

**IV-860 – GESTÃO DE RISCO DA BARRAGEM DE AFETOS PARA
CUMPRIMENTO DA POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE
BARRAGENS NO ESTADO DE PERNAMBUCO**

Marcos Henrique Vieira de Mendonça⁽¹⁾
Hudson Tiago dos Santos Pedrosa
Mayra Angelina Quaresma Freire
Romik Wilson de Assis Júnior

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Analista de Saneamento da Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA, com o cargo de Assessor da Diretoria Regional Agreste e Matas - DRA.

Endereço⁽¹⁾: Rua Pastor José Amaro da Silva, 112 – Boa Viagem - Recife - PE - CEP: 51.021-230 - Brasil - Tel: (81) 98494-2973 - e-mail: marcosmendonca@compesa.com.br

RESUMO

Os graves desastres em barragens de mineração ocorridos em Mariana e Brumadinho, ambos no Estado de Minas Gerais, em 2015 e 2019, respectivamente, trouxeram grandes questionamentos quanto à aplicação e fiscalização da política de segurança de barragens no Brasil. Pereira (2019) aponta que tais acidentes ressaltam a dificuldade do estabelecimento de uma cultura de segurança de barragens no país, uma vez que a lei federal vigente foi promulgada há apenas uma década. Assim, a temática tornou-se de grande destaque em todas as esferas, abrangendo não apenas os barramentos para atividades de mineração, mas também os do setor elétrico, para abastecimento humano e demais finalidades.

A Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) (BRASIL, 2010). A Política se aplica a barramentos destinados à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. A referida Lei também definiu, dentre outras, o empreendedor como o “agente privado ou governamental com direito real sobre as terras onde se localizam a barragem e o reservatório ou que explore a barragem para benefício próprio ou da coletividade” (BRASIL, 2010).

Para ser enquadrada na PNSB, a barragem deve atender a, no mínimo, um dos seguintes critérios: altura do maciço igual ou maior que 15m, a partir do ponto mais baixo da fundação até a crista; capacidade total do reservatório igual ou maior a 3.000.000m³; reservatório que contenha resíduos perigosos; e/ou dano potencial associado classificado como médio ou alto (BRASIL, 2010).

Conforme dados disponibilizados no último Relatório de Segurança de Barragens (RSB), publicado em 2019, encontram-se cadastrados 499 barramentos em Pernambuco, que representam aproximadamente 3% do total de cadastros para todo o território nacional, a saber 17.604, sendo o terceiro estado do Nordeste em quantidade de barragens. Aplicando-se os critérios da PNSB, no Estado existem 198 barragens que se enquadram na legislação. Destas, os usos principais informados são abastecimento humano (46%), combate às secas (16%) e irrigação (15%) (ANA, 2019). A preponderância de tais atividades justifica-se pelo clima e cenário de escassez hídrica vivenciados em Pernambuco.

PALAVRAS-CHAVE: Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB, Plano de Ação Emergencial - PAE, Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB e Simulação de Rompimento Hidrodinâmico de Barragens.

INTRODUÇÃO

A barragem Afetos, localizada no município de Pesqueira - PE, foi classificada pela Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, com base na categoria de risco e de dano potencial associado, como sendo de Classe A, sendo necessário, por tanto, que a Compesa desenvolva o Plano de Segurança de Barragens - PSB e também o Plano de Ações de Emergência - PAE da barragem, devido principalmente ao fato de se tornar primordial delimitar a Zona de Autossalvamento - ZAS, bem como a Zona de Salvamento Secundária - ZSS da mancha de inundação para o cenário extremo, sendo que a primeira sofre maiores danos, com maior potencial de perdas de vidas humanas e de bens materiais, devido à maior amplitude da energia da onda de inundação, tal como a velocidade de propagação da respectiva frente, promovida pela ruptura da barragem, que se dá nos primeiros 30 minutos ou 10 km de distância desta.

O objetivo deste trabalho é estudar a influência resultante do rompimento de uma barragem na barragem subsequente, que se encontra a jusante da mesma, bem como comparar o cenário extremo com o cenário mais provável de rompimento da barragem, com a utilização de softwares. Esses dois cenários relatados anteriormente são componentes do Plano de Ação de Emergência – PAE solicitados pela Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. O PAE tem a finalidade de estabelecer as ações a serem executadas em uma situação de emergência, situação essa que ameace as estruturas desta barragem, com a intensão de reduzir o risco de perda de vida humana e minimizar os danos materiais, bem como a de identificar os agentes a serem notificados dessa ocorrência. O Plano de Ação de Emergência - PAE é um instrumento que servirá de suporte para a elaboração dos planos de contingência municipais pelos respectivos órgãos de defesa civil.

A gestão de emergências aplicada a barragens é constituída por um conjunto de ações coordenadas que visam minimizar a magnitude dos possíveis danos devidos a incidentes e acidentes, assegurando a resposta mais adequada durante e após a ocorrência de um evento anômalo à operação da barragem.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a obtenção da mancha de inundação para o Cenário de Operação Extrema e para o Cenário Mais Provável, com a finalidade de se obter a Zona de Autossalvamento - ZAS, bem como a Zona de Salvamento Secundária - ZSS, se faz necessária a realização da simulação de rompimento hidrodinâmico da barragem com a utilização do software HEC-RAS (Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System), para o modelo hidráulico de propagação de cheia. O modelo se baseia na resolução das equações de Saint-Venant bidimensionais, considerando regimes permanentes ou não permanentes. Para a construção do modelo são necessárias informações em relação a geometria, coeficiente de rugosidade, condições de contorno e condições de cálculo.

