tabela 16- Atributos do XS Cut line	57
Tabela 17- Características espectrais Landsat 8	59
Tabela 18- Combinações de bandas usuais	60
Tabela 19 - Enquadramento de diversos tipos de solos nos grupos de solos	60
Tabela 20- Valores dos números CN da curva de runoff para bacias rurais	61
Tabela 21- Cálculo da precipitação pelo Método de Huff para o primeiro quartil para chuva de 6h	63
Tabela 22- Elementos do Hec-Hms.....	64
Tabela 23- Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning para arroios e rios	66
Tabela 24 - Parâmetros de brecha hipotética.....	67
Tabela 25 - Variação da altura da brecha	67

Tabela 26 - Variação da largura da base inferior da brecha	67
Tabela 27 - Variação do fator de inclinação das paredes laterais da brecha	68
Tabela 28 - Variação da progressão da brecha	68
Tabela 29 - Coeficiente C _b em função do volume do reservatório	71
Tabela 30- Características da bacia e das sub-bacias	77
Tabela 31- Características do rio e dos tributários	78
Tabela 32- Ocupação do solo na bacia	80
Tabela 33 – Cálculo da precipitação média pelo Método de Thiessen	84
Tabela 34 - Resultados gerais da primeira simulação	88
Tabela 35 - Coeficiente CN calibrado	89
Tabela 36 - Resultados gerais da segunda simulação	90
Tabela 37 - Resultados gerais da terceira simulação	93
Tabela 38 - Variação da altura da brecha	98
Tabela 39 - Variação da altura da brecha	99
Tabela 40 – Variação da declividade lateral da brecha	100
Tabela 41 - Variação da declividade lateral da brecha	102
Tabela 42 - Parâmetros das brechas	103
Tabela 43 - Risco nos arredores da cidade de Ituiutaba-MG	106

SUMÁRIO

RESUMO	3
ABSTRACT	4
SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
SUMÁRIO	11
INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS BARRAGENS	18
2.2 HISTÓRICO DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS	20
2.3 LEGISLAÇÃO VIGENTE DE SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	21
2.3.1 Classificação de risco de barragens	23
2.4 FORMAS DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS	24
2.4.1 Erosão interna (“piping”).....	27
2.4.2 Galgamento.....	29
2.4.3 Deslizamento	30
2.4.4 Derrubamento	31
2.4.5 Relação entre o tipo de barragem e a forma de ruptura.....	31
2.5 EFEITOS AMBIENTAIS CAUSADOS POR BARRAGENS	34
2.6 INFLUÊNCIA DA BRECHA DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM NO HIDROGRAMA DE CHEIA A JUSANTE.	35

2.6.1	Influência dos parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura	36
2.6.2	Influência de equações empíricas definidoras de parâmetros de brechas	39
2.7	MODELAGEM DE RUPTURA DE BARRAGENS USANDO HEC-RAS	43
2.8	ZONEAMENTO DE RISCO.....	49
METODOLOGIA.....		52
3.1	ÁREA DE ESTUDO	52
3.2	OBJETO DE ESTUDO	52
3.3	ESTUDO DO CANAL A JUSANTE DA BARRAGEM.....	55
3.3.1	Georreferenciamento da Imagem	55
3.3.2	Configuração geométrica.....	56
3.4	ESTUDO DA BACIA A MONTANTE DA BARRAGEM.....	58
3.4.1	Identificação da bacia	58
3.4.2	Estudo do uso e ocupação do solo	59
3.4.3	Hietograma de precipitação de Huff.....	62
3.4.4	Método de Thiessen.....	64
3.4.5	Modelagem no Hec-Hms.....	64
3.5	MODELAGEM NO HEC-RAS.....	65
3.5.1	Variação dos parâmetros formadores da brecha.....	66
3.5.2	Influência de fórmulas empíricas no hidrograma de vazão a jusante da barragem	69
RESULTADOS		75
4.1	ESTUDO DO CANAL A JUSANTE DA BARRAGEM.....	75
4.1.1	Georreferenciamento da Imagem e configuração geométrica	75
4.2	ESTUDO DA BACIA A MONTANTE DA BARRAGEM.....	75
4.2.1	Identificação da bacia	75
4.2.2	Uso e Ocupação do solo	79
4.2.3	Hietograma de Huff.....	84

4.2.3.1	Chuva média.....	84
4.2.3.2	Chuva máxima.....	86
4.2.4	Modelagem no Hec-Hms.....	87
4.2.5.1	Primeira simulação- CN descalibrado e chuva média.....	87
4.2.5.2	Segunda simulação- CN calibrado e chuva média	89
4.2.5.3	Terceira simulação- CN calibrado e chuva máxima.....	93
4.3	MODELAGEM NO HEC-RAS.....	95
4.3.1	Influência dos parâmetros definidores da brecha no hidrograma a jusante da barragem.....	97
4.3.1.1	Influência da altura da brecha.....	97
4.3.1.2	Influência da largura da brecha	99
4.3.1.3	Influência da declividade lateral da brecha	100
4.3.1.4	Influência da progressão da brecha	101
4.3.2	Influência de fórmulas empíricas no hidrograma de vazão a jusante da barragem 102	
4.4	ZONEAMENTO DE RISCO.....	104
REFERÊNCIAS		110

INTRODUÇÃO

As barragens são grandes estruturas utilizadas há mais de 6.000 anos, cujo Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) define como obstáculos com a capacidade de reter qualquer líquido, rejeitos ou detritos, para fins de armazenamento ou controle, podendo variar de tamanho e são geralmente usadas para fornecimento de água, geração de energia hidroelétrica, para controle de cheias e para irrigação.

A primeira barragem registrada foi no Egito em 4800 A.C e no Brasil a primeira barragem registrada foi em Recife no final do século XVI. O início da construção de grandes barragens brasileiras foi marcado pelas trágicas consequências da seca iniciada em 1877 que se alastrou por todo o Nordeste do País, e posteriormente foram executadas barragens de diversas formas para implantação de hidroelétricas.

Estruturas como barragens carregam risco de rompimento que pode impactar vidas humanas, aquáticas, sistemas hidráulicos, biológicos como descrevem TahmîscîoĖlu et al. (2016) e Atallah (2002). Essas estruturas podem romper de várias formas (erosão interna, galgamento, deslizamento, derrubamento e outras) e isso pode ser causado por fenômenos naturais ou também por má gestão (ZHANG, XU E JIA, 2007). O último registro de rompimento de barragem no Brasil foram as barragens de rejeitos de Santarém e do Fundão, em Mariana-MG, que causou 19 óbitos, 8 desaparecidos, 600 pessoas desalojadas e desabrigadas, interrompeu o abastecimento de água de milhares de pessoas e poluiu o rio Doce.

No Brasil, a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e estipula, como um dos instrumentos desta política, o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de classificação de barragens. Para as barragens classificadas como de dano potencial associado alto, este documento legal obriga os empreendedores a avaliar as consequências adversas no caso de ruptura ou falha operacional

da barragem, aspecto que obriga à modelação de cheias induzidas e ao mapeamento das zonas de risco a jusante. A Figura 1 mostra a vista de jusante de um vale, que ocorrendo à ruptura da barragem será alagado pelo volume de água armazenados.

Figura 1 - Vista de montante de um vale de um rio a jusante de um reservatório de água



É necessário prever essas situações para que populações não possam ser afetadas como nos trabalhos de Xiong (2011) e Ackerman, P.e. e Brunner (2016) ao modelarem a ruptura da barragem Foster Joseph Sayers na Pensilvânia, Estados Unidos da América, usando Hec-Ras e Hec-GeoRas e apresentaram hidrogramas com a variação da vazão e da cota com o tempo e também o mapa de inundação causado pelo seu rompimento.

Gomes et al (2015) fizeram um trabalho variando os parâmetros definidores de brecha para analisar as suas influências no hidrograma de vazão imediatamente a jusante da barragem. Com o trabalho eles notaram que a altura da brecha, a declividade lateral da brecha e a progressão da brecha são os parâmetros mais sensíveis no hidrograma de vazão imediatamente a jusante da barragem.

Ferreira e Andrzejewski (2015) e Gee (2008) simularam a influência de equações empíricas, que definem os parâmetros definidores da brecha, no hidrograma de vazão imediatamente a jusante da barragem em objetos de estudo diferentes. Nos dois objetos de estudo de Gee (2008), a equação de “*MacDonald*” em regime não permanente gerou a maior vazão de pico tendo uma diferença considerável com as outras equações. No objeto de estudo de Ferreira e Andrzejewski (2015) a equação de “*Bureau of Reclamation*” gerou a maior vazão de pico tanto para rompimento por galgamento e piping.

Para se mitigar os impactos causados pelo rompimento dessas estruturas é necessário saber qual o nível de risco que ela submete a vidas humanas e edificações a jusante da barragem rompida. Viseu (2006) estabeleceu parâmetros para se conhecer quatro níveis e classes de risco do rompimento de barragens. Esses parâmetros dependem do nível de água, velocidade e do risco hidrodinâmico (que é a multiplicação do nível de água e a velocidade) no canal.

Com isso foi escolhida a barragem Salto Moraes no Rio Tijuco em Ituiutaba – MG, cujo rompimento impacta a geração de energia elétrica, abastecimento de água de Ituiutaba – MG, vidas humanas e edificações próximas ao canal do Rio Tijuco a jusante da barragem Salto Moraes. A barragem Salto Moraes situada no Rio Tijuco em Ituiutaba – MG foi fundada há 50 anos, do tipo concreto gravidade, altura de 8m e classificada com Pequena Central Hidrelétrica que gera energia elétrica para a cidade de Ituiutaba/MG. Colocar mais justificativas (sociais, ambientais, econômico)

Na metodologia do trabalho foi feita a caracterização geométrica do canal a jusante da barragem usando software de geoprocessamento, a bacia hidrográfica a montante da barragem foi estudada com o objetivo de determinar o hidrograma de chuva que causaria o rompimento hipotético da estrutura usando software de simulação hidrológica, foi feita a simulação hidráulica do canal a jusante a barragem com ruptura da barragem por galgamento em vários cenários para investigar a influência dos parâmetros definidores de formação da brecha e a diferença entre as equações empíricas que definem os parâmetros definidores de formação de brechas no hidrograma de vazão imediatamente a jusante da barragem. Com a equação que gerar a maior vazão de pico foi gerado o mapa de inundação com o nível de risco causado pelo rompimento hipotético.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esta dissertação tem por objetivo geral simular computacionalmente o rompimento hipotético da barragem Salto Moraes no Rio Tijuco, e através de resultados gráficos como hidrogramas de vazão a jusante da barragem e mapa de inundação analisar o impacto causado nas imediações do canal à jusante da barragem.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esse trabalho tem os seguintes objetivos específicos-

- Calibrar o coeficiente CN em cada sub-bacia integrante da bacia hidrográfica a montante da barragem Salto Moraes;
- Investigar a influência que os parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura sobre o hidrograma de vazão imediatamente a jusante da barragem;
- Investigar a influência que as equações empíricas de parâmetros definidores da formação de brechas sobre o hidrograma de vazão imediatamente a jusante da barragem;
- Identificar o nível de risco que o rompimento da barragem causa às vidas humanas e edificações próximas ao canal a jusante da barragem.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS BARRAGENS

As barragens são construções antigas que apresentam uma grande evolução com o decorrer do tempo com o fim de beneficiar a população. Segundo Massad (2010), um dos registros mais antigos é de uma barragem de 12 m de altura, construída na Egito, há aproximadamente 6,8 mil anos com a finalidade de represar água para os trabalhadores das pedreiras, porém ela rompeu por transbordamento.

As barragens de terra eram homogêneas, sendo que o material era transportado manualmente e compactado por pisoteamento de homens ou animais. Com o decorrer do tempo e com a evolução da tecnologia foram introduzidos núcleos de argila para garantir a estanqueidade das barragens, iniciou-se o uso de enrocamento na construção de barragens e no século XX foi introduzida à compactação mecânica (JANSEN, 1983; MASSAD, 2010).

A Tabela 1 mostra alguns dados históricos da evolução da construção de barragens.

Tabela 1- Dados históricos da evolução de barragens

Ano	Registro ou Ocorrência	Local
4800 a.C	Barragem de Sadd – El – Katara	Egito
	Altura- 12m	
	Destruída por transbordamento	
500 a.C	Barragem de terra	Sri Lanka
	Altura- 12 a 27m	
	13.000.000 m ³ de material	
100 a.C	Barragens romanas em arcos	Norte da Itália
		Sul da França
1200 d.C	Barragem Madduk-Masur	Índia
	Altura- 90m	
	Destruída por transbordamento	
1789	Barragem de Estrecho de Rientes	Espanha

	Altura- 46m	
	Destruída logo após o primeiro enchimento	
1820	Telford introduz o uso de núcleos argilosos em barragens de terra e enrocamento	Inglaterra
Fim do século XIX	Barragem de Fort Peck Altura- 76m Volume de material- 100.000.000 m ³	EUA
1856	Experiências de Darcy Velocidade de percolação da água	França
1859	Patente do primeiro rolo compactador a vapor	Inglaterra
1904	Surge o primeiro rolo compactador tipo pé de carneiro	EUA
1930 – 40	A Mecânica dos Solos consolida-se como ciência aplicada	EUA
Hoje	Rolos compactadores vibratórios Barragem de Nurek (URSS)- 312 m Barragens com membranas Barragens em terra armada	EUA URSS Brasil e outros

Fonte: Adaptado de MASSAD, 2010.

No Brasil o início da construção de barragens foi marcado pelas trágicas consequências da drástica seca iniciada em 1877 que se alastrou por todo o Nordeste do País, tornando-se a tragédia nacional de maior vulto causa por fenômenos naturais (FLAVIO MIGUEZ DE MELLO, 1982).

A mais antiga barragem brasileira registrada foi construída em Recife no final do século XVI sendo ela posteriormente alargada e reforçada para permitir para permitir a construção de um acesso para o centro de Recife (FLAVIO MIGUEZ DE MELLO, 2011).

Foram executados barragens de diversas formas: alvenaria, concreto, arco, arco-gravidade, arcos múltiplos e de contrafortes com notável rapidez e economia, sendo que no início as obras eram para combater a seca e posteriormente para implantação de hidroelétricas.

2.2 HISTÓRICO DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS

O rompimento de barragens é uma modalidade de desastres consideravelmente recorrente na história da humanidade. Dois são os principais fatores que podem ser apontados como causa primária desse evento: O advento de um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou o mau planejamento dessa estrutura. A Tabela 2 apresenta falhas de barragens no exterior e no Estado de Minas Gerais-Brasil.

Tabela 2- Falhas de Barragens no exterior e em Minas Gerais (Brasil)

Nome da Barragem	Local	Data	Finalidade da Barragem	Danos causados
St. Francis	Los Angeles (EUA)	1928	Abastecimento de água	450 óbitos
Malpasset	Riviera Francesa (FRA)	1959	Abastecimento de água	Mais de 420 óbitos
Vajont	Dolomitas (ITA)	1963	Geração de energia elétrica	Entre 2000 e 2600 óbitos
Banqiao	Província de Henan CHN)	1975	Controlar enchentes e geração de energia elétrica	25 mil óbitos pela enchente e 135 por consequências posteriores
Sistema federal de diques	New Orleans (EUA)	2005	Abastecimento de água	1836 óbitos
Barragem de Fernandinho	Itabirito	1986	Barragem de rejeitos minerais	7 óbitos

Barragem de Macacos	Nova Lima	2001	Barragem de rejeitos minerários	5 óbitos
Barragem em Cataguases	Cataguases	2003	Barragem de rejeitos industriais.	Contaminação do rio Paraíba do Sul, mortandade de animais e peixes e interrupção do abastecimento de água de 600.000 pessoas
Barragem do Rio Pomba/Cataguases	Miraí	2007	Barragem de rejeitos minerários	Mais de 4000 pessoas desabrigadas ou desalojadas.
Barragem Fundão	Mariana	2015	Barragem de rejeitos minerários	19 óbitos, 8 desaparecidos 600 desabrigados ou desalojados e interrupção do abastecimento de água de milhares de pessoas
Barragem Santarém	Mariana	2015	Barragem de rejeitos minerários.	19 óbitos, 8 desaparecidos 600 desabrigados ou desalojados, interrupção do abastecimento de água de milhares de pessoas

Fonte:

Notam-se na Tabela 2 inúmeros óbitos causados por falhas de barragens, o que faz ser fundamental planos emergenciais essas estruturas e inúmeros rompimentos no Estado de Minas Gerais. Isso se dá devido ao elevado número de barragens no Estado e a intensa atividade minerária que requer esse tipo de estrutura.

2.3 LEGISLAÇÃO VIGENTE DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

Vários acidentes com rompimentos de barragens aconteceram no Brasil e no Mundo, nos últimos anos como visto nas Tabelas 2 e 3. Esses acidentes mudaram a percepção a respeito da segurança de barragens e suscitaram o desenvolvimento de uma regulamentação nesse sentido. Antigamente não havia registros de barragens e carência de informações a

respeito de acidentes como se pode notar na Tabela 3 que a maioria dos acidentes no Brasil estão registrados após o ano 2000 (MELO, 2013).

A Lei de Segurança de Barragens foi proposta em 2003 na Câmara Federal e sancionada em 2010 como a Lei nº 12.334. Essa lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresente uma das seguintes características:

- Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);
- Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

A Política Nacional de Segurança de Barragens tem como objetivo: garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências, regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional, promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens, criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança, coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos, estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público e fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos (BRASIL, 2010).

A Política Nacional de Segurança de Barragens estabelece como algumas das competências do empreendedor: Elaboração do Plano de Segurança da Barragem e o Plano de Ação de Emergência, Realização das Inspeções de Segurança Regular e Especial nas

barragens e Realização da Revisão Periódica de Segurança de Barragem. Essa lei ainda tem um sistema de classificação por categoria de risco e por dano potencial associado constituindo uma base para análise de segurança das barragens, estabelecendo níveis apropriados de monitoramento, inspeção e planos de segurança (BRASIL, 2010).

2.3.1 Classificação de risco de barragens

Brasil (2010) diz que as barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem (Equação 1).

$$CRI = CT + EC + PS \quad (1)$$

Em que:

CRI = categoria de risco;

CT = características técnicas;

EC = estado de conservação;

PS = plano de Segurança da Barragem.

São estabelecidas faixas de classificação da Categoria de Risco: alto ($CRI \geq 60$ ou $EC \geq 8$), médio ($35 < CRI < 60$) e baixo ($CRI \leq 35$) (BRASIL, 2012).

Brasil (2010) diz que a classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

São estabelecidas faixas de classificação do Dano Potencial Associado: alto ($DPA \geq 16$), médio ($10 < DPA < 16$) e baixo ($DPA \leq 10$) (BRASIL, 2012).

2.4 FORMAS DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS

Por serem obras de grande porte, falhas em barragens podem causar desde danos catastróficos, perdas de propriedades e vidas humanas até a deteriorações que podem necessitar ou não de conserto imediato. Sendo assim o desenvolvimento do conhecimento em mecânica dos solos e recursos hídricos deu aos profissionais da engenharia ferramentas que auxiliam a quantificar a magnitude desses danos e a prevê-los e eliminá-los desde a fase de projeto.

Falhas em barragens resultam de forças externas e internas. Estudos de caso mostram que o fracasso da barragem pode surgir devido a razões diferentes, que variam de infiltração, erosão interna, galgamento, liquidação devido a escorregamentos de taludes e liquefação devido a terremotos (XIONG, 2011).

Santos, França e Almeida (2007) descreveram uma relação entre o tipo de barragem com a forma de ruptura mais comum (Tabela 4).

Tabela 3- Causas da ruptura de barragens

Tipo de Barragem	Forma de Ruptura
Aterro	Galgamento
	Erosão interna
	Escorregamento de Fundação
	Ação de ondas da albufeira
	Erosão da fundação a jusante da barragem
Concreto gravidade	Deterioração dos materiais
	Falha da fundação da barragem
	Falta de estabilidade do corpo da barragem
	Erosão da fundação a jusante da barragem
	Atos de guerra
Concreto em arco	Falha dos encontros laterais do vale de fundação
	Saturação das fundações rochosas
	Carga excessiva resultante de um excessivo enchimento da

	albufeira
	Deslizamento do corpo da barragem
	Erosão da fundação a jusante da barragem
Fonte: Adaptado de SANTOS, FRANÇA E ALMEIDA, 2007	

Zhang, Xu e Jia (2007) coletaram 593 casos de falhas em barragens com o objetivo de analisar quais foram as maiores ocorrências de falhas em barragens em vários países. Esses dados são de vários tipos de barragens (concreto, terra, terra - enrocamento, alvenaria e outros) e de vários países (sendo Estados Unidos, Índia, Reino Unido, Austrália e África do Sul os mais coletados). Várias causas foram detectadas e estão apresentadas na Tabela 5.

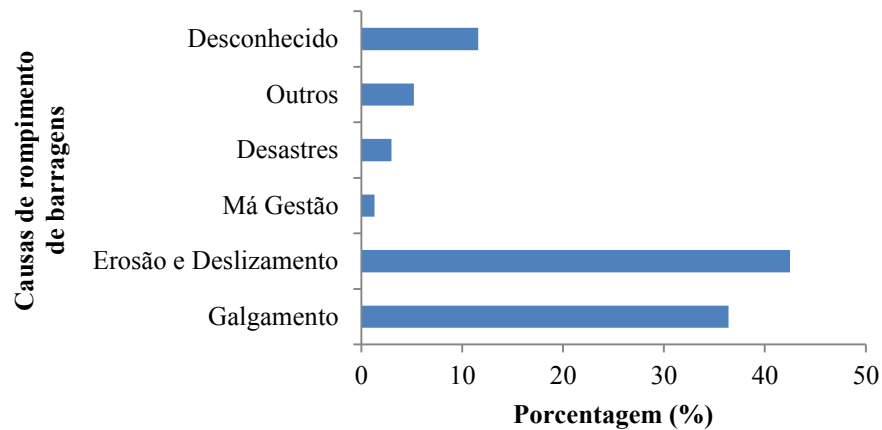
Tabela 4- Categorias das causas de falha em barragens

Item	Causa	Sub-Causa
1	Galgamento	Capacidade insuficiente de Vertedor
		Vazão superior a de projeto
2	Erosão e Deslizamento	Erosão interna no corpo da barragem
		Deslizamento no corpo da barragem
		Erosão interna na fundação
		Erosão ao redor do vertedor
		Qualidade do vertedor
3	Má Gestão	Diminuição da capacidade de controle de inundações nos reservatórios
		Má manutenção e operação
4	Desastres	Terremoto
		Ataque terrorista
		Rompimento de barragem a montante
5	Outros	Bloqueio do Vertedor
		Planejamento deficiente do projeto
6	Desconhecido	

Fonte: Adaptado de ZHANG, XU E JIA, 2007.

Com todos os dados eles fizeram análises estatísticas ilustrados nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 - Causas de rompimento de barragens

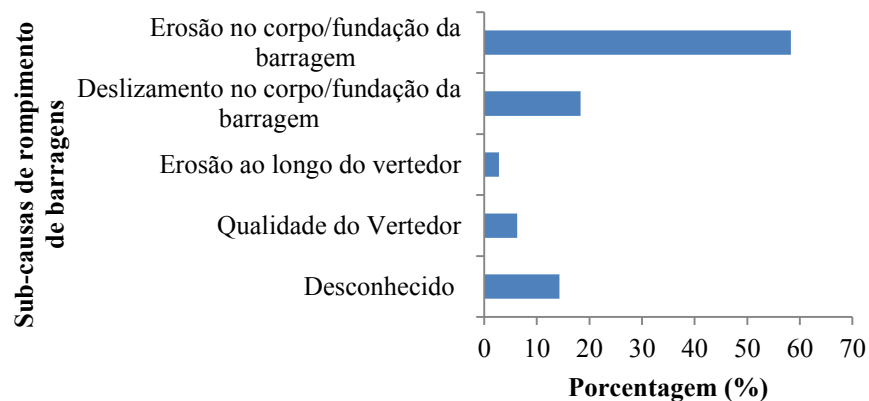


Fonte: Adaptado de ZHANG, XU E JIA, 2007.

Observa-se na Figura 2 que as causas de rompimento de barragens com a maior porcentagem de ocorrência são a erosão e deslizamento e o galgamento, porém ambos são causas gerais e a Figura 3 apresenta as sub-causas com maior porcentagem de ocorrência.

(Procurar estatística brasileira)

Figura 3- Sub-causas de rompimento de barragens



Fonte: Adaptado de ZHANG, XU E JIA, 2007.

Zhang, Xu e Jia (2007) analisaram as ocorrências das causas e sub-causas de rompimento de barragens com os tipos de barragens de terra (barragem de terra homogênea, terra-enrocamento e enrocamento) e chegaram as seguintes conclusões-

- Galgamento e erosão interna no corpo ou na fundação da barragem são as causas com maior porcentagem de ocorrência;

- Em barragens de terra homogênea a erosão interna é a causa com maior ocorrência;
- Em barragens de terra com núcleo impermeável as falhas são mais atribuídas ao galgamento, sendo a erosão interna menos provável;
- Para barragens de terra homogênea os vertedores, as fundações e os taludes são locais com alto risco de galgamento;
- Em barragens com núcleo impermeável a erosão interna é um potencial risco nos locais de contato

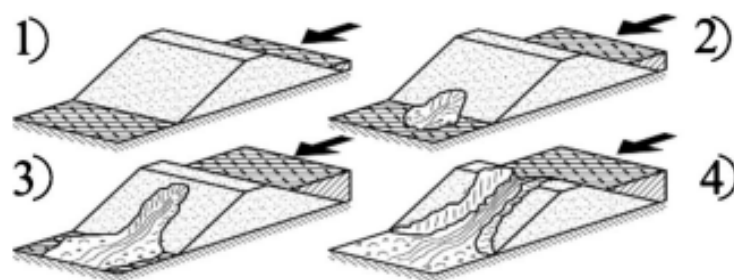
Sendo assim será descrito várias causas de ruptura de barragens colocando em ênfase o galgamento, erosão interna e o piping.

2.4.1 Erosão interna (“piping”)

Como foi notado nas Figuras 2 e 3 a erosão é a maior causa de rompimento de barragens, sendo que, a maior contribuição de dados para análise de barragens que sofreram erosão interna foram barragens antigas e barragens de pequeno porte com defeitos de construção (SHERARD et al. 1963).

O piping ocorre quando a água se infiltra pelo solo compactado ou pela fundação gerando forças erosivas que puxam as partículas do solo através da percolação da água formando um tubo ou um canal no interior da barragem. O canal aumenta suas dimensões à medida que a água percola pelo solo compactado incrementando também o caudal e o força erosiva fazendo que o canal ganhe maiores dimensões ocasionando a ruptura da barragem ((SHERARD et al. 1963) e ((JÓNTAS, 2013))). Esse processo é ilustrado na Figura 4.

Figura 4- Representação de uma ruptura através do “piping”



Fonte: GREGORETTI, MALTAURO E LANZONI (2010)

O pipping inicia quando as forças de resistência à erosão são menores que as forças erosivas. As forças de resistência dependem da coesão e da distribuição granulométrica do material da barragem. Sherard et al. (1963) apresentam uma relação empírica entre a resistência a erosão interna em barragens de terra com tipos de solo e métodos de construção (Tabela 6).

Tabela 5- Relação entre a resistência à erosão interna com tipos de solo e métodos de construção (Ordem decrescente de Resistência à erosão)

Nível	Característica do solo
1	Argila de alta plasticidade (P.I maior que 15%) bem compactada.
2	Argila de alta plasticidade (P.I maior que 15%) má compactada.
3	Mistura de areia e cascalho com pasta de argila de plasticidade média (P.I maior que 6%) bem compactada.
4	Mistura de areia e cascalho com pasta de argila de plasticidade média (P.I maior que 6%) má compactada.
5	Mistura coesa de cascalho, areia e silte (P.I menor que 6%) bem compactada.
6	Mistura coesa de cascalho, areia e silte (P.I menor que 6%) bem compactada.
7	Areia fina uniforme (P.I menor que 6%) bem compactada.
8	Areia fina uniforme (P.I menor que 6%) má compactada.

