

PARECER/LACTEC-MA	Nº 31/2020
Data	30/09/2020

Interessado:	Ministério Público Federal Força Tarefa Rio Doce Procuradoria da República do Estado de Minas Gerais – PRMG Excelentíssima Procuradora Dra. Silmara Cristina Goulart Ref.: Procedimento PA nº 1.22.000.000307/2017-44
Assunto:	Parecer técnico sobre a área de passagem e deposição dos rejeitos advindos do rompimento da barragem de Fundão ao longo dos rios afetados – APDL 2016

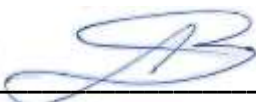
Exma. Procuradora Dra. Silmara Cristina Goulart

O INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO - LACTEC, pessoa jurídica de direito privado, constituído sob a forma de associação civil, sem fins lucrativos, com sede na BR 116, km 98, nº 8813, Centro Politécnico da UFPR, CEP: 81.531-980, Jardim das Américas, em Curitiba, Estado do Paraná, inscrito no CNPJ sob nº 01715975/0001-69 está atuando junto ao Ministério Público Federal de Minas Gerais na posição de assessor técnico no tocante ao rompimento da barragem de Fundão em Mariana – MG. Vimos por meio deste apresentar parecer técnico sobre a área de passagem e deposição dos rejeitos advindos do rompimento da barragem de Fundão ao longo dos rios afetados. Este parecer visa apresentar informações que subsidiem os processos de tomada de decisão, haja vista a necessidade da delimitação da área atingida pela lama de rejeitos advindos do desastre no trecho entre a UHE Risoleta Neves e a foz do rio Doce.

Aproveito a oportunidade para renovar meus protestos de respeito e consideração.

Sem mais para o momento, nos colocamos à disposição para as informações que julgarem necessárias. Telefone de contato: Leonardo Pussieldi Bastos (Coordenador Geral do Diagnóstico Socioambiental - (41) 99102-8276.

Atenciosamente,



Leonardo Pussieldi Bastos

Digitally signed by Leonardo Pussieldi Bastos
DN: C=BR, OU=STI - MA,
O=Leonardo Bastos,
CN=Leonardo Pussieldi Bastos,
E=leonardo.bastos@lactec.org.br
Location: Lactec - MA
Date: 2020-09-30 18:08:17

Leonardo Pussieldi Bastos

Coordenador do Diagnóstico Socioambiental da Bacia do Rio Doce
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Lactec

Documento:	Parecer técnico sobre a área de passagem e deposição dos rejeitos advindos do rompimento da barragem de Fundão ao longo dos rios afetados	
Considerações Gerais:	Este documento refere-se a apresentação dos resultados obtidos pelo Lactec a partir da modelagem hidrodinâmica da cheia ocorrida em janeiro de 2016, para a delimitação da área de passagem e deposição dos rejeitos de mineração advindos do rompimento da barragem de Fundão no trecho entre a UHE Risoleta Neves e a foz do rio Doce.	
Contrato:	4500173758 – Samarco/Lactec	
Solicitante:	Empresa:	Ministério Público Federal
		Procuradoria da República em Minas Gerais
	Endereço:	Av. Brasil, 1877
	Bairro:	Bairro Funcionários
	Cidade:	Belo Horizonte/MG
	CEP:	CEP 30140-007
	A/C:	Dra. Silmara Cristina Goulart
	E-mail:	PRMG-FT-RioDoce@mpf.mp.br
Executante:	Institutos Lactec Rodovia BR-116, km 98, nº 8813 Jardim das Américas Caixa Postal 19067 CEP 81531-980 Curitiba – PR – BR e-mail: leonardo.bastos@lactec.org.br Meio Ambiente T + 55 (41) 99102-8276	

Autoria:	Emitido por:
Equipe Técnica do Lactec Ana Paula Zampieri da Silva, Téc. em geoprocessamento Bernardo Lipski, Eng. Agrônomo, MSc. Bruna Arcie Polli, Eng. Ambiental, Dr. Cleber Henrique Araújo Gama, Eng. Amb. e San., MSc. Fernando Fan, Eng. Ambiental Hugo de Oliveira Fagundes, Eng. Ambiental, MSc. João Batista Dias de Paiva, Eng. Civil, Dr. João Paulo Jankowski Saboia, Eng. Ambiental, MSc. Maricler Toigo, Tecn. em Processamento de Dados Mino Sorribas, Eng. Ambiental, Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Eng. Civil, Dr. Rubem Luiz Daru, Eng. Civil, Dr.	 Leonardo Pussieldi Bastos, M. Sc. Biólogo / CRBio 28808-07D 

PARECER TÉCNICO nº 31

Ref.: Procedimento PA nº 1.22.000.000307/2017-44

Entidade de origem: Lactec

Responsável: Equipe técnica do Lactec

Assunto: Parecer técnico sobre a área de passagem e deposição dos rejeitos advindos do rompimento da barragem de Fundão ao longo dos rios afetados.

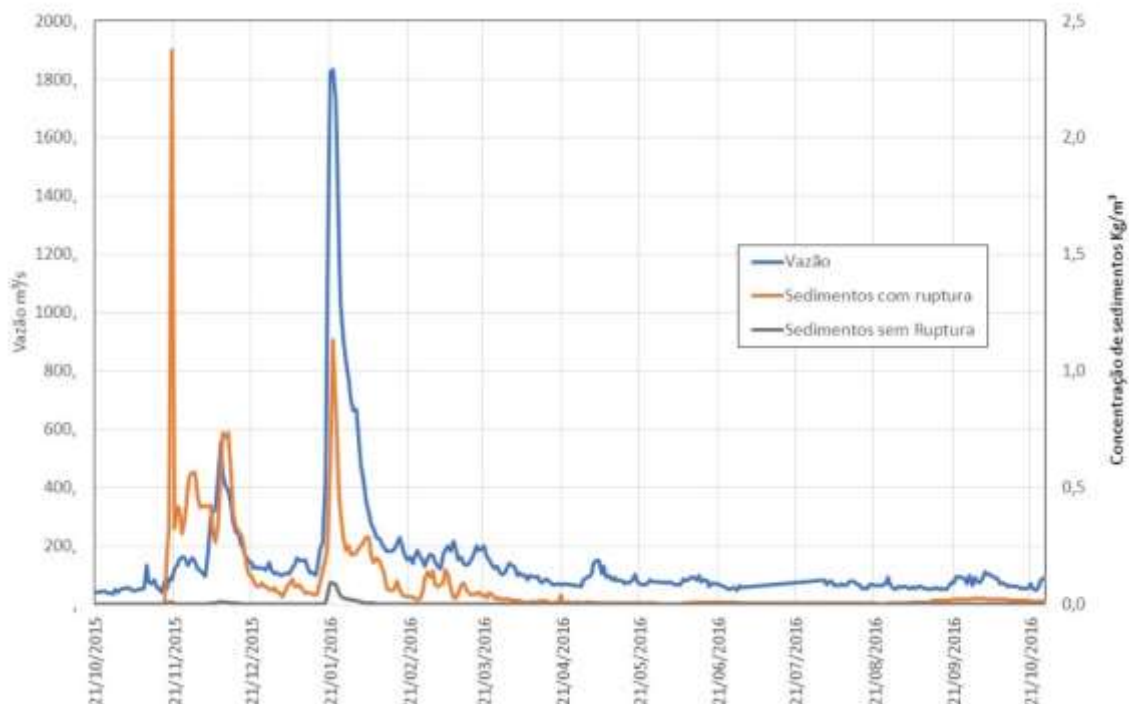
O rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, pertencente ao Complexo de Germano, da empresa Samarco Minerações S.A., ocorreu na tarde do dia 05 de novembro de 2015. Essa barragem era situada em uma região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Doce, na cidade de Mariana, estado de Minas Gerais. Com o rompimento, ocorreu a liberação de um volume estimado de 44 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração (minério de ferro), além de água e materiais utilizados em sua construção (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018).

Todo este rejeito proveniente da ruptura de Fundão foi carregado pelas águas e foi despejado ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e de toda a calha do rio Doce até sua foz afetando também as áreas costeiras e marítima.

A ruptura de Fundão originou uma onda de cheia de grande magnitude e percorreu inicialmente os rios Gualaxo do Norte e rio Carmo. Ao chegar no reservatório de Candonga (UHE Risoleta Neves) a onda de cheia foi absorvida por este empreendimento. Grande parte dos rejeitos ficaram depositados nos leitos e nas margens dos rios a montante de Candonga e no próprio reservatório. O vertedor de Risoleta Neves ficou aberto para não comprometer a barragem e com isso os rejeitos de Fundão passaram para jusante deste reservatório e continuaram a percorrer o rio Doce até sua foz, adentrando no mar. Como o reservatório de Candonga absorveu a onda da ruptura e aliado ao fato de que a bacia do rio Doce se apresentava com baixa vazão natural, a cheia originada pela onda de ruptura a jusante de Candonga foi de baixa magnitude, não chegando a transbordar de sua calha natural, de maneira significativa.

Logo após o desastre, em janeiro de 2016, devido à alta pluviosidade na bacia, ocorreu uma cheia significativa. Devido a ressuspensão e remobilização dos rejeitos depositados, nesta ocasião o rio Doce apresentou altíssima concentração de rejeitos provenientes de Fundão. Este fato pode ser verificado pelas análises de concentração de sedimentos, qualidade de água e turbidez que ainda se apresentavam fora do padrão natural do rio neste período. A Figura 1 apresenta a concentração de sólidos da água onde se pode ver a atípica e altíssima concentração durante a cheia de janeiro de 2016. Desta maneira a área de passagem e deposição dos rejeitos advindos do rompimento da barragem de Fundão, a jusante de Candonga, abrange a área atingida por esta cheia de janeiro de 2016.

Figura 1 – Concentração de sólidos em suspensão em Colatina.



A APDL (Área da Passagem e Deposição da Lama) foi calculada utilizando duas metodologias diferentes. Na região a montante de Candonga a área afetada foi determinada através de observações *in loco* por levantamento de cotas da lama depositada nas margens e das marcas nas encostas e árvores e principalmente através de imagens de satélite e ortoimagens. Isso foi possível devido a grande quantidade de rejeitos depositados nesta região.

Na região a jusante de Candonga não foi possível realizar estas observações diretas, pois a área e altura do rejeito depositado foram bem menores não deixando marcas tão evidentes por todos os locais. Conforme mencionado no documento “TOMO I – Contextualização” do Diagnóstico de danos socioambientais (pág. 207, BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020), novos dados foram disponibilizados ao Lactec permitindo o refinamento da delimitação da APDL no trecho entre a UHE Risoleta Neves e a foz do rio Doce. Desta forma, a metodologia adotada para a definição da APDL, nesta região, foi a modelagem hidrodinâmica da cheia ocorrida em janeiro de 2016 através do modelo HEC-RAS.

O HEC-RAS, desenvolvido no “Hydrologic Engineering Center”, entidade do “Corps of Engineers” dos Estados Unidos, é um modelo hidrodinâmico com o objetivo de representar o fluxo das águas. O programa permite o cálculo do perfil da superfície livre da água para diversos tipos de escoamentos. As equações matemáticas consideradas são basicamente a Equação da continuidade (conservação de massa) e a Equação do Momento (conservação da quantidade de movimento) que são solucionadas através do esquema implícito de diferenças finitas.

Foi utilizada a modelagem unidimensional (1D) de Candonga até Colatina. De Colatina até a foz do rio foi adotada a modelagem bidimensional (2D) mais adequada para regiões mais planas. Os mapas das áreas alagadas podem ser consultados no apêndice A, e maiores detalhes da metodologia, dados utilizados e resultados completos podem ser consultados nos Apêndices B e C a este parecer.

O Lactec utilizou para esta modelagem um levantamento topográfico de alta definição obtido por laser aerotransportado (LIDAR, considerado a melhor tecnologia existente atualmente) de praticamente toda a área, disponibilizado pela Fundação Renova (2019), aliado a um levantamento batimétrico do rio Doce através de 160 seções batimétricas obtidas pela ANA (Agência Nacional de Águas), originando uma distância média de 6 km entre as seções. Nas áreas mais afastadas do rio Doce, na região litorânea do Espírito Santo, foram utilizados os dados topográficos obtidos de um levantamento realizado por “Hiparc Geotecnologia”, entre os anos de 2012 a 2015, para o IEMA (Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo) e complementado pelo BHO ANA 5K (Base Hidrográfica ortorectificada - Agência Nacional de Águas) para obtenção da rede de drenagem. Também foram utilizados dados de vazões e precipitações ocorridas em janeiro de 2016 e, dados de marés e de nível d’água observados em vários pontos ao longo do rio Doce (através de réguas limimétricas ou marcas de enchente) para verificação e validação do modelo.

A calibração do modelo hidrodinâmico e sua validação corresponde a verificar e adaptar os coeficientes do modelo para que este represente adequadamente a realidade. Para isso são confrontados dados simulados e observados em alguns pontos do domínio modelado. Foram utilizados pontos de marcas de enchente e de réguas linimétricas instaladas em estações fluviométricas ao longo do rio e na foz (réguas de maré). Na calibração foram utilizados 10 pontos, a média da raiz do erro médio quadrático das anomalias dos níveis foi de 0,32 m e a média do viés absoluto dos níveis observados foi de 0,61 m. Este valor é considerado adequado para este tipo de modelagem em uma área da magnitude modelada. Foram utilizados 7 pontos de verificação (estações fluviométricas) das cotas máximas da cheia de janeiro de 2016 e o desvio médio foi de 0,13 metros, atestando a ótima qualidade do modelo para representação desta cheia.

A metodologia detalhada e resultado da APDL no trecho entre Fundão e a UHE Risoleta Neves já foi apresentado no TOMO I do diagnóstico de danos socioambientais, assim como a dispersão da pluma na zona costeira e marinha (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020). Como resultado obteve-se uma área de 2.380,76 ha ou 23,8 km² nos municípios de Mariana, Barra Longa, Ponte Nova, Santa Cruz do Escalvado e Rio Doce.

As áreas alagadas estimadas pela modelagem hidrodinâmica simulando a cheia de janeiro de 2016 foram definidas como a APDL na região a jusante de Candonga. Foram afetados a jusante de Candonga um total de 899,02 km² que corresponde a área ribeirinha (incluindo a calha natural do rio), conforme a Figura 2. A Tabela 1 apresentada a área em km² da APDL por município nesse trecho.

Os municípios com a maior área atingida pela APDL são Linhares com 565,11 km² e Aracruz com 62,60 km². Estes municípios têm grande parte com áreas planas junto a foz do Rio Doce. Neste trecho próximo a foz do Rio Doce, em período de seca, o rio corre dentro de sua calha. Durante as grandes cheias, que geralmente ocorrem de dezembro a março, nos momentos de pico da vazão o rio extravasa a calha e alaga esta imensa área de planície extremamente plana e que geralmente corresponde a outras bacias hidrográficas vizinhas. A Figura 3 mostra a APDL neste trecho de Linhares. A Figura 4 é uma foto do satélite em 26/12/2013 indicando este fenômeno de alagamento desta área durante a cheia de dezembro de 2013. Infelizmente não temos fotos de satélite na data da cheia de janeiro de 2016 devido à alta cobertura de nuvens neste período.

Mais alguns exemplos da APDL são apresentados na Figura 5 e Figura 6 onde mostram as regiões da entrada da lagoa Nova e da Lagoa Juparanã respectivamente. Na Figura 6 ainda apresenta como ficaria a mancha de inundação se uma cheia de igual magnitude da de janeiro de 2016 se repetisse e o dique do rio pequeno estivesse na configuração de 2018/2019. Esta imagem induz que sem nenhum dique a cheia de 2016 atingiria uma área maior que a demarcada pela hipotética de uma cheia com o dique de 2018/2019.

Cidades com área urbana ribeirinha com Governador Valadares, Colatina, Aimores, Baixo Gaundu, tiveram 40,06 km², 30,41 km², 6,30 km² e 18,57 km² respectivamente de área afetada. Entre a Figura 7 e a Figura 9 é apresentado a APDL nestas cidades.

Tabela 1 – Quantificação da área afetada pela APDL por município a jusante de Candonga.

Município	APDL (Km ²)
AIMORÉS	18,5696
ALPERCATA	9,4532
ARACRUZ	62,6045
BAIXO GUANDU	6,3000
BELO ORIENTE	3,1808
BOM JESUS DO GALHO	2,8452
BUGRE	3,1063
CARATINGA	4,0733
COLATINA	30,4125
CONSELHEIRO PENA	17,6035
CÓRREGO NOVO	3,5013
DIONÍSIO	3,7089
FERNANDES TOURINHO	6,9626
GALILÉIA	9,7333
GOVERNADOR VALADARES	40,0573

Município	APDL (Km²)
IAPU	8,8847
IPABA	3,8278
IPATINGA	0,1871
ITUETA	13,6698
JAGUARÉ	0,7387
LINHARES	565,1101
MARILÂNDIA	8,4388
MARLIÉRIA	5,1939
NAQUE	4,1743
PERIQUITO	9,8806
PINGO-D'ÁGUA	0,5997
RAUL SOARES	0,9702
RESPLENDOR	12,2807
RIO CASCA	3,5841
RIO DOCE	0,8386
SANTA CRUZ DO ESCALVADO	1,1363
SANTANA DO PARAÍSO	5,3153
SÃO DOMINGOS DO PRATA	0,2875
SÃO JOSÉ DO GOIABAL	2,3280
SÃO MATEUS	2,4822
SÃO PEDRO DOS FERROS	3,6146
SEM-PEIXE	2,3615
SOBRÁLIA	3,7922
TIMÓTEO	1,3101
TUMIRITINGA	15,9055
TOTAL	899,0249

Figura 2 – APDL ao longo do rio Doce.