A distância a ser modelada depende do traçado do rio, da quantidade de obstáculos (efeitos de remanso causados por estrangulamento de secção a jusante e o amortecimento do pico dos hidrogramas causados por interferências a montante) e da sinuosidade do seu percurso (amortecimento devido a dissipação de energia).

Para a simulação, o MDT foi discretizado em uma malha com 50 x 50 m (Santana); O coeficiente de Manning de 0,035 foi utilizado para a determinação das perdas de energia por atrito no modelo. As condições de contorno utilizadas foram: aquecimento do modelo com uma vazão constante de 5 m³/s (Afetos) e 20 m³/s (Santana); imposição do hidrograma de ruptura gradual linear, para obter a vazão de pico efluente devido à ruptura, com a utilização de equações empíricas propostas pelo Froehlich (1995) – para as duas barragens, relacionando a máxima vazão de descarga com características da barragem (altura do barramento, comprimento da crista, volume do reservatório, etc.); imposição de um sumidouro ao final da malha com a declividade de 0,018 m/m (Afetos) e 0,001 m/m (Santana) para a superfície da lâmina d'água.

Para o modelo hidráulico foi admitido um período de cálculo de 24 horas (Afetos) e 36 horas (Santana) de propagação de cheia a fim de atender a propagação da máxima vazão em toda a extensão do estudo.

RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

Em caso de rompimento da barragem, segundo orientações do Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, especificamente do Volume IV Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE, adotou-se para simulação do cenário de ruptura mais desfavorável aquele, sendo utilizado o hidrograma de ruptura gradual linear, para obter a vazão de pico efluente devido a ruptura, com a utilização de equações empíricas propostas por Froehlich (1995), num cenário de ruptura por galgamento. Nesse cenário a barragem encontra-se no nível normal onde o volume do hidrograma a ser simulado corresponde a capacidade máxima da barragem, sem contribuições significativas provenientes de descargas das estruturas extravasoras.

A seguir são apresentadas, nos quadros 1 e 2, as características da Barragem de Afetos e da Barragem de Santana, que se encontra imediatamente à jusante da anterior, para a realização da simulação de rompimento hidrodinâmico das referidas barragens, para o Cenário Extremo.

Quadro 1 - Características da simulação do Cenário Extremo (Chuva Extrema) – Barragem Afetos.

BARRAGEM AFETOS – CENÁRIO EXTREMO	
Material Construtivo	Terra Homogênea
Comprimento (L)	221 m
Altura da barragem (H)	15 m
Altura de água (Hw)	15 m
Largura da Brecha (B)	28 m
Tempo de Pico (tP)	0,23h
Vazão de Pico (Qp)	870,59 m ³ /s

Quadro 2 - Características da simulação do Cenário Extremo (Chuva Extrema) – Barragem Santana, que se encontra à jusante da Barragem de Afetos.

BARRAGEM SANTANA – CENÁRIO EXTREMO	
Material Construtivo	Terra Homogênea
Comprimento (L)	269 m
Altura da barragem (H)	22 m
Altura de água (Hw)	24,5 m
Largura da Brecha (B)	48 m
Tempo de Pico (tP)	0,31h
Vazão de Pico (Qp)	2.152,74 m ³ /s

As figuras 1 e 2 contêm resultados do hidrograma gerado pela ruptura por galgamento da Barragem de Afetos, bem como da Barragem de Santana, que se encontra imediatamente à jusante da anterior, obtidos com a utilização de equações empíricas propostas por Froehlich (1995), para o Cenário Extremo.

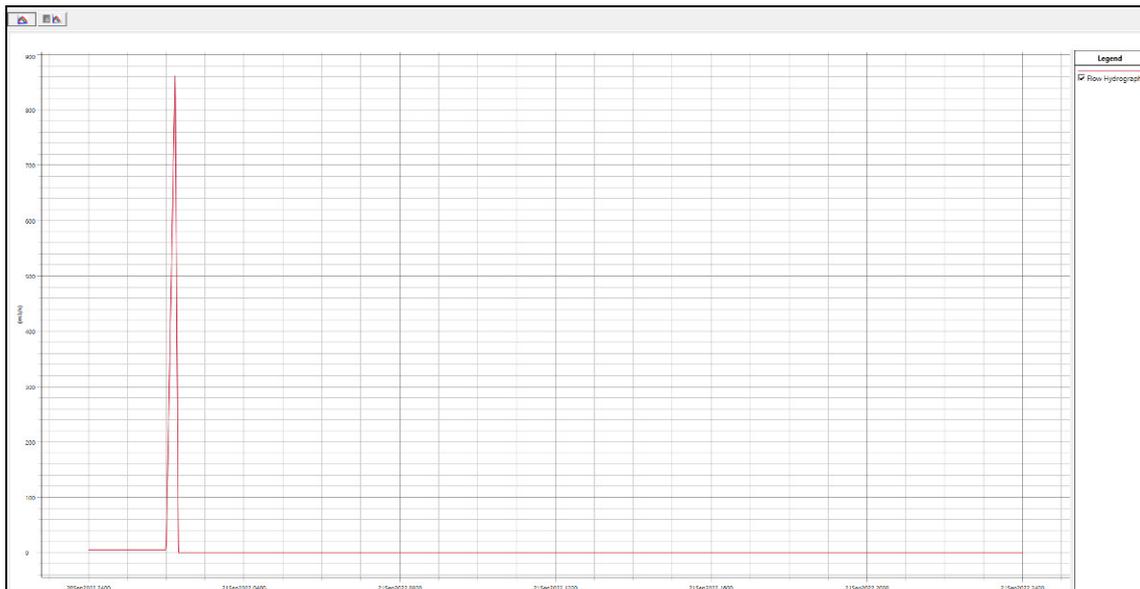


Figura 1: Hidrograma gerado pela ruptura da barragem Afetos por galgamento (Cenário Extremo).