Fonte: Adaptado de SHERARD et al., 1963.

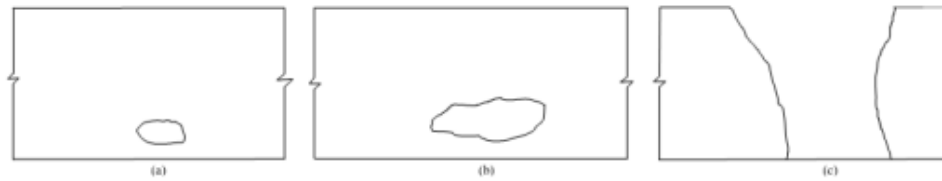
Nota-se na Tabela 6 que as características do material e a sua plasticidade tem maior influência na resistência à erosão interna da barragem do que o método pelo qual ele foi compactado.

Massad (2003) diz que os fatores condicionantes para o “piping” e a formação de brechas em barragens homogêneas são-

- Ausência de filtros horizontais, construídos com materiais permeáveis;
- As condições de compactação do solo;
- Ausência de transições adequadas entre materiais granulares;
- Presença de fundações arenosas.

A Figura 5 mostra o processo de abertura de brecha de uma barragem por “piping”.

Figura 5- Processo de abertura de brecha em uma barragem de terra por “piping”.
a) brecha inicial, b) brecha intermediária e c) momento final



Fonte: JOHNSON E P. (1976) apud JÓNATAS (2013)

2.4.2 Galgamento

Como foi visto na Figura 2 o galgamento é uma das maiores causas de ruptura de barragens no mundo inteiro. Esse fenômeno se dá quando o nível d'água no reservatório se eleva acima da cota da crista da barragem (normalmente devido a chuvas intensas), produzindo arraste de materiais com posterior ruptura em casos de barragem de terra e em barragens de concreto produz uma sobrecarga que pode submetê-la a ruptura (BRASIL, 2012).

Segundo Jónatas (2013), galgamento (Figura 6) em barragens de terra causa o corte em profundidade do coroamento e a erosão do material do talude de jusante produzindo à formação de uma área frágil fazendo que a barragem colapse localmente, podendo o processo de corte em profundidade evoluir até atingir a base da barragem. O mesmo diz ainda que, a localização da área frágil é incerta, mas é de prever que a ruptura inicie na área central da barragem porque geralmente é nela que o escoamento se concentra.

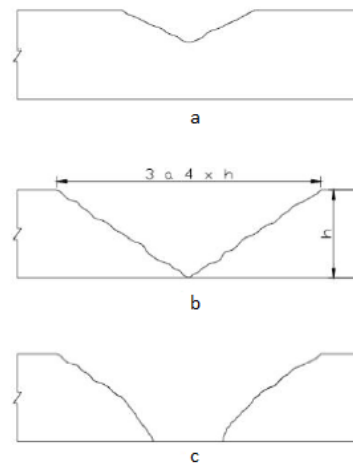
Figura 6- Galgamento em Barragem de Terra



Fonte: JÓNATAS (2013)

A Figura 7 mostra a evolução de uma brecha em uma barragem de terra ao sofrer ruptura por galgamento, sendo que essa evolução depende da duração do galgamento, das propriedades do material da barragem e das características do aterro (JÓNATAS, 2013). Segundo o mesmo autor a brecha terá preferencialmente no início uma forma triangular (Figura 7 (a)), se manter os níveis elevados da cheia, com o material menos resistente e a erosão expandindo lateralmente ela pode mudar da forma triangular para a forma trapezoidal. A extensão da erosão depende da dimensão do reservatório e o volume de água armazenado.

Figura 7- Evolução de uma brecha provocada por galgamento



Fonte: JÓNATAS (2013)

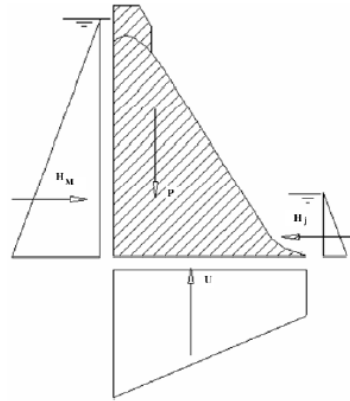
Nas barragens de concreto o galgamento causa uma sobrecarga quando a pressão exercida no parâmetro de montante atinge níveis não previstos no projeto, sendo importante então estimar de forma correta o valor da carga máxima (JÓNATAS, 2013).

2.4.3 Deslizamento

A ruptura por deslizamento ocorre quando áreas da barragem são transportadas para jusante, podendo deslizar tanto no corpo da barragem e na fundação. Segundo Atallah (2002) a principal razão do desequilíbrio de forças que provoca o deslizamento de uma barragem pode ser a subpressão causada pela água infiltrada na fundação da barragem. Uma das formas de evitar o deslizamento é a introdução de um sistema de drenagem de forma a diminuir a subpressão e também aumentar o peso da barragem.

A Figura 8 mostra as solicitações de uma barragem sendo H_f a pressão hidrostática a montante, H_j solicitação imposta a jusante pelo nível de água, P o peso da barragem e U a subpressão na fundação da barragem.

Figura 8- Solicitações de uma barragem de concreto (aumentar as letras legível)



Fonte: JÓNATAS (2013)

2.4.4 Derrubamento

Atallah (2002) diz que este tipo de ruptura é causado pelo desequilíbrio dos momentos que atuam sobre a estrutura. Esse tipo de ruptura acontece em barragens de concreto por serem estruturas rígidas fazendo com que se comportem como um corpo singular, porém em barragens de terra esse tipo de ruptura não acontece porque não são estruturas rígidas. Para que não aconteça esse tipo de ruptura deve haver um equilíbrio entre os momentos resistentes e os momentos que causam o derrubamento.

2.4.5 Relação entre o tipo de barragem e a forma de ruptura

A Tabela 7 mostra a relação existente entre os tipos de barragem com a forma de ruptura.

Tabela 6- Relação entre o tipo de barragem e a forma de ruptura

		Tipo de Barragem				
		Terra	Concreto	Arco	Arco com Contrafortes	Múltiplos Arcos
Forma de Ruptura	Piping	x	x	x	x	x
	Galgamento	x	x	x	x	x
	Deslizamento	x	x			
	Derrubamento		x	x	x	x

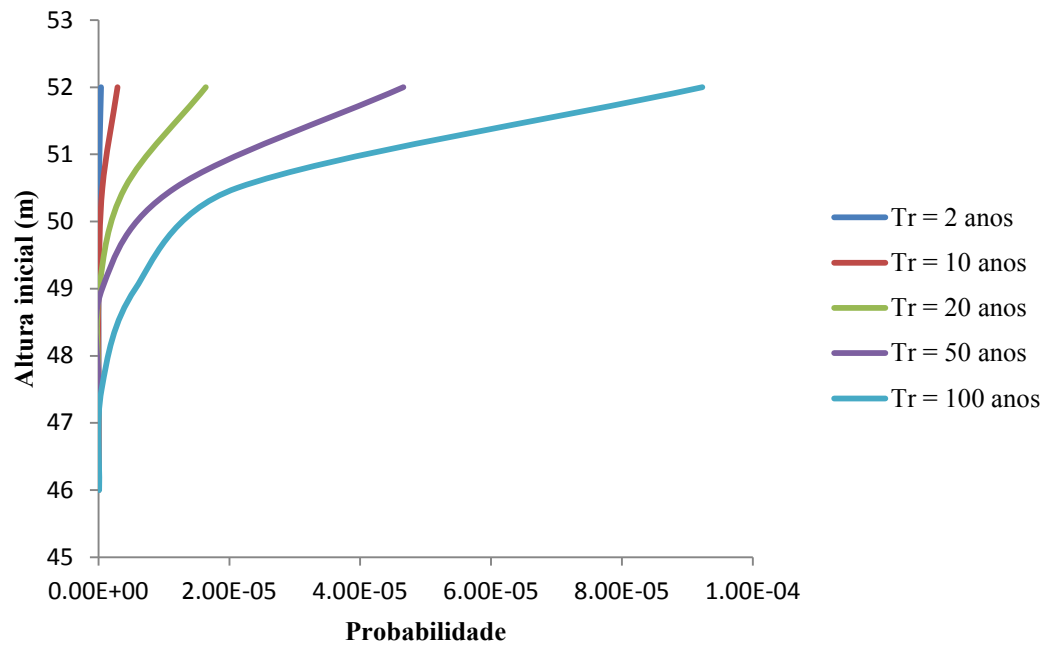
Fonte: Adaptado de ATALLAH, 2002.

Goodarzi, Shui e Ziaei (2012) apresentaram um artigo usando conceitos probabilísticos em barragens. No trabalho eles usaram a simulação Monte Carlo (MCS) e a amostragem hypercubo latino (LHS) para fazer as análises de incerteza. Eles usaram como estudo a barragem Meijaran que fica situada no norte do Irão. Eles dizem que a falha ocorre quando a solicitação é maior que a resistência à mesma e o conhecimento dessas duas incógnitas é um fator fundamental em análise de risco e depende do tipo de estrutura hidráulico e do problema físico.

O MCS é uma simulação que usa números aleatórios para modelar um processo desejado, ela fornece ao tomador de decisão uma gama de resultados possíveis e as probabilidades de ocorrências desses resultados. A amostragem hypercubo latino é uma técnica de redução de variância baseado no forte controle do processo de amostragem que consiste na estratificação da distribuição acumulada de probabilidade das variáveis de entrada da simulação em n partes de igual probabilidade (MALETTA, 2005).

As Figuras 9 e 10 mostram os resultados que eles tiveram para 5 tempos de retorno (2 anos, 10 anos, 20 anos, 50 anos e 100 anos)

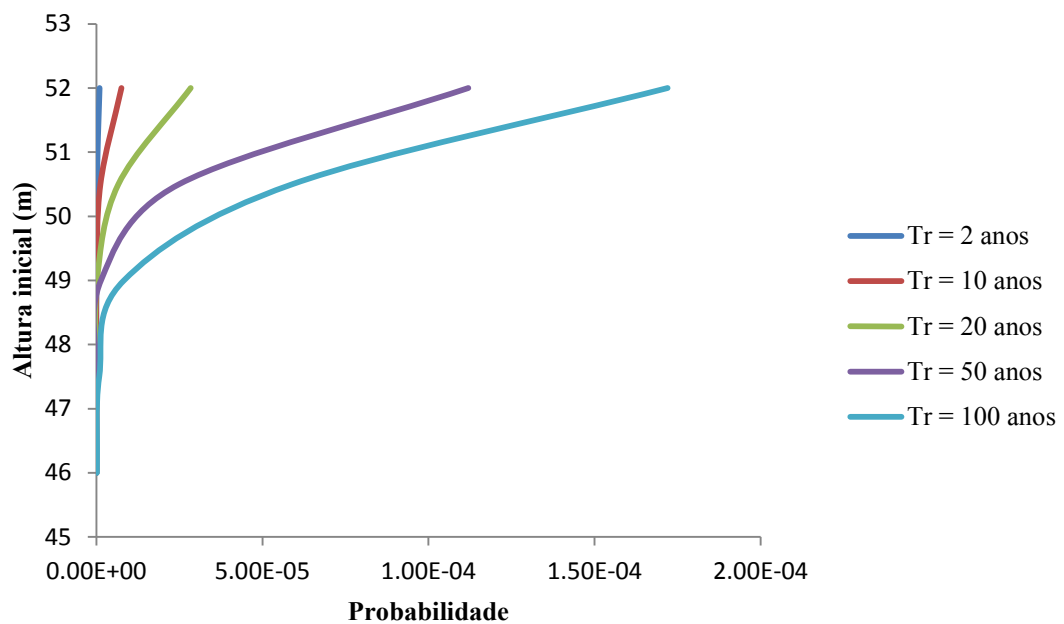
Figura 9 - Probabilidade de galgamento usando o MCS



Fonte: Adaptado de GOODARZI, SHUI e ZIAEI, 2012.

A Figura 10 mostra a probabilidade de galgamento usando o método hypercubo latino.

Figura 10- Probabilidade de galgamento usando o hypercubo latino



Fonte: Adaptado de GOODARZI, SHUI e ZIAEI, 2012.

2.5 EFEITOS AMBIENTAIS CAUSADOS POR BARRAGENS

TahmİscİoĖlu et al. (2016) e Atallah (2002) apresentaram em seus trabalhos vários efeitos ambientais causados pela construção e ruptura de barragens. Embora as barragens tenham uma enorme contribuição na economia de uma nação como irrigação, controle hidrológico, saneamento e geração de energia existem também os efeitos ou mudanças causadas por essas estruturas.

O principal efeito hidráulico causado por uma barragem é uma mudança na descarga da bacia em um reservatório estacionário em vez de um leito de rio.

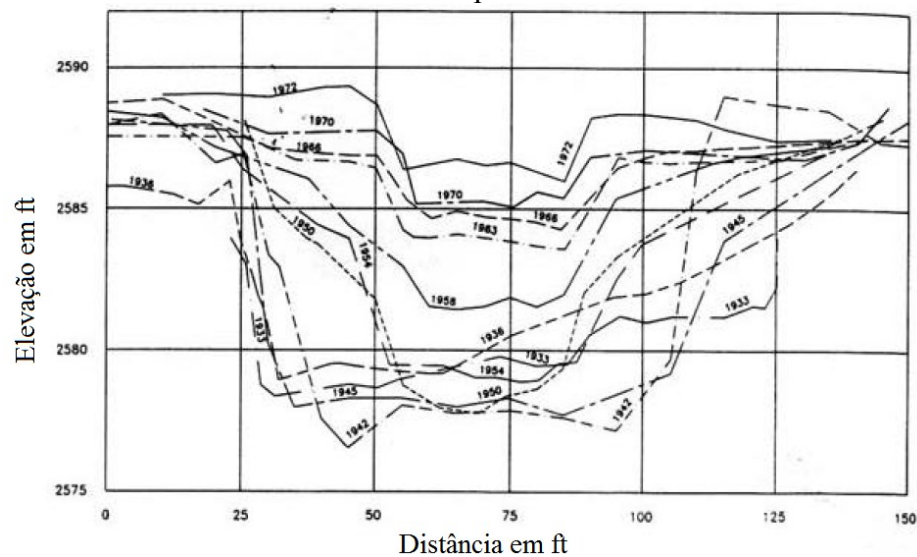
Instantaneamente, ocorre uma mudança na jusante na barragem porque enquanto a barragem acumula água o leito a jusante fica seco e durante este intervalo temporário que pode acontecer periodicamente o equilíbrio hidrológico pode entrar em colapso, aumenta a decadência da fauna e da flora. Apesar de, após este processo se formar um novo ecossistema, TahmİscİoĖlu et al. (2016) diz que não há chances do novo ecossistema voltar a saúde anterior.

Atallah (2002) fala que uma diminuição na vazão do rio pode causar alteração na seção do rio devido aos seguintes fatores:

- A baixa vazão no canal não é capaz de erodir os lados do canal;
- Os sedimentos transportados pelo canal irão coalescer e interferir como os lados do canal.

O mesmo autor diz ainda que pode haver mudança na profundidade do canal porque a baixa vazão não é capaz de transportar os sedimentos depositados no fundo do canal (Figura 11).

Figura 11- Alteração de uma seção de um rio a jusante de uma barragem com o decorrer do tempo



Fonte: ATALLAH, 2002.

Essa alteração na seção do rio é um efeito negativo porque se houver uma vazão que o canal não possa suportar vidas humanas próximas do rio podem ser afetadas.

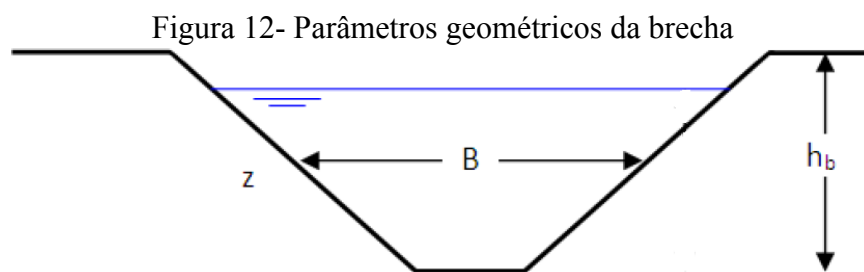
No sistema atmosférico há alterações no microclima da região como variações na porcentagem de umidade, temperatura e o movimento de ar. Essas alterações podem não ser prejudiciais à saúde humana, porém são notáveis por muitas plantas e animais ((TAHMİSCİOĞLU et al., 2016), (ATALLAH, 2002))

2.6 INFLUÊNCIA DA BRECHA DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM NO HIDROGRAMA DE CHEIA A JUSANTE.

Costa (1985) diz que a estimativa das características do rompimento hipotético de uma barragem, a determinação da vazão de pico e a propagação dessa vazão para jusante permanecem uma arte imprecisa sendo que a diversidade de tipos de barragens, de mecanismos de falhas, de sedimentos e morfologia do rio a jusante fazem com que os impactos no rio, erosões e deposições sejam meramente especulativos. Um ponto torna-se claro, entretanto: a habilidade para estimar a hidrologia, a hidráulica e a geomorfologia de todos os tipos de rompimentos de barragens está fundamentada em nosso conhecimento de eventos históricos e em medições e observações apropriadas.

Sendo assim, é de suma importância o conhecimento do desenvolvimento do processo de ruptura de uma barragem desde a formação da brecha até a propagação da onda de cheia que se formará a jusante, proporcionando a elaboração de planos de ações emergenciais, reduzindo os danos que possam ocorrer devido à ruptura da barragem. Uma das principais informações fornecidas pela simulação da ruptura da barragem é o nível de água a jusante, informação com a qual se torna possível definir a área atingida pela onda formada devido à ruptura. A estimativa do nível de água a jusante, provocado pela propagação da onda de cheia, possibilita definir a área a ser atingida.

A brecha de ruptura de uma barragem (Figura 12) é a área no corpo da barragem pela qual passa a água armazenada no reservatório durante o fenômeno de ruptura



Fonte: AUTOR, 2017

Os principais parâmetros geométricos que definem a geometria da brecha são-

- Profundidade da brecha (h_b)- É a distância vertical correspondente entre a base inferior da brecha, após a sua completa formação, e a crista da barragem.
- Largura média da brecha (B)- É a largura da base média da brecha após a sua completa formação.
- Declividade dos taludes laterais (z)- Caracterizam e descrevem a forma de abertura da brecha.

Além dos parâmetros geométricos existe também o tempo de formação da brecha de ruptura, que é o intervalo de tempo entre o iniciou da formação da brecha e a sua formação completa. O tempo de formação da brecha de ruptura descreve a evolução temporal da brecha.

2.6.1 Influência dos parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura

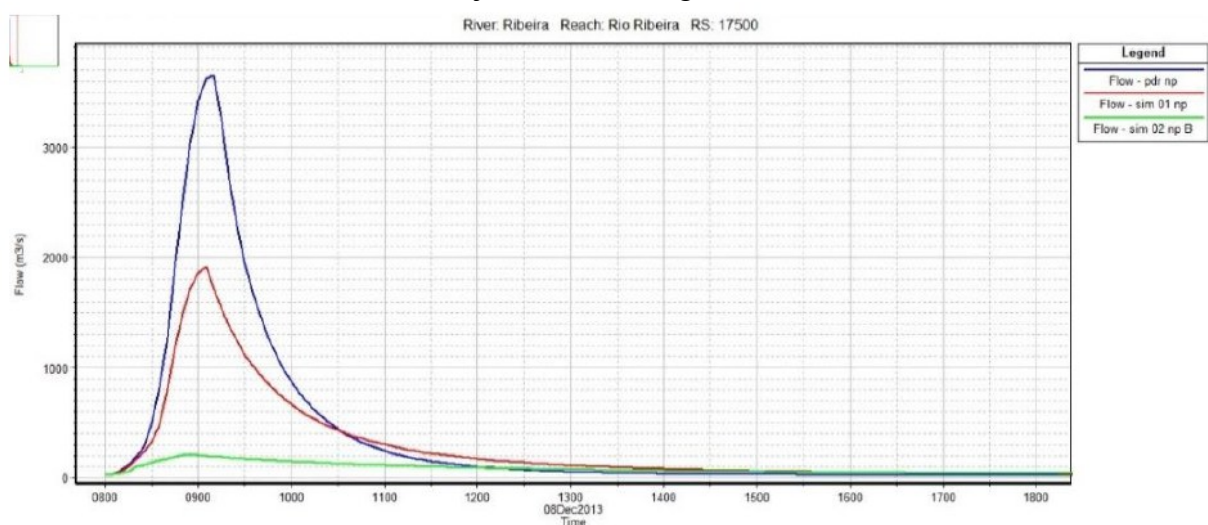
Gomes et al. (2015) fizeram um estudo que consistiu na: caracterização da área de estudo; determinação das seções transversais do trecho a jusante da barragem; estabelecimento das equações de formação da brecha; determinação do tempo de formação da brecha; estabelecimento de cenários de ruptura da barragem; e propagação do hidrograma de cheia a jusante, devido a ruptura da barragem.

A área de estudo foi a PCH Arrieiros, localizada no Rio Ribeira do Iguape (Estado). O complexo é composto por uma barragem em terra na margem direita. Na margem esquerda encontra-se a estrutura do vertedouro, em soleira livre, circuito de geração, túnel de desvio do rio e um trecho de barragem em concreto. O vertedouro irá operar a fio d'água, com a formação de um reservatório que terá uma área inundada de 1,06 km², sendo que deste total subtrai-se 0,24 km² da área da calha do rio, resultando assim uma área inundada total de 0,82 km², com um volume de 12.820.000 m³ de água armazenada.

Gomes et al. (2015) definiram um cenário padrão para realizar um estudo comparativo da influência de cada parâmetro de formação da brecha de ruptura sobre vazões e níveis de água a jusante da barragem e a partir desse cenário variaram-se parâmetros como: altura da brecha de ruptura, altura inicial do “piping”, largura final da base inferior da brecha, declividade das paredes laterais da brecha e a progressão da brecha.

A primeira análise feita foi da influência da cota da base inferior da brecha conforme mostra a Figura 13. Eles analisaram três cenários, sendo que a cota da base inferior da brecha aumenta ($Z_{\text{padrão}} = 422,50$, $Z_{\text{cenário01}} = 431,50$ e $Z_{\text{cenário02}} = 440,50$).

. Figura 13- Influência da cota da base inferior da brecha no hidrograma de cheia a jusante da barragem



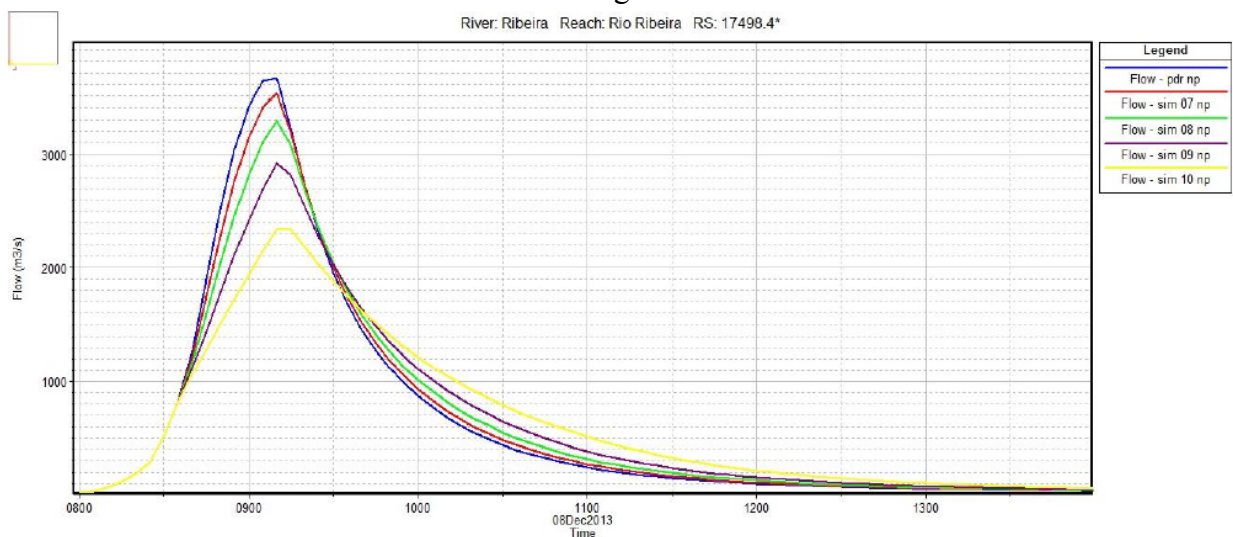
Fonte: GOMES et al.,2015.

Nota-se na Figura 13 que com o aumento da cota da base inferior da barragem a vazão de pico diminui. Isso acontece devido ao volume de material erodido ser maior quanto menor for a cota, o que aumenta também o tempo de formação da brecha causando uma maior vazão a jusante.

Gomes et al. (2015) analisaram também a influência da largura da base inferior da brecha. Eles variaram a largura da base inferior em três cenários: padrão ($w_b = 14\text{m}$), cenário 05 ($w_b = 7\text{m}$) e cenário 06 ($w_b = 21\text{m}$), porém notaram que as variações da largura da base inferior não impactaram significativamente nas variáveis analisadas.

A influência da declividade das paredes laterais foi analisada em cinco cenários: padrão (2-1), cenário 07 (1,5-1), cenário 08 (1-1), cenário 09 (0,5-1) e cenário 10 (0-1). Os resultados obtidos estão na Figura 14.

Figura 14- Influência da declividade das paredes laterais no hidrograma de cheia a jusante da barragem



Fonte: GOMES et al.,2015.

Com a Figura 14 nota-se que o aumento da declividade das paredes laterais aumenta a vazão de pico a jusante da barragem. Isso se dá devido a maior área da brecha final.

Com todas as análises viram que três parâmetros são mais sensíveis em relação aos demais na variação de vazões e níveis de água no trecho em estudo. Os parâmetros foram: a elevação da base da brecha (Z_{base}) e a variação da inclinação lateral da brecha.

2.6.2 Influência de equações empíricas definidoras de parâmetros de brechas

Há numerosos métodos para prever os parâmetros de brecha que servem como dados de entrada para uma análise do rompimento de barragens. Segundo Ferreira e Andrzejewski (2015) três abordagens básicas podem ser identificadas: análise comparativa de casos similares, o uso de equações empíricas baseadas em casos históricos e o uso de um modelo de rompimento com embasamento físico, que usa princípios de hidráulica e transporte de sedimentos para simular o desenvolvimento da brecha.

Foram reunidas equações empíricas de diversos autores que estimam parâmetros definidores da formação de brecha e vazão de pico com base em estatísticas históricas ((COSTA (1985)) e (WAHL (1998))). Na Tabela 8 são apresentadas algumas equações.

Tabela 7- Equações empíricas para dimensões de brecha e vazão de pico

Autores	Largura média (m)	Tempo de formação (h)	Vazão de pico (m³/s)
Froehlich (1995)	$B = 0,1803K_0V_w^{0,32}h_b^{0,19}$	$t_f = 0,00254V_w^{0,53}h_b^{-0,9}$	$Q_P = 0,607K_0V_w^{0,295}h_b^{1,24}$
Von Thun e Gillette (1990)	$B = 2,5h_w + C_b$	$t_f = B/4h_w$ $t_f = B/(4h_w + 61)$	-
Hagen (1982) McDonald e Langridge	-	-	$Q_P = 325(V_w h_w^{-0,6})^{0,42}$
Monopolis (1984)	-	$t_f = 0,0179V_{er}^{0,364}$	$Q_P = 1,154(V_w h_w)^{0,412}$
Bureau of Reclamation (1988)	$B = 3h_w$	$t_f = 0,011B$	$Q_P = 19,1h_b^{1,85}$
Kirkpatrick (1977) Soil Conservation Service (1981)	-	-	$Q_P = 1,268(h_w + 0,3)^{2,5}$ $Q_P = 16,6h_w^{1,85}$

Fonte: Adaptado de COSTA (1985) e WAHL (1998).