Figura 3 – ADPL no município de Linhares obtida pela modelagem da cheia de janeiro de 2016.



Figura 4 – Imagem de satélite Landsat 8 durante a cheia de 2013 (imagem de 26/12/2013).



Figura 5 - ADPL na ligação entre rio Doce e Lagoa Nova.

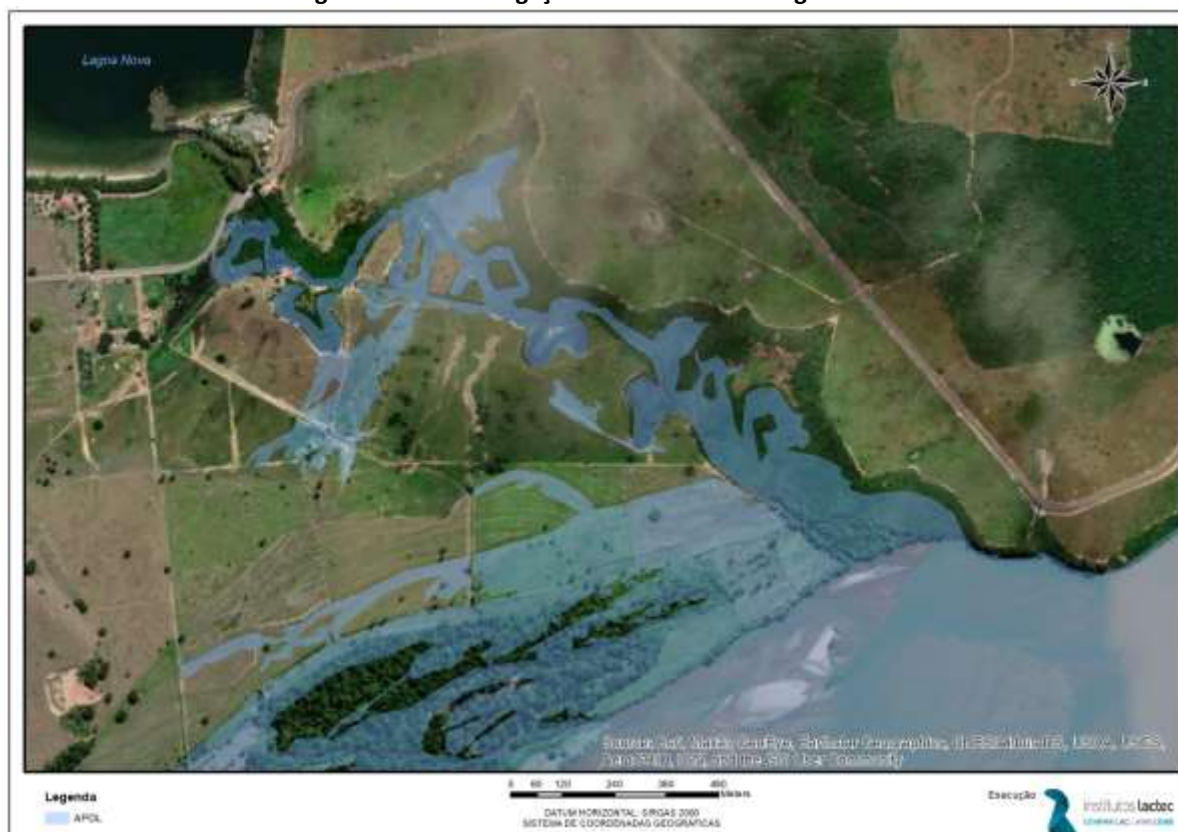


Figura 6 – APDL e área hipotética da cheia de 2016 com dique de 2018/2019 nos rios Pequeno e Doce.



Figura 7 – APDL na cidade de Governador Valadares



Figura 8 – APDL nas cidades e Aimorés e Baixo Gandu



Figura 9 – APDL na cidade de Colatina



Ao todo a área de passagem e deposição dos rejeitos de mineração advindos do rompimento da barragem da Fundão abrange 922,8 km², desde Fundão, em Mariana (MG), até a foz do rio Doce, em Linhares (ES), passando por 43 municípios em Minas Gerais e no Espírito Santo (ver os mapas das áreas alagadas entre a UHE Risoleta Neves e a foz do rio Doce no Apêndice A).

O resultado final da APDL apresentou uma diferença média entre observado e simulado em torno de 13 cm (modelagem 1d) e 14 cm (modelagem 2d) que é um ótimo valor para este tipo de modelagem resultando uma APDL muito assertiva e de ótima qualidade.

É o parecer.

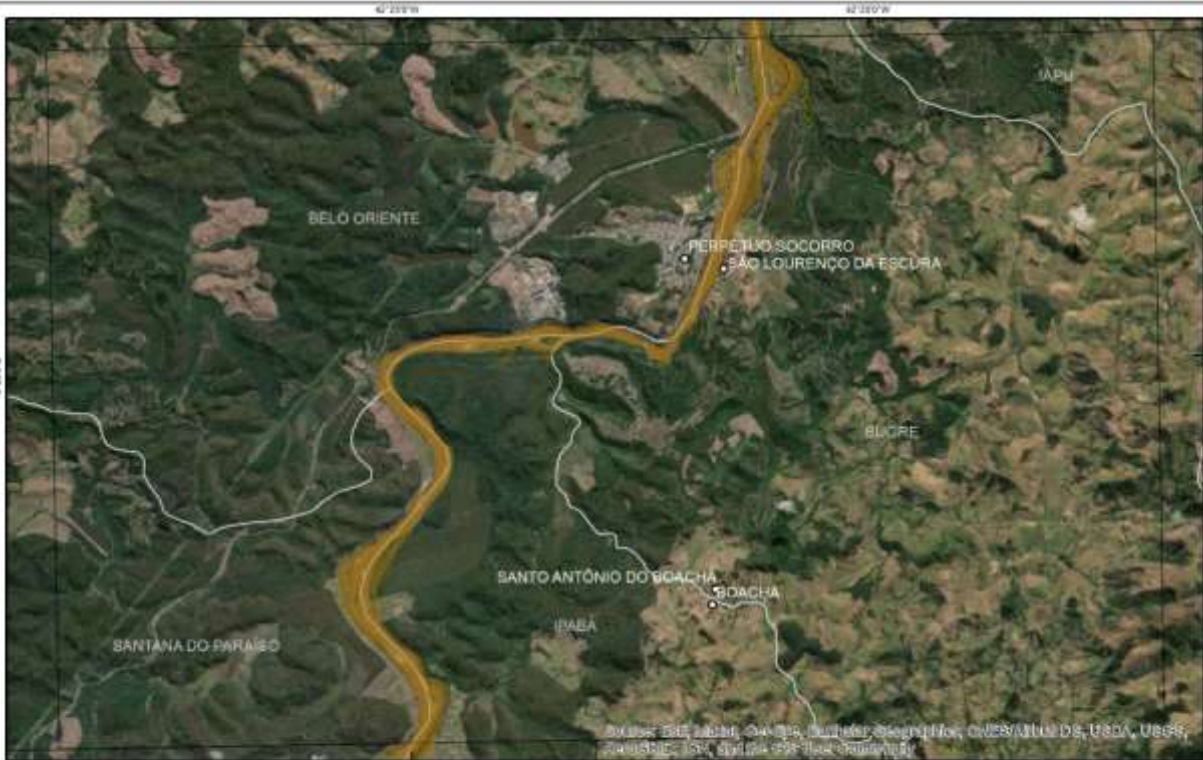
APÊNDICE A

MAPAS DA ÁREA DE PASSAGEM E DEPOSIÇÃO DA LAMA (APDL)

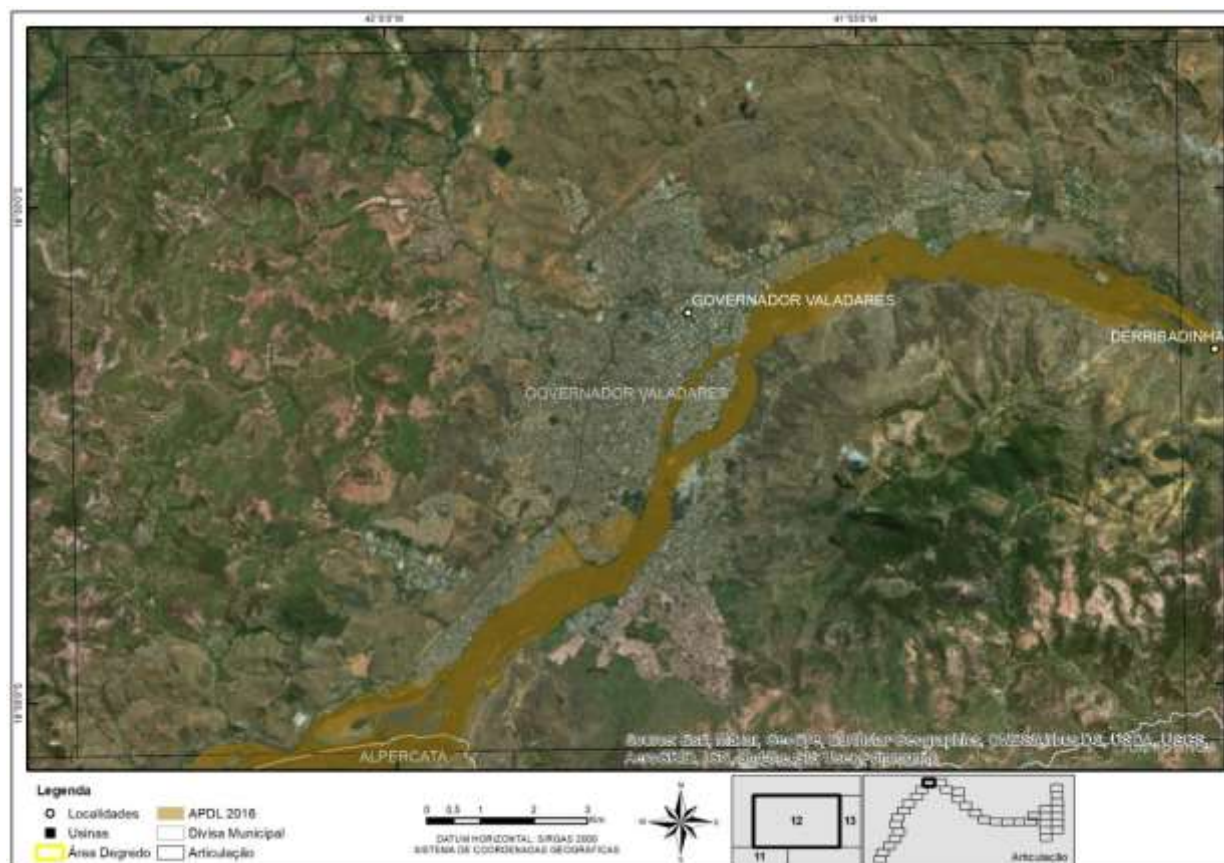
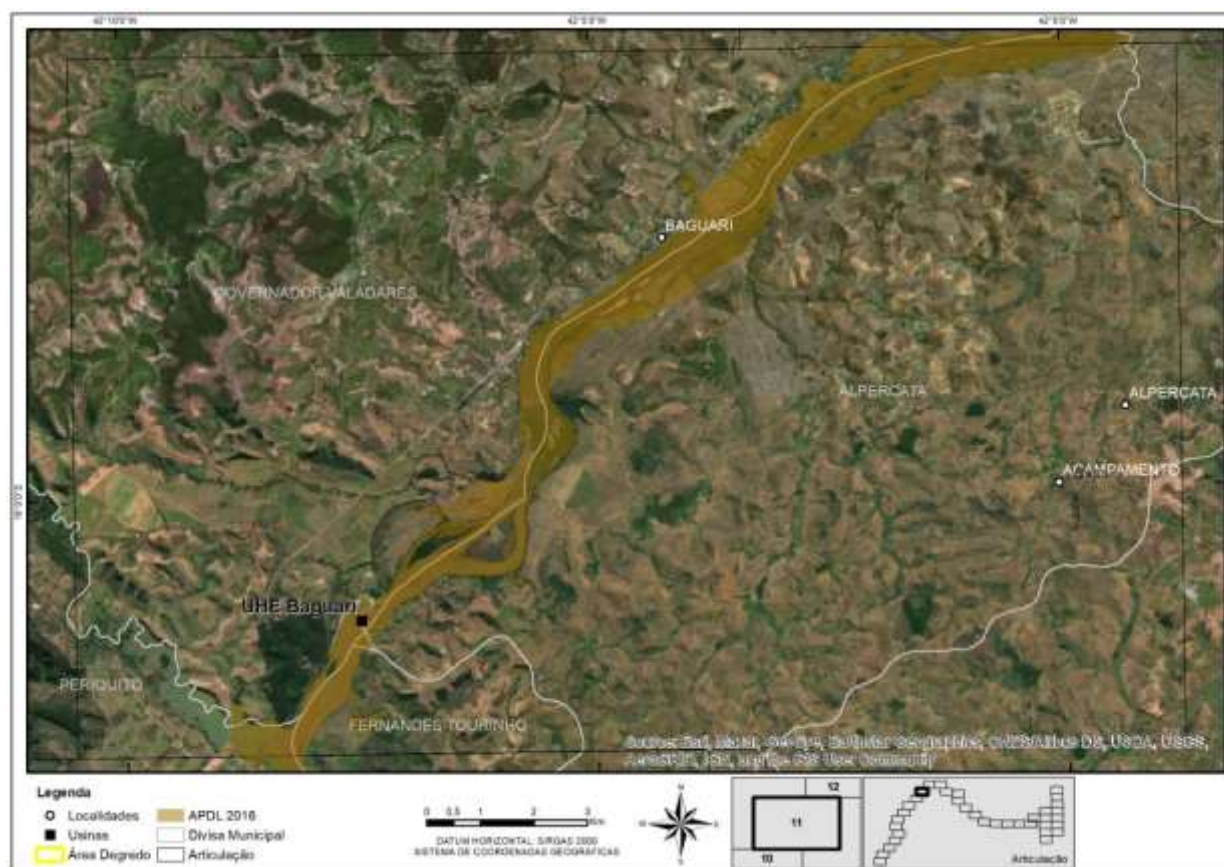