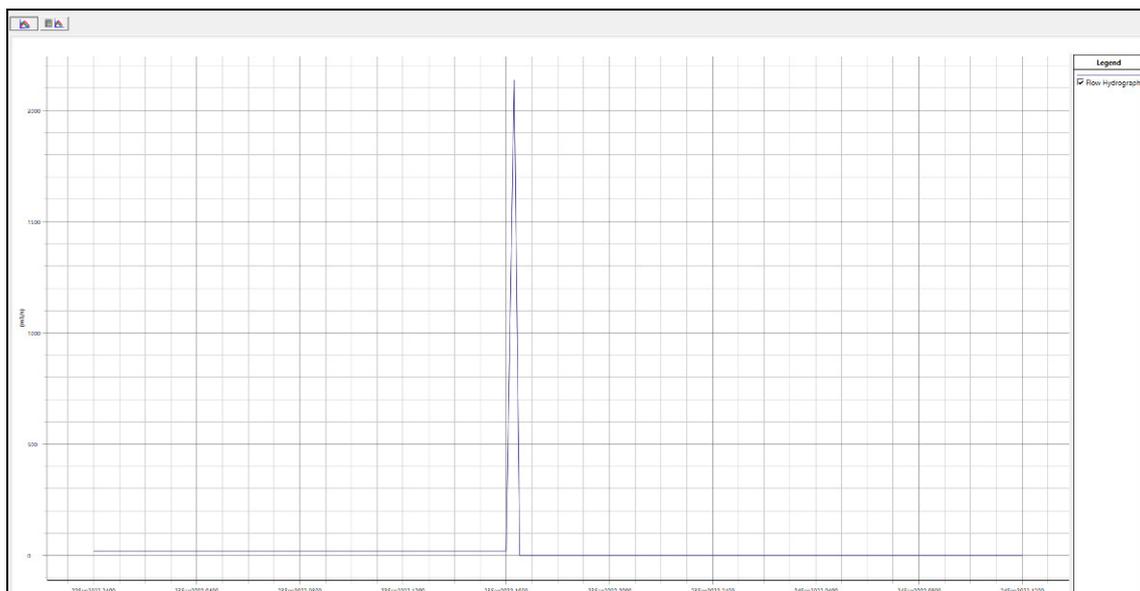


Figura 2: Hidrograma gerado pela ruptura da barragem Santana, decorrente da ruptura da Barragem de Afetos, por galgamento (Cenário Extremo).

Além da delimitação da mancha de inundação, cabe destacar outras informações relevantes à gestão dos riscos e ao desenvolvimento do Plano de Contingência como a graduação de risco em função da profundidade e velocidade. Segundo Viseu (2006), a relação entre profundidade e velocidade pode ser um bom indicador dos danos causados nas inundações dinâmicas, as faixas utilizadas neste trabalho estão apresentadas no quadro 3.

Quadro 3: Critérios para graduação do nível de perigo da inundação dinâmica.

Nível de Perigo	Classe	Inundação Dinâmica (HxV)
Reduzido	Verde	$HxV < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Alto para pessoas	Amarelo	$0,5 \text{ m}^2/\text{s} < HxV < 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Alto para pessoas / Médio para edificações	Laranja	$1,0 \text{ m}^2/\text{s} < HxV < 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Alto para pessoas / Alto para edificações	Vermelho	$HxV > 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$

Fonte: Viseu, (2006) apud Curso ANA-ITAIPU, (2011)

Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil – FPTI.

A importância de uma submersão se deve à capacidade da cheia de provocar danos às pessoas, edificações e aos bens. Os principais parâmetros para se 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.

O resultado da simulação do Cenário Extremo, realizada para o rompimento da Barragem de Afetos, com suas consequências na Barragem de Santana que se encontra imediatamente à jusante da anterior, estão apresentados no mapa das áreas afetadas na Figura 3.