Em que-

B = largura média da brecha (m);

C_b = Coeficiente empírico característico do material;

h_b = Altura da brecha (m);

h_w = altura de água acima do fundo da brecha (m);

K_o = Coeficiente empírico dependente do tipo de material ($k_0=1,4$ para galgamento e $k_0=1,0$ para outros casos) ;

Q_p = Vazão de pico (m^3/s);

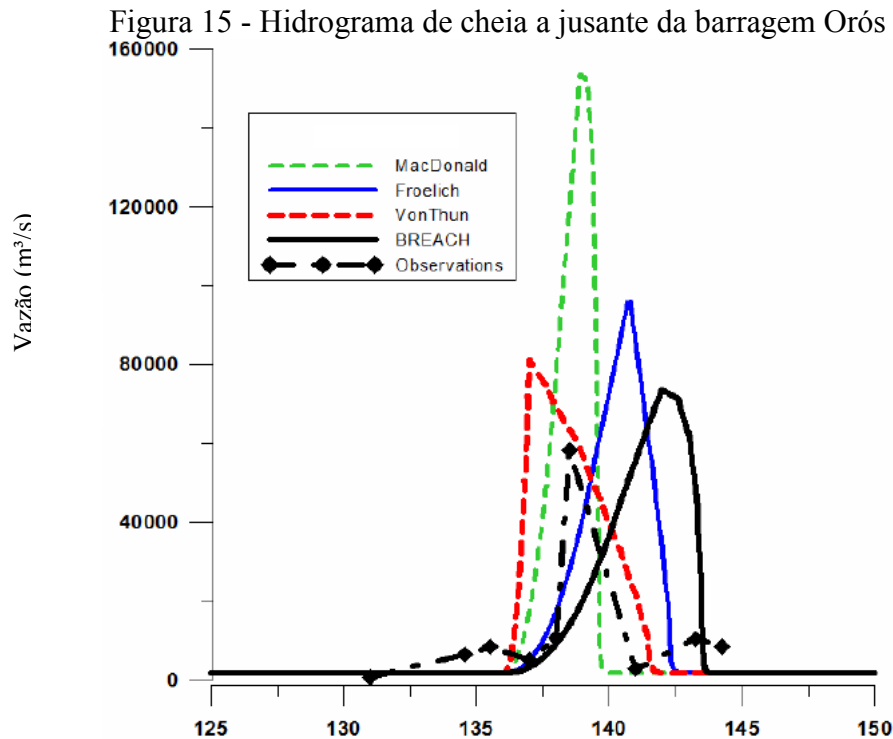
t_f = Tempo de formação da brecha (h);

V_w = Volume de água acima da brecha (m^3);

V_{er} = Volume de material erodido (m^3);

V_{out} = Volume de água descarregado através da brecha (m^3).

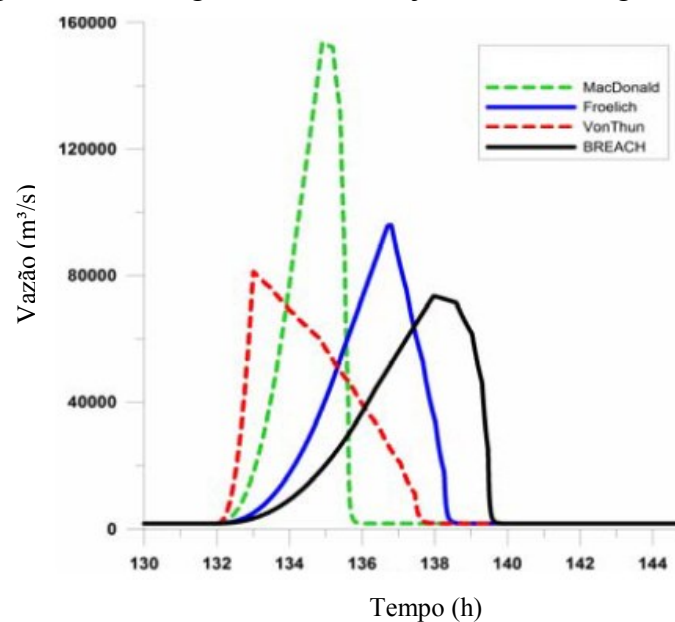
Gee (2008) analisou equações empíricas em duas barragens utilizando o modelo Hec-Ras no regime não permanente. A primeira barragem que ele analisou foi a Barragem Orós localizada no Brasil, estado do Ceará, que rompeu por galgamento em 1960. A barragem consistia de um maciço zoneado com núcleo argiloso. A Figura 15 mostra o hidrograma de cheias à jusante da barragem.



Fonte: Adaptado de GEE, 2008.

Nota-se na Figura 15 que a vazão de pico encontrada com a formulação empírica de MacDonald foi muito maior em relação às outras formulações. Gee (2008) analisou também a Barragem Banqiao localizada na china que rompeu por galgamento em 1975, resultado das fortes chuvas causadas pelo Tufão Nina causando morte de 200.000 pessoas. A Barragem era de terra com núcleo de argila. A Figura 16 mostra o hidrograma de cheias à jusante da barragem.

Figura 16 - Hidrograma de cheia a jusante da barragem Banqiao



Fonte: Adaptado de GEE, 2008.

Semelhante ao hidrograma mostrado na Figura 15, o hidrograma da Figura 16 mostra a equação de MacDonald com uma maior vazão de pico.

Ferreira e Andrzejewski (2015) simularam a ruptura de uma barragem hipotética por galgamento e piping, com seção trapezoidal simples de: altura máxima = 50 m; elevação da crista = EL.50 m; comprimento da crista = 1.000 m; largura da crista = 7 m; trecho reto do fundo = 800 m; e paramentos de jusante e montante = 1/1,75. Núcleo de argila da elevação da crista até a fundação, com 5 m de largura na crista e 80 m de largura na base (máxima), resultando em taludes de montante e jusante = 1/0,75.

Eles usaram equações empíricas e o modelo Breach que é baseado em princípios de hidráulica, transporte de sedimentos, mecânica dos solos, propriedades geométricas e do material da barragem, volume do reservatório, curva de descarga do vertedouro e vazões afluentes ao reservatório. A barragem foi simulada com uma descarga de 20.000 m³/s. A Tabela 9 mostra os resultados obtidos nas diversas simulações feitas.

Tabela 8 - Resultados obtidos por Ferreira e Andrzejewski (2015) através de equações empíricas

Autores	Largura média da Brecha (m)	Tempo de formação da brecha (h)	Vazão de pico (m³/s)
Equações empíricas – Piping			
Froehlich (1995)	110	0,9	34.491
Von Thun e Gillette (1990)	177	0,7	-
Hagen (1982)	-	-	28.617
McDonald e Langridge-Monopolis (1984)	-	2,6	28.522
Bureau of Reclamation (1988)	147	1,6	46.554
Kirkpatrick (1977)	-	-	41.639
Soil Conservation Service (1981)	-	-	42.232
Equações empíricas - Galgamento			
Froehlich (1995)	154	0,9	40.288
Von Thun e Gillette (1990)	177	0,7	-

Hagen (1982)	-	-	28.617
McDonald e Langridge-Monopolis (1984)	-	14,4	28.522
Bureau of Reclamation (1988)	147	1,6	46.554
Kirkpatrick (1977)	-	-	41.639
Soil Conservation Service (1981)	-	-	42.232
Modelo computacional - Piping			
	49,5	2,1	63.875
Modelo computacional - Galgamento			
	452	112	158.650

Fonte: FERREIRA E ANDRZEJEWSKI, 2015.

Notaram-se entre os resultados das fórmulas empíricas, valores iguais para os casos de piping e galgamento, pois autores não diferenciam tais fenômenos. O valor mais alto estimado da largura média da brecha, para o caso do piping e galgamento, é 3,1 vezes o menor valor estimado. O tempo mais longo estimado de formação da brecha, para o caso do piping, é 3,7 vezes o menor valor estimado; e no caso de galgamento é 20,6 vezes o menor valor estimado.

O pico de vazão defluente estimado mais alto, para o caso do piping, é 1,6 vezes o menor valor estimado; e para o caso de galgamento é 1,5 vezes o menor valor estimado.

Entre os resultados apresentados pelo BREACH notou-se que os valores de vazão de pico, nos casos de piping e galgamento, e o tempo de formação da brecha no caso do galgamento, foram bastante superiores em relação às fórmulas empíricas.

2.7 MODELAGEM DE RUPTURA DE BARRAGENS USANDO HEC-RAS

Xiong (2011) e Ackerman, P.e. e Brunner (2016) publicaram artigos que se tornaram relevantes para a referente pesquisa abordando o tema que é desenvolvida na pesquisa. Eles modelaram a ruptura de uma barragem e apresentaram os resultados de forma diferente.

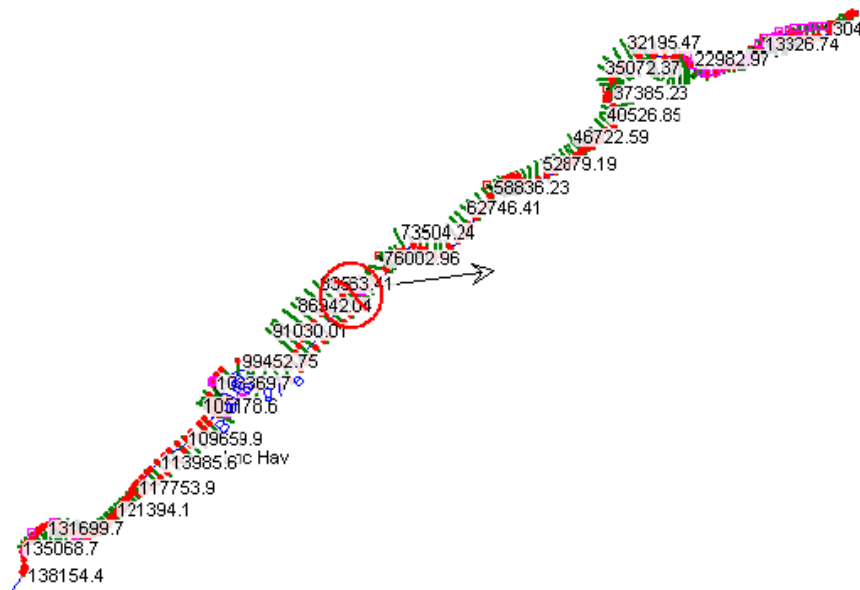
O objeto de estudo de Xiong (2011) e Ackerman, P.e. e Brunner (2016) foi a barragem Foster Joseph Sayers na Pensilvânia – Estados Unidos da América.

Xiong (2011) simulou três cenários para as condições da máxima vazão provável: “sem a barragem”, “ruptura de barragem” e “sem ruptura”. Foi considerado como forma de ruptura o piping assumindo que ela inicia na cota 660 e foi considerado regime permanente variado.

Diferente de Xiong (2011), Ackerman, P.e. e Brunner (2016) relatam como fizeram a modelagem hidráulica do rio que aflui para a barragem. A modelagem foi feita com uso do HEC- Geo RAS que é uma interface do Hec-Ras no Arc Gis para fazer o mesmo e pode ser exportado para o Hec-Ras para modelar a barragem, fazer a simulação e obter os resultados.

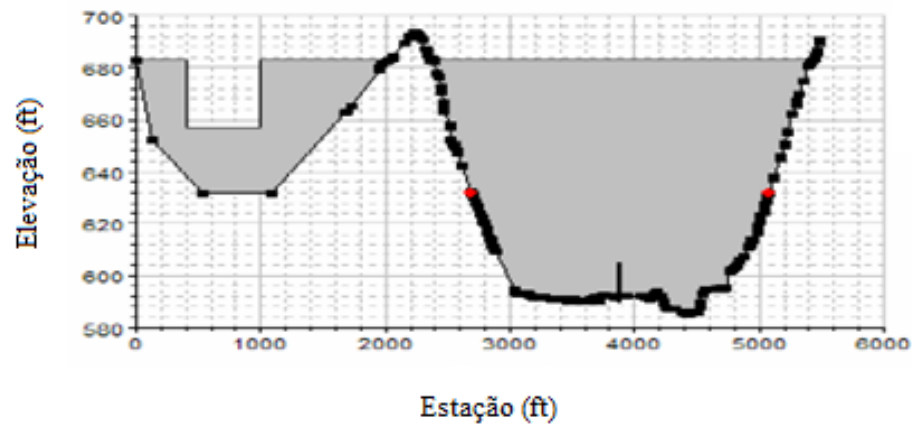
A Figura 17 ilustra as seções no rio e a Figura 18 mostra a seção transversal da barragem modelada no Hec-Ras.

Figura 17- Modelagem do rio bald eagle creek no Hec-Ras



Fonte: Adaptado de XIONG, 2011.

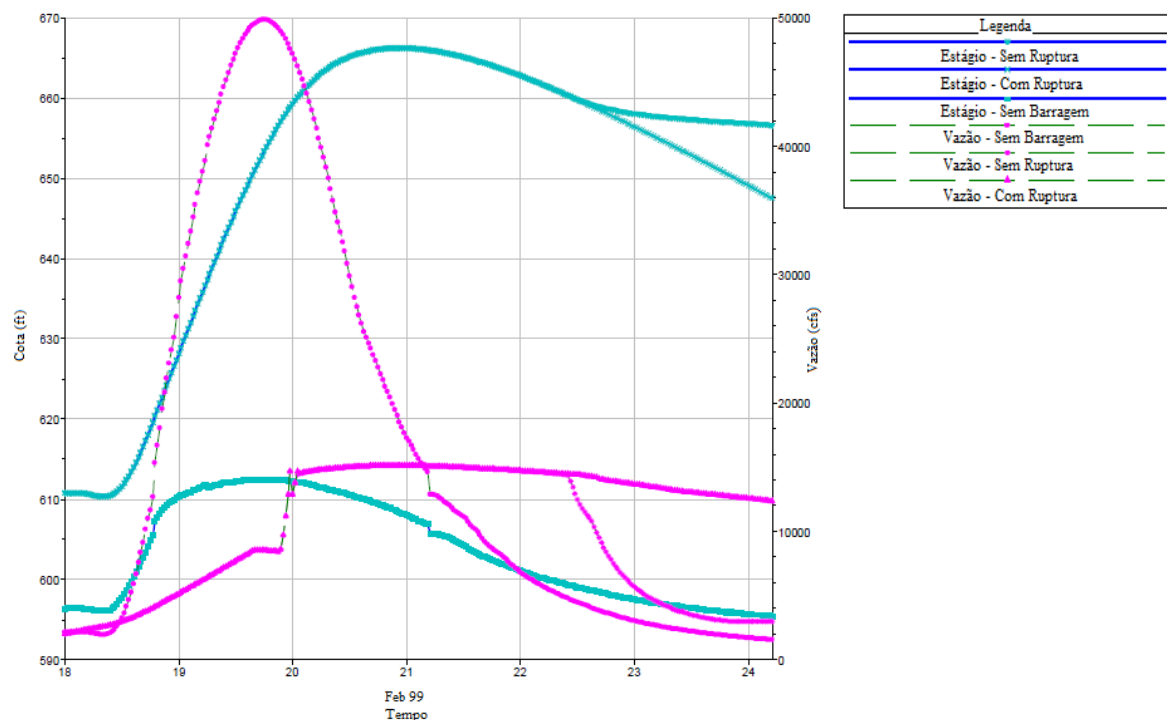
Figura 18- Seção transversal da barragem Faster Joseph Sayers modelada no Hec-Ras



Fonte: Adaptado de XIONG, 2011 e ACKERMAN, P.E. E BRUNNER, 2016.

A Figura 19 apresenta um dos resultados de Xiong (2011) em uma seção imediatamente a montante da barragem, ou seja, que indica as condições do reservatório.

Figura 19- Resultados de Seção imediatamente a montante da barragem



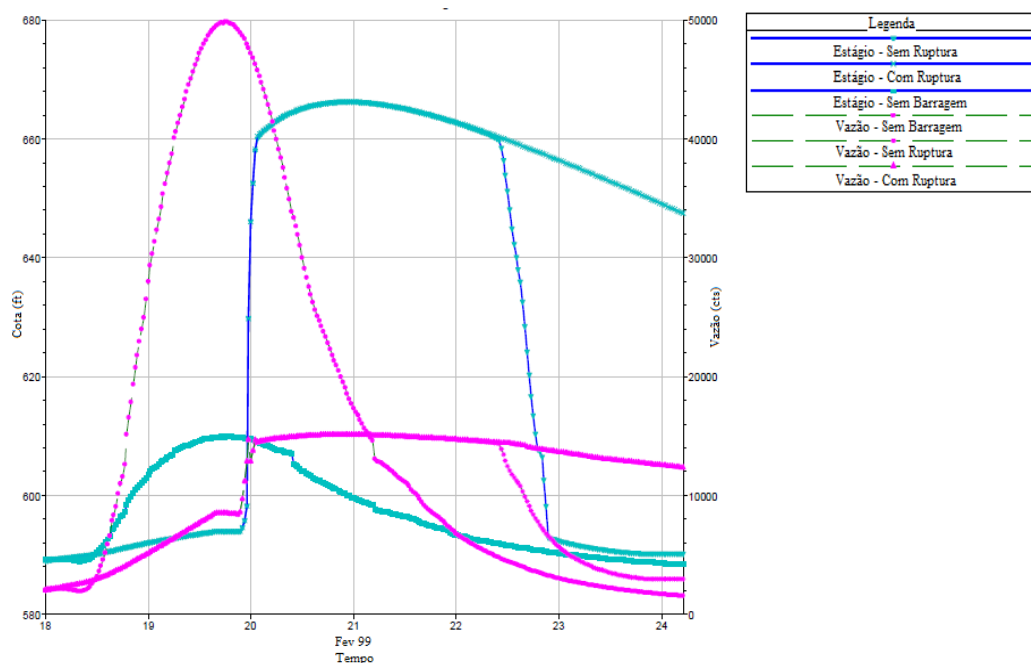
Fonte: Adaptado de XIONG, 2011.

Nota-se que a vazão de pico é atenuada nos cenários “sem ruptura” e “com ruptura”, enquanto que, no cenário “sem barragem” assume valores menores. Antes da data 22 Fevereiro de 99 a cota e a vazão estão sobrepostas nos cenários “com ruptura” e “sem ruptura”, sendo que, após isso a vazão no cenário “sem ruptura” cai rapidamente e a cota

do cenário “com ruptura” é menor que a cota no cenário “sem ruptura” indicando um esvaziamento significativo no cenário “com ruptura” (XIONG, 2011).

A Figura 20 ilustra os resultados de uma seção imediatamente a jusante da barragem, onde a vazão e a cota caem drasticamente no cenário “sem ruptura” após 22 de Fevereiro de 1999 comparado com o cenário “com ruptura”. Nota-se que no cenário “com ruptura” o período de maior cota permanece por maior período de tempo o que enfraquece a resistência da barragem e aumenta a brecha causando a ruptura (XIONG, 2011).

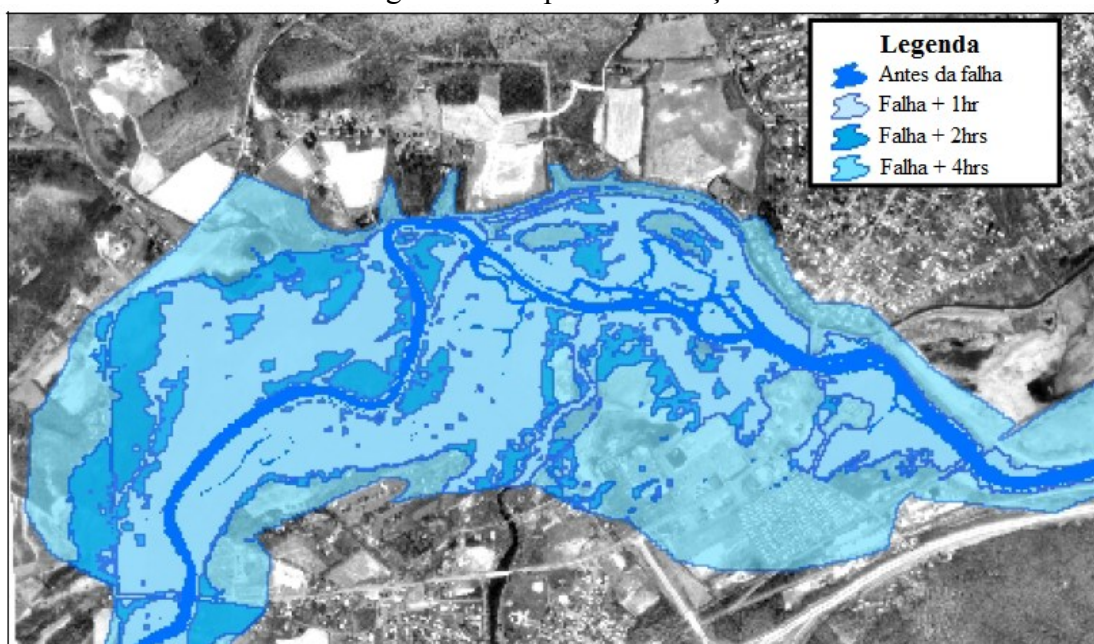
Figura 20: Resultados de uma seção imediatamente a jusante da barragem



Fonte: Adaptado de XIONG, 2011.

Para o mesmo objeto de estudo Ackerman e Brunner (2016) apresentaram uma mapa de inundação (Figura 21) mostrando as áreas afetadas com a ruptura da barragem.

Figura 21- Mapa de Inundação



Fonte: Adaptado de ACKERMAN E BRUNNER, 2016.

Tanto Xiong (2011) e Ackerman e Brunner (2016) deixam claro a importância da avaliação da ruptura de barragens com o uso da ferramenta Hec-Ras podendo modelar hidraulicamente o rio, a barragem e o com uso de GIS associado a essas ferramentas pode-se obter informações das consequências podendo antecipar criando ações de mitigação.

Pereira et al (2017) comparam os modelos simplificados e o modelo Hec-Ras no estudo de áreas de inundação para algumas barragens situadas no Estado de Minas Gerais. Os modelos simplificados apresentados são: MS-20S e o MS-50S desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Portugal (LNEC), que são baseadas em equações empíricas de estudos que permitem estimar a vazão máxima gerada em função da altura da barragem, do volume do reservatório ou da combinação de ambos. O MS-20S surgiu da necessidade de se analisar num curtíssimo intervalo de tempo mais de uma centena de barragens sob a jurisdição da Agência Nacional de Águas (ANA). Ela se baseia na definição de duas variáveis principais, a saber: vazão de pico e a distância máxima de cálculo.

O MS-50S surgiu da necessidade de adotar uma metodologia conceitualmente mais correcta para simular, o amortecimento do escoamento da onda de cheia a jusante da barragem. Ele usa o método de Muskingam-Cunge para simular a propagação da onda da cheia a jusante da barragem. Esse método não necessita de dados hidrológicos para a sua calibração e as informações necessárias para iniciar os cálculos são de fácil obtenção.

Pereira et al (2017) simularam 28 barragens, no caso do modelo MS-20S, 8 barragens no caso do modelo MS-50S que representam apenas aquelas onde existem a jusante aglomerados com mais de 100 edificações, respectivamente as UHE Machado Mineiro e Cajuru bem como as PCH Peti, Ivan Botelho III, Areia Branca, Pipoca, Brito e Melo Viana e 3 barragens (representando reservatórios de três tipos: grande, médio e pequeno volume armazenado) no caso do modelo HEC-RAS. A Tabela 10 mostra a comparação entre as áreas de inundação obtidas pelos modelos MS-20S e MS-50S com 20 seções transversais.

Tabela 9 – Comparação entre as áreas de inundação obtidas pelos modelos simplificados MS-20S e MS-50S

Barragem	Volume do Reservatório (hm³)	MS-20S (km²)	MS-50S (km²)
UHE Machado Mineiro	202,16	30,062	35,107
UHE Cajuru	192,70	42,864	52,500
PCH Peti	43,58	9,025	8,710
PCH Ivan Botelho III	18,05	4,297	4,566
PCH Areia Branca	8,49	2,337	2,429
PCH Pipoca	8,20	2,252	2,363
PCH Brito	2,55	1,791	1,819
PCH Melo Viana	1,27	1,218	1,347

Fonte: Adaptado de PEREIRA, et al (2017)

Nota-se na Tabela 10 que o modelo MS-50S gerou maiores áreas de inundação para os mesmos objetos de estudo. A Tabela 11 apresenta a comparação entre os modelos MS-50S (com 50 seções) e o Hec-Ras para três barragens.

Tabela 10 - Valores das áreas de inundação obtidas pelo modelo simplificado MS-50S e pelo modelo

Barragem	Hec-Ras (km²)	MS-50S (km²)
UHE Machado Mineiro	47,925	60,117
PCH Peti	24,132	31,098
PCH Areia Branca	8,657	11,538

Fonte: Adaptado de PEREIRA, et al (2017)

Nota-se na Tabela 11 que o modelo MS-50S apresentou também maior área de inundação que o modelo Hec-Ras.

2.8 ZONEAMENTO DE RISCO

Além de obter o mapa de inundação através de recursos de cartografia, se podem fazer também estudos do zoneamento de risco. Esse processo consiste na divisão do território potencialmente atingido pela onda de cheia, sendo classificada segundo os riscos envolvidos, a magnitude do dano, a vulnerabilidade e os tempos de alerta envolvidos (BALBI, 2008).

Almeida (2001) lista as principais características hidrodinâmicas envolvidas em um zoneamento:

- Áreas atingidas (determina quais elementos em risco serão afetadas, população, estruturas, etc);
- Cotas máximas dos níveis d'água ou alturas máximas;
- Instante de chegada da onda de cheia;
- Instante de chegada da altura máxima;
- Grau de perigo em função da velocidade e altura ($V \times H$), em m^2/s ;
- Velocidade máxima do escoamento.

O tempo entre a identificação da emergência e a chegada da onda de cheia nos locais habitados é o primeiro parâmetro para a classificação da área de risco. O tempo eficaz de aviso permite com que as pessoas preparem a mobilização e a evacuação das zonas mais sensíveis, sendo este o fator primordial para a mitigação do efeito das cheias. A USBR (1999) adotou um critério para estimar a perda de vidas em função do tempo de alerta (Tabela 12).

Tabela 11 – Número esperado de vítimas em função do tempo de alerta.

Tempo de aviso (min)	Perda de vidas	Número esperado de vítimas
0 a 15	Significante	NEV= 50% no número de pessoas em risco
15 a 90	Potencialmente significativa	NEV= (número de pessoas em risco) ^{0,6}
Mais de 90	Perda de vidas virtualmente Eliminada	NEV= 0.0002 x número de pessoas em risco

Fonte: Adaptado de USBR, 1999.

Segundo Júnior (2013) a importância de uma submersão se deve à capacidade da cheia de provocar danos às pessoas, edificações e aos bens. Os principais parâmetros para classificar os danos são: a área atingida, a profundidade da cheia (H) e a sua velocidade de

propagação (V). A ameaça provocada por esses fatores combinados corresponde ao Risco hidrodinâmico calculado pela Equação 2.

$$\text{Risco hidrodinâmico} = H \times V \quad (2)$$

Em que:

Risco hidrodinâmico = m^2/s

H = profundidade (m);

V = velocidade do fluxo (m/s)

Synaven *et al.*, (2000) fez um estudo com o objetivo de estabelecer valores para os quais as cheias provocam danos. Eles realizaram simulações com pessoas e modelos físicos de edificações para tentar obter o grau de perigo de uma inundação como mostra a Tabela 13.

Tabela 12 – Consequências do Risco Hidrodinâmico

Risco Hidrodinâmico (m^2/s)	Consequências
<0,5	Crianças e deficientes são arrastados
0,5 – 1	Adultos são arrastados
1 – 3	Danos de submersão em edifícios e estruturais em casas fracas
3 – 7	Danos estruturais em edifícios e possível colapso
> 7	Colapso de certos edifícios

Fonte: Adaptado de SYNAVEN, 2000.