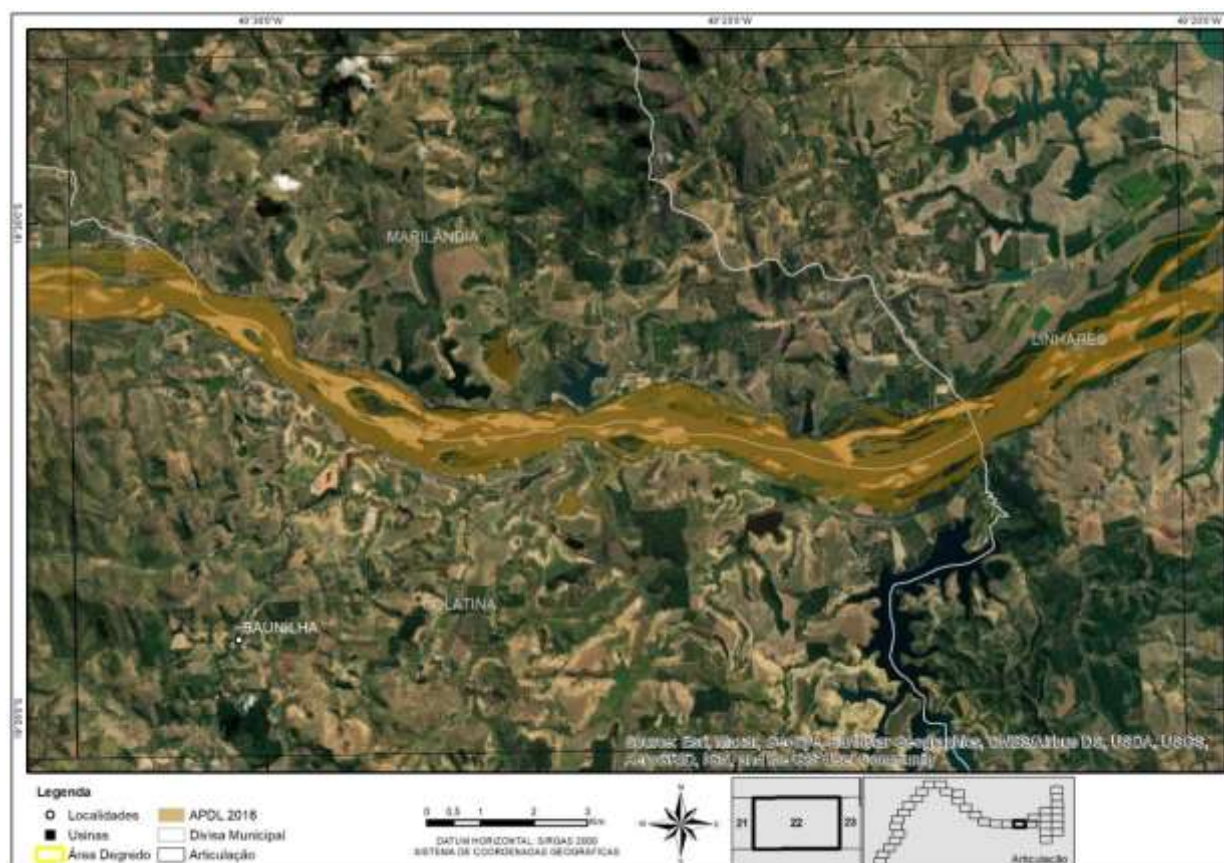


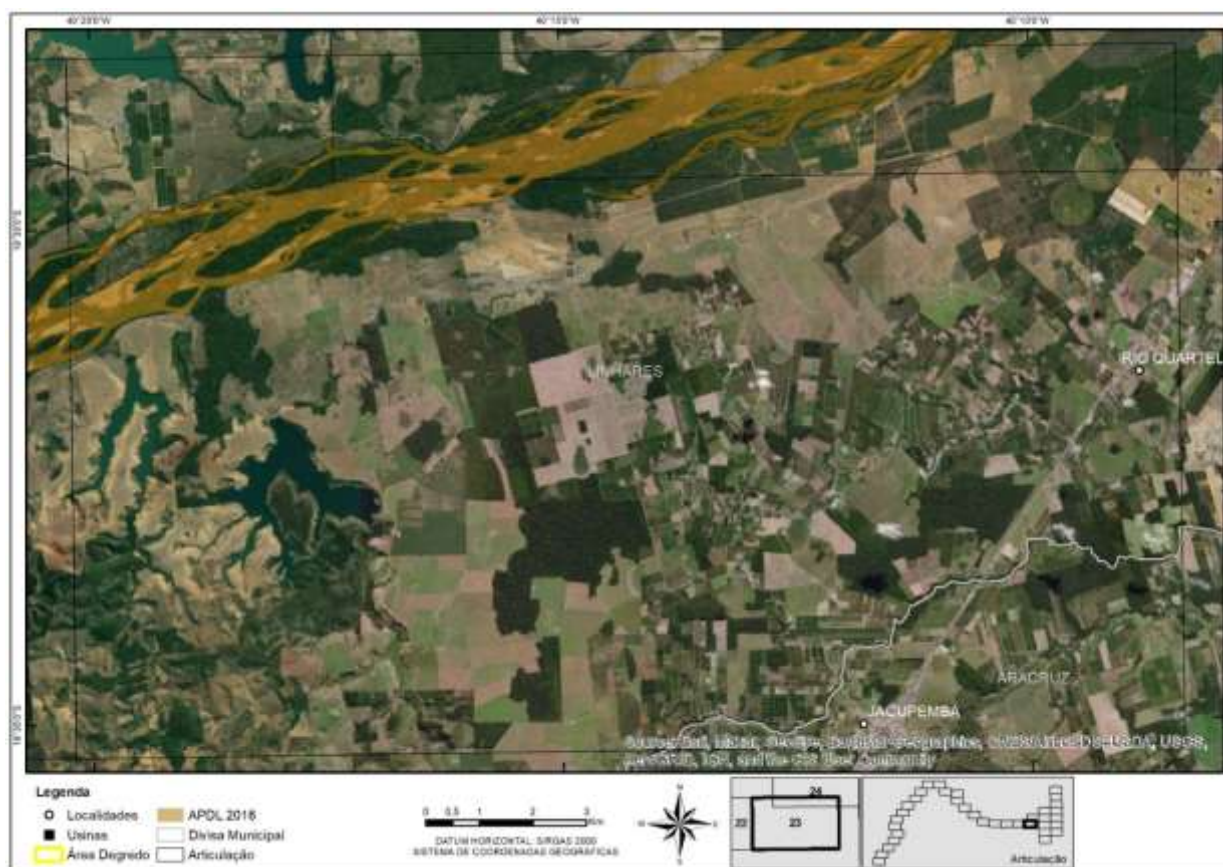




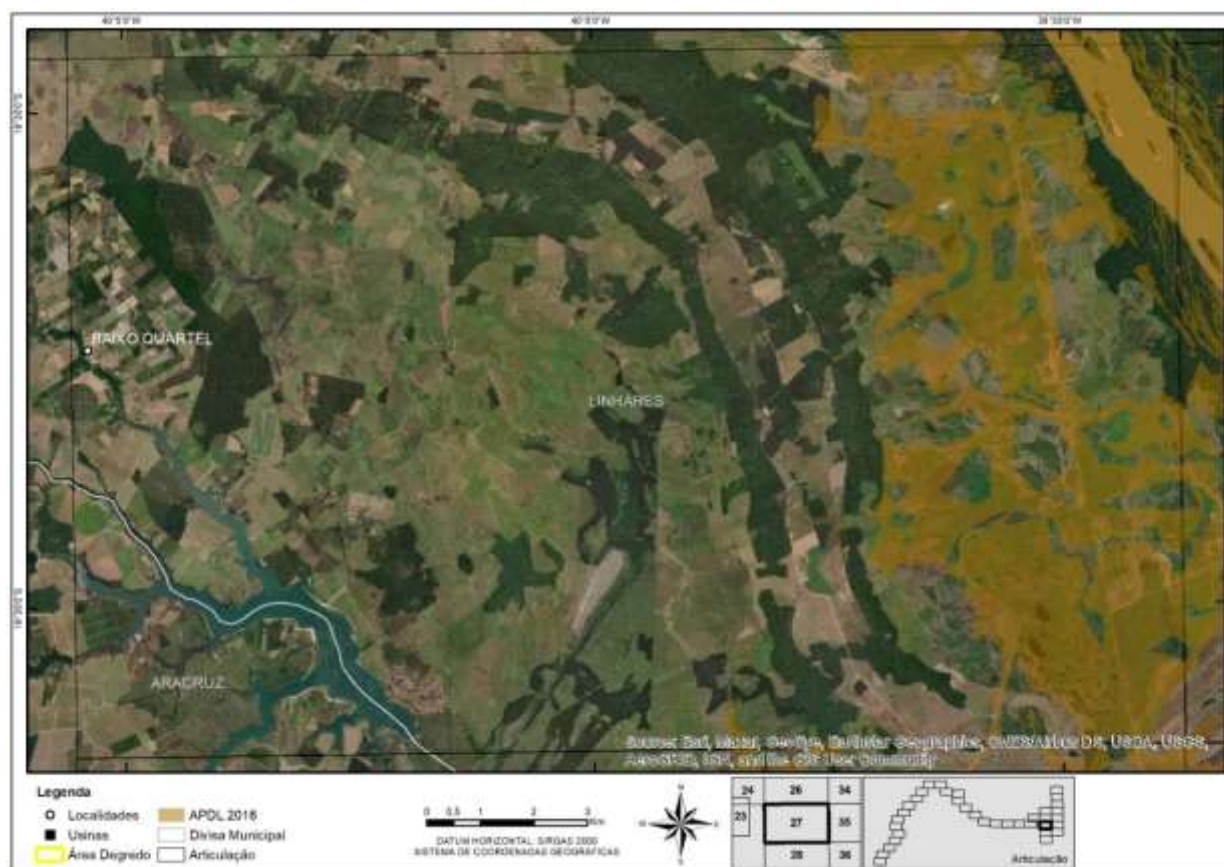


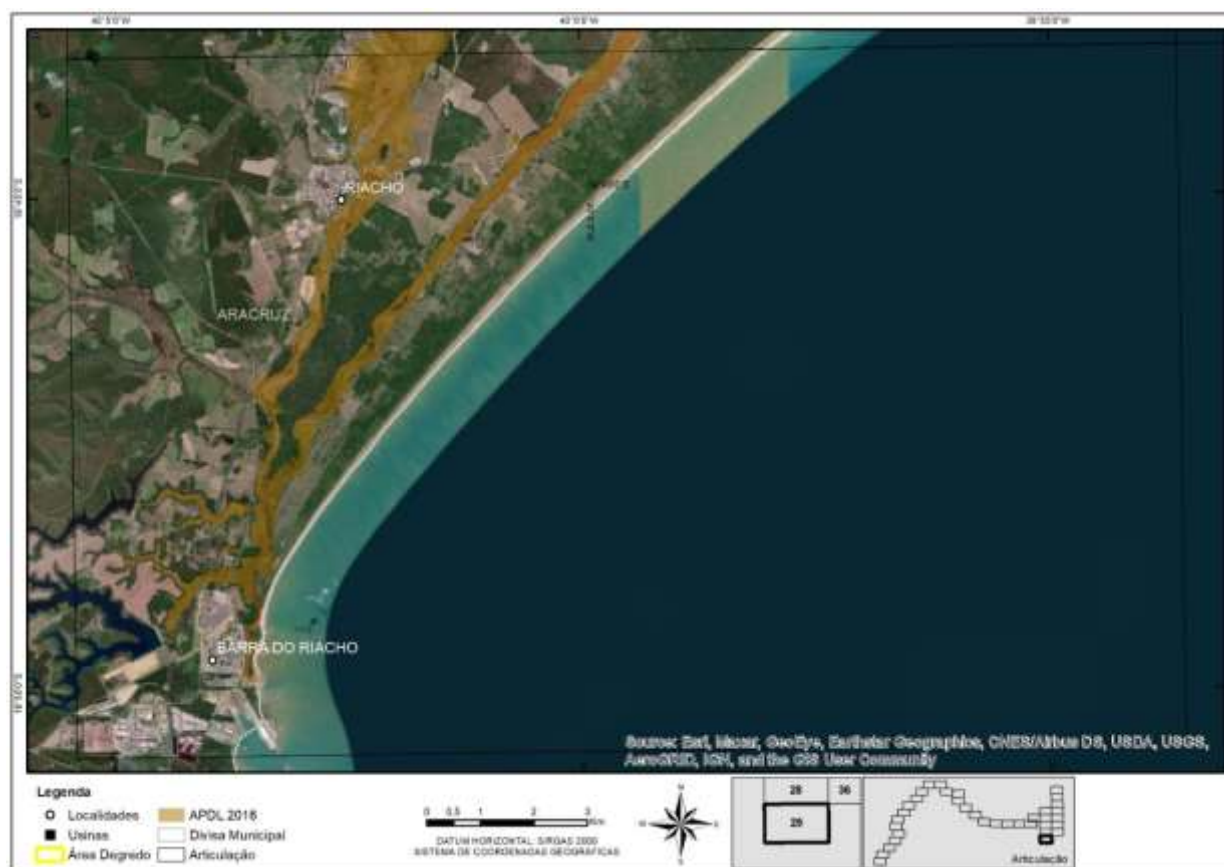


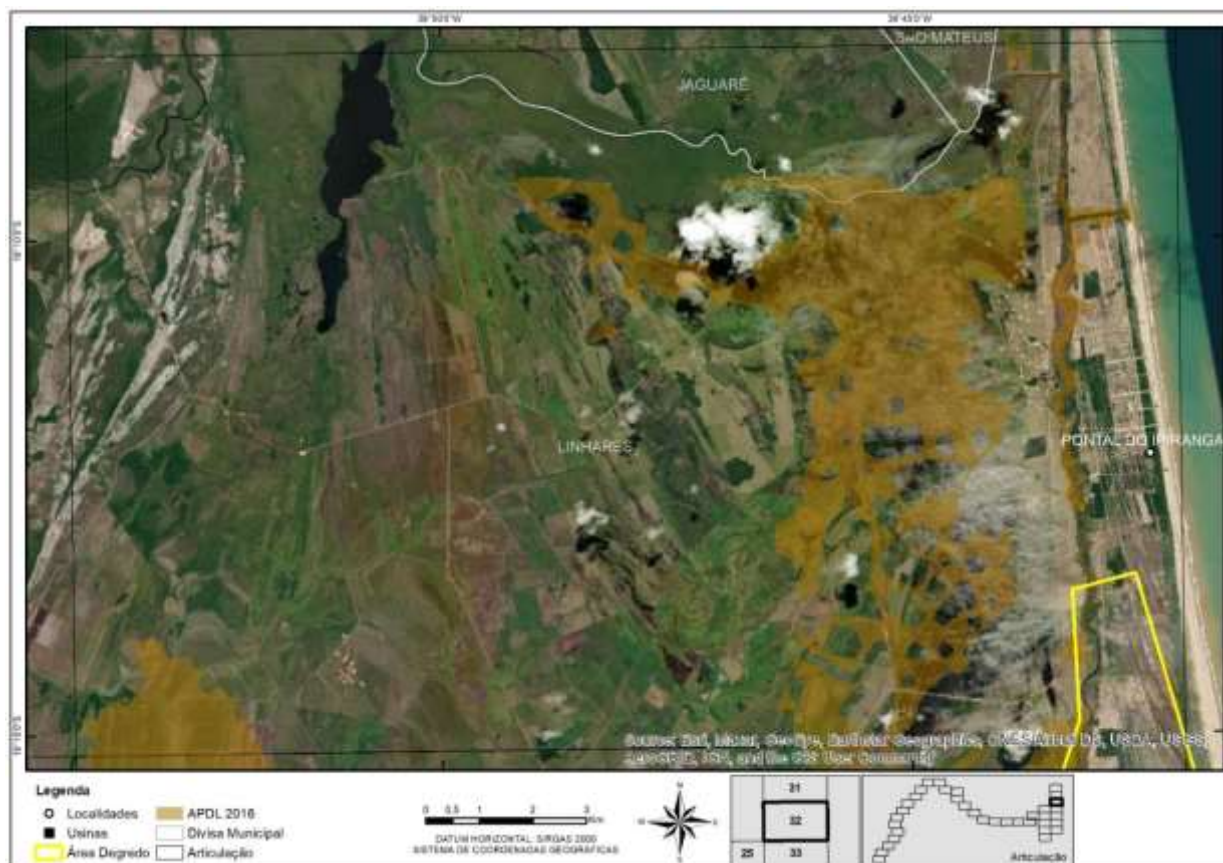


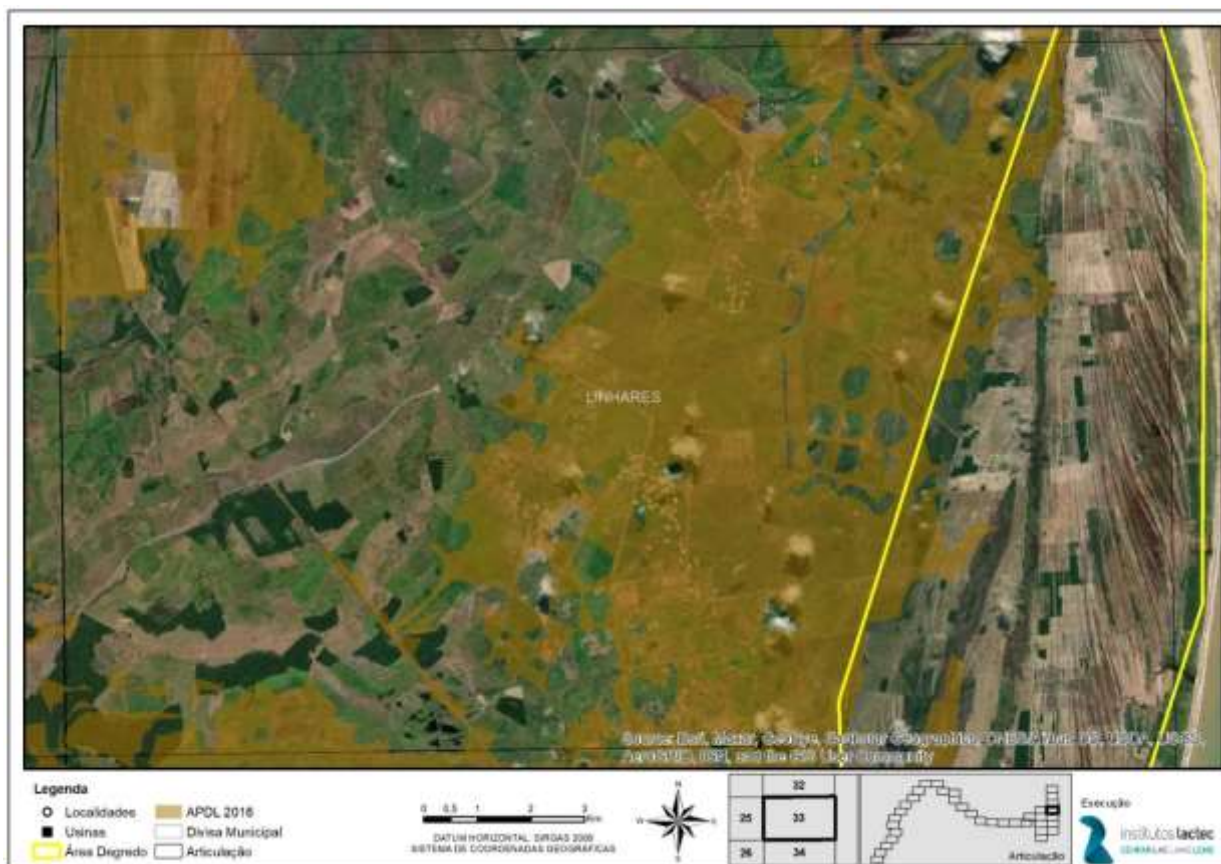














APÊNDICE B

SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DAS CHEIAS NO RIO DOCE: ATUALIZAÇÃO DO MODELO HEC-RAS UTILIZANDO UM MDT DE ALTA RESOLUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Este apêndice apresenta o relato dos resultados finais dos serviços de atualização da Área de Passagem da Lama (APDL) no rio Doce, utilizando simulação hidrodinâmica 1D com o modelo HEC-RAS.

São apresentados nesse relatório resultados da simulação hidrodinâmica unidimensional para a cheia de 2016 ocorrida no Rio Doce, utilizando o modelo HEC-RAS. O modelo HEC-RAS utiliza equações que permitem descrever o transporte de água em terrenos considerando processos físicos como efeitos de remanso e interação com planícies de inundação. Para esse estudo, também foi considerado a utilização do MDT para a região de Linhares/ ES, que se baseia em curvas de nível de 5 em 5m.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo HEC-RAS (USASCE 2019, <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>) foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Além de simulações 1D, esse modelo permite realizar simulações hidrodinâmicas bidimensionais horizontais (2DH) em regime não permanente (utilizando as equações completas de *Saint-Venant*).