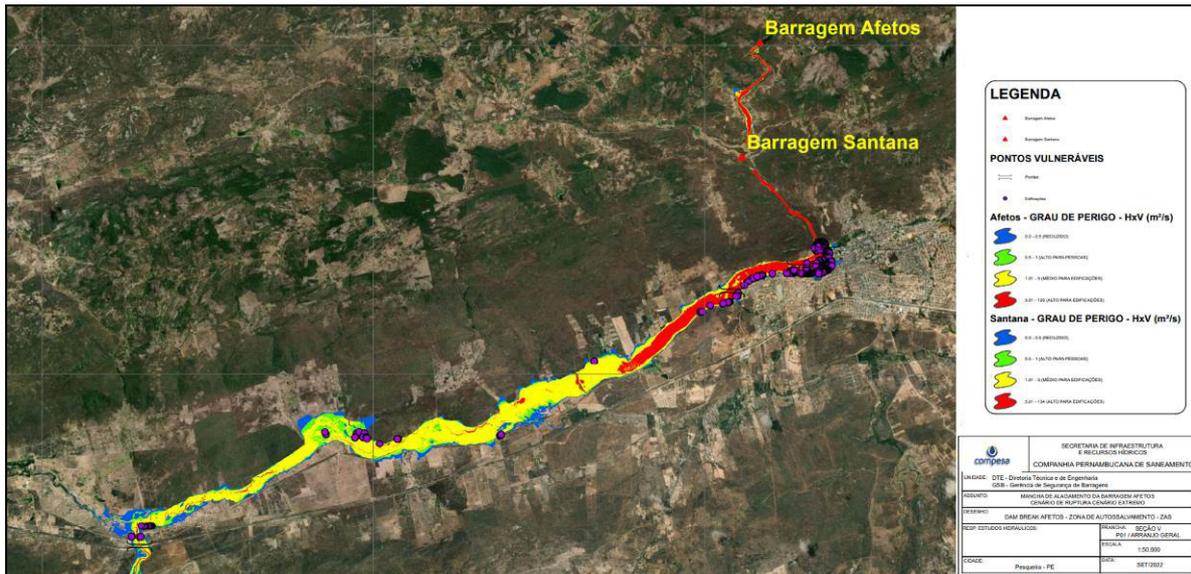


Figura 3: Áreas afetadas pelo rompimento da barragem AFETOS no Cenário Extremo (Operação Extrema + Galgamento).

Para a realização da simulação de rompimento hidrodinâmico das barragens no Cenário Mais Provável, adotou-se uma condição de Dia de Sol. Nessa condição a barragem encontra-se no nível normal sendo também utilizado o hidrograma de ruptura gradual linear, para obter a vazão de pico efluente devido à ruptura, com a utilização de equações empíricas propostas por Froehlich (1995), num cenário de ruptura por piping, sem contribuições significativas provenientes de descargas das estruturas extravasoras.

A seguir são apresentadas, nos quadros 4 e 5, as características da Barragem de Afetos e da Barragem de Santana, que se encontra imediatamente à jusante da anterior, para a realização da simulação de rompimento hidrodinâmico das referidas barragens para o Cenário Mais Provável.

Quadro 4 - Características da simulação do Cenário Mais Provável (Dia de Sol) – Barragem Afetos.

BARRAGEM AFETOS – CENÁRIO MAIS PROVÁVEL	
Material Construtivo	Terra Homogênea
Comprimento (L)	221 m
Altura da barragem (H)	15 m
Altura de água (Hw)	14 m
Largura da Brecha (B)	19 m
Tempo de Pico (tP)	0,23h
Vazão de Pico (Qp)	558,33 m³/s

Quadro 5 - Características da simulação do Cenário Mais Provável (Dia de Sol) – Barragem Santana, que se encontra à jusante da Barragem de Afetos.

BARRAGEM SANTANA – CENÁRIO MAIS PROVÁVEL	
Material Construtivo	Terra Homogênea
Comprimento (L)	269 m
Altura da barragem (H)	22 m
Altura de água (Hw)	23,32 m
Largura da Brecha (B)	33 m
Tempo de Pico (tP)	0,31h
Vazão de Pico (Qp)	1.409,17 m ³ /s

As figuras 4 e 5 contêm resultados do hidrograma gerado pela ruptura por galgamento da Barragem de Afetos, bem como da Barragem de Santana, que se encontra imediatamente à jusante da anterior, obtidos com a utilização de equações empíricas propostas por Froehlich (1995), para o Cenário Mais Provável.



Figura 4: Hidrograma gerado pela ruptura da barragem Afetos por piping (Cenário Mais Provável).