Viseu (2006) estabeleceu critérios para graduação do risco em função da profundidade e da velocidade. Considera-se o fato de que na área inundada existam edificações para proteção das pessoas em diferentes profundidades. Este é o princípio de evacuação vertical, em que se considera que as pessoas podem se deslocar para pavimentos superiores na tentativa de evitar a cheia. As Tabelas 14 e 15 mostram essas graduações.

Tabela 13 – Nível de perigo para seres humanos

Nível	Classe	Inundação Estática (H)	Inundação Dinâmica ($H \times V$)
Reduzido	Verde	< 1 m	< 0,5 m^2/s
Médio	Amarelo	1 m – 3 m	0,5 m^2/s – 0,75 m^2/s
Importante	Laranja	3 m – 6 m	0,75 m^2/s – 1,0 m^2/s
Muito Importante	Vermelho	> 6 m	> 1,0 m^2/s

Fonte: Adaptado de VISEU, 1998

Tabela 14 – Nível de perigo para edificações

Nível	Classe	Inundação Dinâmica (HxV)	Velocidade (V)
Reduzido	Verde	$< 3 \text{ m}^2/\text{s}$	$< 2 \text{ m/s}$
Médio	Amarelo	$3 \text{ m}^2/\text{s} - 5 \text{ m}^2/\text{s}$	$2 \text{ m/s} - 4 \text{ m/s}$
Importante	Laranja	$5 \text{ m}^2/\text{s} - 7 \text{ m}^2/\text{s}$	$4 \text{ m/s} - 5,5 \text{ m/s}$
Muito Importante	Vermelho	$> 7 \text{ m}^2/\text{s}$	$> 5,5 \text{ m}^2/\text{s}$

Fonte: Adaptado de VISEU, 1998

METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do trabalho é a bacia hidrográfica do rio Tijuco. Segundo Santos e Baccaro (2004) o rio está localizado no Triângulo Mineiro entre as coordenadas geográficas 18°40' e 19°47' S e 47°53' a 50°13' W, tem sua nascente no município de Uberaba-MG, em uma cota altimétrica de 950 m, e deságua no Rio Paranaíba em uma cota altimétrica de 526 m.

A bacia hidrográfica do rio Tijuco tem área de 14.249,05 km², comprimento de 250 km de comprimento percorrendo os municípios de Uberaba-MG, Uberlândia-MG, Veríssimo-MG, Monte Alegre de Minas-MG, Campina Verde-MG, Prata-MG e Ituiutaba-MG e tem como principal afluente o Rio da Prata ((SANTOS; BACCARO, 2004); (SCARPARO; MAMEDE; SILVA, 2016)).

3.2 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo do trabalho é a usina hidroelétrica Salto Moraes (Figura 22). A usina é de propriedade da CEMIG e está localizada no Rio Tijuco, afluente do Rio Paranaíba, no município de Ituiutaba-MG ((CACHAPUZ; LAMARÃO; MARTINS, 2005); (SCARPARO; MAMEDE; SILVA, 2016)).

Figura 22- Usina Hidrelétrica Salto Moraes

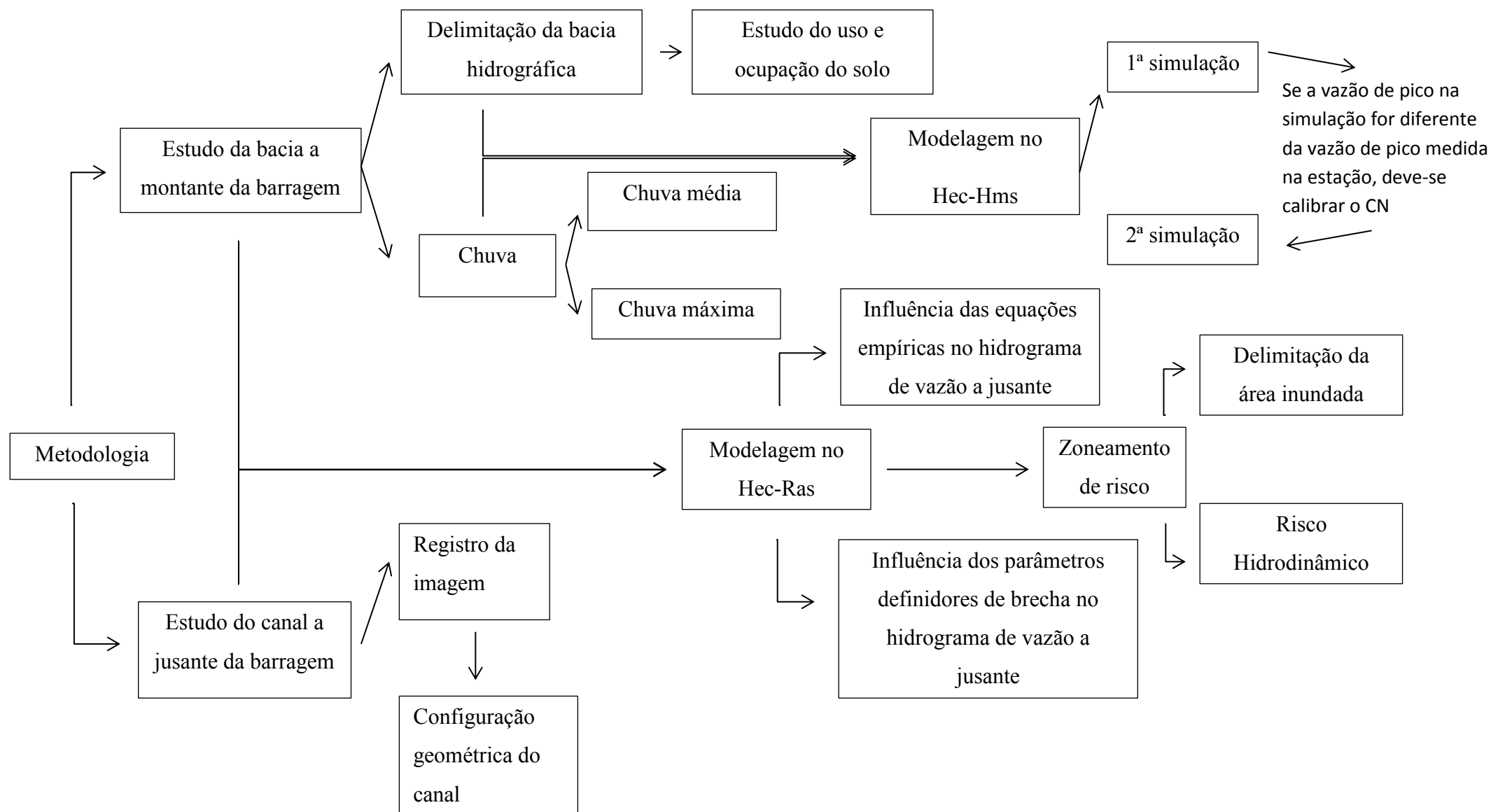


Fonte: Adaptado de CACHAPUZ, LAMARÃO E MARTINS, 2005.

A barragem é do tipo concreto gravidade, altura de 8m e a cota do coroamento é 511,04 m. A usina tem uma potência instalada de 2,4 MW, 2 unidades geradoras, turbina Kaplan, nela é feita captação de água e fornece energia elétrica ao município de Ituiutaba-MG ((CACHAPUZ; LAMARÃO; MARTINS, 2005); (SCARPARO; MAMEDE; SILVA, 2016)).

A Figura 23 mostra o fluxograma da metodologia do trabalho.

Figura 23 - Fluxograma da metodologia



3.3 ESTUDO DO CANAL A JUSANTE DA BARRAGEM

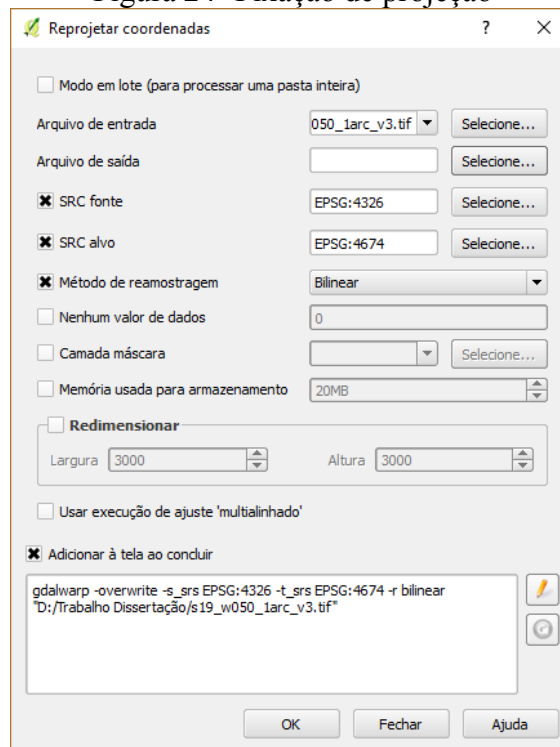
O estudo do canal a jusante da barragem Salto Moraes foi feito com uso de softwares de sistema de informação geográfica (SIG) como Arcgis e Qgis para o georreferenciamento e para a configuração da geometria do canal e a transferência de dados para o software Hec-Ras foi usado o Hec-GeoRas.

3.3.1 Georreferenciamento da Imagem

Foi adquirido um arquivo gratuito (raster) do Modelo Digital de Elevação (MDE) apartir dos dados da Missão Topográfica Radar *Shuttle* (SRTM) disponibilizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) da região localizada nos arredores do município de Ituiutaba-MG da data 23 de Setembro de 2014.

No primeiro instante a projeção foi fixada no DATUM SIRGAS 2000 (Figura 24) utilizando o método de reamostragem bilinear para definir o comportamento dos pixels. Segundo Melo e Pachêco (2016) o método de reamostragem bilinear toma por base os valores de cinza dos quatro vizinhos mais próximos ao centro do novo pixel, utilizando uma janela de dimensão 3 x 3 pixels, calcula-se a média ponderada das distâncias dos centros dos 4 pixels ao centro do pixel de saída e o cálculo do valor de cinza (pixel de saída) é dado pela distância entre dois pixels (de entrada).

Figura 24- Fixação de projeção



Fonte: AUTOR, 2017

A transformação radiométrica foi feita de modo a gerar o raster em 16 bit e no último instante foi reprojetada a imagem para a projeção UTM, fuso 22S e datum SIRGAS 2000. Com o arquivo raster, foi gerado o modelo vetorial em *Triangulation Interpolated Network* (TIN) com uso do Arcgis.

3.3.2 Configuração geométrica

A configuração geométrica foi feita usando o Hec-GeoRas por meio de sua interface ao software Arcgis e consiste na criação dos *layers* “*stream centerline*”, representa a linha do rio, “*bank lines*” duas linhas paralelas a linha do rio, “*flowpaths centerlines*” que define o máximo alcance do escoamento ou neste caso da área de inundação e “*XS Cut lines*” que são as seções transversais e que formam o canal do rio estudado.

O rio e o trecho dele são representados pelo *layer stream centerline* seguindo o talvegue do canal de montante para jusante no meio dela. Cameron T. Ackerman (2009) lista as seguintes regras para a criação desse layer-

- O *stream centerline* deve ser criado de montante para jusante;

- Cada trecho do rio deve ter uma única combinação de nome do rio e trecho;
- Os *stream centerlines* não devem se interceptar, exceto nas confluências onde os pontos finais são coincidentes.

Após a criação do *stream centerline* foi feita a identificação da mesma nomeando o rio e o trecho. Em seguida, foi criado o *layer bank line* que define o escoamento do canal principal a partir do escoamento nas laterais do canal. Segundo Cameron T. Ackerman (2009) a orientação desse *layer* não é importante podendo ser tanto de montante para jusante e vice-versa, ele não pode ser descontínuo e só pode ter duas linhas.

O *layer flowpath centerline* tem o objetivo de identificar o escoamento na margem esquerda, central e margem direita e obedeceram-se as seguintes regras para a criação das mesmas: O *layer* deve seguir a direção do escoamento, deve ser contínuo para cada rio, ela deve interceptar uma linha de corte somente uma vez e elas não podem se interceptar (CAMERON T. ACKERMAN, 2009). Após a criação dos 3 *flowpaths centerline* foi feita a identificação para a linha central do canal, da lateral esquerda e direita.

O último layer criado foi o *XS Cut line* que define as seções ao longo do canal. A localização, posição e extensão de cada seção do canal são representados pelo *XS Cut line*. Na direção do escoamento, o layer deve ser orientado da esquerda para a direita, deve ser perpendicular à direção do escoamento, duas linhas não podem se interceptar e ela deve interceptar o *stream centerline* somente uma vez (CAMERON T. ACKERMAN, 2009).

Com os layers criados foi processado o Hec-GeoRas para criar os atributos do *stream centerline* e o *XS Cut line*. A Tabela 16 indica os atributos para o *stream centerline*.

Tabela 15- Atributos do *Stream Centerline*

Item	Descrição
Topology	Preenche os campos do nó e para o nó.
Lenghts / Stations	Calcula o comprimento para cada trecho do rio, indica a direção do fluxo e qual a estação de cada seção transversal.
Elevations	Converte o layer stream centerline 2D em 3D.

Fonte: Adaptado de CAMERON T. ACKERMAN, 2009.

Os atributos do layer *XS Cut lines* são as apresentadas na Tabela 17.

Tabela 16- Atributos do *XS Cut line*

Item	Descrição
------	-----------

<i>River/Reach Names</i>	Preenche o nome do rio e do trecho baseado no <i>stream centerline</i>
<i>Stationing</i>	Calcula a estação de cada seção transversal baseado na interseção do <i>stream centerline</i> com o <i>XS Cut line</i> .
<i>Bank Stations</i>	Calcula a posição da margem direita e esquerda de cada seção transversal como porcentagem do comprimento da seção.
<i>Downstream reach lengths</i>	Calcula o comprimento entre cada seção transversal baseado no <i>flowpath centerline</i> .
<i>Elevations</i>	Extraí os dados de elevação do MDT cria um layer 3D (<i>XS Cut line 3D</i>)

Fonte: Adaptado de CAMERON T. ACKERMAN, 2009.

3.4 ESTUDO DA BACIA A MONTANTE DA BARRAGEM

O estudo da bacia a montante da barragem teve como objetivo determinar o hidrograma de cheia na barragem em um evento extremo, o qual poderá causar o galgamento na estrutura da barragem. Para que isso pudesse ser feito, foi necessário identificar o canal a montante da barragem, os tributários, a bacia e as sub-bacias.

3.4.1 Identificação da bacia

Para fazer a identificação da bacia a montante, foi necessário adquirir imagens dos municípios de Uberaba-MG, Uberlândia-MG, Campina Verde-MG e, juntamente com a imagem de Ituiutaba-MG anteriormente adquirida, fazer um mosaico devido a extensão do canal a montante da barragem. Esse mosaico de imagens passou pelo mesmo georreferenciamento descrito no item 3.3.1 tendo como projeção SIRGAS 2000 UTM 22S.

Após o georreferenciamento do mosaico, foram extraídas curvas de nível de modo a fazer a identificação da bacia e das sub-bacias, sendo adotado um intervalo de 10m entre as curvas de nível de modo a ter uma maior precisão no estudo e assim, identificar o canal principal e os tributários e consequentemente foram caracterizadas a bacia e as sub-bacias criando máscaras (polígonos) no Qgis e identificando pontos de maior cota altimétrica que contribuíam para as bacias e sub-bacias.

Com a identificação destes pontos, foi possível obter características como a área da bacia, comprimento do talvegue, comprimento do rio e dos tributários e as maiores e menores cotas altimétricas de cada bacia e sub-bacia.

3.4.2 Estudo do uso e ocupação do solo

O estudo do uso e ocupação do solo da bacia e de cada sub-bacia tem como objetivo determinar o coeficiente de escoamento superficial ou número de flúvio (CN) médio. Esse estudo foi feito utilizando o *software Multispec* (software livre) considerando as classes: água, solo exposto, agricultura, pastagem e floresta.

Inicialmente, foram adquiridas imagens de satélite do município Ituiutaba-MG disponibilizadas pela USGS utilizando o Landsat 8. Este satélite entrou em operação em 2013, obtém imagens em 16bits, e ela possui 12 bandas conforme ilustra a Tabela 18 mostrando suas características espectrais (USGS, 2016).

Tabela 17- Características espectrais Landsat 8

Landsat 8 – Bandas	Comprimento de onda (micrometro)	Resolução espacial (metro)
Banda 1 – Ultra – azul	0,43 – 0,45	30
Banda 2 – Azul	0,45 – 0,51	30
Banda 3 – Verde	0,53 – 0,59	30
Banda 4 – Vermelho	0,64 – 0,67	30
Banda 5 – Infravermelho	0,85 – 0,88	30
Banda 6 – SWIR 1	1,57 – 1,65	30
Banda 7 – SWIR 2	2,11 – 2,29	30
Banda 8 – Pancromático	0,50 – 0,68	15
Banda 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30
Banda 10 – TIRS	10,60 – 11,19	100
Banda 11 – TIRS 2	11,50 – 12,51	100

Fonte: USGS, 2016

O satélite Landsat 8 tem combinações de bandas diferentes do Landsat 7 e 5 como mostra a Tabela 19.

Tabela 18- Combinações de bandas usuais

Resultado	Landsat 7 e Landsat 5	Landsat 8
Infravermelho	4, 3, 2	5,4,3
Cor natural	3, 2, 1	4,3,2
Falsa Cor	5, 4, 3	6,5,4
Falsa Cor	7,5,3	7,6,4
Falsa Cor	7,4,2	7,5,3

Fonte: USGS, 2016

Com os resultados do uso e ocupação de solo de cada bacia e sub-bacia é possível determinar o CN médio. Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2015) fizeram um estudo em 2005 em que tinham como objetivo enquadrar diversos tipos de solos em cada grupo de solo apresentado na Tabela 20.

Tabela 19 - Enquadramento de diversos tipos de solos nos grupos de solos

Grupo de solo	Tipos de solo
A	Latossolo amarelo distrófico típico A moderado textura argilosa, Latossolo vermelho ácrico típico A moderado textura muito argilosa, Latossolo vermelho acriférico típico, Latossolo vermelho amarelo distrófico A moderado textura argilosa, Latossolo vermelho distroférico típico A moderado textura muito argilosa, Latossolo vermelho distrófico típico A moderado textura muito argilosa, Latossolo vermelho eutroférico A moderado textura muito argilosa.
B	Argissolo vermelho Eutrófico A moderado textura argilosa/muito argilosa, Latossolo amarelo distrófico típico A proeminente textura média, Latossolo vermelho amarelo distrófico (típico), Neossolo quartzarênico Órtico típico A fraco, Nitossolo háplico distrófico típico A moderado textura média / argilosa, Nitossolo háplico distrófico típico A moderado textura média / argilosa, Nitossolo vermelho distrófico latossólico A moderado textura argilosa/muito argilosa, Nitossolo vermelho eutroférico típico A moderado textura muito argilosa.
C	Argissolo vermelho eutrófico típico A moderado textura média/argilosa, Argissolo amarelo distrófico arênico A moderado, textura arenosa/média, Argissolo vermelho-amarelo distrófico típico A moderado textura média/argilosa, Cambissolo háplico Tb Distrófico latossólico, Cambissolo háplico Tb Eutrófico típico A moderado textura média, Cambissolo húmico distrófico latossólico,

	Espodossolo ferrocárbico hidromórfico típico, Neossolo fluvico.
D	Alissolo crômico argilúvico abrupto A moderado textura média/muito argilosa, Afloramentos de rocha, Cambissolo háplico Tb Distrófico gleico, Cambissolo háplico Tb Distrófico típico, Cambissolo háplico Tb Eutrófico típico A moderado textura argilosa/média, Chernossolo argilúvico férrico típico textura argilosa, Chernossolo argilúvico férrico típico textura argilosa, Gleissolo háplico Ta distrófico típico A moderado, textura errática, Gleissolo háplico Tb distrófico típico, textura argilosa, Gleissolo sálico Sódico típico, Luvisolo crômico pálico arênico A moderado textura arenosa/média, Luvisolo crômico pálico planossólico A moderado textura arenosa/média, Neossolo litólico eutrófico chernossólico, Organossolo háplico hêmico típico, Planossolo hidromórfico eutrófico típico A proeminente textura média/argilosa, Plintossolo pétrico concrecionário distrófico A moderado textura arenosa/média muito cascalhenta, solos de mangue.

Fonte: Adaptado de Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2015).

O coeficiente CN é um parâmetro utilizado em hidrologia que relaciona os grupos hidrológicos do solo com o uso da terra, defesa contra erosão e a condição hidrológica de infiltração, auxiliando na estimativa do escoamento superficial do solo ((PORTO, 1995), (TUCCI ET AL, 1993)). Tucci et al, (1993) apresentou valores tabelados para bacias rurais e urbanos (Tabela 21).

Tabela 20- Valores dos números CN da curva de runoff para bacias rurais

Uso do solo	Superfície do solo	Grupo do solo			
		A	B	C	D
Solo Lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89

legumes ou cultivados	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	67	81	88
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras	Normais	56	75	86	91
Estradas de terra	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: Adaptado de TUCCI ET AL, 1993.

Sendo assim, calcula-se o CN médio por meio da Equação 3.

$$CN_{\text{Médio}} = \frac{\sum A \times CN}{A_{\text{Total}}} \quad (3)$$

Em que:

$CN_{\text{Médio}}$ – Coeficiente da curva de runoff médio;

CN – Coeficiente da curva de runoff;

A – Área de cada amostra;

A_{Total} – Área total.

3.4.3 Hietograma de precipitação de Huff

Fez-se uma análise pluviométrica com dados dos últimos 50 anos na região de Ituiutaba-MG por meio dos dados da Agência Nacional de Águas (ANA) disponibilizados na

hidroweb. Com a seleção de dados, escolheu-se a chuva, esta é discretizada num período de 6h pelo Método de Huff como mostra a Tabela 22.

Tabela 21- Cálculo da precipitação pelo Método de Huff para o primeiro quartil para chuva de 6h

Tempo (%)	Precipitação acumulada (%)	Precipitação no intervalo (%)
0	0,0	0,0
5	6,3	6,3
10	20,0	13,7
15	37,8	17,8
20	52,0	14,2
25	63,8	11,8
30	71,0	7,2
35	75,6	4,6
40	79,0	3,4
45	82,6	3,6
50	85,3	2,7
55	87,5	2,2
60	89,4	1,9
65	91,4	2,0
70	93,1	1,7
75	94,4	1,3
80	95,6	1,2
85	96,5	0,9
90	97,8	1,3
95	99,0	1,2
100	100	1,0

Fonte: TOMAZ, 2010

Sendo assim calcula-se a chuva em cada intervalo de acordo com a Equação 4, no qual P_T é a precipitação máxima nos últimos 50 anos:

$$\text{Chuva} = P_T \times \% \text{ Chuva} \quad (4)$$

Em que-

Chuva – Chuva em cada intervalo (mm)

P_T – Precipitação Total (mm)

3.4.4 Método de Thiessen

O Método de Thiessen é utilizado para o cálculo da precipitação média numa bacia hidrográfica a partir das observações nos postos disponíveis, incorporando um peso a cada um deles, em função de suas áreas de influência. As áreas de influência são determinadas a partir da disposição espacial dos postos através do traçado dos polígonos de Thiessen. A Equação 5 mostra como é calculado a precipitação média.

$$P_m = \frac{\sum A_n \times P_n}{\sum A} \quad (5)$$

Em que-

P_m – Precipitação média na bacia (mm);

A_n – Área de cada polígono (m²);

P_n – Precipitação de cada posto (mm);

O Método de Thiessen se enquadra no trabalho para a calibração do modelo hidrológico de modo a terem-se valores reais de CN.

3.4.5 Modelagem no Hec-Hms

O Hec-Hms é um software de modelagem hidrológica que faz parte do pacote da HEC com procedimentos hidrológicos tradicionais como infiltração, escoamento superficial e hidrogramas. O objetivo da modelagem no Hec-Hms é determinar a descarga na cabeceira da Barragem Salto Moraes. Para que isso pudesse ser determinado foi necessário criar sub-bacias, rios e junções como mostra a Tabela 23.

Tabela 22- Elementos do Hec-Hms

Elemento Hidrológico	Descrição
<i>Subbasin</i>	O elemento “ <i>subbasin</i> ” é usado para representar a bacia hidrográfica. Dada à precipitação, o fluxo de saída do elemento de sub-bacia é calculado subtraindo-se as perdas, transformando excesso de precipitação a corrente de fluxo à saída do sub-bacia.
<i>Reach</i>	O elemento “ <i>reach</i> ” é utilizado para transmitir o fluxo à jusante no

	modelo de bacia sendo que a entrada nesse elemento pode vir de um ou vários elementos hidrológicos de montante.
<i>Junction</i>	O elemento “ <i>junction</i> ” é utilizado para ligar elementos hidrológicos de montante. A entrada nesse elemento pode ser vários elementos de montante e a saída é calculada somando todas as entradas e assumindo nenhum reservatório.

Fonte: FLEMING, 2010.

No elemento *subbasin* foi informando a área da bacia, o método de perda e transformação adotado foi o SCS. O número CN é o calculado na Equação 3, foi adotado 1% de área impermeável e o tempo de concentração é calculado pela Equação 6. COLOCAR O NOME DA EQUAÇÃO

$$T_c = 57 \times \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (6)$$

Em que:

T_c – Tempo de concentração (min);

L – Comprimento do talvegue (Km)

H – Diferença de cota (m)

No elemento *reach* precisa ser informado somente o tempo de concentração que é calculado pela Equação 6 substituindo o comprimento do talvegue pelo comprimento do rio.

Para entrar com informações da pluviometria é necessário criar “*Meteorologic models*” e “*Time-series data*” no Hec-Hms. O *Time-series data* é a chuva que foi discretizada pelo método de Huff em 6 horas usando a Equação 4 e o *Meteorologic models* tem como objetivo preparar condições de meteorologia para cada bacia.

No Hec-Hms serão feitas duas simulações: Uma simulação com a chuva média para a calibração do CN e outra simulação com o CN calibrado com a maior chuva dos últimos 50 anos para determinar a maior vazão afluente na barragem.

3.5 MODELAGEM NO HEC-RAS

Hec-Ras é um programa do pacote da HEC integrado de programas de análises hidráulicos onde o usuário interage com o sistema usando uma interface gráfica. Esse sistema é capaz de trabalhar em regime permanente, análise unidimensional e bidimensional de regime não permanente, transporte de sedimentos e qualidade da água (BRUNNER, 2014).

A modelagem no Hec-Ras consistiu na configuração da geometria (seção da barragem e do reservatório), do regime não permanente e o plano de simulação do sistema. Como a geometria fora configurada no Hec – GeoRas conforme descrito em 3.3.2, no Hec - Ras foi configurada a barragem com a brecha de acordo com as informações descritas em 3.2, a entrada do coeficiente de rugosidade (Tabela 24) e a configuração do reservatório.

Tabela 23- Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning para arroios e rios

Item	Natureza das paredes	Condições			
		Muito Boas	Boas	Regulares	Ruins
1	Limpos, retilíneos e uniformes.	0,025	0,028	0,030	0,033
2	Como em 1, porém com vegetações e pedras.	0,030	0,033	0,035	0,040
3	Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos.	0,035	0,040	0,045	0,050
4	Como em 3, águas baixas, declividade fraca.	0,040	0,045	0,050	0,055
5	Como em 3, com vegetação e pedras.	0,033	0,035	0,040	0,045
6	Como em 4, com pedras.	0,045	0,050	0,055	0,060
7	Com margens espaiadas, pouca vegetação.	0,050	0,060	0,070	0,080
8	Com margens espaiadas, muita vegetação.	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: PORTO (2006)

Os parâmetros da brecha são fornecidos por Brunner (2014) na guia para rompimento de barragem do Hec-Ras e foi adotada a onda senoidal como progressão da brecha.