O modelo HEC-RAS permite que informações detalhadas a respeito do relevo e da geometria da calha do rio sejam consideradas. Durante a definição das características do modelo e dos elementos que serão representados é possível incluir estruturas hidráulicas, como barramentos, pontes, vertedouros, diques, entre outros. É possível delimitar áreas de armazenamento, colocar diversos trechos de rios e indicar diferentes valores do coeficiente de Manning (n) para diferentes regiões. Durante a execução do modelo ainda é possível identificar regiões que estão com fluxo em regime supercrítico ou subcrítico.

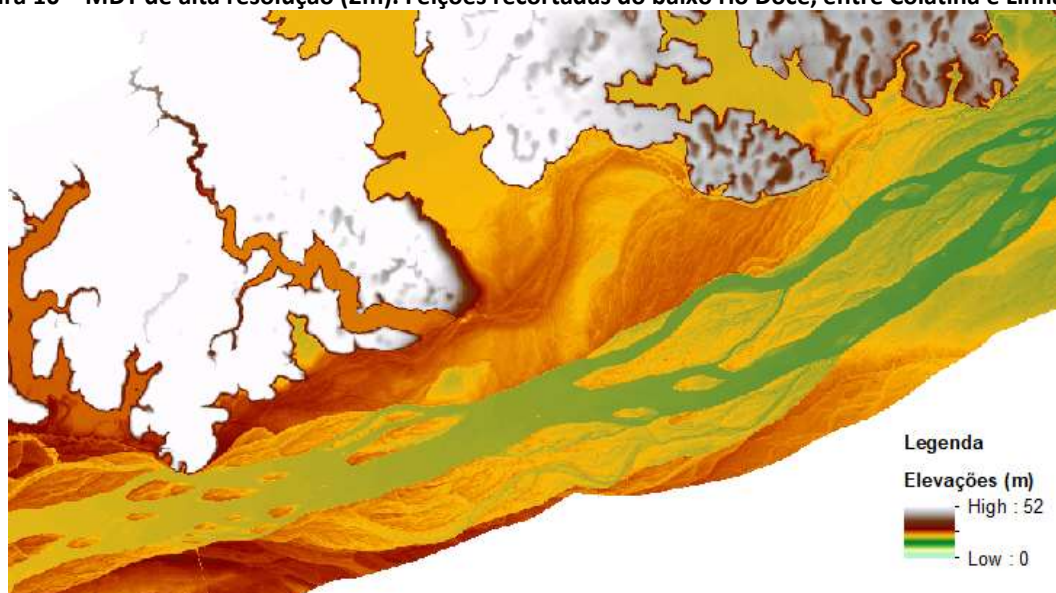
Nos subitens a seguir são apresentados os detalhes da aplicação do modelo HEC-RAS no eixo principal do rio Doce, desde a UHE Risoleta Neves até sua foz, em Linhares-ES. A área que foi simulada foi até a foz para utilizar como condição de contorno as Mares. Entretanto a APDL utilizou o resultado deste modelo até Colatina. No Município de Linhares a APDL foi definida utilizando uma modelagem 2D mais adequada para esta região de grandes planícies.

2.1 Processamento do MDT de alta resolução

A base do presente trabalho é a utilização de um Modelo Digital de Terreno de alta resolução espacial (Figura 10) fornecido pela Fundação Renova. Esse modelo foi levantado utilizando equipamentos laser que permitem a identificação da cota do terreno e não a cota no topo da vegetação.

O aerolevantamento topográfico resultou em 874 arquivos do tipo *raster* (matricial) que foram agrupados em um único arquivo usando geoprocessamento. Devido à grande demanda computacional e tempo de processamento das operações, incluindo aquelas feitas no modelo HEC-RAS, o MDT foi redimensionado de uma resolução de 0,5m para 2,0m, não gerando danos para os objetivos desse trabalho, visto que o rio Doce alcança larguras da ordem de 1km na porção mais à jusante e possui poucas planícies de inundação ao longo de todo o seu curso.

Figura 10 – MDT de alta resolução (2m). Feições recortadas do baixo rio Doce, entre Colatina e Linhares.



2.1.1 Batimetria do Rio Doce

A primeira etapa de preparação do modelo consistiu na definição da batimetria do rio a partir do MDT de alta resolução e de seções topobatimétricas levantadas em campo, disponíveis para a região de estudo, com inclusão de quatro seções no reservatório de Baguari.

O MDT é capaz de caracterizar a topografia da região de estudo, mas fornece informação sobre a superfície da água no momento do levantamento e não sobre a batimetria, se fazendo necessário processamentos, conforme descrito neste item.

Foram utilizados dados de 160 seções transversais topobatimétricas ao longo do Rio, levantadas em campo e fornecidas pela Agência Nacional de Águas, para definir melhor a descrição da calha principal do rio Doce. Essas seções, que distam uma da outra cerca de 6 km encontram-se ilustradas na Figura 11.

Figura 11 - Seções transversais topobatimétricas ao longo do Rio Doce.



A partir da localização das seções levantadas em campo foram extraídas elevações do MDT. Nestas novas seções com elevações do MDT foram localizados os valores referentes à água, a partir da consideração estatística da moda da elevação em cada seção e um limiar de $\pm 0,20\text{m}$ a partir desta, ou seja, um ponto da seção foi classificado como água quando a diferença entre a sua elevação e a moda das elevações naquela seção fosse de até 20cm.

Para os pontos de uma seção transversal identificados como água, foram calculadas a diferença média entre o MDT e as seções de campo. Esta diferença definiu a profundidade média de cada seção e correspondeu às profundidades d'água a serem descontadas do MDT ao longo da máscara d'água, permitindo que a partir do mapa topográfico contemplando nível do terreno e da superfície d'água estimesse a batimetria.

A Figura 12 e a Figura 13 apresentam dois exemplos deste processo de rebaixamento do MDT, nas seções transversais de referência DC-0001 e DC-0042. Em vermelho é apresentado o perfil das seções segundo levantamento em campo; em azul é representada a linha d'água a partir da consideração da moda dos valores do MDT e; em preto consta o perfil da seção após rebaixamento do MDT pela altura efetiva de escoamento na seção.

Figura 12 - Perfil longitudinal do rio na seção DC-0001.

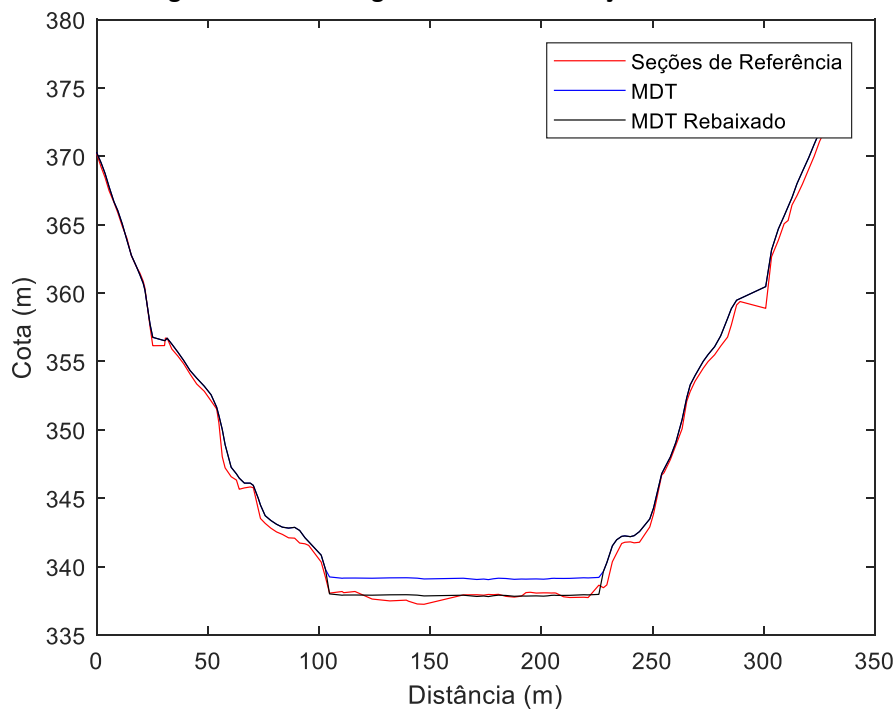
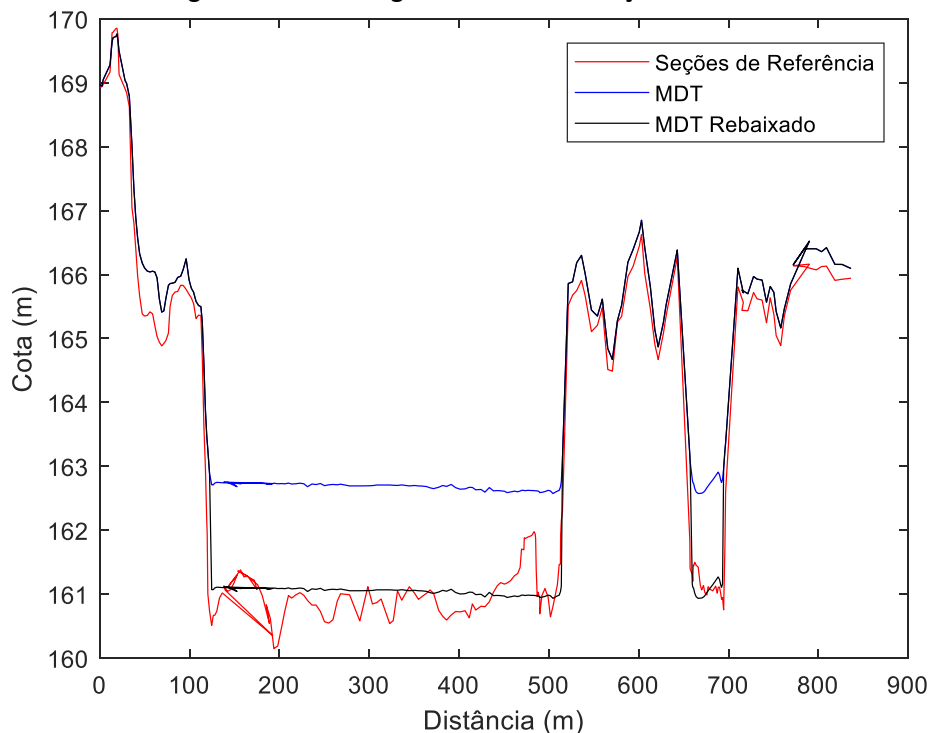


Figura 13 - Perfil longitudinal do rio na seção DC-0042



2.1.1.1 Definição da máscara d'água

Este procedimento teve como objetivo a definição da máscara de água durante o levantamento do MDT de alta resolução, sendo possível diferenciar a superfície d'água de ilhas, margem e planície de inundação que estavam secos durante o levantamento do MDT.

A obtenção da máscara de água dependeu inicialmente da seleção manual de pontos definidos como água no MDT de alta resolução ao longo de todo o rio, conforme ilustrado na Figura 14. Este procedimento também foi apoiado pela visualização da região através de imagens de satélite obtidas em período seco.

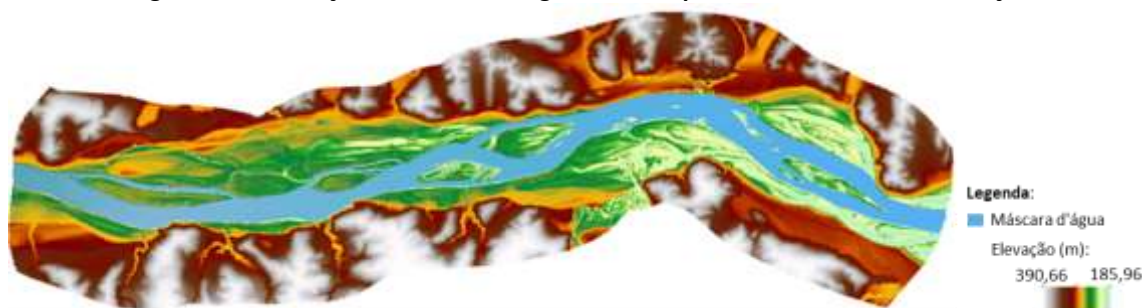
Figura 14 – Classificação manual de pontos referentes à água no leito do rio.



Após este procedimento, os pontos foram interpolados para obtenção de um *raster* de elevação da superfície de água, através dos pontos definidos na etapa anterior. A interpolação foi realizada pelo método IDW - *Inverse Distance Weighted*, considerando que o número de pontos classificados manualmente foi denso o suficiente para representar espacialmente os pixels com água.

A diferença entre o mapa de elevação da superfície de água interpolado e o MDT pode ser utilizado para diferenciar a água de ilhas, margens e outras formações de terreno. Considerou-se pertencentes à máscara d'água os pixels cujo resultado dessa subtração foi muito baixo ($\pm 0,50\text{m}$). Este valor de 0,50m foi determinado como o menor valor que gerasse uma máscara d'água mais coerente com as elevações do MDT, a partir de análise visual. Tendo em vista que para este processo foi utilizado um MDT com resolução de 4m e a presença de ruídos no MDT de alta resolução original, este valor de 0,50m foi avaliado como adequado. A Figura 15 ilustra a máscara d'água obtida a partir do MDT de alta resolução. Os *rasters* foram processados com resolução espacial de 4 m para facilitar o processamento.

Figura 15 – Ilustração da máscara d'água obtida a partir de MDT de alta resolução.



2.1.1.2 Definição da elevação do terreno no leito do Rio

A definição das elevações dentro da máscara d'água deu-se através da utilização das profundidades médias extraídas em cada seção pela diferença entre o MDT e seções levantadas em campo disponibilizadas pela ANA e apresentadas no item 2.1.1. Essas profundidades foram utilizadas para interpolar ao longo de todo o rio a altura que o MDT deveria ser rebaixado.

A área de estudo foi dividida em 4 regiões, sendo duas entre os reservatórios de Candonga e Baguari (com divisão entre elas no Parque Estadual do Rio Doce), e as outras duas definidas até o reservatório de Aimorés e posterior a este, até a foz do Rio. Esta divisão foi realizada para diminuir o tamanho dos arquivos raster e, assim, facilitar o processamento e também para evitar variações bruscas de nível durante a interpolação em cada trecho (por exemplo, que elevações à jusante de reservatórios fossem interpoladas para regiões à montante e vice-versa).

Para executar esta interpolação utilizou-se o método *Topo to Raster* do software ArcGIS para dados definidos como *PointElevation*. Este procedimento resultou na batimetria do rio e, abaixo, a Figura 16 ilustra as elevações calculadas que foram substituídas no MDT de alta resolução e a Figura 17 apresenta um exemplo do MDT final com profundidades (em azul) escavadas na calha do rio.

Figura 16 - Batimetria em trecho do Rio Doce, obtida através da interpolação pelo método Topo to Raster das profundidades em seções transversais.



Figura 17 – Profundidades calculadas a partir do processo de interpolação em trecho do Rio Doce.



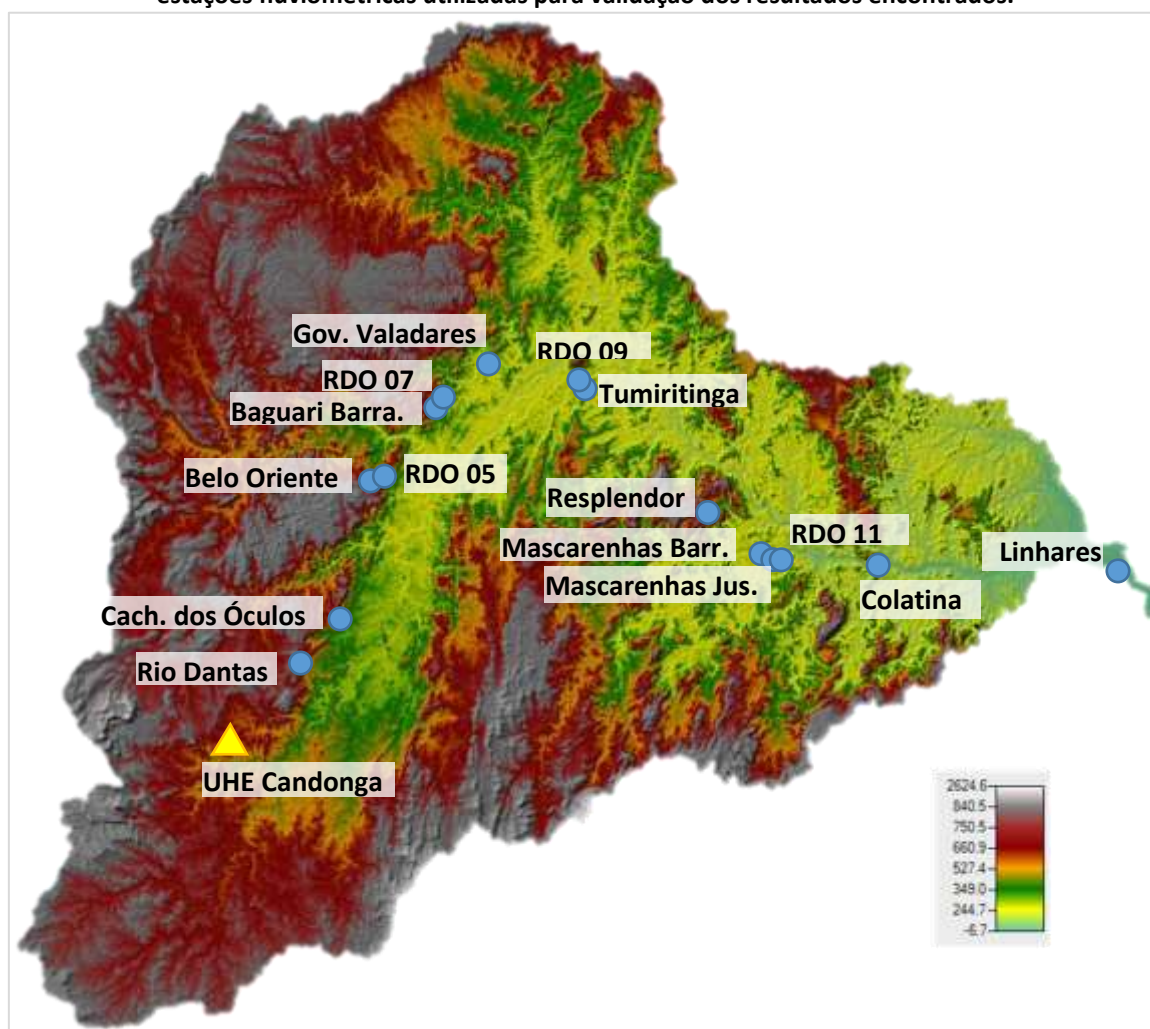
Na região do reservatório de Aimorés foi utilizado os dados em arquivo raster da batimetria de fundo do reservatório, realizada pelo LACTEC e datada de junho de 2015. No reservatório da UHE Baguari, utilizou-

se seções transversais levantadas em campo, fornecidas pela Agência Nacional de Águas (ANA) ao LACTEC, para uma melhor estimativa das profundidades próximo ao barramento.