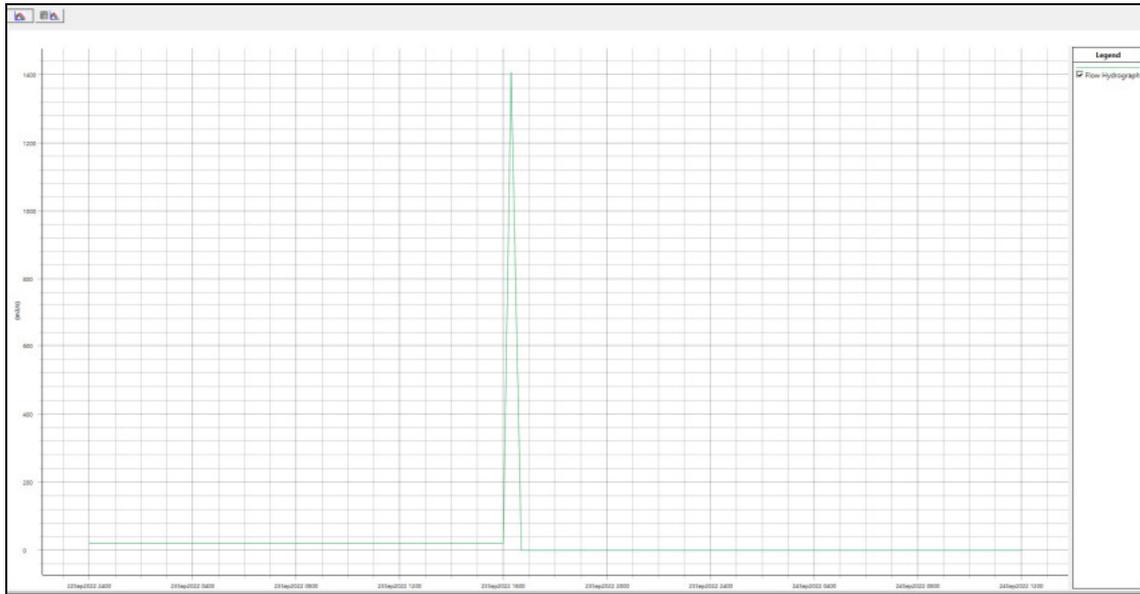


Figura 5: Hidrograma gerado pela ruptura da barragem Santana, decorrente da ruptura da Barragem de Afetos, por piping (Cenário Mais Provável).

O resultado da simulação do Cenário Mais Provável, realizada para o rompimento da Barragem de Afetos, com suas consequências na Barragem de Santana que se encontra imediatamente à jusante da anterior, estão apresentados no mapa das áreas afetadas na Figura 6.

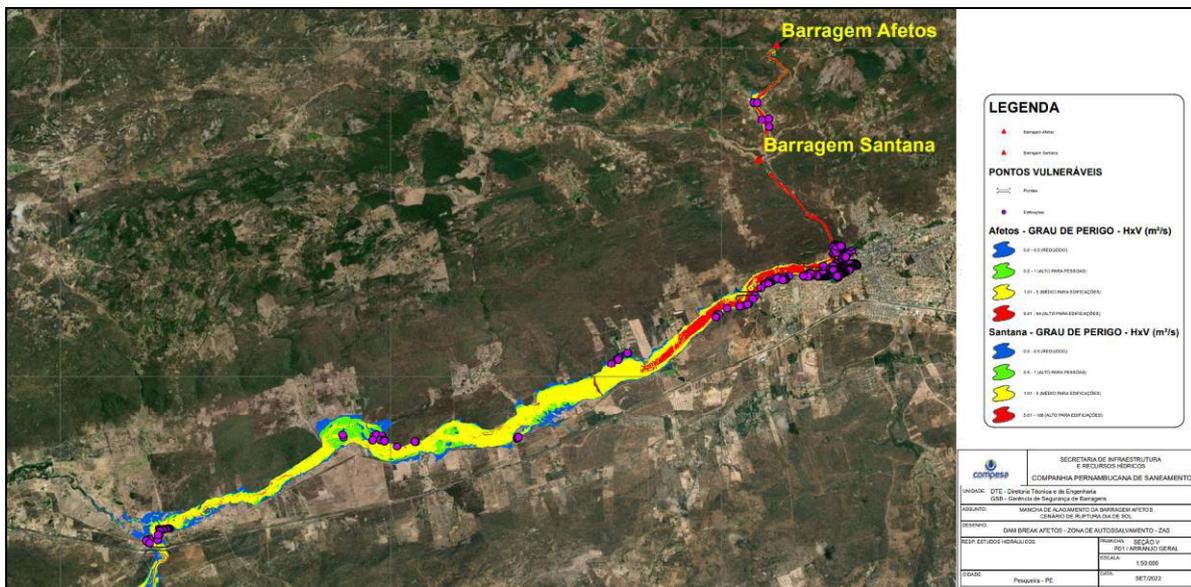


Figura 6: Áreas afetadas pelo rompimento da barragem AFETOS no Cenário Mais Provável (Dia de Sol).

Foram gerados mapas do risco hidrodinâmico para a barragem Afetos, cujo rompimento afeta diretamente a Barragem de Santana, que se encontra imediatamente à jusante da barragem anterior, para o Cenário Extremo e para o Cenário Mais Provável, observando-se ainda, nas figuras 7 e 8, a variação do número de residências afetadas em ambos os cenários, bem como a mudança de risco entre os cenários.