3.5.1 Variação dos parâmetros formadores da brecha

Será estabelecida uma brecha hipotética para investigar a influência os parâmetros dos da formação da brecha de ruptura sobre o hidrograma de cheia a jusante. A Tabela 25 mostra

os parâmetros definidos para a brecha hipotética em que B é a largura da base inferior da brecha, Hb é a altura da brecha e Z é o fator de declividade das paredes laterais.

Tabela 24 - Parâmetros de brecha hipotética

B (m)	H _b (m)	Z	Progressão da brecha
65	7	2	Onda senoidal

Fonte: AUTOR, 2017.

Com essa brecha será variada os seguintes parâmetros: a altura da brecha, largura da base inferior da brecha, a inclinação lateral da brecha e a progressão da brecha. Como o tempo de formação de brecha (Tf) é função dos parâmetros da formação da brecha citados deverá ser calculado o tempo para cada cenário de simulação. A equação utilizada para calcular o tempo de formação de brecha será a de McDonald e Langridge-Monopolis (1984) descrita na Tabela 8.

A Tabela 26 descreve os cenários de simulação em que será variada a altura da brecha.

Tabela 25 - Variação da altura da brecha

Cenários	H _b (m)	B (m)	Z	Progressão da brecha	T _f (h)
Cenário 01	Hb	65	2	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>
Cenário 02	0,7Hb	65	2	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>
Cenário 03	0,5Hb	65	2	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>
Cenário 04	0,2Hb	65	2	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>

Fonte: AUTOR, 2017

Definiu-se para os cenários 05 a 08 a variação da largura da base inferior da brecha como descreve a Tabela 27.

Tabela 26 - Variação da largura da base inferior da brecha

Cenários	H _b (m)	B (m)	Z	Progressão da brecha	T _f (h)
Cenário 05	7	B	2	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>

Cenário 06	7	0,7B	2	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>
Cenário 07	7	0,5B	2	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>
Cenário 08	7	0,2B	2	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>

Fonte: AUTOR, 2017

Os cenários 09 a 12 variarão o fator de inclinação das paredes laterais como descreve a Tabela 28.

Tabela 27 - Variação do fator de inclinação das paredes laterais da brecha

Cenários	H_b (m)	B (m)	Z	Progressão da brecha	T_f(h)
Cenário 09	7	65	0,5	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>
Cenário 10	7	65	1,0	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>
Cenário 11	7	65	1,5	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>
Cenário 12	7	65	2,0	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>

Fonte: AUTOR, 2017

Os cenários 13 e 14 tem como objetivo verificar a influência da progressão da brecha no hidrograma a jusante da barragem (Tabela 29).

Tabela 28 - Variação da progressão da brecha

Cenários	H_b (m)	B (m)	Z	Progressão da brecha	T_f(h)
Cenário 13	7	65	2	Onda senoidal	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>
Cenário 14	7	65	2	Linear	<i>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</i>

Fonte: AUTOR, 2017

3.5.2 Influência de fórmulas empíricas no hidrograma de vazão a jusante da barragem

O Hec-Ras oferece quatro opções de equações empíricas para caracterizar a brecha: “Froehlich (1995)”, “Froehlich (2008)”, “Von Thun and Gillette (1990)” e “Xu and Zhang (2009)”. Será feito um estudo comparativo dessas quatro equações para verificar qual gera maior vazão de pico em regime não permanente e posteriormente elaborar o mapa de inundação.

3.5.2.1 Froehlich (1995)

As equações de regressão de “*Froehlich (1995)*” para a largura média da brecha e tempo de formação da brecha são descritos nas equações 11 e 12 respectivamente-

$$B_{\text{média}} = 0,1803 \times K_0 \times V_w^{0,32} \times h_b^{0,19} \quad (7)$$

Em que:

$B_{\text{média}}$ – Largura média (m);

K_0 – Constante (1,4 para rupturas em galgamento e 1,0 para piping);

V_w – Volume do reservatório no momento da ruptura (m³);

h_b – Altura da brecha (m).

$$T_f = 0,00254 \times V_w^{0,53} \times h_b^{-0,90} \quad (8)$$

Em que:

T_f – Tempo de formação da brecha (m);

V_w – Volume do reservatório no momento da ruptura (m³);

h_b – Altura da brecha (m).

“*Froehlich (1995)*” indica para a inclinação lateral da brecha 1,4H:1V para ruptura em galgamento e 0,9H:1V para os outros tipos de ruptura.

3.5.2.2 Froehlich (2008)

Em 2008 “*Froehlich*” fez uma atualização das suas equações de regressão baseado em novas informações de ruptura de barragem. Ele adicionou 74 dados de ruptura de barragens ao seu acervo para calcular a largura média da brecha e o tempo de formação da brecha. A equação de “*Froehlich (2008)*” se enquadra para barragens com altura entre 3,05 e 92,96 metros e volume do reservatório no momento da ruptura entre 0,0139 e 660 x 10⁶ m³. As equações 9 e 10 mostram as equações para o cálculo da largura média da brecha e o tempo de formação da brecha respectivamente.

$$B_{\text{média}} = 0,27 \times K_0 \times V_w^{0,32} \times h_b^{0,04} \quad (9)$$

Em que:

$B_{\text{média}}$ – Largura média (m);

K_0 – Constante (1,3 para rupturas em galgamento e 1,0 para piping);

V_w – Volume do reservatório no momento da ruptura (m³);

h_b – Altura da brecha (m).

g – Aceleração gravitacional (9,80665 m/s²);

$$T_f = 63,2 \times \sqrt{\frac{V_w}{g \times h_b^2}} \quad (10)$$

Em que:

T_f – Tempo de formação da brecha (m);

V_w – Volume do reservatório no momento da ruptura (m³);

h_b – Altura da brecha (m).

“*Froehlich (2008)*” indica para a inclinação lateral da brecha 1,0H:1V para ruptura em galgamento e 0,7H:1V para os outros tipos de ruptura.

3.5.2.3 Von Thun and Gillette (1995)

“*Von Thun and Gillette*” usaram 57 dados de barragens dos trabalhos de “*Froelich*” e “*McDonald e Langridge-Monopolis*” para desenvolver sua metodologia. Esse método propõe brechas com inclinação lateral de 1,0H:1V e se enquadra para barragens com altura entre 3,66 e 92,96 metros e volume do reservatório no momento da ruptura entre 0,027 e 660 x 10⁶ m³. A Equação 11 calcula a largura média da brecha.

$$B_{\text{média}} = 2,5 \times h_w + C_b \quad (11)$$

Em que:

$B_{\text{média}}$ – Largura média (m);

h_w – Altura da água acima da brecha (m).

C_b – Coeficiente que é função do volume do reservatório (m) (Tabela 30).

Tabela 29 - Coeficiente C_b em função do volume do reservatório

Volume do Reservatório (m ³)	C_b (m)
< 1,23 x 10 ⁶	6,1
1,23 x 10 ⁶ - 6,17 x 10 ⁶	18,3
6,17 x 10 ⁶ - 1,23 x 10 ⁷	42,7
> 1,23 x 10 ⁷	54,9

Fonte:

O cálculo do tempo de formação de brecha para barragens resistentes a erosão é mostrado na equação 12.

$$T_f = \frac{B_{\text{média}}}{4 \times h_w} \quad (12)$$

Em que:

T_f – Tempo de formação da brecha (h);

$B_{\text{média}}$ – Largura média (m);

h_w – Altura da água acima da brecha (m).

3.5.2.4 Zu and Chang (2009)

“Zu and Chang” fizeram um estudo com 182 barragens para que pudessem elaborar equações que calculassem largura da brecha, tempo de formação da brecha e inclinação lateral da brecha. Essas equações se enquadram em barragens com altura entre 3,2 e 92,96 metros e volume do reservatório no momento da ruptura entre 0,105 e 660 x 10⁶ m³. A equação 13 calcula a largura média da brecha.

$$\frac{B_{média}}{h_b} = 0,787 \times \left(\frac{h_d}{h_r}\right)^{0,133} \times \left(\frac{V_w^{\frac{1}{3}}}{h_w}\right)^{0,652} \times e^{B_3} \quad (13)$$

Em que:

$B_{média}$ = Largura média (m);

h_b = Altura da brecha (m).

h_r = 15 m.

h_d = Altura da barragem (m).

h_w = Altura da água acima da brecha (m).

V_w = Volume do reservatório no momento da ruptura (m³);

B_3 = $b_3 + b_4 + b_5$ (coeficiente que são função das propriedades da barragem);

b_3 = 0,026 para barragens de concreto;

b_4 = 0,149 para ruptura em galgamento;

b_5 = 0,291 para barragens com resistentes a erosão.

A largura do topo da brecha é calculada pela equação 14.

$$\frac{B_t}{h_b} = 1,062 \times \left(\frac{h_d}{h_r}\right)^{0,092} \times \left(\frac{V_w^{\frac{1}{3}}}{h_w}\right)^{0,508} \times e^{B_2} \quad (14)$$

Em que:

B_t = Largura do topo da brecha (m);

h_b = Altura da brecha (m).

h_r = 15 m.

h_d = Altura da barragem (m).

h_w = Altura da água acima da brecha (m).

V_w = Volume do reservatório no momento da ruptura (m^3);

$B_2 = b_3 + b_4 + b_5$ (coeficientes que são função das propriedades da barragem);

$b_3 = 0,088$ para barragens de concreto;

$b_4 = 0,299$ para ruptura em galgamento;

$b_5 = 0,411$ para barragens com resistentes a erosão.

O tempo de formação da brecha é calculado pela equação 15.

$$\frac{T_f}{T_r} = 0,304 \times \left(\frac{h_d}{h_r}\right)^{0,707} \times \left(\frac{V_w^{\frac{1}{3}}}{h_w}\right)^{1,228} \times e^{B_5} \quad (15)$$

Em que:

T_t = Tempo de formação da brecha (h);

T_r = 1 hora;

h_r = 15 m;

h_d = Altura da barragem (m);

h_w = Altura da água acima da brecha (m);

V_w = Volume do reservatório no momento da ruptura (m^3);

$B_2 = b_3 + b_4 + b_5$ (coeficientes que são função das propriedades da barragem);

$b_3 = -0,674$ para barragens de concreto;

$b_4 = -0,579$ para ruptura em galgamento;

$b_5 = -1,205$ para barragens com resistentes a erosão.

“*Zu and Chang*” diferente dos outros autores de equações empíricas não estipula valores para a inclinação lateral da brecha, sendo assim, a mesma é calculada pela equação 16.

$$Z = \frac{B_t - B_{média}}{h_b} \quad (16)$$

Em que:

B_t = Largura do topo da brecha (m);

$B_{média}$ = Largura média da brecha (m);

h_b = Altura da brecha (m).

Após os dados obtidos no modelo hidráulico, deve se utilizar ferramentas de geoprocessamento para gerar o mapa com a mancha de inundação associadas à cartografia da região para a equação empírica que gerar maior vazão de pico. De posse dos dados da simulação e software de geoprocessamento a ser utilizado, seguiu-se a etapa de confecção do mapa. Ele deve indicar numa forma simples e em escala adequada, a área impactada com o rompimento da barragem e com o cálculo do risco hidrodinâmico indicar o nível de risco às comunidades a jusante dentro da zona de inundação. O risco hidrodinâmico é calculado pela Equação 2.

RESULTADOS

4.1 ESTUDO DO CANAL A JUSANTE DA BARRAGEM

Nesta seção serão apresentadas as imagens georreferenciadas em formato raster e vetorial (TIN) e as seções que foram feitas no Hec-GeoRas.

4.1.1 Georreferenciamento da Imagem e configuração geométrica

A imagem em formato raster foi fixada com a projeção SIRGAS 2000 UTM 22S, foi recortada da seção da barragem até a última seção transversal e foi convertido para o formato vetorial (TIN) conforme descrito em 3.3.1.

O canal a jusante da barragem tem de comprimento 52,72 Km e seguindo as indicações apresentadas em 3.3.2 foram criadas 277 seções transversais ao longo do canal

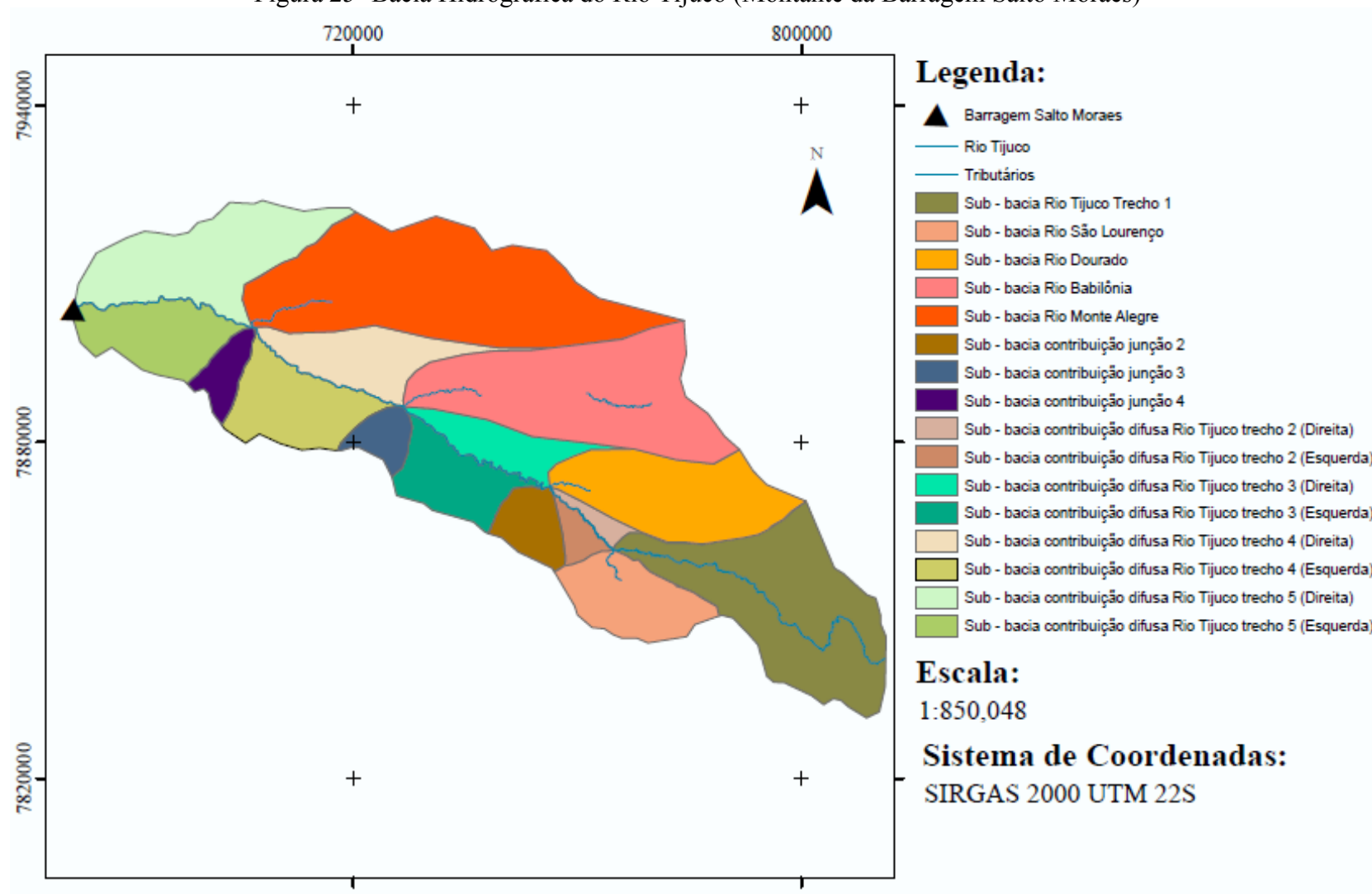
4.2 ESTUDO DA BACIA A MONTANTE DA BARRAGEM

Nessa seção serão apresentadas as curvas de nível, a bacia e as sub-bacias, o Hietograma de Huff, os resultados do estudo de uso e ocupação do solo e da Modelagem no Hec-Hms.

4.2.1 Identificação da bacia

Ao analisar as curvas de nível geradas com intervalos de 10m foram identificadas 4 sub-bacias (Rio São Lourenço, Rio Dourado, Rio Babilônia e Rio Monte Alegre) ao longo do canal a montante da barragem. Porém com estudo da bacia hidrográfica verificou-se que a contribuição difusa no lado esquerdo do Rio Tijuco é elevada. Sendo assim foi necessário criar sub-bacias fictícias que expressem essa contribuição como mostra a Figura 25 de modo que a precipitação em cada sub-bacia fictícia pudesse caminhar para as junções.

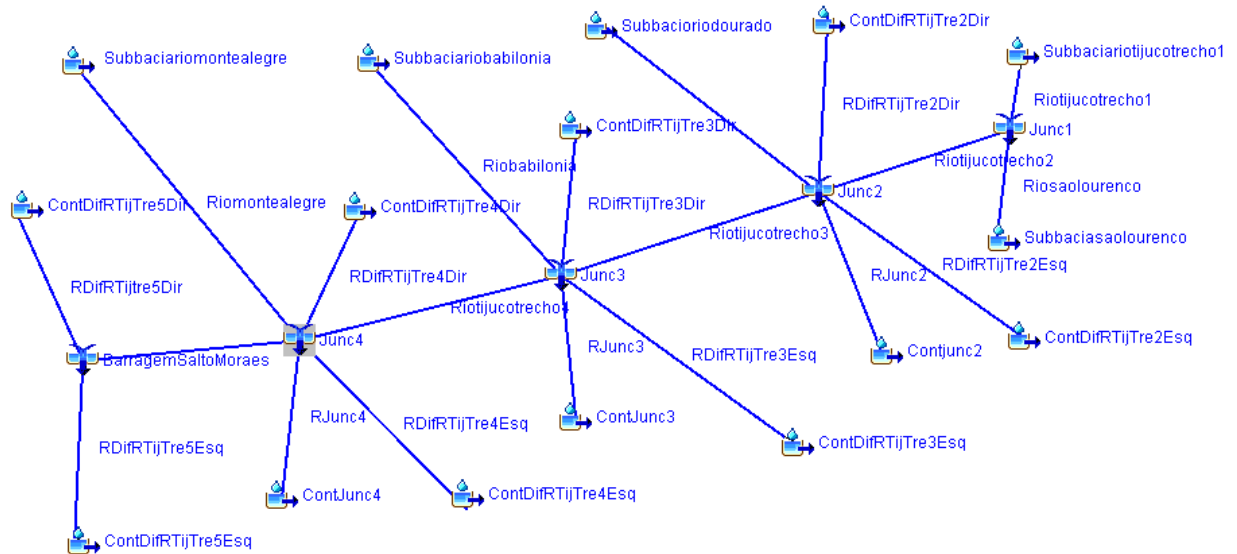
Figura 25- Bacia Hidrográfica do Rio Tijuco (Montante da Barragem Salto Moraes)



Fonte: AUTOR, 2017

Com a identificação de todas as sub-bacias fez-se a topologia no Hec-Hms para poder encontrar a vazão na barragem Salto Moraes. A topologia foi feita com todos os elementos descritos na Tabela 28 como se vê na Figura 26.

Figura 26 - Topologia da bacia hidrográfica a montante da barragem Salto Moraes



Fonte: AUTOR, 2017

Nota-se na Figura 26 que o rio principal (Rio Tijuco) foi dividido em 5 trechos de modo que haja junções entre o mesmo e os diversos tributários.

Com todos os elementos identificados e inseridos na topologia foi necessário utilizar software de geoprocessamento para extração de informações geométricas para alimentar a simulação no Hec-Hms. As informações geométricas extraídas foram área da sub-bacia, talvegue da sub-bacia, diferença de cota altimétrica da sub-bacia, comprimento do rio e a diferença de cota altimétrica do rio. As Tabelas 31 e 32 mostram as informações geométricas e o tempo de concentração que é calculado com o uso da Equação 6.

Tabela 30- Características da bacia e das sub-bacias

Sub - bacia	Maior cota (m)	Menor cota (m)	Dif. de cota (m)	Talvegue (km)	Tempo de conc. (min)
Rio Tijuco Trecho 1	950	690	260	100,33	1373,29
Rio São Lourenço	840	690	150	17,76	229,69
Rio Dourado	900	660	240	38,48	468.21
Contribuição Junção 2	810	660	150	15,21	192,06

Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Esquerda)	810	660	150	12,68	155,66
Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Direita)	810	660	150	15,11	190,60
Rio Babilônia	870	630	240	49,10	620,44
Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Esquerda)	780	630	150	25,8	353,59
Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Direita)	780	630	150	40,71	598,80
Contribuição Junção 3	720	660	60	12,18	211,45
Rio Monte Alegre	870	600	270	61,73	772,40
Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Esquerda)	720	600	120	26,55	398,27
Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Direita)	780	600	180	46,76	655,08
Contribuição Junção 4	720	600	120	17,89	252,43
Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Direita)	780	540	240	53,04	678,28
Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Esquerda)	720	540	180	53,04	757,72

Fonte: AUTOR, 2017

A Tabela 32 mostra as informações geométricas dos rios.

Tabela 31- Características do rio e dos tributários

Rio	Maior cota (m)	Menor cota (m)	Dif. de cota (m)	Comp (km)	Tempo de conc. (min)
Rio Tijuco Trecho 1	950	690	260	100,33	1373,29
Rio São Lourenço	720	690	30	13,35	306,94
Rio Tijuco Trecho 2	690	660	30	15,94	376,64
Rio Dourado	720	660	60	11,80	203,92
Rio Junção 2	810	660	150	15,21	192,06
Rio Contribuição Difusa	810	660	150	12,68	155,66

Tijuco Trecho 2 (Esquerda)					
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Direita)	810	660	150	15,11	190,60
Rio Tijuco Trecho 3	660	630	30	46,21	1287,94
Rio Babilônia	810	630	180	77,66	1177,02
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Esquerda)	780	630	150	25,80	353,59
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Direita)	780	630	150	40,71	598,80
Rio Junção 3	720	660	60	12,18	211,45
Rio Tijuco trecho 4	630	600	30	31,217	818,85
Rio Monte Alegre	660	600	60	25,49	496,32
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Esquerda)	720	600	120	26,55	398,27
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Direita)	780	600	180	46,76	655,08
Rio Junção 4	720	600	120	17,89	252,43
Rio Tijuco Trecho 5	600	540	60	33,03	669,37
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Direita)	780	540	240	53,04	678,28
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Esquerda)	720	540	180	53,04	757,72

Fonte: AUTOR, 2017

4.2.2 Uso e Ocupação do solo

Como descrito em 3.4.2 o estudo de uso e ocupação do solo foi feito no *Multispec* considerando 5 classes (água, agricultura, floresta, pastagem e solo) de modo a determinar o potencial de infiltração médio ($CN_{\text{médio}}$). Foi identificado no mapa de solos mostrado no Anexo A que o solo da região estudada é o Latossolo vermelho distrófico, sendo assim foi adotado o grupo de solo A conforme mostra o enquadramento da Tabela 20. A classe agricultura foi classificada como plantações regulares em curvas de nível, solo como solo

lavrado em fileiras retas, pastagem como pastagem normal em curvas de nível e floresta como florestas esparsas. As Tabelas 33 mostram os resultados do estudo feito.

Tabela 32- Ocupação do solo na bacia

Uso e ocupação	%	Área (km²)	CN	CN Médio
Sub - bacia Rio Tijuco Trecho 1				
Pastagem	45,8	424,91	25,00	38,73
Agricultura	16,7	154,93	67,00	
Floresta	18,7	173,49	46,00	
Solo	10,7	99,27	70,00	
Sub - bacia Rio São Lourenço				
Pastagem	20,50	65,73	25,00	55,24
Agricultura	64,50	206,80	67,00	
Floresta	15,00	48,09	46,00	
Sub - bacia Rio Dourado				
Pastagem	67,40	382,29	2500	35,71
Agricultura	18,40	104,36	67,00	
Floresta	14,20	80,54	46,00	
Sub - bacia Rio Babilônia				
Pastagem	73,06	685,36	25,00	33,97
Agricultura	14,67	137,62	67,00	
Floresta	11,30	106,00	46,00	
Solo	0,97	9,10	70,00	
Sub - bacia Rio Monte Alegre				
Pastagem	74,00	922,05	25,00	33,79
Agricultura	14,50	180,67	67,00	
Floresta	10,30	128,34	46,00	
Solo	1,20	14,95	70,00	
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Esquerda)				
Pastagem	72,60	47,90	25,00	34,92
Agricultura	12,20	8,05	67,00	
Floresta	8,50	5,61	46,00	
Solo	6,70	4,42	70,00	
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Direita)				
Pastagem	87,80	42,34	25,00	28,99
Agricultura	4,40	2,12	67,00	
Floresta	6,00	2,89	46,00	
Solo	1,90	0,92	70,00	
Sub - bacia Contribuição Junção 2				

Capítulo 4– Resultados

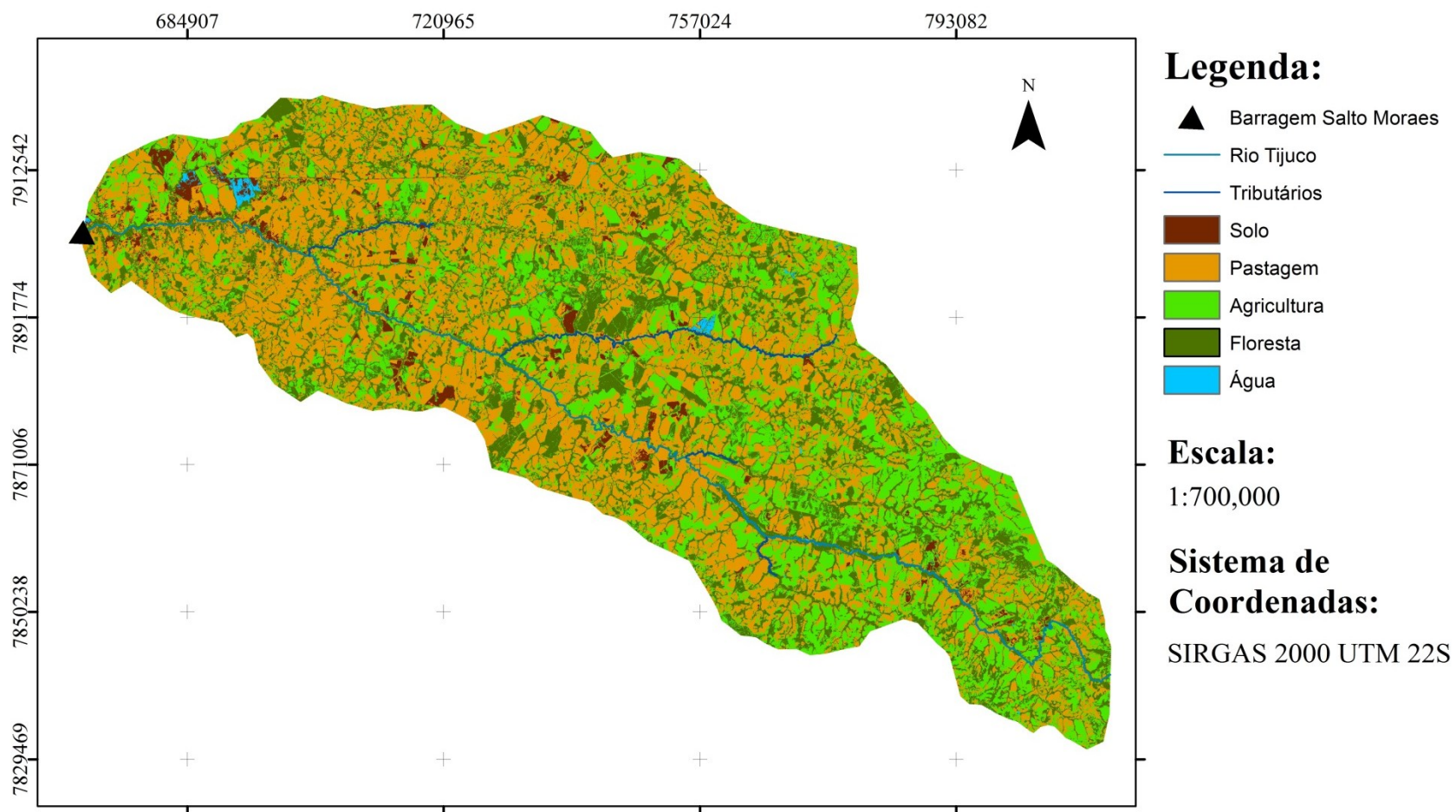
Pastagem	75,70	112,88	25,00	
Agricultura	5,20	7,75	67,00	
Floresta	15,70	23,41	46,00	32,01
Solo	3,40	5,07	70,00	
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Esquerda)				
Pastagem	85,70	197,99	25,00	
Agricultura	4,95	11,44	67,00	
Floresta	7,00	16,18	46,00	29,63
Solo	2,40	5,55	70,00	
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Direita)				
Pastagem	88,50	184,70	25,00	
Agricultura	5,70	11,90	67,00	
Floresta	4,60	9,60	46,00	28,90
Solo	1,20	2,50	70,00	
Sub - bacia Contribuição Junção 3				
Pastagem	82,80	81,22	25,00	
Agricultura	4,20	4,12	67,00	
Floresta	9,40	9,22	46,00	30,36
Solo	3,60	3,53	70,00	
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Esquerda)				
Pastagem	85,1	300,45	25,00	
Agricultura	5,00	17,65	67,00	
Floresta	8,05	28,42	46,00	29,62
Solo	1,85	6,53	70,00	
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Direita)				
Pastagem	82,80	269,94	25,00	
Agricultura	8,50	27,71	67,00	
Floresta	5,00	16,30	46,00	31,29
Solo	3,70	12,06	70,00	
Sub - bacia Contribuição Junção 4				
Pastagem	87,40	87,93	25,00	
Agricultura	1,50	1,51	67,00	
Floresta	11,10	11,17	46,00	27,96
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Esquerda)				
Pastagem	36,00	116,32	25,00	
Agricultura	50,10	161,88	67,00	
Floresta	13,90	44,91	46,00	48,96
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Direita)				
Pastagem	77,70	470,74	25,00	
Agricultura	8,70	52,71	67,00	
Floresta	11,10	67,25	46,00	32,11

Solo	2,50	15,15	70,00
------	------	-------	-------

Fonte: AUTOR, 2017

Com todas as informações apresentadas na Tabela 33 foi gerado um mapa de uso e ocupação do solo de toda a bacia hidrográfica como mostra a Figura 27. Nota-se que a bacia hidrográfica a montante da barragem tem maior uso e ocupação do solo de pastagem.