2.1.2 Definição da Geometria do modelo

No HEC-RAS, agrupou-se o MDT de alta resolução (incluindo as informações dos reservatórios das UHEs Aimorés e Baguari) ao Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS Palsar (ASF DAAC, 2015), com resolução espacial de 12,5m, a fim de representar outras regiões não abrangidas pelo aerolevantamento. A Figura 18 apresenta o MDE utilizado e a localização das estações fluviométricas utilizadas na validação dos resultados.

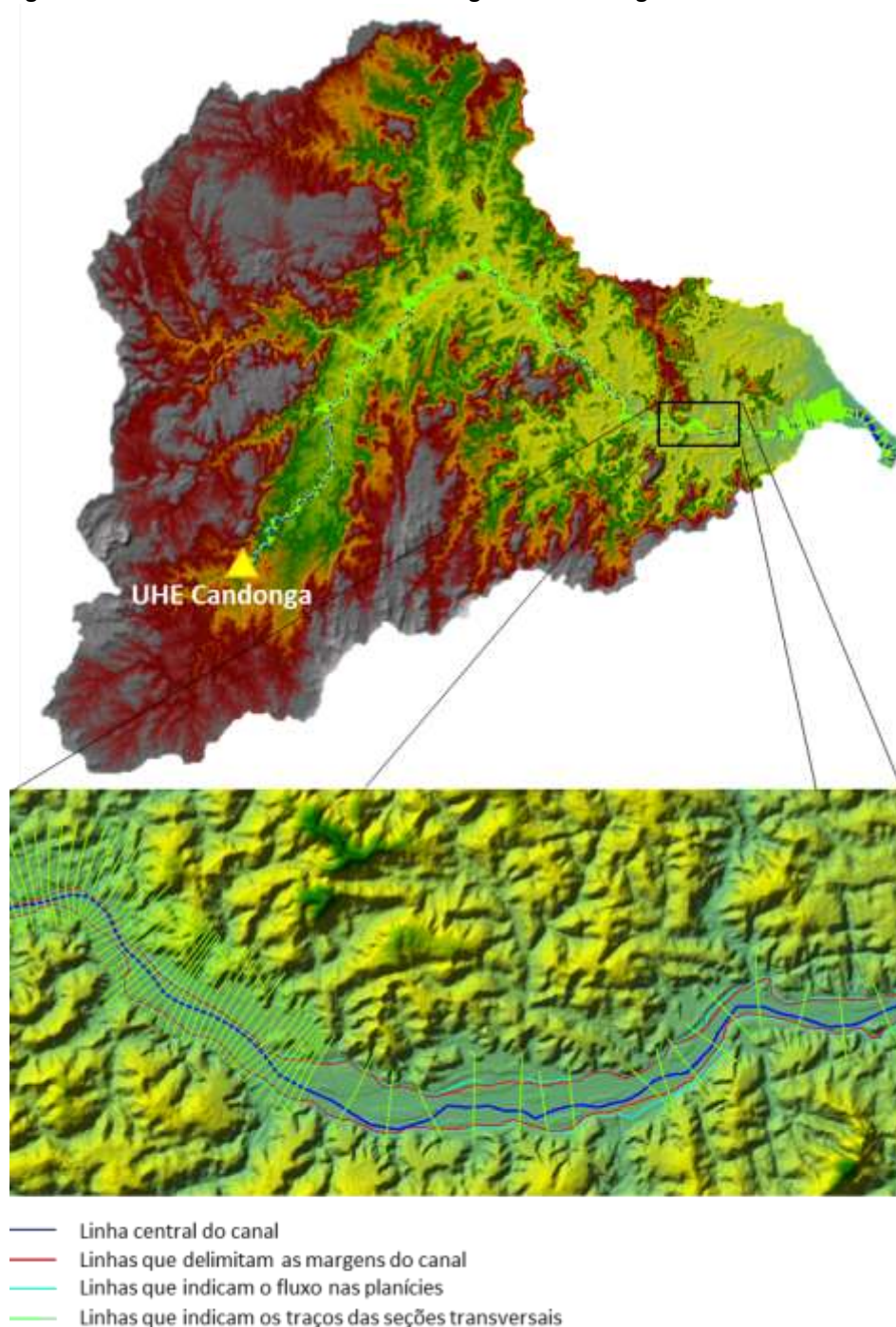
Figura 18 – Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS Palsar (ASF DAAC, 2015) para a bacia hidrográfica do rio Doce e estações fluviométricas utilizadas para validação dos resultados encontrados.



Em cima desse novo terreno foi delimitado o rio principal e suas margens, as linhas que indicam as distâncias percorridas pelos fluxos nas planícies, e foram traçadas e extraídas diversas seções transversais. Todas essas informações são apresentadas na Figura 19 a distância entre as seções transversais foi em média

de 580 m, mas em alguns trechos, com relevo mais complexo e maiores declividades, esse valor chegou próximo de 65 m, valores esses coerentes com aqueles recomendados por Castellarin et al. (2009).

Figura 19 – Modelo Digital de Terreno do eixo principal do rio Doce e Modelo Digital de Elevação da bacia hidrográfica do rio Doce. Zoom com detalhe da geometria na região da cidade de Colatina-ES.



Estruturas hidráulicas, como pontes, não foram consideradas na modelagem hidráulica como simplificação para montagem do modelo pelo entendimento de que estas estruturas não afetariam de

maneira significativa a expansão das manchas de inundação, foco deste estudo, especialmente nas localidades de maior interesse.

2.1.3 Tratamento de quedas d'água

O escoamento em quedas d'água é do tipo bruscamente variado, não sendo representado de forma adequada pelas equações completas de Saint Venant utilizadas, padrão na versão *unsteady* do modelo HEC-RAS. Nesses casos a queda d'água foi representada através de escoamento sobre um vertedouro de uma *Inline structure*, com geometria da crista definida pelo MDT. Esses trechos de rio com quedas d'água foram identificados através da inspeção visual de imagens de satélite de alta resolução, disponível no RasMapper, e do perfil do fundo.

2.1.4 Reservatórios

A operação dos reservatórios foram representadas através de uma simples relação cota-vazão, considerando: vazão defluente igual a zero quando a cota é menor ou igual a cota da crista do vertedouro; vazão defluente igual a vazão máxima de dimensionamento do vertedouro ($TR=10.000$ anos) que ocorre quando o nível máximo maximorum (ou crista da barragem) é atingido. Para a UHE Baguari, conforme Nota Técnica ANA nº 323/SOC/2005, considerou-se $N_{Amin}=184,5m$, $N_{Acrista}=188m$ e $Q_{max}=12.227m^3/s$. Para a UHE Mascarenhas, conforme Nota Técnica ANA n.º 2006/2007/GEREG/SOF-ANA, considerou-se $N_{Amin}=59,5m$, $N_{Amaxmax}=62,1m$ e $Q_{max}=14.500m^3/s$.

2.2 Condições de contorno e condições iniciais

O modelo HEC-RAS requer condições de contorno (CC) e condições iniciais (CI) para realizar a simulação hidrodinâmica do transporte de água no canal.

Neste trabalho, utilizou-se como CC de montante as vazões defluentes da UHE Candonga (fornecidos pela ANA e disponíveis no endereço eletrônico do SAR – Sistema de Acompanhamento de Reservatórios) de janeiro de 2012 a dezembro de 2017 e como aportes laterais ao longo do rio Doce, vazões simuladas com o modelo MGB.

O MGB é um modelo hidrológico computacional desenvolvido por Collischonn et al. (2007). O modelo representa diversos processos do ciclo hidrológico, como a precipitação na forma de chuva, a infiltração no solo e posterior recarga dos aquíferos, a evapotranspiração da água contida em superfícies e presente nas plantas e também o escoamento da água sobre o solo e nos rios. Assim, usando o MGB foi possível estimar as vazões para diversos trechos de cursos d'água da bacia do rio Doce, usando dados de precipitação, de

clima, de relevo, do tipo de solo e da sua capacidade de armazenamento de água e da vegetação que cobre o solo da área de estudo.

Dada a cobertura espaço-temporal incompleta de observações de vazões de postos fluviométricos nos afluentes ao trecho simulado do rio Doce, optou-se por utilizar resultados de vazões simuladas do modelo MGB como condições de contorno (contribuições laterais). Desta forma, optou-se por um padrão de entrada de condições de contorno para todos os afluentes para diminuição de incertezas. O modelo MGB foi calibrado e validado, conforme documentado em relatório de estudo anterior, apresentando métricas de desempenho do coeficiente de Nash-Sutcliffe maior que 0,75 e BIAS inferior a 10% na maioria das estações avaliadas. Sendo assim, a acurácia dessas estimativas foi considerada adequada para o objetivo desse estudo.

Para a CC de jusante, utilizou-se uma série de níveis de maré para todo o período simulado (a aquisição e processamento dos dados de maré são descritos no item 2.2.1). Para as CI considerou-se que o rio estava seco e que os dez dias antes do dia 01 de janeiro de 2012 teriam valores de vazão constantes e iguais a esse. Esses dez primeiros dias foram considerados para o aquecimento do modelo. Foram simulados o período de 2012 a 2017 com atenção especial para as cheias do período para calibração do modelo.

2.2.1 Condição de contorno de jusante - Maré

Definiu-se como condição de contorno de jusante a altura da maré astronômica na foz do rio. Para obtenção da série histórica de níveis de maré na região, tomou-se como base a estação maregráfica mais próxima à foz cadastrada pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

A estação utilizada foi a Terminal Barra do Riacho, localizada na Latitude: 19° 50' 19.56" S e Longitude: 40° 3' 34.99" W. Para esta estação são disponibilizadas 13 constantes harmônicas, validadas no período de 30/07/2004 a 01/09/2004 (CHM - Banco Nacional de Dados Oceanográficos, 2019). O nível médio da maré utilizado como referência (0,78m) e as informações das constantes harmônicas são disponibilizados pelo CHM, conforme Tabela 2.

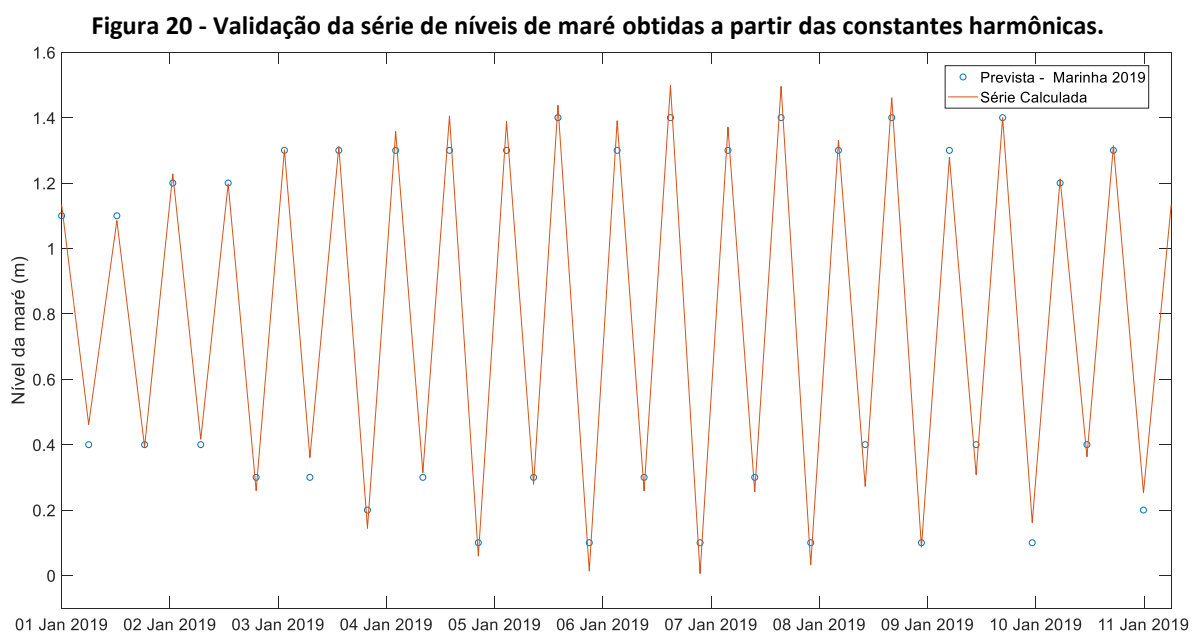
Tabela 2 – Constantes harmônicas – Terminal Barra do Riacho (ES).

<i>Constante Harmônica</i>	<i>Semi-amplitude H (m)</i>	<i>Fase g (rad)</i>
M2	0,443	0,8534
S2	0,217	0,9768
O1	0,087	0,9635
N2	0,061	0,9912
K1	0,062	1,8227
K2	0,059	0,9868
Q1	0,025	0,6695
P1	0,021	1,7583
NU2	0,012	0,9727
L2	0,018	0,9985
T2	0,013	0,9719
2N2	0,008	1,1289

A série de maré foi gerada para todo o período de simulação, com discretização de 2h, através do somatório das componentes harmônicas utilizadas nesta estação e apresentadas na tabela acima.

Para validação deste procedimento, foi gerada a série de maré para o ano de 2019 e comparado com a tábua de maré disponibilizada pela Marinha do Brasil (CHM - Banco Nacional de Dados Oceanográficos, 2019).

Nesta validação foi encontrado um $RMSE = 0.099$ e um coeficiente de determinação $R^2 = 0.98$ entre as duas séries. Estas métricas demonstram uma ótima eficiência da metodologia, tendo em vista que a precisão das estimativas disponibilizadas pela marinha e utilizados como referência na análise são de precisão de 0.10m. A Figura 20 apresenta a série calculada e a série prevista pela Marinha para o início do período de validação, janeiro de 2019.



2.3 Calibração e validação do modelo

Inicialmente foram adotados valores de coeficiente de Manning (n) para rios naturais e planície de inundação iguais a 0,035 e 0,1 respectivamente. Posteriormente, na etapa de calibração, os valores de n para a calha principal foram ajustados, variando entre 0,032 e 0,050, conforme Porto (2006). A calibração foi realizada avaliando, principalmente, a melhora nas métricas: coeficiente de eficiência ENS (Nash e Sutcliffe, 1970) (Equação 1) e $RMSE$ (Equação 5), calculados para os níveis observados e simulados e também avaliando visualmente os cotogramas simulados e observados, visando sempre a melhoria dos picos.

As vazões, níveis e curvas-chave estimados com o modelo HEC-RAS foram comparados com aqueles medidos em campo em 15 estações fluviométricas (listadas na Tabela 3 e com localização segundo Figura 18)

conforme disponibilidade de dados de cada uma, pois nem todas possuem dados de vazão e nível para todo o período simulado.

Tabela 3 – Listagem de estações fluviométricas utilizadas para calibração e validação dos resultados encontrados.

Código	Estação	Período de Dados		Fonte
		Ínicio	Fim	
56425000	Rio Dantas	22/11/1981	31/12/2017	ANA
56539000	Cachoeira dos olhos	24/12/1979	31/12/2017	ANA
56850000	Governador Valadares	24/12/1979	31/12/2017	ANA
56920000	Tumiritinga	24/12/1979	31/12/2017	ANA
56948005	Resplendor_Jusante	19/05/1983	26/11/2004	ANA
56994500	Colatina	01/07/1983	31/12/2017	ANA
56719998	Belo Oriente	18/10/1986	31/12/2017	ANA
56846080	UHE Baguari Barramento	31/12/2008	29/06/2015	ANA
56992400	UHE Mascarenhas Barramento	01/01/1995	29/06/2015	ANA
56992480	UHE Mascarenhas Jusante	01/10/2002	30/04/2013	ANA
56998200	Linhares Cais do Porto	01/01/2003	31/12/2017	ANA
56338260	RDO 05	04/08/2017	31/12/2017	RENOVA
56846200	RDO 07	01/08/2017	31/12/2017	RENOVA
56001000	RDO 09	01/08/2017	31/12/2017	RENOVA
56338360	RDO 11	01/08/2017	31/12/2017	RENOVA

Os dados das estações fluviométricas foram obtidos da base de dados HIDROWEB (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) da ANA e as que possuem a nomenclatura inicial “RDO” foram fornecidas pela fundação RENOVA. Também foram fornecidos pela contratante informações sobre os níveis de referência das réguas linimétricas, utilizadas para estimar o zero das réguas e para converter as séries históricas de cota de régua para níveis d’água. Para a comparação dos dados observados e simulados de vazões e níveis foi utilizado o período de 2012 a 2017, com abrangência dos eventos de cheias de interesse (2015 e 2016). Para a comparação dos resultados das curvas-chave, como existem poucos dados medidos em campo anualmente, utilizou-se toda a série histórica dos dados observados em cada estação e comparou-se com os dados simulados no período de 2012 a 2017.