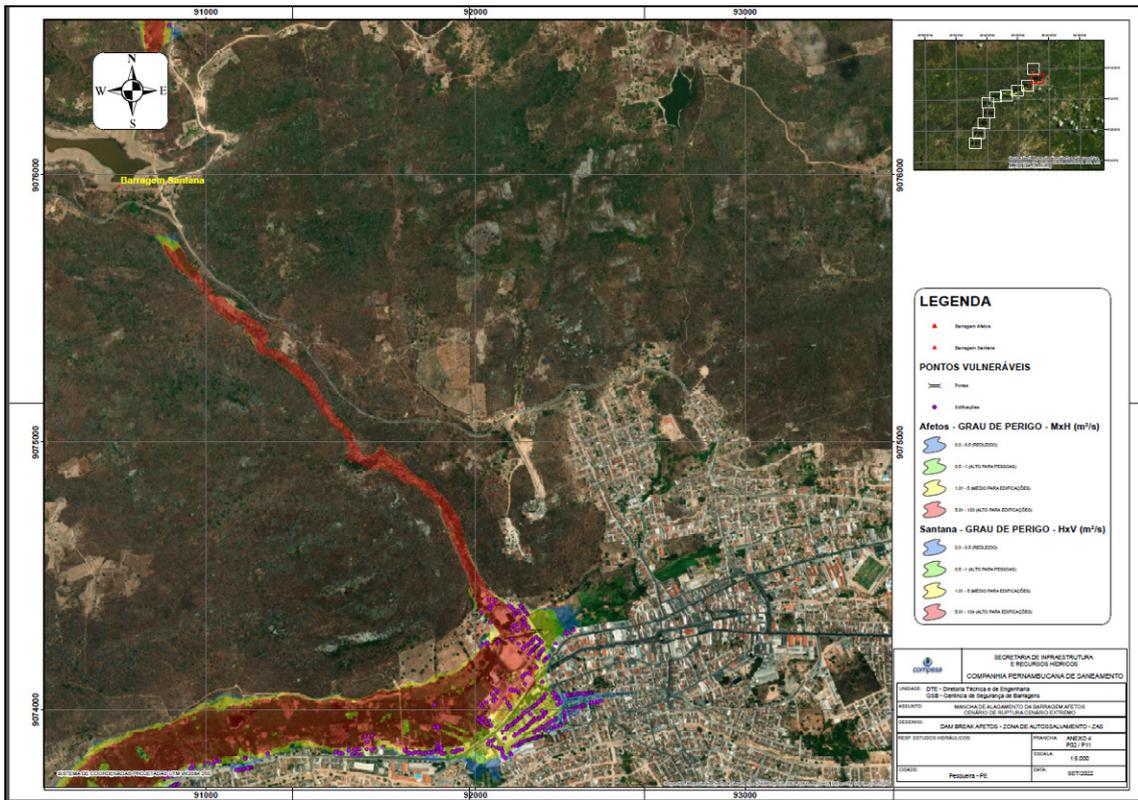


Figura 7: Grau de perigo e a variação do número de residências afetadas para o Cenário Extremo, resultante do rompimento da barragem Afetos resultando no rompimento da barragem Santana.

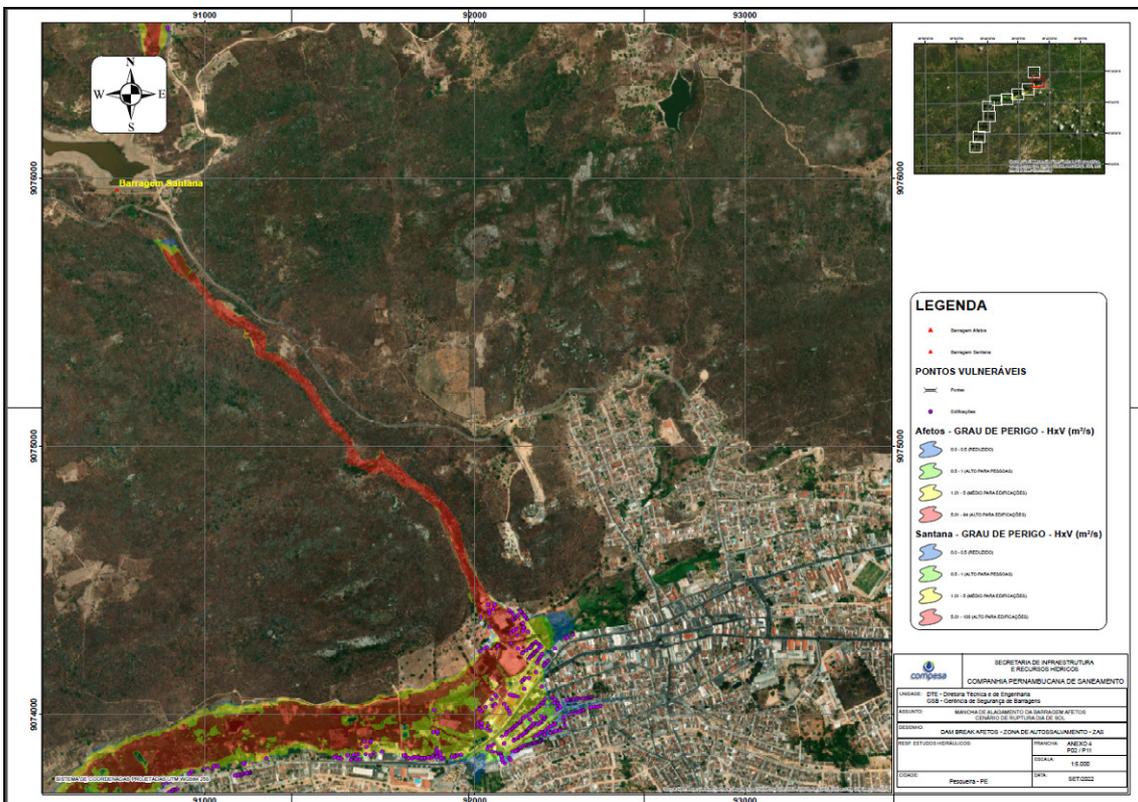


Figura 8: Grau de perigo e a variação do número de residências afetadas para o Cenário Mais Provável, resultante do rompimento da barragem Afetos resultando no rompimento da barragem Santana.

CONCLUSÕES

A metodologia utilizada para a obtenção do hidrograma de ruptura para o Cenário Mais Provável e para o Cenário Extremo, aliado com a utilização do HEC-RAS (Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System) para a obtenção do modelo hidráulico de propagação de cheia, baseado na resolução das equações de Saint-Venant bidimensionais, considerando regimes permanentes ou não permanentes, se mostraram bastante satisfatórios, conforme os resultados de 2 (duas) seções de controle mostrados no quadro 6.