Figura 27- Uso e Ocupação do solo na bacia hidrográfica a montante da barragem



Fonte: AUTOR, 2017

4.2.3 Hietograma de Huff

4.2.3.1 Chuva média

Inicialmente, foi necessário calcular a chuva média na bacia hidrográfica, utilizando o Método de Thiessen, para que pudesse ser calibrado o CN de cada sub - bacia. Foram identificadas três estações pluviométricas, a saber: Monte Alegre de Minas, Ponte BR-153 (Faz. Nossa Senhora Aparecida), Fazenda Paraíso, Patrimônio Rio do Peixe e Fazenda Letreiro. Com porte das coordenadas de cada estação, usou-se de software de geoprocessamento para levantar as áreas de influência de cada estação como mostra a Figura 28.

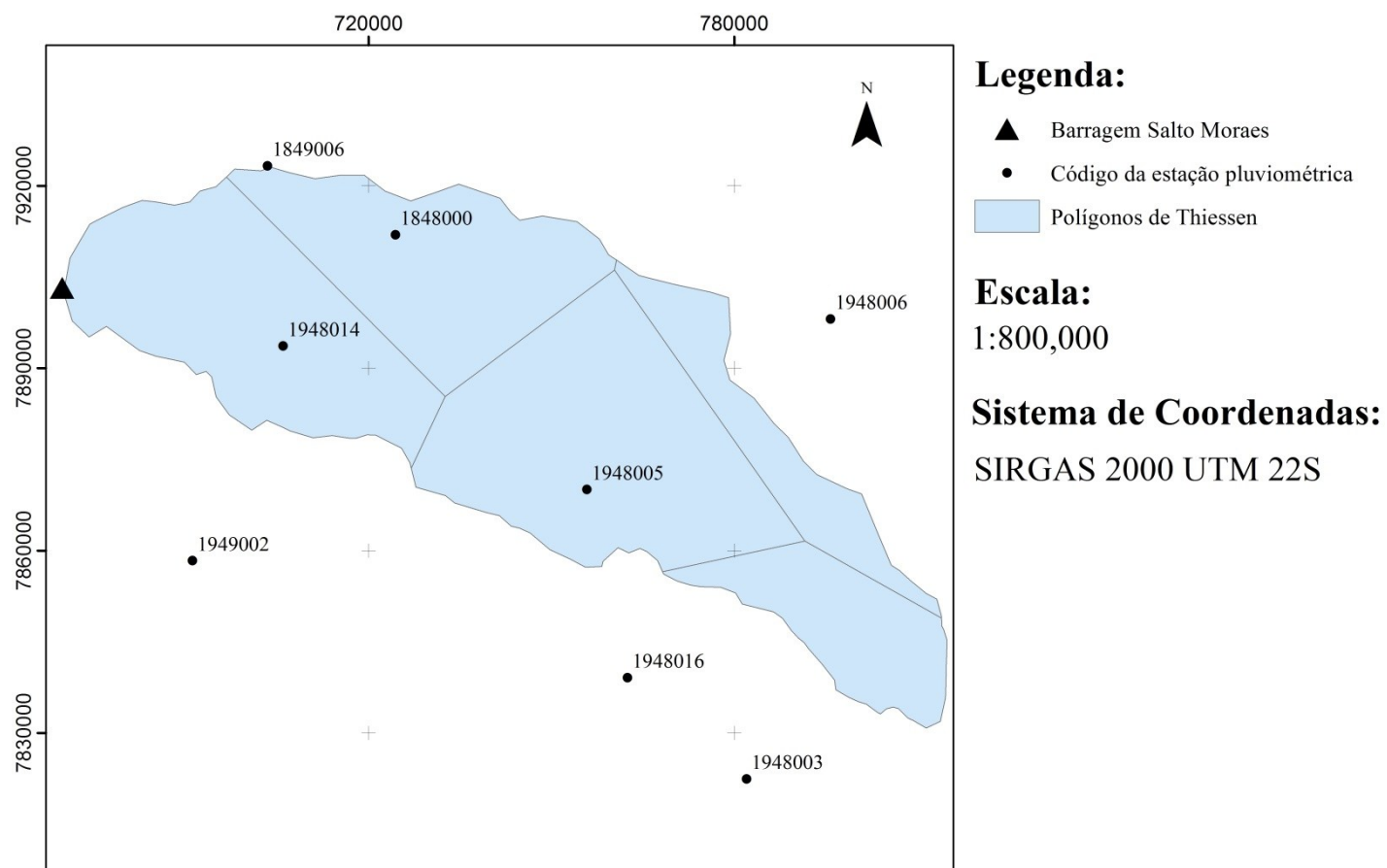
A data da precipitação levantada de cada estação foi 26 de Dezembro de 2008 e com os dados levantados foi possível calcular a precipitação média utilizando a Equação 5. Os dados levantados e a precipitação média são mostrados na Tabela 34.

Tabela 33 – Cálculo da precipitação média pelo Método de Thiessen

Código da Estação	Nome da estação	Coordenadas UTM		Área de Influência (m²)	Prec. (26/12/08) (mm)	Prec. média (mm)
		X (m)	Y (m)			
1848000	Monte Alegre de Minas	724.452,53	7.911.960,50	1.179.103.833,11	12,50	73,97
1948014	Ponte BR-153 (Faz. Nossa Senhora Aparecida)	706.009,83	7.893.659,78	1.486.569.839,69	186,70	
1948005	Fazenda Paraíso	755.846,92	7.870.056,26	1.744.575.154,28	61,20	
1948016	Patrimônio Rio do Peixe	762.528,17	7.839.133,67	621.678.060,05	9,50	
1948006	Fazenda Letreiro	795.837,67	7.898.101,92	539.493.354,96	13,30	

Fonte: AUTOR, 2017

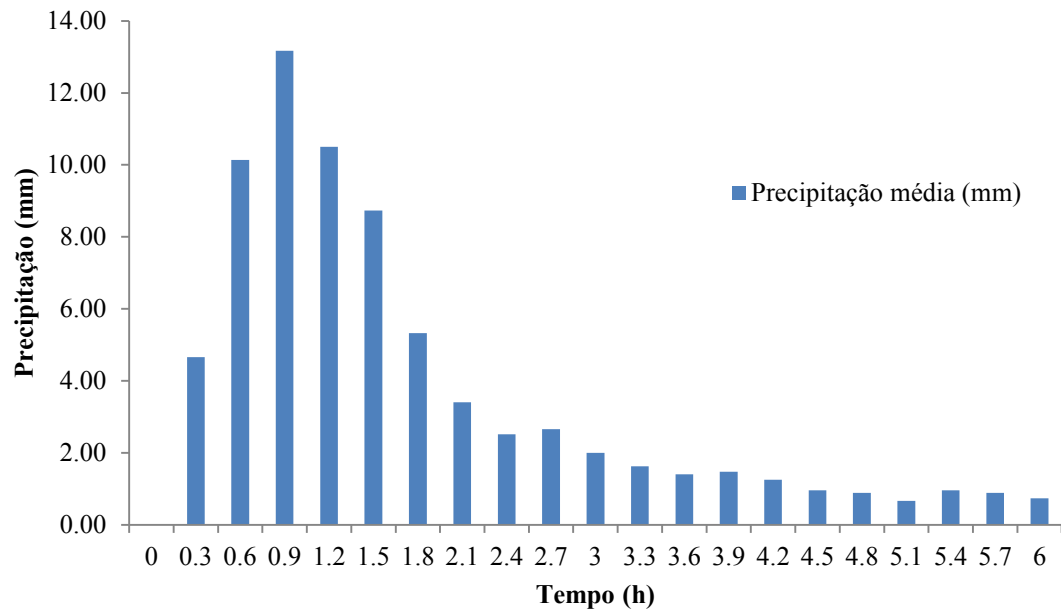
Figura 28 - Polígonos de Thiessen



Fonte: AUTOR, 2017

A precipitação média da bacia hidrográfica na data indicada na Tabela 34 foi discretizada em 6 horas pelo Método de Huff conforme descrito em 3.4.3 e mostra a Figura 29.

Figura 29 – Precipitação média discretizada em 6 horas

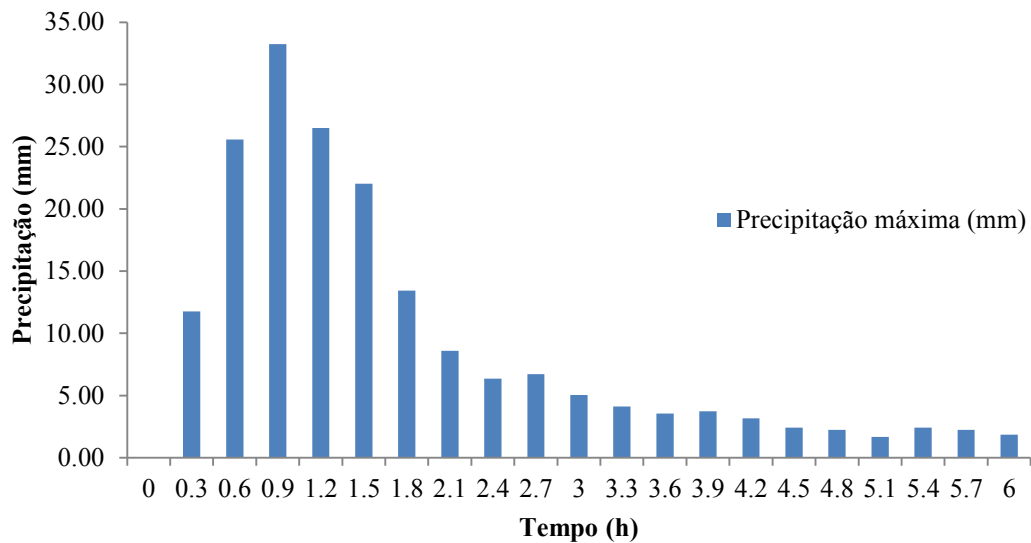


Fonte: AUTOR, 2017

4.2.3.2 Chuva máxima

A chuva máxima será utilizada para simular o rompimento da barragem Salto Moraes. A maior chuva registrada no município de Ituiutaba – MG nos últimos 50 anos foi de 186,7mm medida pela estação pluviométrica de código 1948014 na data 26 de Dezembro de 2008. Essa precipitação foi discretizada em 6 horas pelo Método de Huff, indicado em 3.4.3, como mostra a Figura 30.

Figura 30 - Precipitação máxima discretizada em 6 horas



Fonte: AUTOR, 2017

4.2.4 Modelagem no Hec-Hms

A modelagem no Hec-Hms tem como objetivo encontrar o hidrograma de vazão a jusante da barragem Salto Moraes. Para isso o Hec-Hms fornece resultados gerais da simulação e específicos para cada sub-bacia, rio e junção mostrada na Figura 25. Além disso foi necessário calibrar o coeficiente CN para que os resultados possam ser confiáveis. Sendo assim foi necessário fazer três simulações, a saber: com CN descalibrado e chuva média, com CN calibrado e chuva média e com CN calibrado e chuva máxima. Os resultados gerais são apresentados ao longo do texto porém os resultados específicos são apresentados nos Apêndices A, B, C, D, E e F.

4.2.5.1 Primeira simulação- CN descalibrado e chuva média

Com a topologia criada (Figura 26) conforme descrito em 3.4.4, e com os dados mostrados nas Tabelas 31, 32 e 33 e com a chuva média fez-se a primeira simulação no Hec-Hms. Essa simulação tem como objetivo verificar se a vazão máxima na barragem Salto

Moraes é igual à vazão da estação de código 60845000 no dia 28 de Dezembro de 2008 que é 110,9 m³/s. A Tabela 35 mostra os resultados gerais desta simulação.

Tabela 34 - Resultados gerais da primeira simulação

Elemento Hidrológico	Área de drenagem (km²)	Vazão de pico (m³/s)	Tempo de vazão de pico
Sub - bacia Rio Tijuco trecho 1	927,74	6,60	04Jan2017. 01:00
Rio Tijuco Trecho 1	927,74	6,60	04Jan2017. 23:00
Sub - bacia Rio São Lourenço	320,62	82,30	03Jan2017. 07:00
Rio São Lourenço	320,62	81,50	03Jan2017. 12:00
Junção 1	1248,36	82,50	03Jan2017. 12:00
Rio Tijuco Trecho 2	1248,36	81,60	03Jan2017. 19:00
Sub - Bacia Rio Dourado	567,20	11,00	03Jan2017. 10:00
Rio Dourado	567,20	11,00	03Jan2017. 13:00
Sub - Bacia Contribuição Junção 2	149,11	5,90	03Jan2017. 05:00
Rio Junção 2	149,11	5,90	03Jan2017. 08:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Esquerda)	65,97	3,40	03Jan2017. 04:00
Rio Contribuição Difusa Tijuco Trecho 2 (Esquerda)	65,97	3,20	03Jan2017. 07:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Direita)	48,23	2,30	03Jan2017. 05:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Direita)	48,23	2,30	03Jan2017. 08:00
Junção 2	2078,87	88,00	03Jan2017. 19:00
Rio Tijuco Trecho 3	2078,87	87,80	04Jan2017. 16:00
Sub - bacia Rio Babilônia	938,08	14,10	03Jan2017. 12:00
Rio Babilônia	938,08	14,10	04Jan2017. 08:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Esquerda)	764,66	18,30	03Jan2017. 08:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Esquerda)	764,66	18,20	03Jan2017. 13:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Direita)	208,70	3,50	03Jan2017. 12:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Direita)	208,70	3,50	03Jan2017. 21:00
Sub - bacia Contribuição Junção 3	98,10	3,90	03Jan2017. 05:00
Rio Junção 3	98,10	3,80	03Jan2017. 09:00
Junção 3	4088,41	94,90	04Jan2017. 16:00
Rio Tijuco trecho 4	4088,41	92,90	05Jan2017. 06:00
Sub - bacia Rio Monte Alegre	655,09	8,10	03Jan2017. 15:00

Rio Monte Alegre	655,09	8,10	03Jan2017. 23:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Esquerda)	353,05	8,00	03Jan2017. 08:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Esquerda)	353,05	7,90	03Jan2017. 15:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Direita)	326,01	4,90	03Jan2017. 13:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Direita)	326,01	4,90	03Jan2017. 23:00
Sub - bacia Contribuição Junção 4	100,60	3,60	03Jan2017. 06:00
Rio Junção 4	100,60	3,60	03Jan2017. 10:00
Junção 4	5523,16	93,50	05Jan2017. 06:00
Rio Tijuco Trecho 5	5523,16	93,40	05Jan2017. 17:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Direita)	605,85	8,50	03Jan2017. 13:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Direita)	605,85	8,50	04Jan2017. 00:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Esquerda)	323,12	16,00	03Jan2017. 16:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Esquerda)	323,12	15,90	04Jan2017. 05:00
Barragem Salto Moraes	6452,13	94,00	05Jan2017. 17:00

Fonte: AUTOR, 2017

Vê-se que a vazão máxima da Barragem Salto Moraes é inferior ao da estação mencionada, o que faz necessário a calibração do CN para que as vazões sejam iguais.

4.2.5.2 Segunda simulação- CN calibrado e chuva média

Foram realizadas tentativas no Hec-Hms para encontrar a vazão pretendida. O coeficiente CN teve um aumento de 3% como se vê na Tabela 36.

Tabela 35 - Coeficiente CN calibrado

Sub - bacia	CN _{Médio} calibrado
Sub - bacia Rio Tijuco Trecho 1	39,893
Sub - bacia Rio São Lourenço	57,25
Sub - bacia Rio Dourado	36,78

Sub - bacia Rio Babilônia	35,00
Sub - bacia Rio Monte Alegre	34,80
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Esquerda)	35,97
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Direita)	29,85
Sub - bacia Contribuição Junção 2	32,97
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Esquerda)	30,51
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Direita)	29,76
Sub - bacia Contribuição Junção 3	31,26
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Esquerda)	30,51
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Direita)	32,22
Sub - bacia Contribuição Junção 4	28,79
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Esquerda)	50,42
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Direita)	33,07

Fonte: AUTOR, 2017

Com o coeficiente CN calibrado foi feita uma nova simulação com todos os dados informados nas Tabelas 31, 32 e 36 e com a chuva média. A Tabela 37 mostra os resultados gerais desta simulação.

Tabela 36 - Resultados gerais da segunda simulação

Elemento Hidrológico	Área de drenagem (km²)	Vazão de pico (m³/s)	Tempo de vazão de pico
Sub - bacia Rio Tijuco trecho 1	927,74	6,80	04Jan2017. 01:00
Rio Tijuco Trecho 1	927,74	6,80	05Jan2017. 00:00
Sub - bacia Rio São Lourenço	320,62	100,30	03Jan2017. 07:00
Rio São Lourenço	320,62	99,50	03Jan2017. 12:00
Junção 1	1248,36	100,50	03Jan2017. 12:00
Rio Tijuco Trecho 2	1248,36	98,20	03Jan2017. 19:00
Sub - Bacia Rio Dourado	567,20	11,00	03Jan2017. 10:00
Rio Dourado	567,20	11,00	03Jan2017. 13:00
Sub - Bacia Contribuição Junção 2	149,11	5,90	03Jan2017. 05:00
Rio Junção 2	149,11	5,90	03Jan2017. 08:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Esquerda)	65,97	3,40	03Jan2017. 04:00

Capítulo 4– Resultados

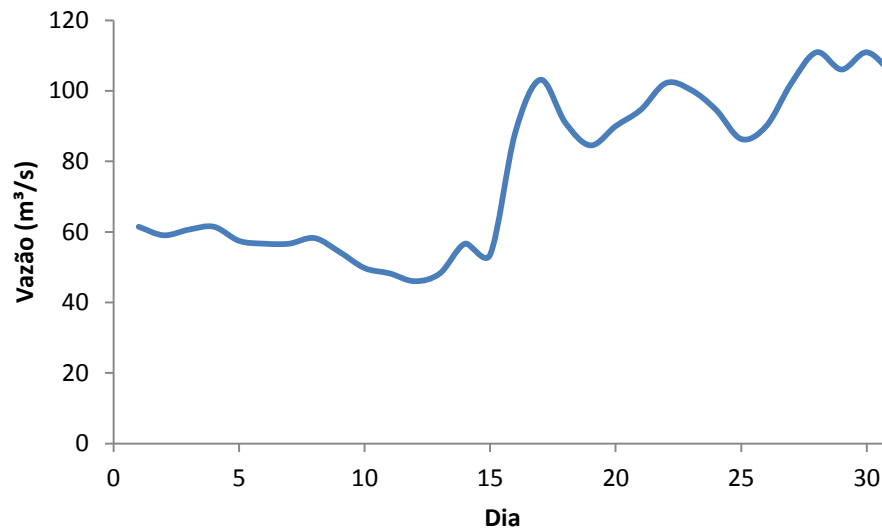
Rio Contribuição Difusa Tijuco Trecho 2 (Esquerda)	65,97	3,20	03Jan2017. 07:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Direita)	48,23	2,30	03Jan2017. 05:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Direita)	48,23	2,30	03Jan2017. 08:00
Junção 2	2078,87	105,50	03Jan2017. 18:00
Rio Tijuco Trecho 3	2078,87	105,00	04Jan2017. 16:00
Sub - bacia Rio Babilônia	938,08	14,10	03Jan2017. 12:00
Rio Babilônia	938,08	14,10	04Jan2017. 08:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Esquerda)	764,66	18,30	03Jan2017. 08:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Esquerda)	764,66	18,20	03Jan2017. 13:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Direita)	208,70	3,50	03Jan2017. 12:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Direita)	208,70	3,50	03Jan2017. 21:00
Sub - bacia Contribuição Junção 3	98,10	3,90	03Jan2017. 05:00
Rio Junção 3	98,10	3,80	03Jan2017. 09:00
Junção 3	4088,41	112,10	04Jan2017. 16:00
Rio Tijuco trecho 4	4088,41	109,90	05Jan2017. 05:00
Sub - bacia Rio Monte Alegre	655,09	8,10	03Jan2017. 15:00
Rio Monte Alegre	655,09	8,10	03Jan2017. 23:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Esquerda)	353,05	8,00	03Jan2017. 08:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Esquerda)	353,05	7,90	03Jan2017. 15:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Direita)	326,01	4,90	03Jan2017. 13:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Direita)	326,01	4,90	03Jan2017. 23:00
Sub - bacia Contribuição Junção 4	100,60	3,60	03Jan2017. 06:00
Rio Junção 4	100,60	3,60	03Jan2017. 10:00
Junção 4	5523,16	110,60	05Jan2017. 05:00
Rio Tijuco Trecho 5	5523,16	110,00	05Jan2017. 17:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Direita)	605,85	8,50	03Jan2017. 13:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Direita)	605,85	8,50	04Jan2017. 00:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Esquerda)	323,12	19,50	03Jan2017. 16:00

Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Esquerda)	323,12	19,40	04Jan2017. 05:00
Barragem Salto Moraes	6452,13	110,90	05Jan2017. 17:00

Fonte: AUTOR, 2017

A Figura 31 mostra as vazões medidas na estação 60845000.

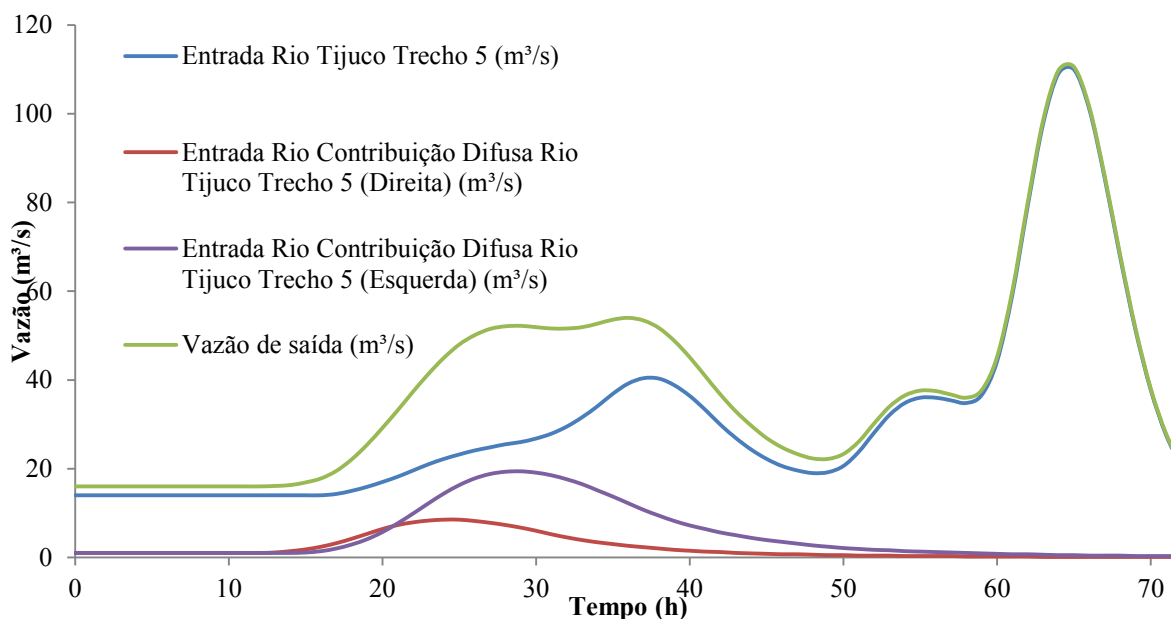
Figura 31 - Vazões medidas pela estação



Fonte: AUTOR, 2017

A Figura 32 mostra o hidrograma de vazão de entrada na barragem Salto Moraes.

Figura 32 - Hidrograma de vazão de entrada da Barragem Salto Moraes



Fonte: AUTOR, 2017

4.2.5.3 Terceira simulação- CN calibrado e chuva máxima

Com o coeficiente CN calibrado fez-se a última simulação no Hec – hms para ter o hidrograma de vazão na barragem. Essa simulação foi feita com os dados das Tabelas 31, 32 e 36 e com a chuva máxima. A Tabela 38 mostra os resultados gerais desta simulação.