Na etapa de validação, a performance do modelo foi avaliada utilizando o coeficiente de eficiência *ENS* (Nash e Sutcliffe, 1970) para as vazões e anomalias de níveis d'água, *BIAS* para as vazões e níveis, coeficiente de correlação de Pearson (*R*), erro dos desvio padrão (*eSTD*) indicando erro na amplitude de variação dos níveis d'água e Raiz do Erro Médio Quadrático para os níveis d'água absolutos e anomalias apresentados, respectivamente, nas equações 1, 2, 3, 4 e 5. Os valores de *ENS* e *R* são melhores quanto mais próximos forem do valor 1. Já as demais métricas, quanto mais próximos de 0, melhor a performance do modelo.

$$ENS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2} \right] \quad (1)$$

$$BIAS_Q(\%) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs}) \cdot (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (2a)$$

$$BIAS_H(m) = \bar{Y}^{sim} - \bar{Y}^{obs} \quad (2b)$$

$$R = \frac{\sum (Y^{obs} - \bar{Y}^{obs}) \cdot (Y^{sim} - \bar{Y}^{sim})}{\sqrt{\sum (Y^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2 \cdot \sum (Y^{sim} - \bar{Y}^{sim})^2}} \quad (3)$$

$$eSTD (\%) = 100 \times \frac{(\text{desvio padrão médio obs.} - \text{desvio padrão médio sim.})}{\text{desvio padrão médio obs.}} \quad (4)$$

$$RMSE (m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}{N}} \quad (5)$$

Onde, Y^{sim} são os valores simulados de uma variável e Y^{obs} são os valores observados.

3 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados na forma de gráficos e figuras bem como as estatísticas obtidas na etapa de validação do modelo HEC-RAS. Na discussão dos resultados, esses são apresentados de forma resumida, por anomalias e valores absolutos de níveis, focando nas estações Rio Dantas; Cachoeira dos Óculos; Governador Valadares e Linhares Cais do Porto para uma representação das diferentes regiões do Rio Doce.

É de interesse deste estudo a representação hidrodinâmica na bacia do Rio Doce, sobretudo para vazões e níveis d'água máximos. Neste sentido, durante o processo de calibração focou-se no melhor desempenho de representação dos picos dos cotogramas. Além disso, incertezas sobre o zero das réguas das estações reforçam o interesse de analisar o desempenho das simulações a partir das anomalias dos níveis.

3.1 Vazões

Da Figura 21 a Figura 27 são apresentados os gráficos das vazões para as estações abrangidas no estudo.

Figura 21 – Vazões simuladas e observadas na estação Rio Dantas.

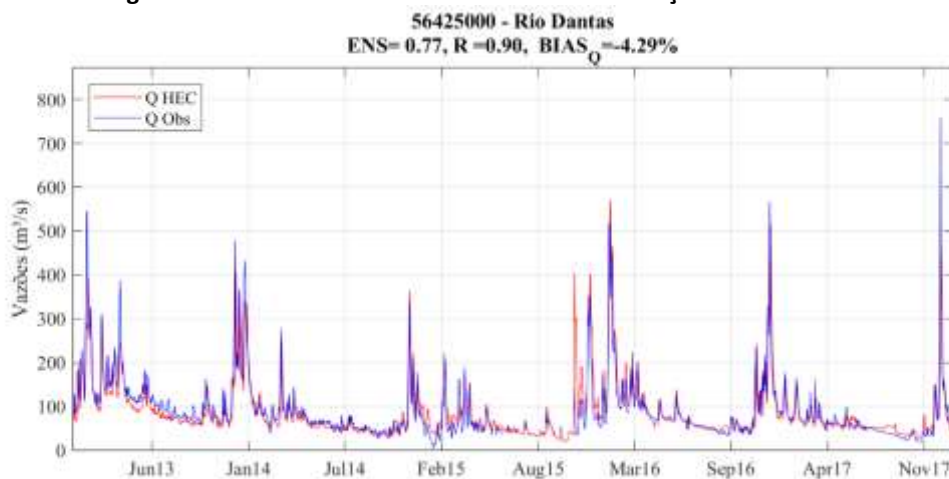


Figura 22 – Vazões simuladas e observadas na estação Cachoeira dos Óculos.

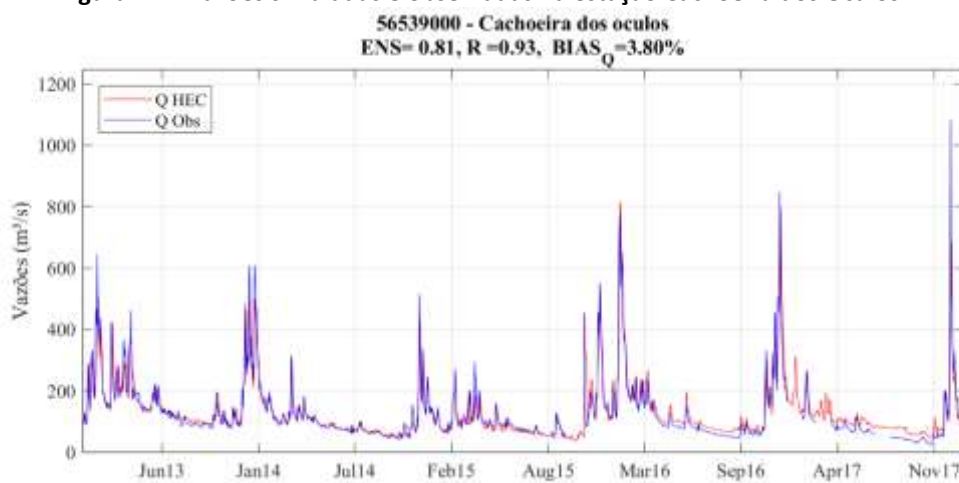


Figura 23 – Vazões simuladas e observadas na estação Belo Oriente.

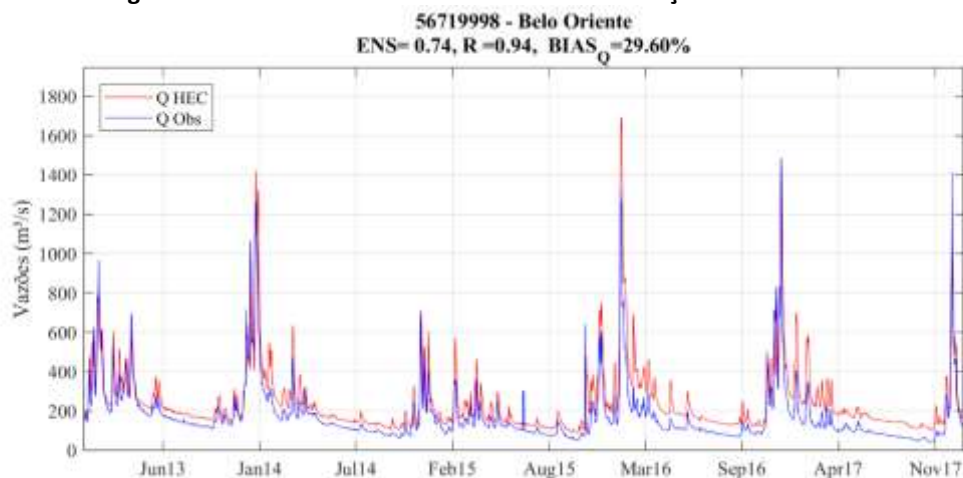


Figura 24 – Vazões simuladas e observadas na estação UHE Baguari Barramento.

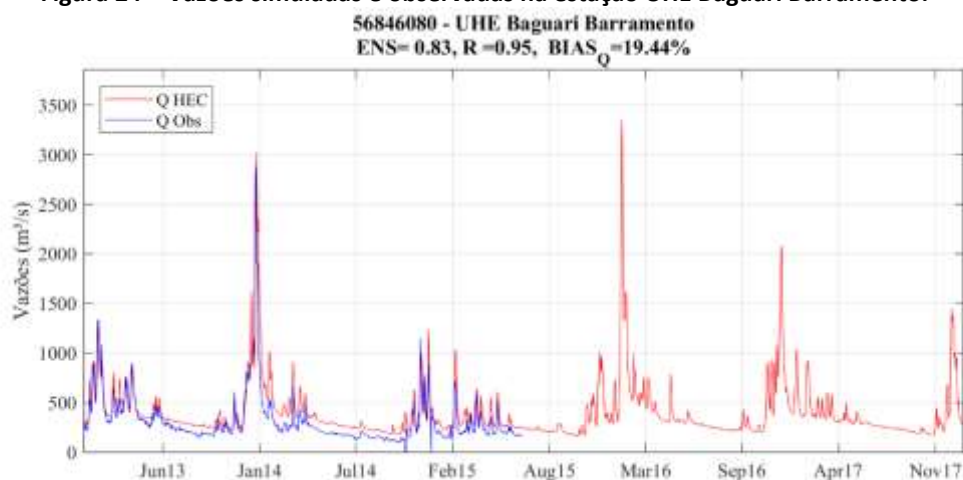


Figura 25 – Vazões simuladas e observadas na estação Governador Valadares.

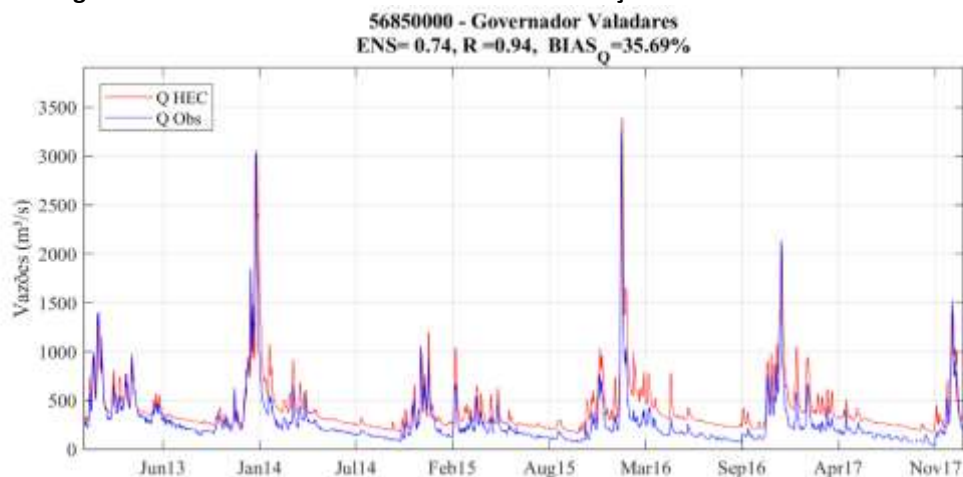


Figura 26 – Vazões simuladas e observadas na estação Tumiritinga.

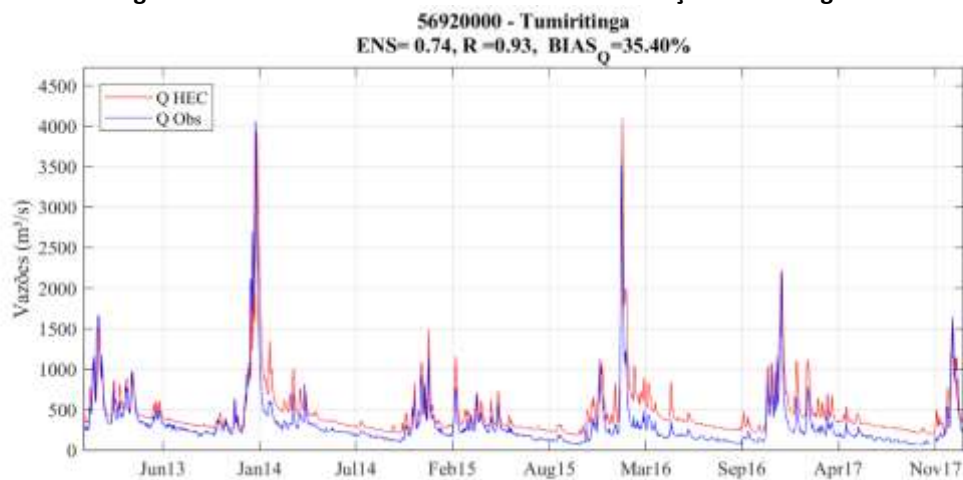
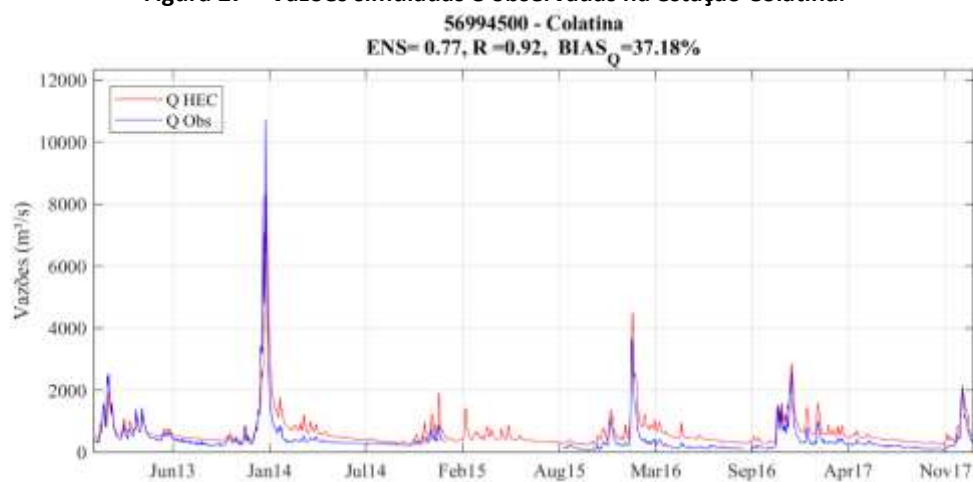


Figura 27 – Vazões simuladas e observadas na estação Colatina.



3.2 Níveis (anomalias)

Da Figura 28 a Figura 38 Figura 27 são apresentados os gráficos dos níveis (anomalias) para as estações abrangidas no estudo.

Figura 28 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação Rio Dantas.

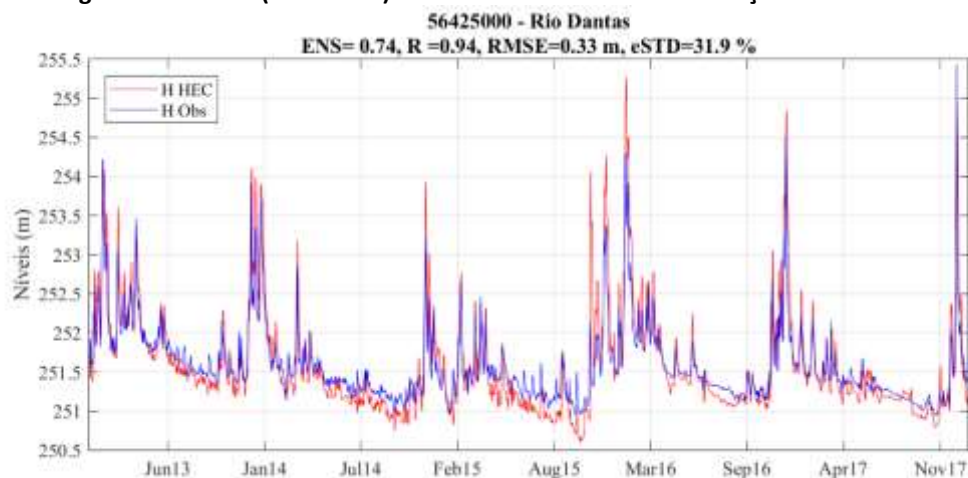


Figura 29 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação Cachoeira dos Óculos.



Figura 30 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação Belo Oriente.



Figura 31 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação RDO 07.



Figura 32 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação Governador Valadares.

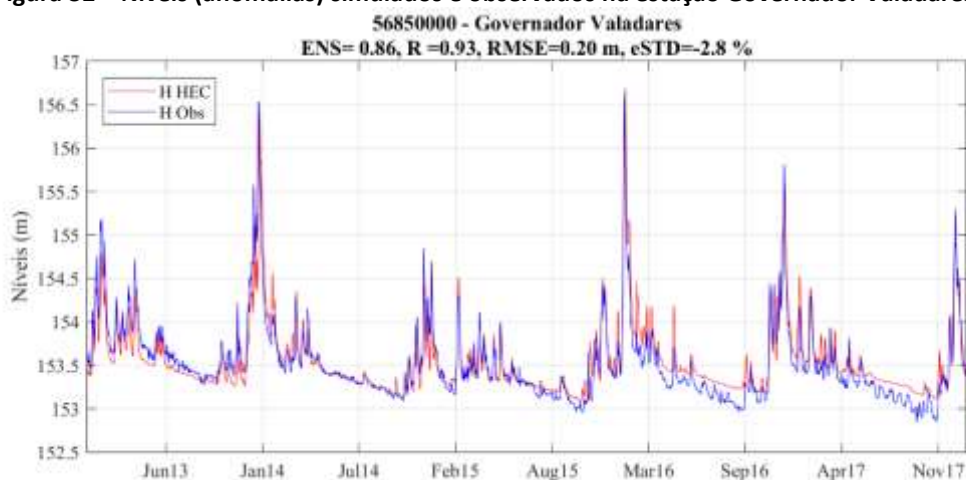


Figura 33 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação Tumiritinga.