Essas 2 (duas) seções de controle tem o objetivo de atender ao recomendado pelo Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, Volume IV Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE. Os principais resultados da simulação hidrodinâmica nas seções de controle são apresentados no quadro 6.

Quadro 6: Resultados da simulação hidrodinâmica nas seções de controle.

Seção	Distância (km)	Tempo de Pico após DAMBREAK (h)	Cota Inundação (m)	H Máx (m)
Ponte próxima à Tv. Pitanguara	2,71	0,07	634,40	2,97
Ponte próxima ao Rancho Felipe Feitosa	4,44	0,13	622,90	2,09

O perfil das seções, cota de inundação e hidrogramas podem ser vistos nas figuras 9 e 10.

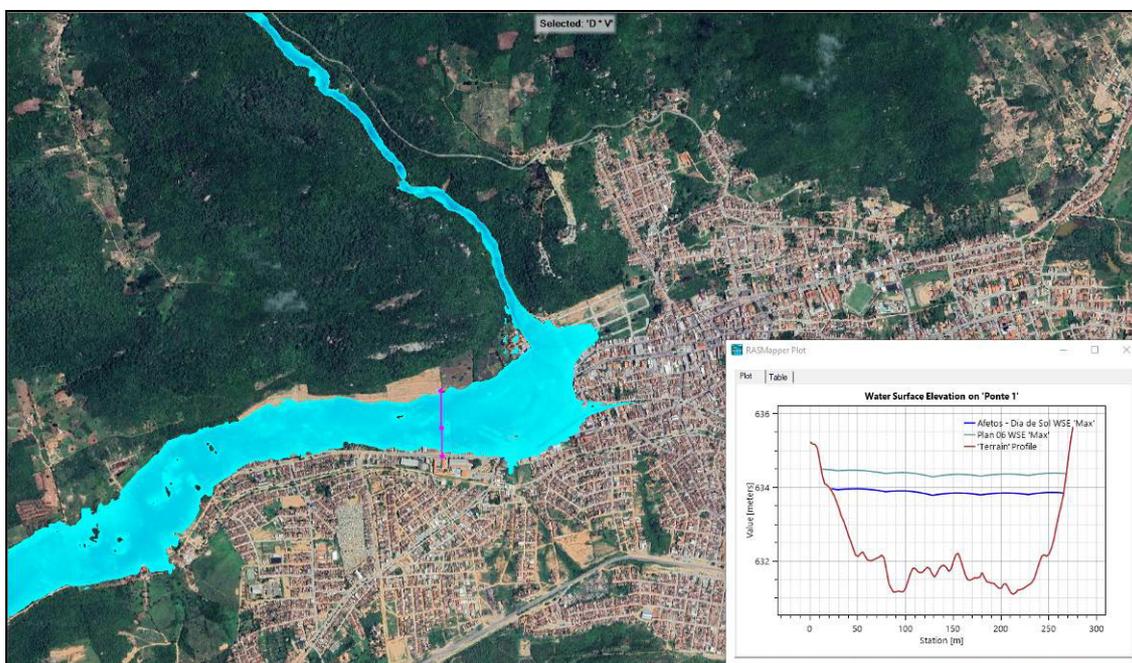


Figura 9: Perfil do terreno e cota máxima de inundação na seção próximo à Tv. Pitanguara – Elevações do Nível da água de 2,47m e 2,97 m do ponto mais baixo do rio.

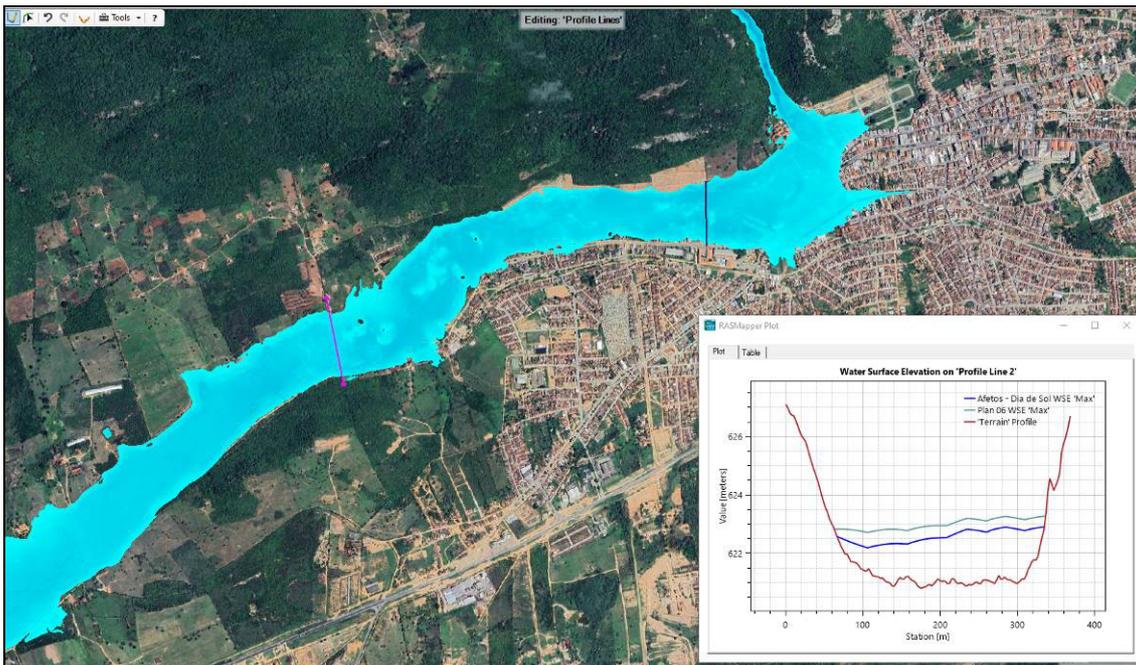


Figura 10: Perfil do terreno e cota máxima de inundação na seção próxima ao Rancho Felipe Feitosa – Elevações do Nível da água de 1,65 m e 2,09 m do ponto mais baixo do rio.