Tabela 37 - Resultados gerais da terceira simulação

Elemento Hidrológico	Área de drenagem (km ²)	Vazão de pico (m ³ /s)	Tempo de vazão de pico
Sub - bacia Rio Tijuco trecho 1	927,74	214,90	04Jan2017. 02:00
Rio Tijuco Trecho 1	927,74	214,80	05Jan2017. 01:00
Sub - bacia Rio São Lourenço	320,62	808,40	03Jan2017. 06:00
Rio São Lourenço	320,62	799,20	03Jan2017. 11:00
Junção 1	1248,36	800,20	03Jan2017. 11:00
Rio Tijuco Trecho 2	1248,36	798,80	03Jan2017. 18:00
Sub - Bacia Rio Dourado	567,20	265,80	03Jan2017. 11:00
Rio Dourado	567,20	263,80	03Jan2017. 15:00
Sub - Bacia Contribuição Junção 2	149,11	80,40	03Jan2017. 07:00
Rio Junção 2	149,11	79,70	03Jan2017. 10:00

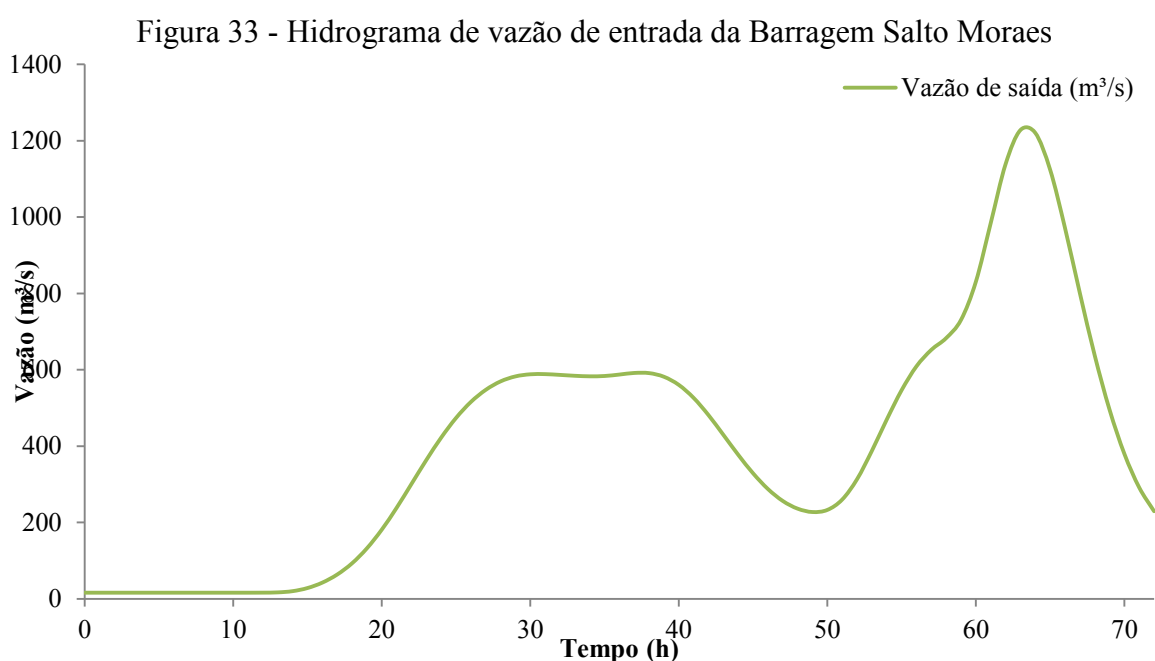
Capítulo 4– Resultados

Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Esquerda)	65,97	54,00	03Jan2017. 06:00
Rio Contribuição Difusa Tijuco Trecho 2 (Esquerda)	65,97	52,60	03Jan2017. 08:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Direita)	48,23	17,10	03Jan2017. 07:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 2 (Direita)	48,23	16,90	03Jan2017. 10:00
Junção 2	2078,87	1022,30	03Jan2017. 17:00
Rio Tijuco Trecho 3	2078,87	1020,10	04Jan2017. 15:00
Sub - bacia Rio Babilônia	938,08	290,60	03Jan2017. 14:00
Rio Babilônia	938,08	288,90	04Jan2017. 09:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Esquerda)	764,66	209,50	03Jan2017. 10:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Esquerda)	764,66	208,10	03Jan2017. 16:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Direita)	208,70	33,80	03Jan2017. 14:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 3 (Direita)	208,70	33,80	04Jan2017. 00:00
Sub - bacia Contribuição Junção 3	98,10	40,40	03Jan2017. 07:00
Rio Junção 3	98,10	40,10	03Jan2017. 11:00
Junção 3	4088,41	1225,60	04Jan2017. 15:00
Rio Tijuco trecho 4	4088,41	1215,30	05Jan2017. 04:00
Sub - bacia Rio Monte Alegre	655,09	163,70	03Jan2017. 16:00
Rio Monte Alegre	655,09	163,20	04Jan2017. 01:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Esquerda)	353,05	88,40	03Jan2017. 10:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Esquerda)	353,05	88,40	03Jan2017. 17:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Direita)	326,01	69,40	03Jan2017. 14:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 4 (Direita)	326,01	69,40	04Jan2017. 01:00
Sub - bacia Contribuição Junção 4	100,60	25,70	03Jan2017. 08:00
Rio Junção 4	100,60	25,30	03Jan2017. 12:00
Junção 4	5523,16	1229,80	05Jan2017. 04:00
Rio Tijuco Trecho 5	5523,16	1218,00	05Jan2017. 15:00
Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Direita)	605,85	139,60	03Jan2017. 15:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Direita)	605,85	139,20	04Jan2017. 02:00

Sub - bacia Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Esquerda)	323,12	247,80	03Jan2017. 15:00
Rio Contribuição Difusa Rio Tijuco Trecho 5 (Esquerda)	323,12	247,80	04Jan2017. 04:00
Barragem Salto Moraes	6452.13	1227,80	05Jan2017. 15:00

Fonte: AUTOR, 2017

Nota-se na Tabela 38 que a máxima vazão solicitante da barragem é 1227,80 m³/s. A Figura 33 mostra o hidrograma de vazão da barragem que será dado de entrada no Hec-Ras.



Fonte: AUTOR, 2017

4.3 MODELAGEM NO HEC-RAS

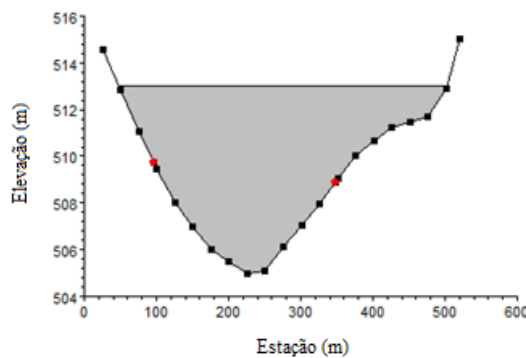
A modelagem no Hec-ras tem como objetivo analisar a influência de cada parâmetro definidor da brecha no hidrograma a jusante da barragem e na vazão de pico e a tem como objetivo também analisar a influência das equações empíricas presentes no Hec-ras no hidrograma a jusante da barragem e na vazão de pico. A modelagem consistiu em configurar a seção transversal da barragem, importação da geometria do canal do Arc-gis para o Hec-Ras,

configuração do regime não permanente para a simulação e adequação dos cenários de simulação conforme descrito em 3.5.

O coeficiente de rugosidade foi adotado 0,125 (canais com margens espraçadas e muita vegetação) para as margens direita e esquerda do canal e 0,035 (paredes retilíneas e uniformes com vegetações e pedras) para o fundo do canal conforme descrito na Tabela 24.

A barragem Salto Moraes tem 8m de altura, comprimento de 450 m e de concreto. A Figura 34 mostra configuração da seção transversal no Hec-Ras.

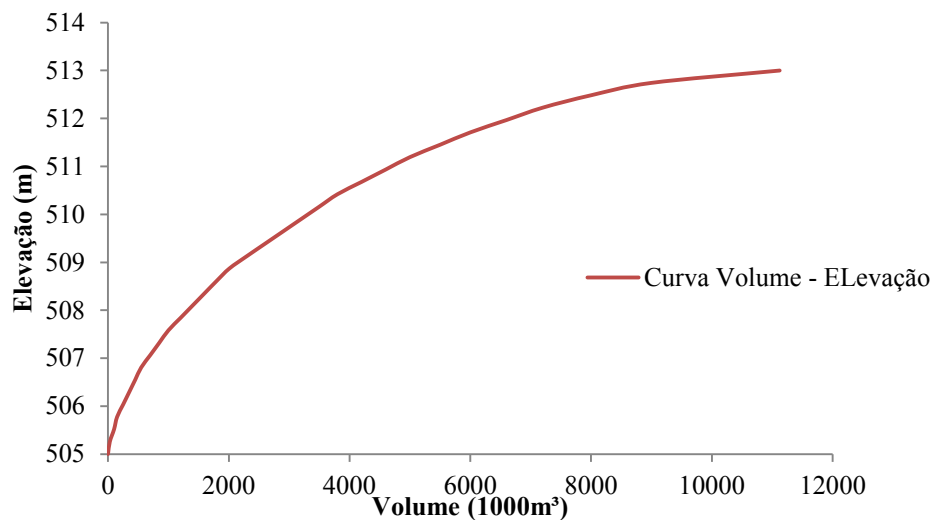
Figura 34- Seção transversal da barragem



Fonte: AUTOR, 2017

Como objetivo do trabalho foi adotado galgamento como forma de ruptura da barragem que inicia quando o fluido atinge a elevação de 513m. Com informações do volume do reservatório foi feita a curva elevação – volume do reservatório como mostra a Figura 35.

Figura 35- Curva elevação - volume do reservatório



Fonte: AUTOR, 2017

Na configuração do regime não permanente foram adotadas duas condições de contorno: o hidrograma na estação 73000 e a declividade na estação 20082,7. Os dados do hidrograma são os apresentados na Figura 35 e a declividade 0,0001. Como consta no hidrograma a vazão de entrada é 5 m³/s e a elevação inicial foi adotada 513m. Para a simulação foi adotado tempo de controle de 19 horas.

4.3.1 Influência dos parâmetros definidores da brecha no hidrograma a jusante da barragem

Essa seção irá mostrar à influência de cada parâmetro definidor da brecha no hidrograma a jusante da barragem em regime não permanente como descrito em 3.5.1 com a brecha hipotética descrita na Tabela 25.

4.3.1.1 Influência da altura da brecha

Foram estabelecidos quatro cenários para analisar a influência da altura da brecha no hidrograma de vazão a jusante da barragem. Esses cenários variam a altura da brecha e o tempo de formação da brecha, pois o mesmo é função da geometria da brecha (Tabela 8),

porém a largura, a inclinação lateral e a progressão da brecha se mantêm constantes em todos os cenários (Tabela 39).

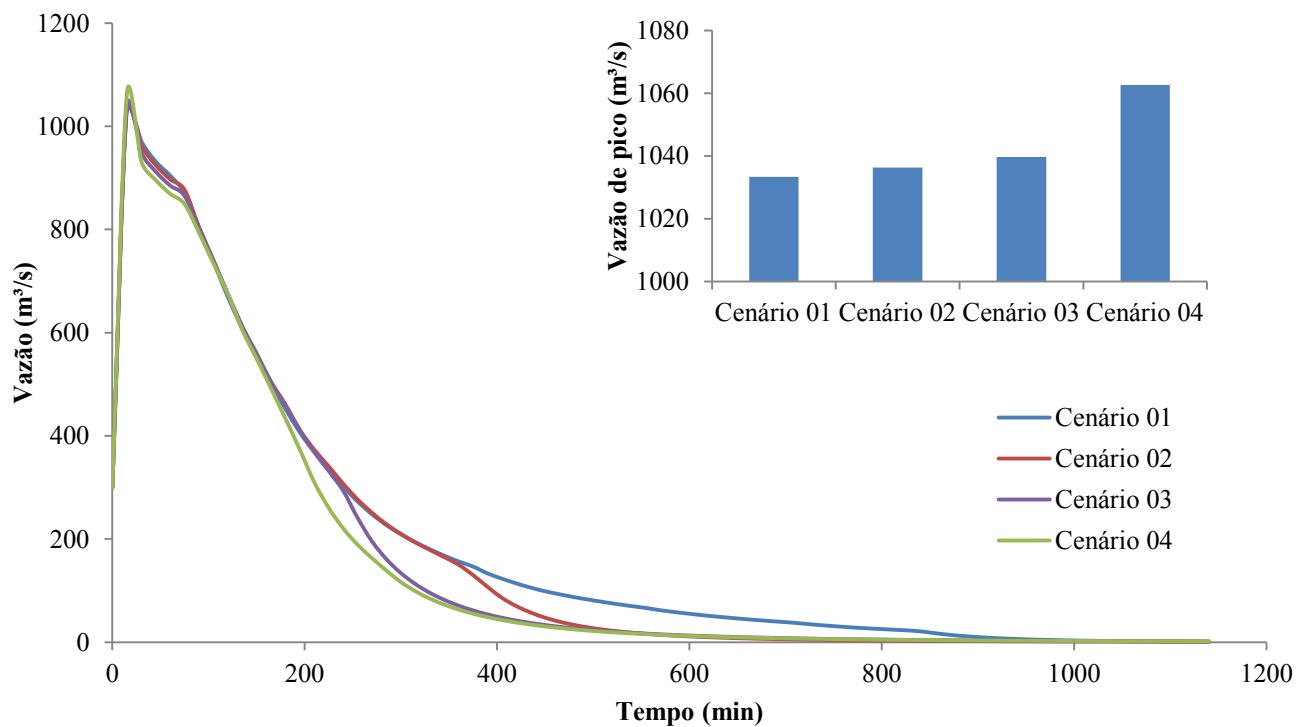
Tabela 38 - Variação da altura da brecha

Cenários	Hb (m)	B (m)	Z	Progressão da brecha	Tf (h)
Cenário 01	7,0	65	2	Onda senoidal	0,32
Cenário 02	4.9	65	2	Onda senoidal	0,28
Cenário 03	4,0	65	2	Onda senoidal	0,25
Cenário 04	3.5	65	2	Onda senoidal	0,24

Fonte: AUTOR, 2017

A Figura 36 mostra os hidrogramas de cada cenário de modo a se visualizar a influência de cada cenário.

Figura 36 - Hidrograma de vazão a jusante dos cenários 01 a 04



Nota-se na Figura 36 a diferença entre as vazões de pico de cada cenário é baixa (de 1033 m³/s para 1062 m³/s) e que conforme se aumenta a altura da brecha a vazão de pico diminui. Porém nota-se que com o decorrer do tempo o cenário 1 tem maior vazão em relação aos demais cenários.

4.3.1.2 Influência da largura da brecha

Foram estabelecidos quatro cenários indicadas na Tabela 27 para analisar a influência da largura da brecha no hidrograma de vazão a jusante da barragem. Esses cenários variam a largura da brecha e o tempo de formação da brecha, pois o mesmo é função da geometria da brecha (Tabela 8), porém a altura, a inclinação lateral e a progressão da brecha se mantêm constantes em todos os cenários (Tabela 40).

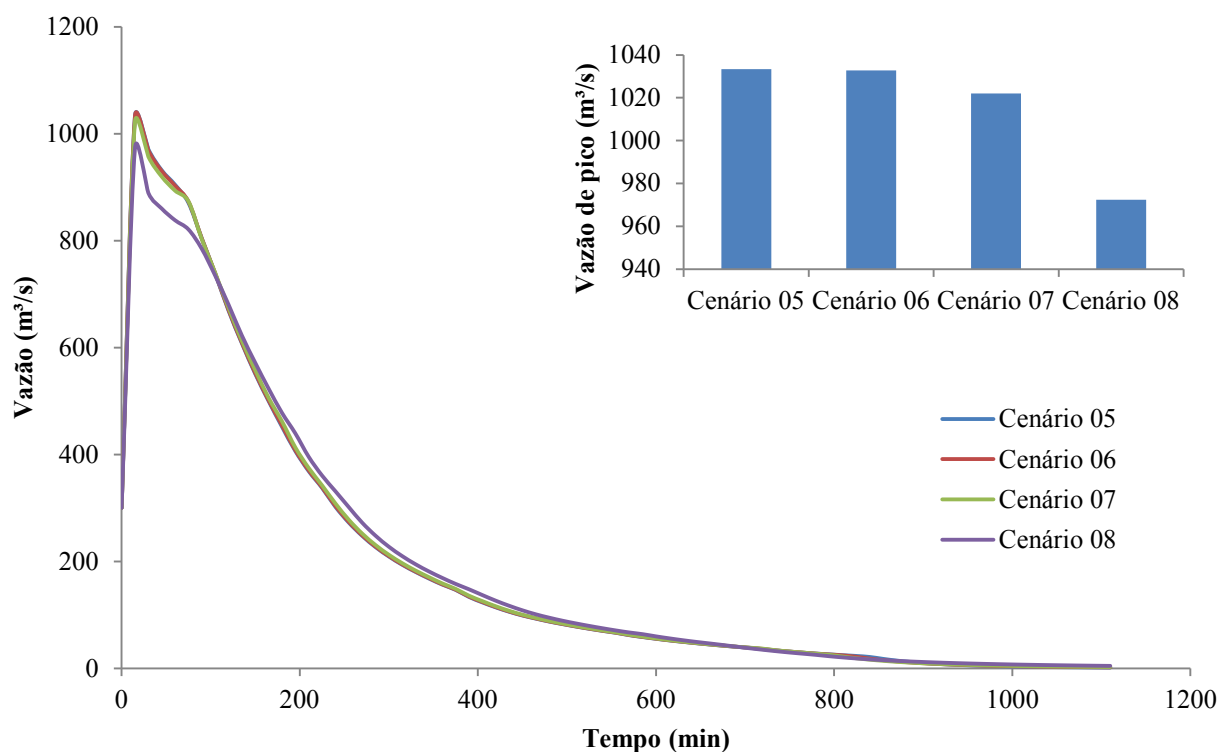
Tabela 39 - Variação da altura da brecha

Cenários	H _b (m)	B (m)	Z	Progressão da brecha	T _f (h)
Cenário 05	7	65,0	2	Onda senoidal	0,32
Cenário 06	7	45,5	2	Onda senoidal	0,29
Cenário 07	7	32,5	2	Onda senoidal	0,26
Cenário 08	7	13,0	2	Onda senoidal	0,22

Fonte: AUTOR, 2017

A Figura 37 mostra o hidrograma de vazão a jusante da barragem dos cenários 05 a 08 em regime não permanente.

Figura 37 - Hidrograma de vazão a jusante dos cenários 05 a 08



Fonte: AUTOR, 2017

Vê-se na Figura 37 que a vazão de pico aumenta com o aumento da largura da brecha, do cenário 05 para o cenário 08 há uma diferença de 61 m³/s. Vê-se também que com o decorrer do tempo todos os cenários têm o mesmo comportamento e não há uma alteração relevante nas vazões.

4.3.1.3 Influência da declividade lateral da brecha

Para estimar a influência da declividade lateral da brecha no hidrograma de vazão a jusante da barragem foi estabelecida quatro cenários indicadas na Tabela 28. Esses cenários variam a declividade lateral da brecha e o tempo de formação da brecha, pois o mesmo é função da geometria da brecha (Tabela 8), porém a altura, a largura e a progressão da brecha se mantêm constantes em todos os cenários (Tabela 41).

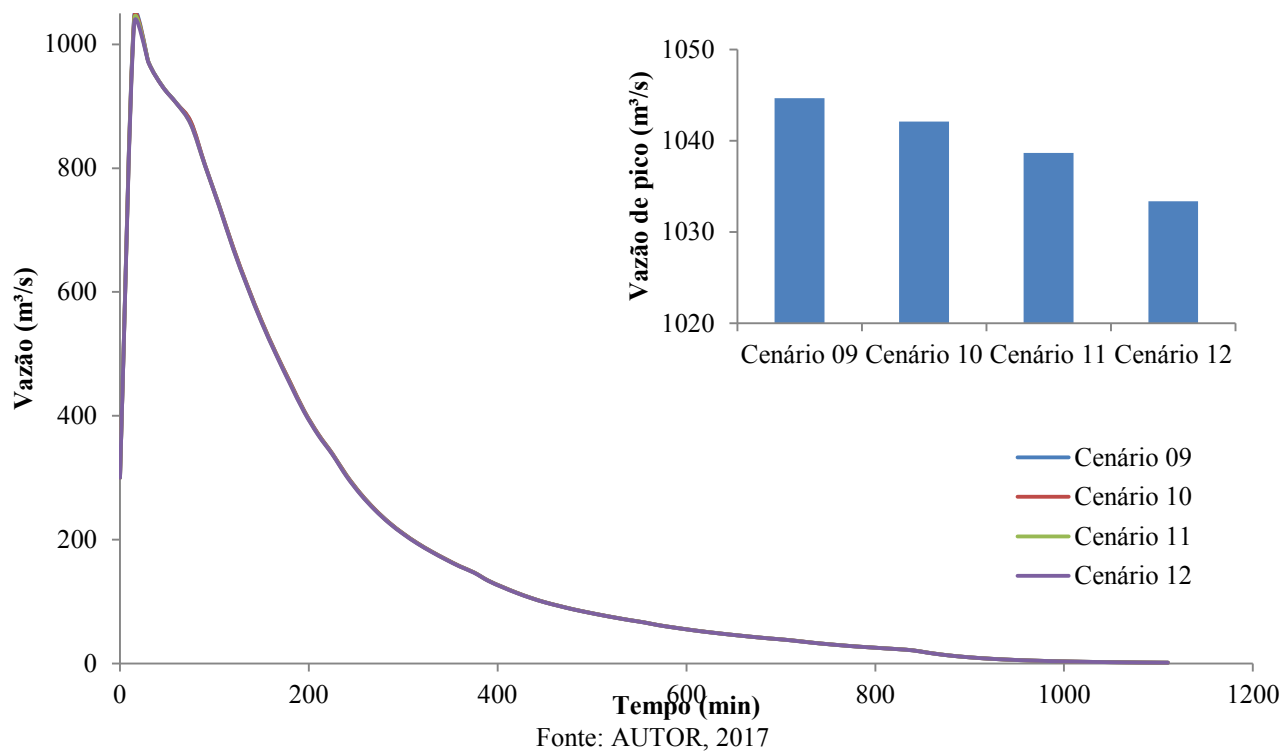
Tabela 40 – Variação da declividade lateral da brecha

Cenários	H_b (m)	B (m)	Z	Progressão da brecha	T_f (h)
Cenário 09	7	65	0,5	Onda senoidal	0,30
Cenário 10	7	65	1,0	Onda senoidal	0,31
Cenário 11	7	65	1.5	Onda senoidal	0,32
Cenário 12	7	65	2,0	Onda senoidal	0,32

Fonte: AUTOR, 2017

A Figura 38 mostra os hidrogramas de vazão à jusante da barragem de todos os cenários descritos na Tabela 41.

Figura 38 - Hidrograma de vazão a jusante dos cenários 09 a 12



Vê-se na Figura 38 que os hidrogramas de vazão a jusante da barragem dos quatro cenários simulados são semelhantes, porém nota-se uma pequena variação na vazão de pico (de 1044 m³/s para 1033 m³/s) quando se aumenta a declividade lateral da brecha. Ao aumentar a declividade lateral da brecha a vazão diminui.

4.3.1.4 Influência da progressão da brecha

O software Hec-Ras oferece duas opções de progressão da brecha: onda senoidal e linear. Sendo assim foram estabelecidos dois cenários para analisar a influência da progressão da brecha no hidrograma de vazão a jusante da barragem (Tabela 42).

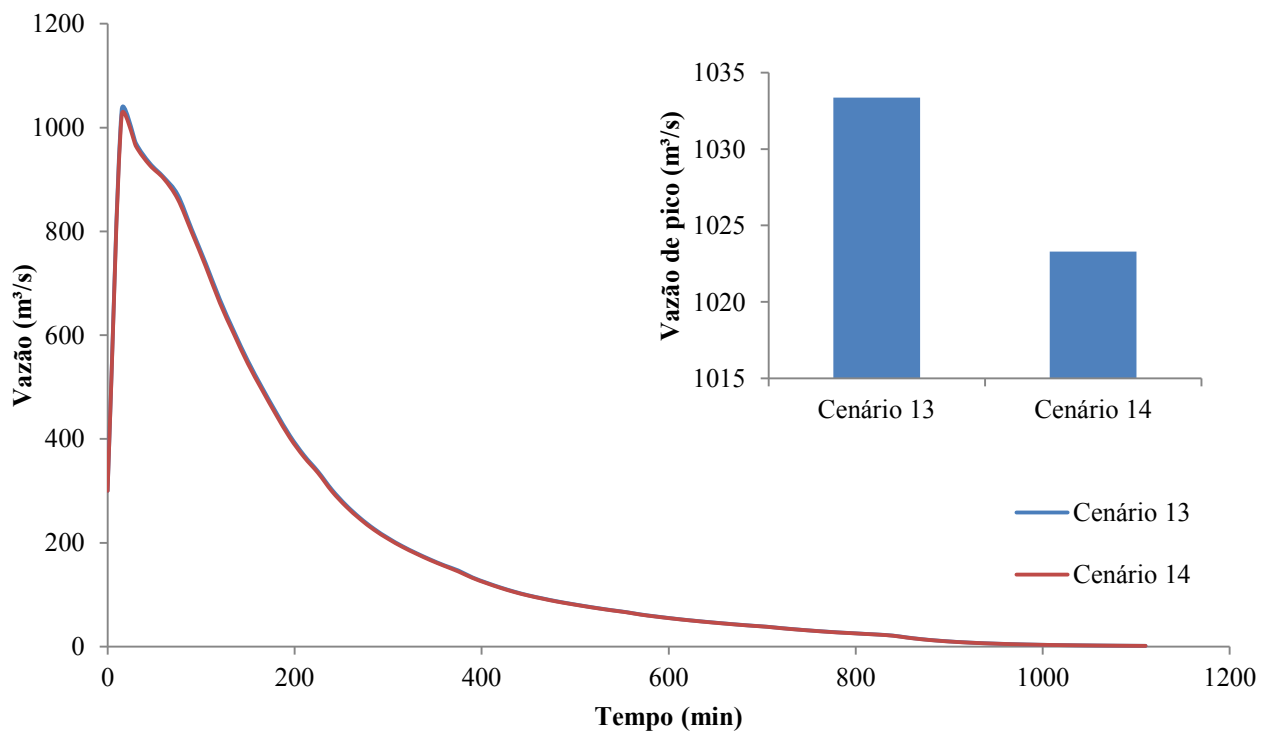
Tabela 41 - Variação da declividade lateral da brecha

Cenários	H _b (m)	B (m)	Z	Progressão da brecha	T _f (h)
Cenário 13	7	65	2	Onda senoidal	0,32
Cenário 14	7	65	2	Linear	0,32

Fonte: AUTOR, 2017

Os hidrogramas de vazão a jusante da barragem dos cenários 12 e 13 são mostrados na Figura 39.

Figura 39 - Hidrograma de vazão a jusante dos cenários 13 e 14



Na Figura 39 nota-se que os dois cenários têm comportamentos semelhantes no hidrograma de vazão a jusante, porém nota-se que a vazão de pico do cenário 13 (progressão senoidal) é ligeiramente maior que a vazão de pico do cenário 14 (progressão linear). A diferença de vazão dos dois cenários é de 10 m³/s.

4.3.2 Influência de fórmulas empíricas no hidrograma de vazão a jusante da barragem

O Hec-Ras fornece quatro opções de equações que definem parâmetros formadores da brecha. Essas equações foram descritas em 3.5.2 e a Tabela 43 mostra os resultados desses parâmetros.

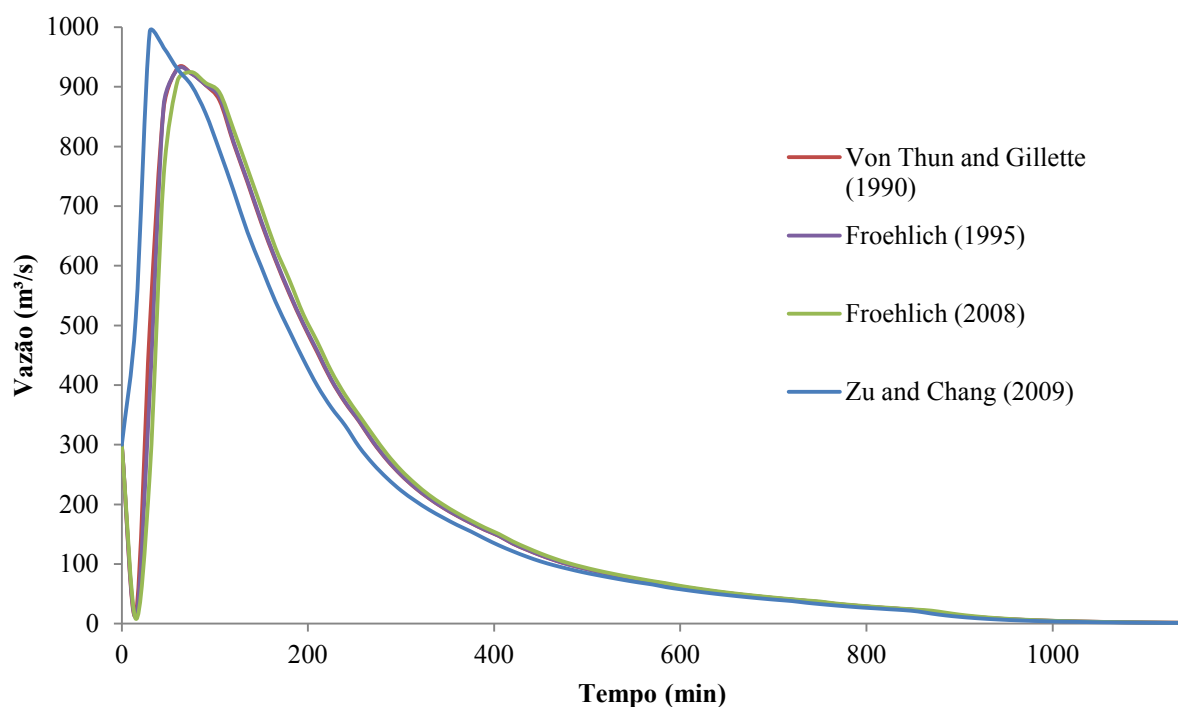
Tabela 42 - Parâmetros das brechas

Autor	H_b (m)	$B_{\text{médio}}$ (m)	Z	T_f (h)
Froehlich (1995)	7	65,68	1,4	2,39
Froehlich (2008)	7	68,21	1,0	2,67
Von Thun and Gillette (1990)	7	60,20	1,0	2,15
Zu and Chang (2009)	7	77,95	1,87	1,23

Fonte: AUTOR, 2017

Foi adotada a progressão senoidal como progressão de brecha porque se notou na Figura 39 que o mesmo gera uma vazão de pico maior. Com todos os dados foram feitas simulações em regime não permanente para se obter os hidrogramas de vazão a jusante da barragem. A Figura 40 mostra esses hidrogramas.