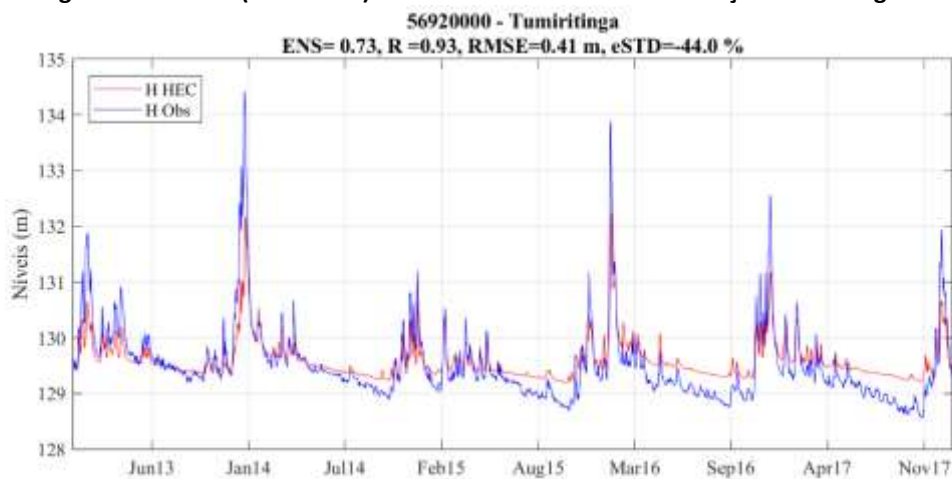


Figura 34 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação Colatina.

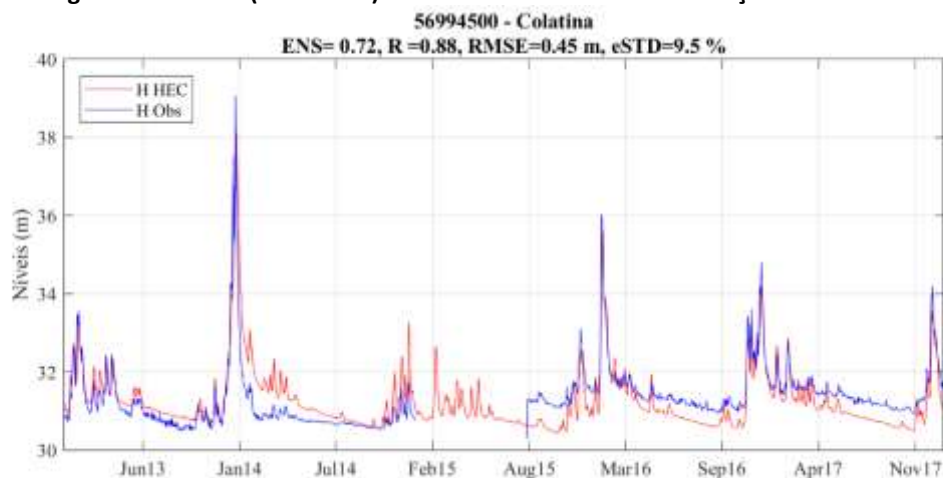


Figura 35 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação Linhares Cais do Porto.



Figura 36 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação RDO 09.

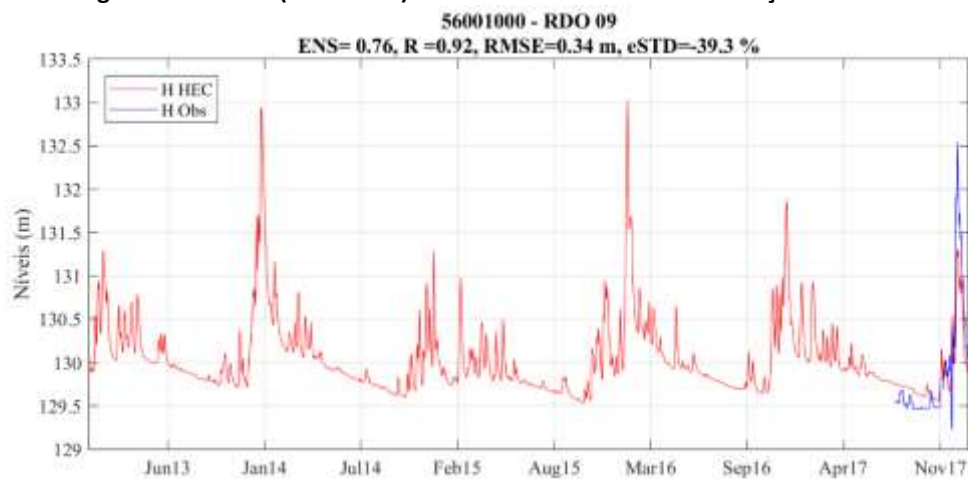
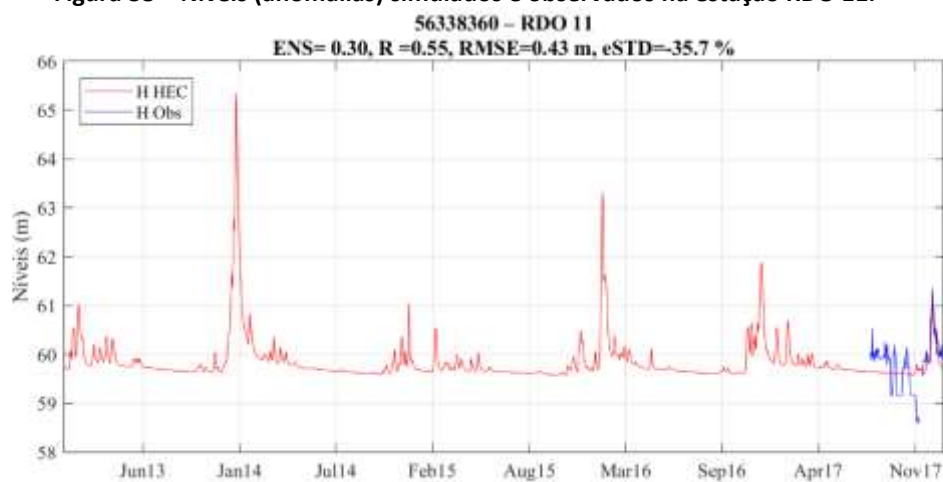


Figura 37 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação RDO 05.



Figura 38 – Níveis (anomalias) simulados e observados na estação RDO 11.



3.3 Níveis Absolutos

Da Figura 39 a Figura 49 Figura 27 são apresentados os gráficos dos níveis absolutos para as estações abrangidas no estudo.

Figura 39 – Níveis absolutos simulados e observados na estação Rio Dantas.

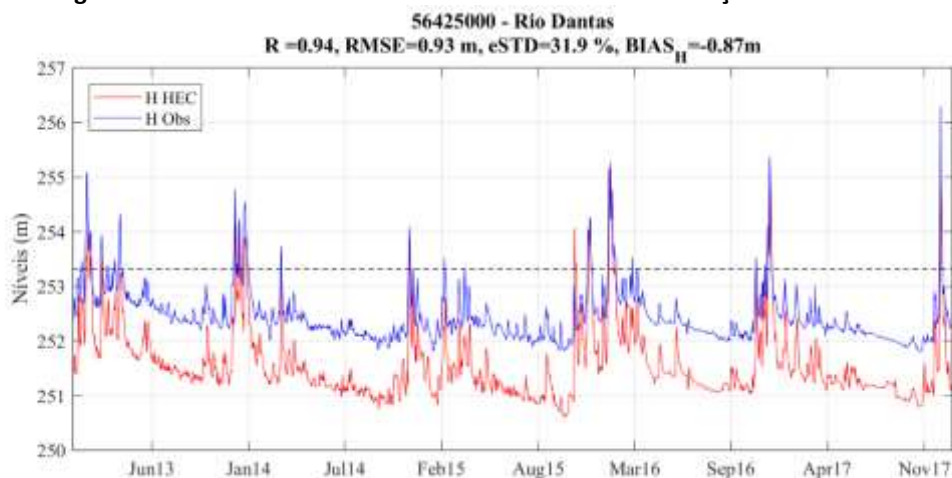


Figura 40 – Níveis absolutos simulados e observados na estação Cachoeira dos Óculos.

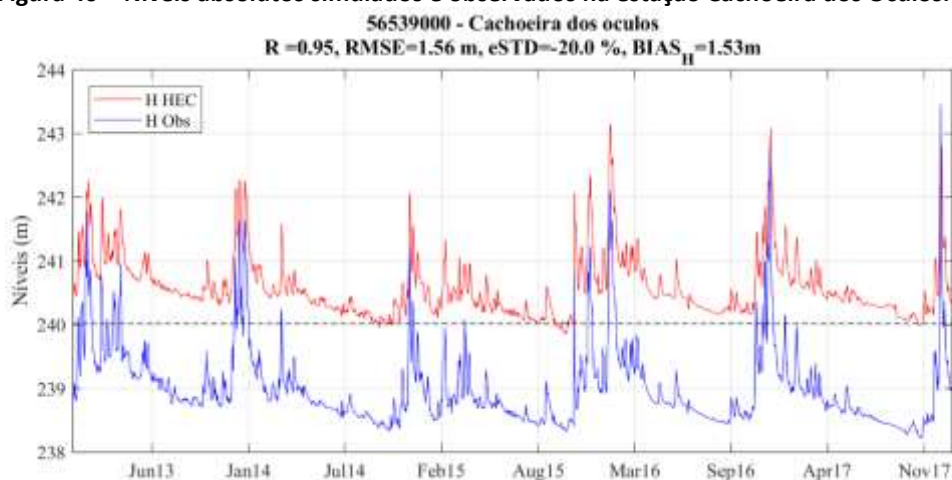


Figura 41 – Níveis absolutos simulados e observados na estação Belo Oriente.

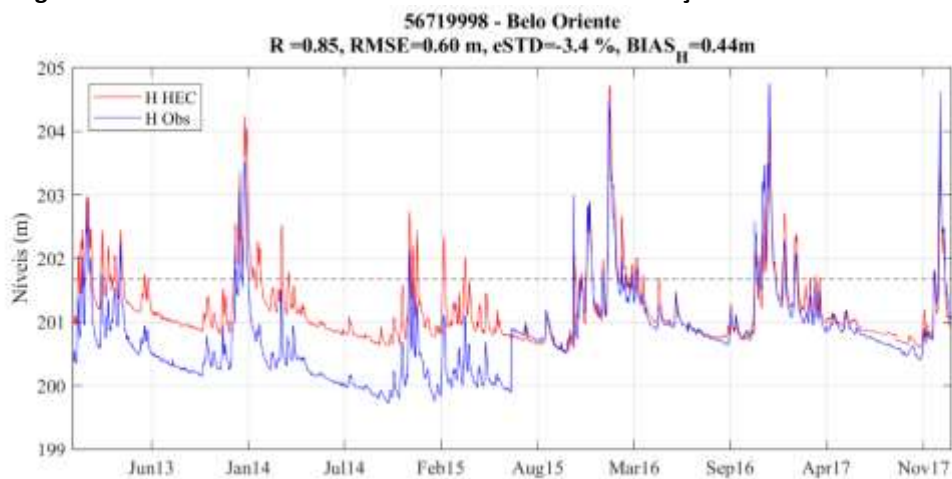


Figura 42 – Níveis absolutos simulados e observados na estação RDO 07.



Figura 43 – Níveis absolutos simulados e observados na estação Governador Valadares.

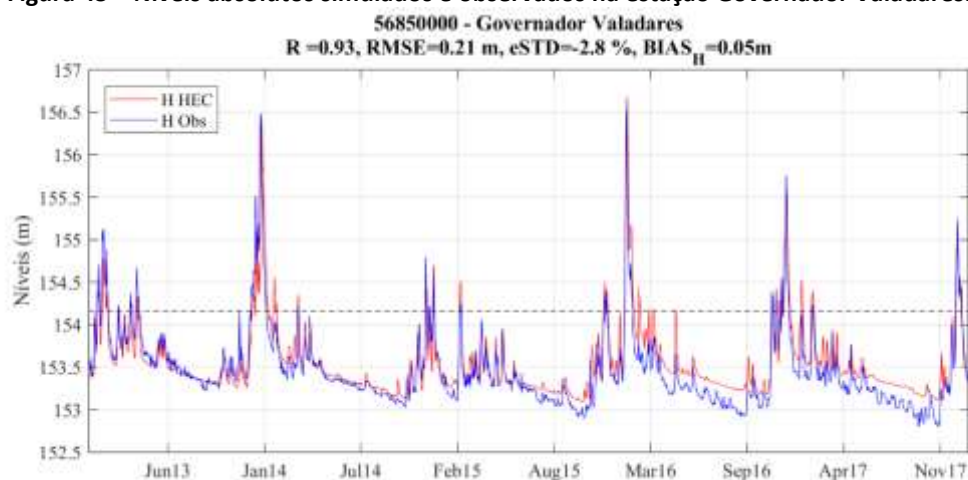


Figura 44 – Níveis absolutos simulados e observados na estação Tumiritinga.

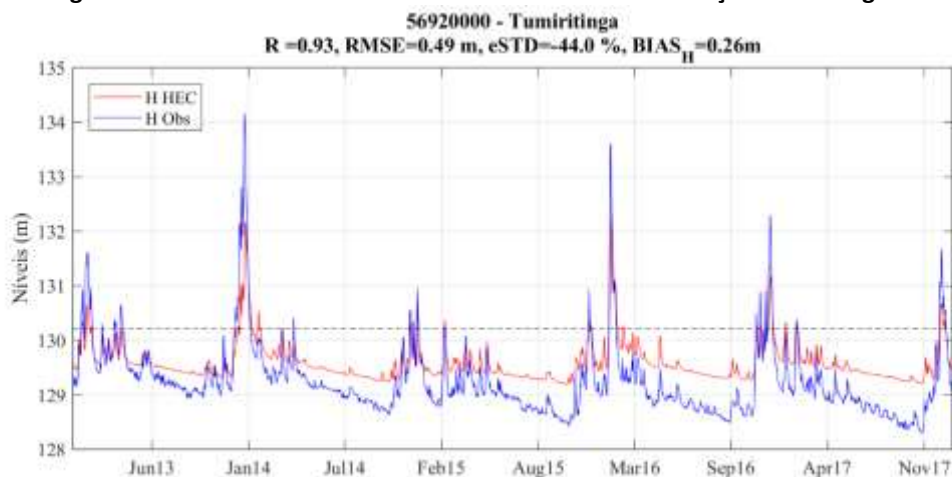


Figura 45 – Níveis absolutos simulados e observados na estação Colatina.

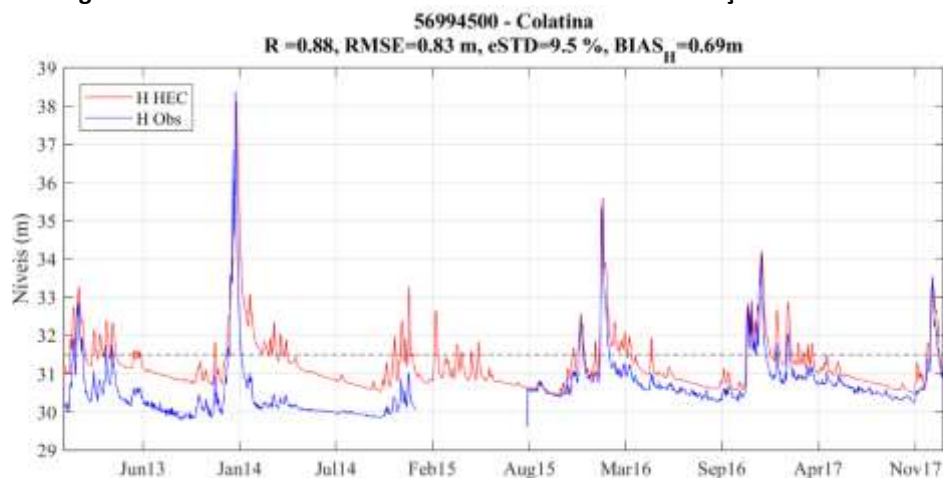


Figura 46 – Níveis absolutos simulados e observados na estação RDO 09.



Figura 47 – Níveis absolutos simulados e observados na estação RDO 05.

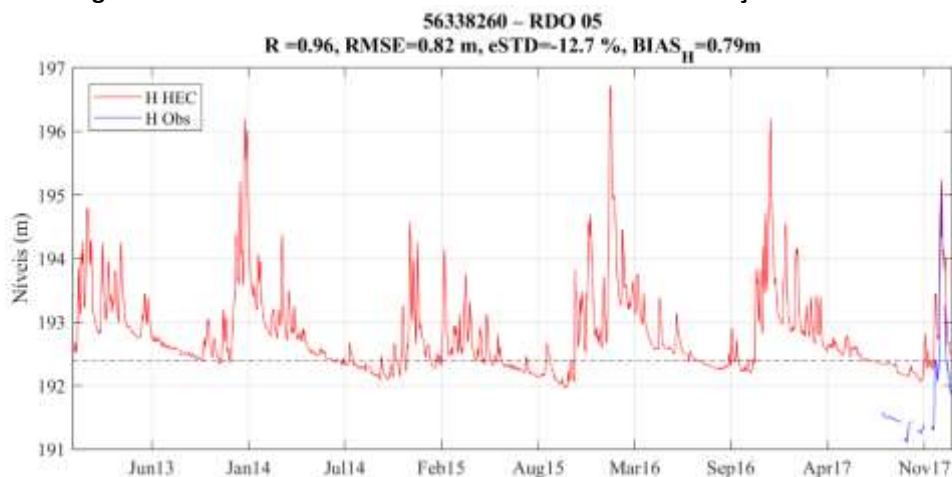


Figura 48 – Níveis absolutos simulados e observados na estação RDO 11.