Realizamos o estudo da vazão do órgão extravasor da barragem Santana que se encontra a jusante da barragem Afetos, levando-se em consideração as equações consagradas pela literatura, que levam em consideração a geometria do vertedouro e foi verificado que a vazão de pico (828,16 m³/s), conforme figura 11, calculada pelo software Hec-Ras, ao final da mancha de inundação para o cenário extremo, próximo à barragem de Santana, é maior do que vazão máxima (255,7 m³/s) calculada para o vertedouro, conforme quadro 7, sendo verificado que a mesma não suporta a cheia provocada pela ruptura da barragem de Afetos, devido ao fato de que este acontecimento provocará o galgamento da referida barragem.

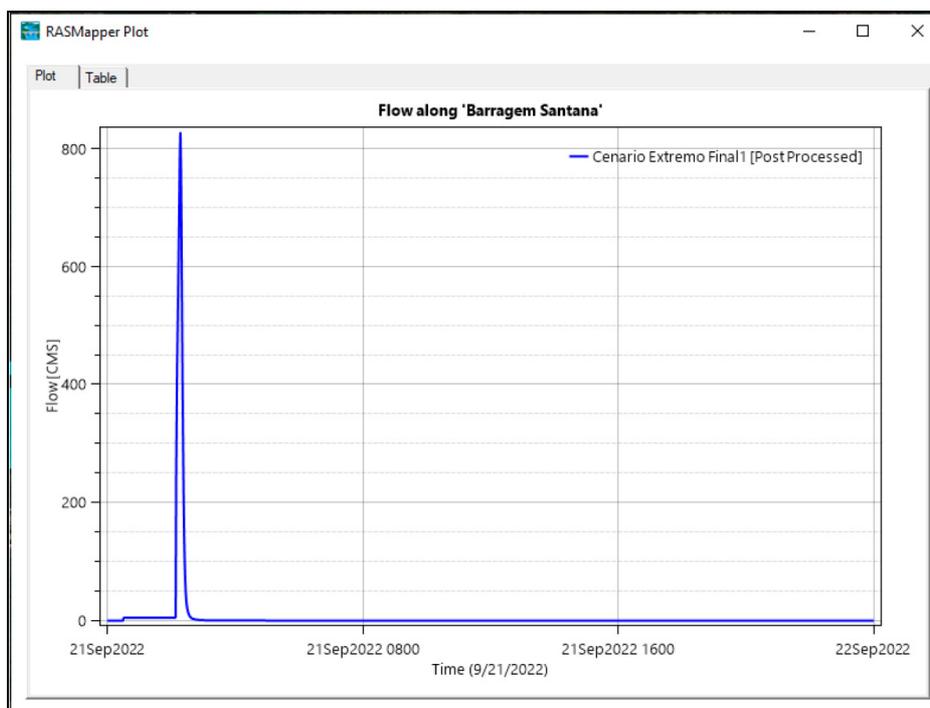


Figura 11: Vazão de pico ao final da mancha de inundação para o cenário extremo, próximo à barragem de Santana, localizada a jusante da barragem de Afetos.

Quadro 7: Resultados da vazão do órgão extravasor da barragem de Santana.

Cota, (m)	He, (m)	He/H0, (m)	C/C0	C	L	Qv
815.0	0.00	0.000	0.783	1.72	42.0	0.0
816.0	1.00	0.791	0.971	2.13	41.6	88.6
817.0	2.00	1.000	1.000	2.19	41.2	255.7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Relatório de Segurança de Barragens 2018**. Brasília: ANA, 2019. 103p.
2. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Resolução nº 236, de 30 de janeiro de 2017**. Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília: ANA, 2017.
3. AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA - APAC. **Resolução nº 03, de 28 de dezembro de 2017**. Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB, além de revogar a Resolução Nº 02/2016 DC APAC, de 22 de dezembro de 2016. Recife: APAC, 2017.
4. BRASIL. Lei Federal nº 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 União**, Brasília, 2010.
5. PEREIRA, L. F. **Segurança de barragens no Brasil: um breve comparativo com a legislação internacional e análise da influência da cobertura do solo de APPs sobre manchas de inundação** (estudo de caso da PCH Pedra Furada, Ribeirão - PE). 2019. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2019.
6. PERNAMBUCO. Decreto nº 47.698, de 10 de julho de 2019. Aprova, no âmbito do Estado de Pernambuco, o Manual Técnico de Defesa Civil para gestão de riscos e desastres relacionados a intensas precipitações pluviométricas. **Diário Oficial do Estado [de Pernambuco]**, Recife, 2019.