Figura 40 - Influência das equações empíricas no hidrograma de vazão a jusante da barragem



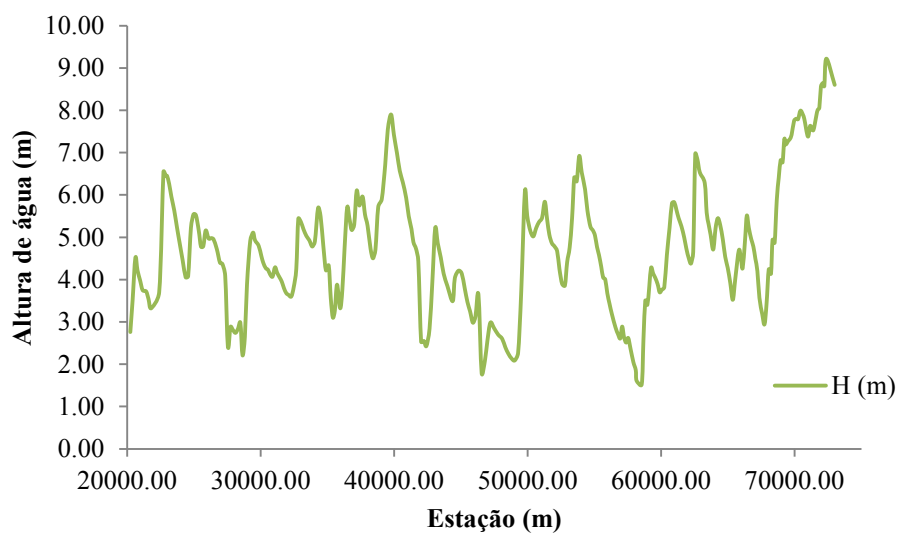
Fonte: AUTOR, 2017

A equação de *Xu and Chang* gerou uma vazão maior que as restantes equações. Nota-se na Tabela 43 que a equação deles tem maior largura média o que faz com que a vazão de pico seja maior. Nota-se também na Figura 40 que as equações de *Froehlich* e *Von Thun and Gillette* têm comportamentos semelhantes.

4.4 ZONEAMENTO DE RISCO

Com a equação de Froehlich (2008) foi adquirido no Hec-Ras o nível de água e a velocidade em cada seção transversal do canal a jusante da barragem Salto Moraes. As Figuras 41 e 42 mostram esses valores de altura de água e a velocidade.

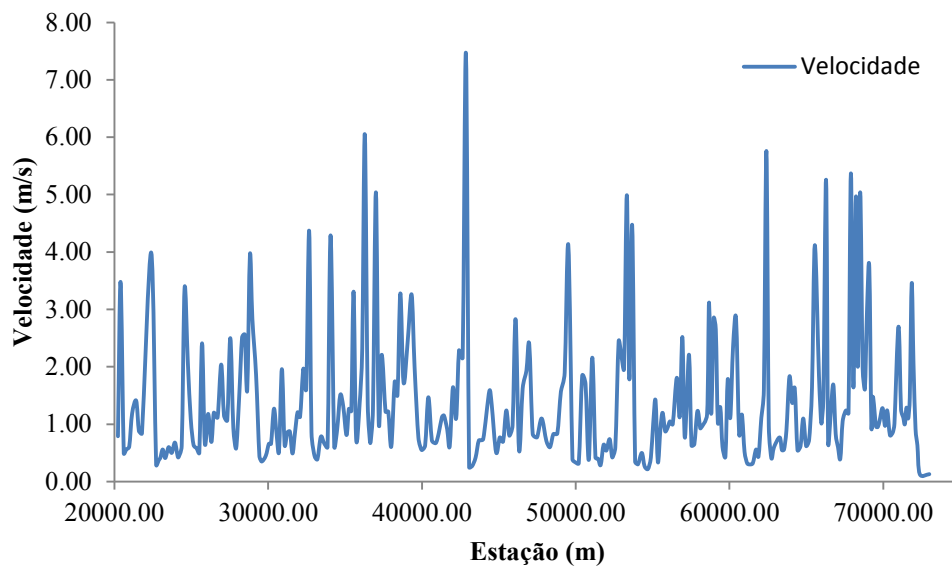
Figura 41 – Altura de água no canal a jusante da Barragem Salto Moraes



Fonte: AUTOR, 2017

A Figura 42 mostra os valores de velocidade no canal à jusante da Barragem Salto Moraes.

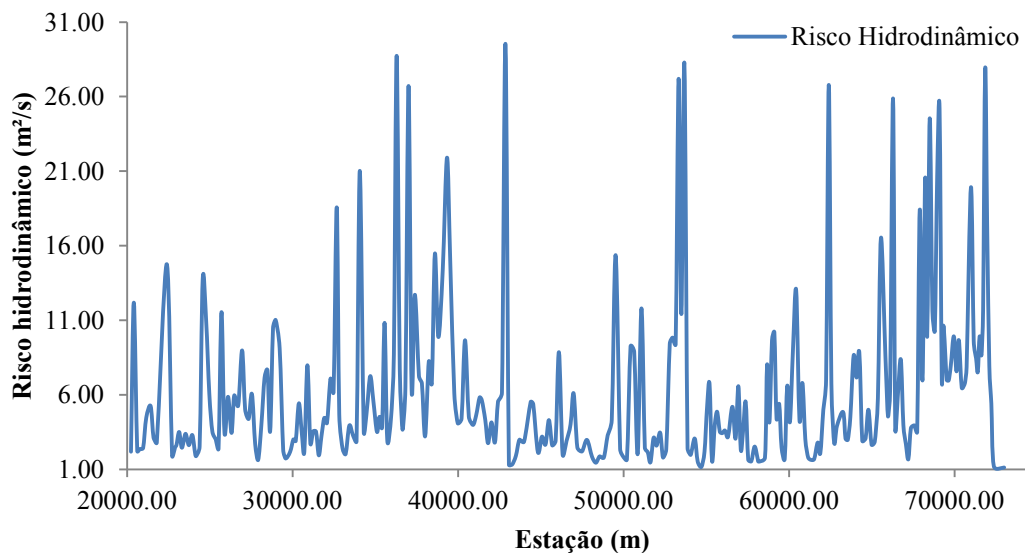
Figura 42 – Velocidade no canal a jusante da Barragem Salto Moraes



Fonte: AUTOR, 2017

Com o uso da Equação 2 foi gerada a Figura 43 que mostra o risco hidrodinâmico ao longo do canal a jusante da barragem.

Figura 43 - Risco hidrodinâmico ao longo do canal



Fonte: AUTOR, 2017

Para se analisar o nível de risco foram utilizados os parâmetros descritos nas Tabelas 16 e 17. Para seres humanos o rompimento da Barragem Salto Moraes tem nível “Muito Importante” e classe “Vermelho” pois o Risco Hidrodinâmico é maior que $1 \text{ m}^2/\text{s}$ em todo o canal. Já para edificações nota-se que ela tem vários níveis e classes ao longo do canal.

A Figura 44 mostra a área inundada pelo rompimento da barragem Salto Moraes. Ela mostra no detalhe que a área inundada atinge arredores da cidade de Ituiutaba-MG, estruturas de entretenimento e uma estação de tratamento de esgoto. Isso acontece nas estações 62401,09 a 60807,38 onde o risco hidrodinâmico varia como mostra a Tabela 44.

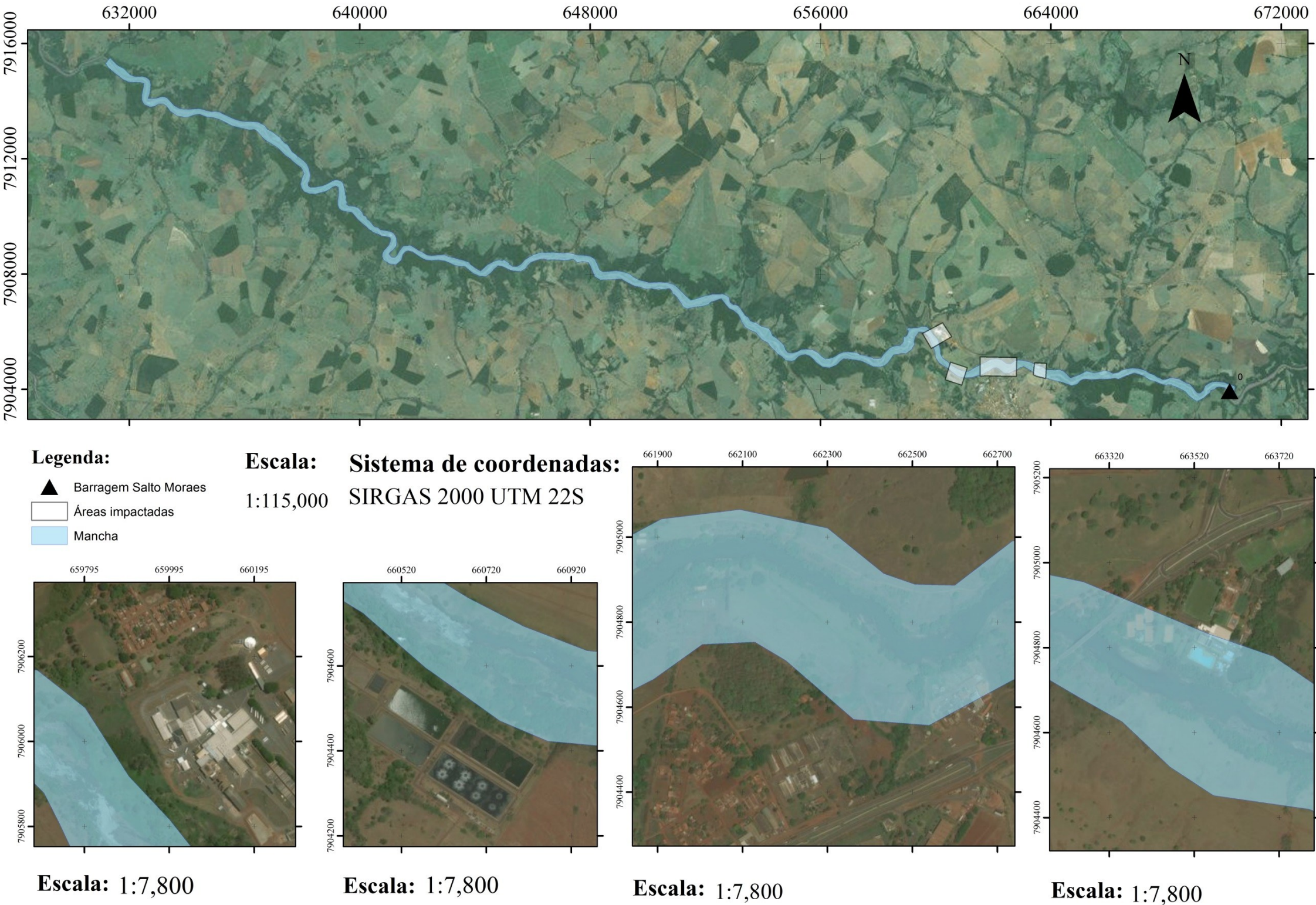
Tabela 43 - Risco nos arredores da cidade de Ituiutaba-MG

Estação (m)	H (m)	V (m/s)	Risco Hidrodinâmico (m^2/s)
62401,09	4,65	5,76	26,78
62238,26	4,38	1,60	7,01
62070,48	4,50	1,11	5,00
61888,72	4,73	0,44	2,08
61729,13	4,99	0,56	2,79
61517,04	5,26	0,32	1,68
61309,16	5,45	0,30	1,64
61149,51	5,64	0,32	1,80
60980,01	5,83	0,52	3,03
60807,38	5,80	1,17	6,79

Fonte: AUTOR, 2017

Nota-se nesse trecho apresentado que para seres humanos o nível é muito importante e a classe é vermelha. Na estação 62401,09 fica situado um edifício com área de lazer; nessa seção nota-se que o risco hidrodinâmico é muito elevado (classe vermelho) o que causa o colapso do edifício. Na estação 60807,38 há uma estação de tratamento de esgoto há nível de risco importante e classe amarelo para edificações podendo causar danos estruturais e possível colapso. As estações 62238,26 a 60980,01 são os arredores da cidade de Ituiutaba-MG a qual é impactada pela área inundada como mostra a Figura 44. Para edificações nota-se que a classe do risco é amarelo causando danos estruturais de edifícios e possível colapso.

Figura 44 - Mapa de inundação do rompimento da barragem Salto Moraes



Fonte: AUTOR, 2017

CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo simular computacionalmente o rompimento hipotético da barragem Salto Moraes no Rio Tijuco, e através de resultados gráficos como hidrogramas de vazão a jusante da barragem e mapa de inundação analisar o impacto causado nas imediações do canal à jusante da barragem.

O canal, a jusante da barragem Salto Moraes, foi caracterizado com a criação de 277 seções transversais no Hec-Geo Ras tendo o mesmo um comprimento de 50 km. Este canal passa nos arredores de cidade de Ituiutaba-MG, visto que isso foi uma das justificativas para estudar o rompimento da barragem por galgamento. Com o estudo do canal a jusante concluiu-se que a mesma é muito íngreme fazendo com que o rompimento da barragem cause elevada altura de água nas seções.

Além do estudo do canal a jusante da barragem, foi estudada a bacia hidrográfica a montante da barragem. Esse estudo teve como objetivo principal calcular o hidrograma de vazão que causaria hipoteticamente o rompimento da estrutura. Com o estudo da topografia da bacia a montante da barragem foi identificadas todas as sub-bacias e devido à contribuição difusa no Rio Tijuco ser alta foram criadas sub-bacias fictícias para levar em consideração essa contribuição. No total foram identificadas quatro sub-bacias reais (Rio Dourado, Rio São Lourenço, Rio Babilônia e Rio Monte Alegre) e doze sub-bacias fictícias.

Analisando o solo da região constatou-se que o tipo de solo na mesma é o latossolo vermelho distrófico, tendo como o grupo de solo A. O estudo do uso e ocupação do solo feito em cada sub-bacia mostrou que a ocupação predominante em toda a bacia hidrográfica a montante barragem Salto Moraes é de pastagem e por consequência tendo um elevado potencial de infiltração como indicam os hidrogramas apresentados nos Apêndices.

Na simulação no Hec-Hms utilizaram-se três cenários de modo a calibrar o coeficiente CN. A primeira simulação foi feita utilizando a chuva média calculada pelo Método de Thiessen, a qual gerou uma vazão máxima na barragem Salto Moraes de 94 m³/s. A segunda simulação foi feita em várias tentativas até que a vazão máxima na barragem fosse à registrada na estação fluviométrica. Essa simulação foi feita com a chuva média e o CN calibrado, a qual gerou uma vazão máxima na barragem Salto Moraes de 110,90 m³/s (igual

ao da estação fluviométrica). A terceira simulação foi feita com a maior precipitação dos últimos 50 anos na região de Ituiutaba-MG e com CN calibrado, a qual gerou uma vazão máxima de 1227,80 m³/s na barragem Salto Moraes.

Com porte dos dados do canal a jusante da barragem, o hidrograma de vazão na barragem, a curva do reservatório e a seção da barragem foram feitas várias simulações no Hec-Ras em regime não permanente. Primeiramente foi criado um cenário padrão e vários outros para verificar a influência dos parâmetros definidores de formação da brecha no hidrograma de ruptura a jusante. Os cenários 01 a 04 estudaram a influência da altura da brecha e indicaram que conforme aumenta a altura da brecha a vazão de pico imediatamente a jusante da barragem diminui. Os cenários 05 a 08 estudaram a influência da largura da brecha e constatou-se que com o aumento da largura da brecha a vazão de pico imediatamente a jusante da barragem aumenta. Os cenários 09 a 12 estudaram a influência da declividade lateral da brecha e indicaram que conforme aumenta a declividade lateral da brecha a vazão de pico imediatamente a jusante da barragem diminui. Os últimos cenários (13 e 14) estudaram a influência da progressão da brecha e constatou-se que a progressão senoidal gera maior vazão de pico que a progressão linear.

Foi analisada também no Hec-Ras a influência de quatro equações empíricas que definem parâmetros formadores da brecha. Concluiu-se com as simulações feitas que a equação de “*Xu and Chang (2009)*” gera uma maior vazão de pico (992,12 m³/s).

Com os resultados da simulação feita com a equação de “*Xu and Chang (2009)*” elaborou-se um mapa de inundação da ruptura da barragem. Esse mapa indicou que a área inundada atingiria os arredores da cidade de Ituiutaba-MG como se previa na justificativa do trabalho. Como uso de parâmetros estabelecidos pela literatura constatou-se que as áreas impactadas com a ruptura da barragem causariam mortes de vidas humanas e destruição de edifícios.

Com todos os objetivos estabelecidos cumpridos, conclui-se que o rompimento hipotético da barragem Salto Moraes sob as condições previstas no trabalho impacta diretamente vidas humanas, edifícios e estruturas como estação de tratamento de esgoto o que pode influenciar o saneamento da cidade.

REFERÊNCIAS

ACHAPUZ, Paulo Brandi de Barros; LAMARÃO, Sérgio Tadeu de Niemeyer; MARTINS, Gilberto Lima. **Usinas da Cemig: A história da eletricidade em Minas e no Brasil**. 2005. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/nossos_negocios/usinas/Documents/livro_usinas.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2016.

ACKERMAN, Cameron T.; P.E.; BRUNNER, Gary W.. **DAM FAILURE ANALYSIS USING HEC-RAS AND HEC-GEORAS**. Disponível em: <http://acwi.gov/hydrology/mtsconfwkshops/conf_proceedings/3rdFIHMC/11F_Ackerman.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2016.

ALMEIDA, A. B. Emergência e gestão do risco. In: *Curso de Exploração e Segurança de Barragens*. Capítulo 7. Lisboa: Instituto Nacional da Água (INAG), 2001. 104p

ATALLAH, Tony. **A REVIEW ON DAMS AND BREACH PARAMETERS ESTIMATION**. 2002. 120 f. Dissertação (Mestrado) : Curso de Civil And Environmental Engineering, Department Of Civil And Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute And State University Blacksburg, Virginia, 2002. Disponível em: <<https://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-05232002-234249/unrestricted/finalone.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2016.

BALBI, D.A.F. **Metodologias para a elaboração de Planos de Ações Emergenciais para inundações induzidas por Barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti – MG**. 2008. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais 2008.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 12.334 de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema

Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do Art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do Art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. *Diário Oficial*

[da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 21 set. 2010. Seção 1. p. 1.

Disponível em: <<http://www.in.gov.br>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

BRASIL. Engecorps Engenharia. Agência Nacional de Águas (Org.). **Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas: Estudos de Ruptura de Barragens**. Brasília: Engecorps, 2012. 113 p. Disponível em: <[http://gripbsul.ana.gov.br/rels/R06.Estudo de Ruptura de Barragens/R06.Estudo de Ruptura de Barragens.Tomo_I_Texto.pdf](http://gripbsul.ana.gov.br/rels/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens.Tomo_I_Texto.pdf)>. Acesso em: 16 jun. 2016.

BRUNNER, G. **Using HEC-RAS for dam break studies**. Califórnia: Hydrologic Engineering Center, 2014. 74 p.

BUREAU OF RECLAMATION. **Design of small dams**. Colorado, Estados Unidos-US Department of the Interior, 1987. 904 p.

CAMERON T. ACKERMAN. Us Army Corps Of Engineers. **Hec-GeoRas: GIS tools for support of Hec-Ras using ArcGis**. 4.2 Califórnia: Hydrologic Engineering Center, 2009. 246 p.

CESTARY JÚNIOR, Euclides. **ESTUDO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO PARA ELABORAÇÃO DE PLANO DE AÇÃO EMERGENCIAL DE BARRAGENS – UHE TRÊS IRMÃOS ESTUDO DE CASO**. 2013. 224 f. Dissertação (Mestrado) : Curso de Engenharia Civil, Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

Costa, J. E. (1985) – “Floods from Dam Failures”, U.S. Geological Survey Open-File Report 85-560, 54 p, Denver, Colorado.

FLAVIO MIGUEZ DE MELLO (Rio de Janeiro). Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. **Barragens no Brasil**. São Paulo: Novo Grupo, 1982. 279 p.

FERREIRA, Ana Luisa Moreira; ANDRZEJEWSKI, Edgar Alberti. **COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUPTURA DE UMA BARRAGEM**

HIPOTÉTICA. Comitê Brasileiro de Barragens- XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu, v. 30, n. 1, p.1-12, maio 2015.

FLAVIO MIGUEZ DE MELLO (Rio de Janeiro). Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. **A História das Barragens no Brasil séculos XIX, XX e XXI-** Cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro- Sindicato Nacional de Editores de Livros, 2011. 524 p. Disponível em:

<http://www.cbdb.org.br/documentos/a_historia_das_barragens_no_brasil.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2016.

FLEMING, M. J. **Quick Start Guide**. Califórnia- Hydrologic Engineering Center, 2010. 52 p.

GEE, Michael. Comparison of Dam Breach Parameter Estimators. **Corps Of Engineers Hydrologic Engineering Center**, Califórnia, v. 1, n. 1, p.1-10, jan. 2008.

GREGORETTI, Carlo; MALTAURO, Alessandro; LANZONI, Stefano. Laboratory Experiments on the Failure of Coarse Homogeneous Sediment Natural Dams on a Sloping Bed. **Journal Of Hydraulic Engineering**, Tennessee, v. 136, n. 11, p.868-879, nov. 2010. Disponível em:

<http://www.image.unipd.it/s.lanzoni/publications/PDF/Gregoretti_et_al_JHE10.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2016.

GOMES, Julio et al. Investigação da influência dos parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura de uma barragem sobre o hidrograma de cheia a jusante. **Comitê Brasileiro de Barragens- XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Foz do Iguaçu, v. 30, n. 1, p.1-20, maio 2015.

GOODARZI, Ehsan; SHUI, Lee Teang; ZIAEI, Mina. Dam overtopping risk using probabilistic concepts – Case study- The Meijaran Dam, Iran. **Ain Shams Engineering Journal**. Cairo, p. 185-197. set. 2012.

JANSEN, Robert B.. **Dams and public safety**. Minnesota- U.S. Department Of The Interior, 1983. 332 p. Digitalizado em 2009. Disponível em: <<http://ussdams.com/ussdeducation/Media/damsfrombeginning.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2016.

JÓNATAS, Ricardo Jorge Lourenço. **Rotura de barragens de aterro por galgamento- Ensaios experimentais com aterros homogêneos**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Energia e do Ambiente, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: <http://docs.di.fc.ul.pt/bitstream/10451/10259/1/ulfc106012_tm_Ricardo_Jónatas.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2016.

MALETTA, Bruno Vasques. **Modelos baseados em Simulação de Monte Carlo: Soluções para o cálculo do Value-at-Risk**. 2005. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Administração, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Cap. 2. Disponível em: <http://www.coppead.ufjf.br/upload/publicacoes/Bruno_Maletta.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2016.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**; São Paulo, Oficina de Textos, 2003.

MELO, Alexandre Vaz de. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: Estudo de caso de barragens da CEMIG GT**. 2013. 244 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Cap. 2.

MELO, Ivan Dornelas Falcone de; PACHÊCO, Admilson P.. **ASPECTOS DA CORREÇÃO GEOMÉTRICA DE IMAGENS ORBITAIS**. Disponível em: <[https://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria e Sensoriamento Remoto/Artigos/f048.pdf](https://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriamento%20Remoto/Artigos/f048.pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2016

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto- Princípios e Aplicações**. Editora Edgar Blücher Ltda. São José dos Campos, 1989. 308p.

PEREIRA, Carlos Eugénio et al. Comparação entre modelos simplificados e o modelo HEC-RAS no estudo de áreas de inundação para o caso de Minas Gerais, Brasil. **Revista Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 38, n. 1, p.75-90, mar. 2017. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH). <http://dx.doi.org/10.5894/rh38n1-cti3>.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Paulo- Rima Artes e Textos, 2006. 540 p.

SANTOS, Luciano dos; BACCARO, Claudete Aparecida Dallevedove.

CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA BACIA DO RIO TIJUCO. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 1, p.1-21, fev. 2004.

SANTOS, J. Brito dos; FRANÇA, M. J.; ALMEIDA, A. Betâmio de. Risco associado à ruptura por galgamento de barragens de aterro. **Ingenieria del Agua**, Córdoba, v. 14, n. 4, p.260-278, maio 2007.

SARTORI, Aderson; LOMBARDI NETO, Francisco; GENOVEZ, Abel Maia. 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. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p.1-14, out. 2015.

SCARPARO, Claudio; MAMEDE, Nelson; SILVA, Luciano Barbosa. **ESTRUTURA ARQUITETÔNICA E URBANÍSTICA**. Disponível em:

<[http://fundacaoituiutaba.com.br/FichasInvent/usina Salto dos Moares.pdf](http://fundacaoituiutaba.com.br/FichasInvent/usina%20Salto%20dos%20Moaers.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2016

SHERARD, James L et al. **Earth-Rock Dams-** Engineering Problems of Design and Construction. New York- Library Of Congress, 1963. 721 p.

SYNAVEN, K. The pilot Project Kyrkojarvi dam and reservoir, Seinajoki, Finland. In- INTERNACIONAL SEMINAL AND WORKSJOP RISK ASSESMENT, DAM-BREAK FLOOD ANÁLISIS AND EMERGENCY ACTION PLANNING. Seinajnoki- Finnish Environment Institute, 2000.

TAHMİSCİOĞLU, M. Sait et al. **POSITIVE AND NEGATIVE IMPACTS OF DAMS ON THE ENVIRONMENT**. Disponível em:

<<http://www.creditvalleyca.ca/wp-content/uploads/2011/02/60.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

USGS. **Landsat**. Disponível em:

<http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php>. Acesso em: 10 jun. 2016.

WISEU, T.; MARTINS, R. Safety risks of small dams. In- BERGA, L. (Ed.) *Dam Safety*. Rotterdam- Balkema, 1998. p. 283-288.

Wahl, T. L. (1998) - “Prediction of Embankment Dam Breach Parameters- A Literature Review and Needs Assessment”, Dam Safety Research Report, Water Resources Research Laboratory, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office.

XIONG, Yi. A Dam Break Analysis Using HEC-RAS. **Journal Of Water Resource And Protection**. Mississippi, p. 370-379. 28 mar. 2011.

XIONG, Yi. A Dam Break Analysis Using HEC-RAS. **Jwarp**, [s.l.], v. 03, n. 06, p.370-379, 2011. Scientific Research Publishing, Inc,. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2011.3604>

ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. Analysis of earth dam failures- A database approach. **Isgsr2007- First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk**, Shanghai, v. 1, n. 1, p.293-302, 18 out. 2007