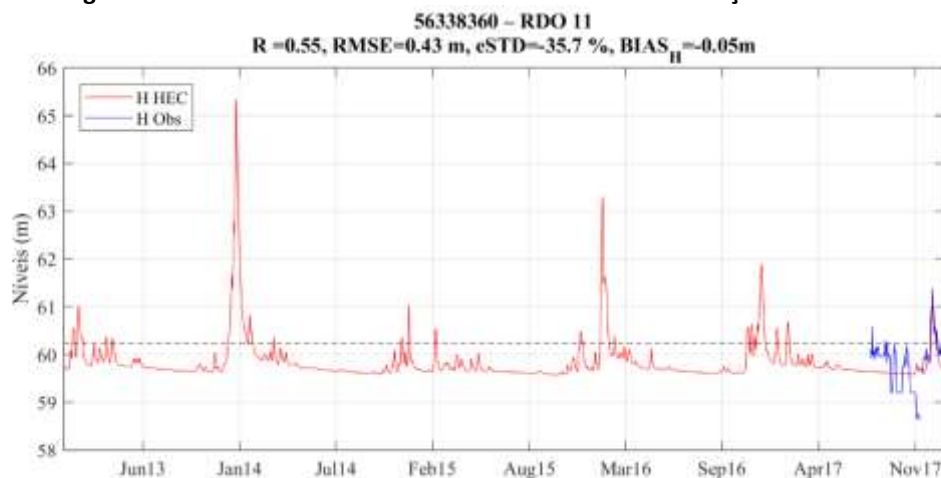
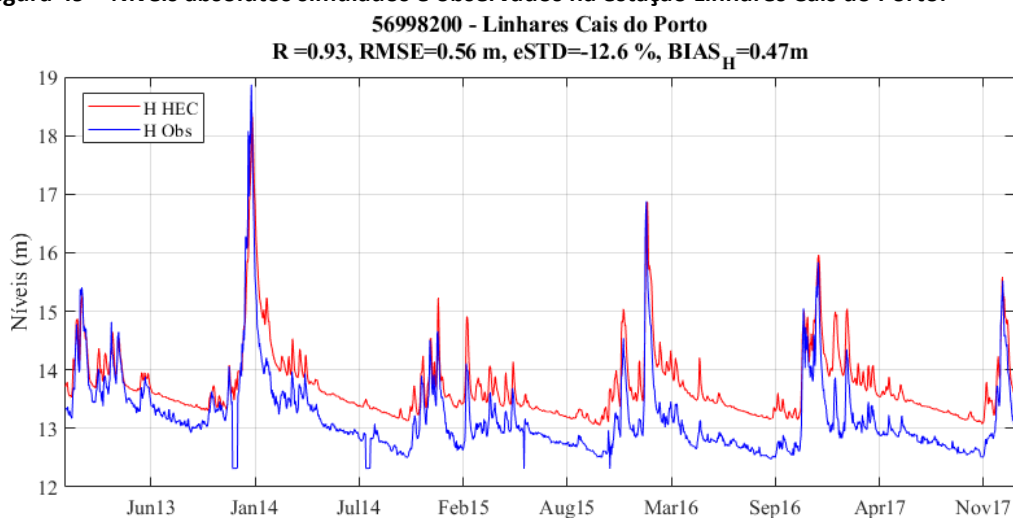


Figura 49 – Níveis absolutos simulados e observados na estação Linhares Cais do Porto.



3.4 Curvas-Chave

Da Figura 50 a Figura 55 Figura 27 são apresentados os gráficos das curvas-chave para as estações abrangidas no estudo.

Figura 50 – Curvas-chave simuladas e observadas na estação Rio Dantas.

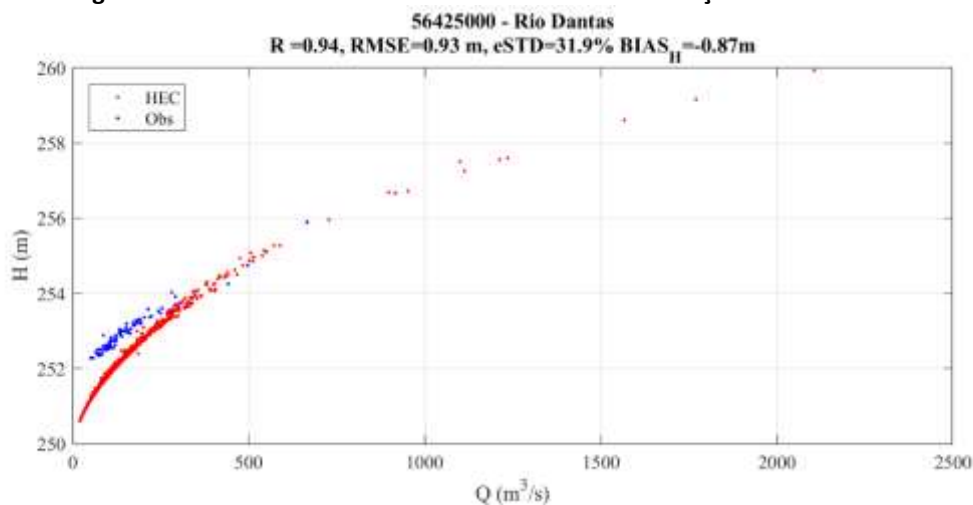


Figura 51 – Curvas-chave simuladas e observadas na estação Cachoeira dos Óculos.

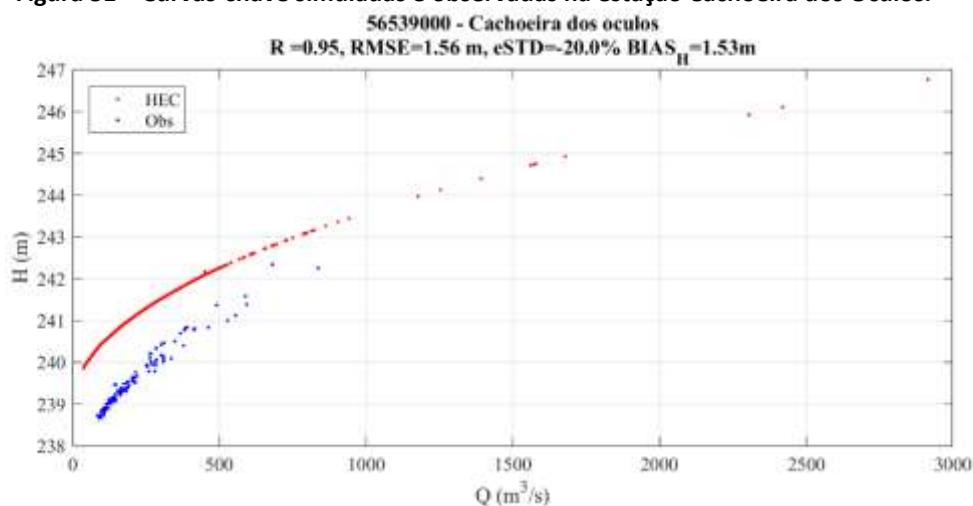


Figura 52 – Curvas-chave simuladas e observadas na estação Belo Oriente.

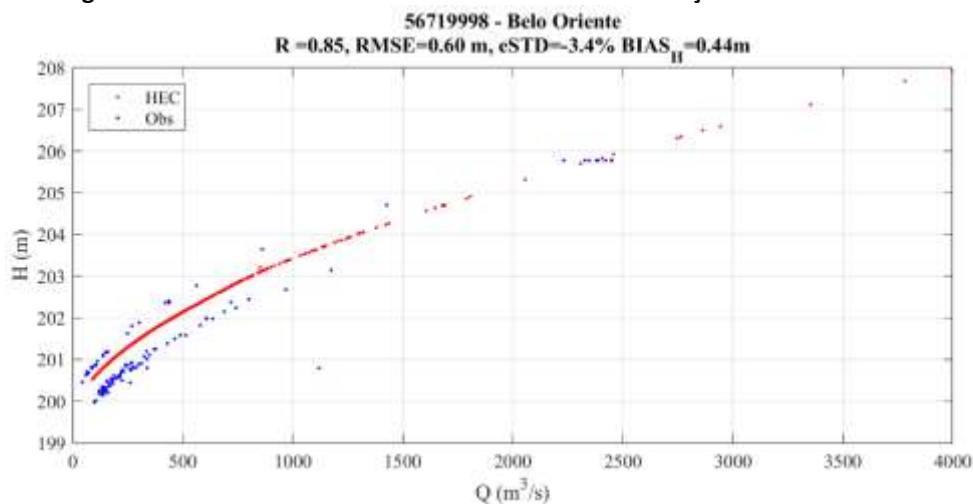


Figura 53 – Curvas-chave simuladas e observadas na estação Governador Valadares.

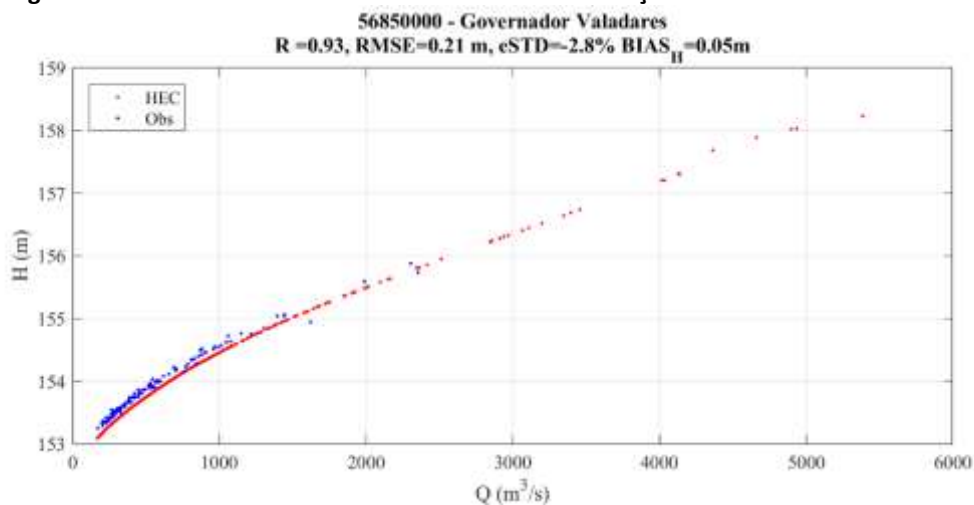


Figura 54 – Curvas-chave simuladas e observadas na estação Tumiritinga.

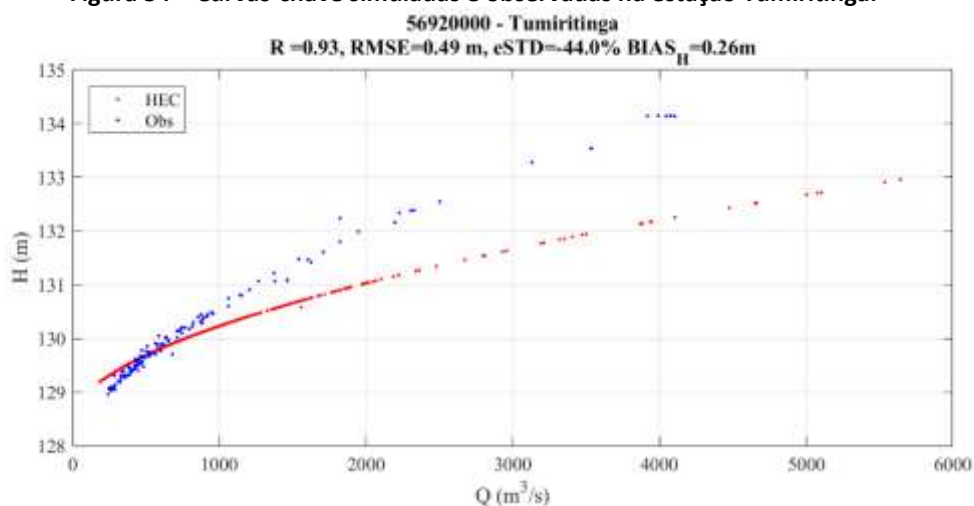
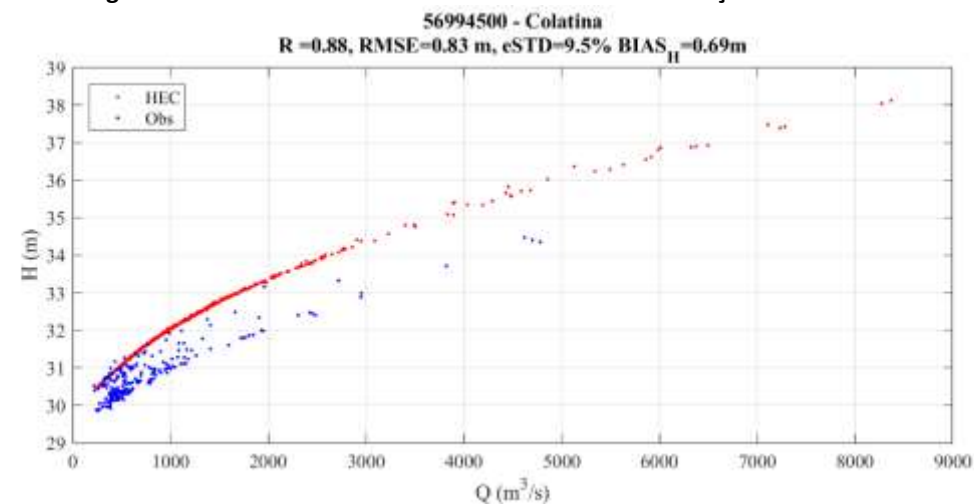


Figura 55 – Curvas-chave simuladas e observadas na estação Colatina.



3.5 Discussão dos resultados

Os resultados apresentados no item 3.2 mostram que existe concordância entre os dados observados e simulados no que se refere as anomalias de níveis, com valores de ENS entre 0,74 e 0,88. O RMSE para anomalias de níveis d'água nestas estações variou de 0,20m a 0,33m. Avaliando todas as estações, os valores de ENS variaram entre 0,30 e 0,91 e os de RMSE entre 0,19 e 0,69. Estes resultados demonstram a capacidade do modelo hidrodinâmico com MDT de alta resolução na representação hidrodinâmica da região. Os valores das estatísticas para todas as estações utilizadas no estudo são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores das métricas calculadas entre as anomalias de níveis observados e simulados.

Estação	ENS	R	RMSE (m)	eSTD (%)
56425000 - Rio Dantas	0.74	0.94	0.33	31.11
56539000 - Cachoeira dos olhos	0.88	0.95	0.26	-20.21
56850000 - Governador Valadares	0.87	0.93	0.20	-3.87
56920000 - Tumiritinga	0.73	0.93	0.40	-43.77
56948005 - Resplendor_Jusante *	-	-	-	-
56994500 - Colatina	0.70	0.87	0.47	9.70
56719998 - Belo Oriente	0.72	0.85	0.40	-8.23
56846080 - UHE Baguari Barramento*	-	-	-	-
56992400 - UHE Mascarenhas Barramento*	-	-	-	-
56992480 - UHE Mascarenhas Jusante	0.81	0.90	0.69	-8.52
56998200 - Linhares Cais do Porto	0.86	0.93	0.29	-12.62
56338260 – RDO 05	0.91	0.96	0.21	-15.13
56846200 - RDO 07	0.91	0.96	0.19	-13.29
56001000 - RDO 09	0.76	0.93	0.33	-38.77
56338360 – RDO 11	0.30	0.55	0.43	-35.83
Mediana	0.79	0.93	0.33	-12.96

* Essas estações não possuíam dados de nível no período avaliado.

Os piores desempenhos encontrados foram para a estação RDO 11 e isto deve-se ao fato desta estação possuir um curto período de dados e uma provável inconsistência de dados em mais da metade do período disponível. Contudo, apesar da pequena extensão da série observada, com uma aparente descontinuidade em novembro de 2017, o evento de pico ocorrido em dezembro de 2017 foi bem representado na simulação de níveis, como pode ser observado na Figura 38.

Ao avaliar as séries de níveis absolutos observados e simulados (Figura 39 a Figura 49), observa-se que apesar de apresentar um viés nas vazões de base do hidrograma, as maiores vazões (foco deste trabalho e, portanto, de todo o processo de calibração) encontram-se melhor representadas. Os coeficientes de correlação (R) variaram de 0,93 a 0,95 e o $RMSE$ variou de 0,21m a 1,58m. Para todas as estações do estudo, os valores de R variaram entre 0,55 e 0,96 e os valores de $RMSE$ entre 0,21 e 2,44. Os valores das estatísticas para todas as estações utilizadas no estudo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores das métricas calculadas entre os níveis absolutos observados e simulados.

Estação	R	RMSE (m)	eSTD (%)	BIAS (m)
56425000 - Rio Dantas	0.94	0.96	31.11	-0.90
56539000 - Cachoeira dos olhos	0.95	1.58	-20.21	1.56
56850000 - Governador Valadares	0.93	0.21	-3.87	0.06
56920000 - Tumiritinga	0.93	0.49	-43.77	0.28
56948005 - Resplendor_Jusante *				
56994500 - Colatina	0.87	0.87	9.70	0.73
56719998 - Belo Oriente	0.85	0.54	-8.23	0.37
56846080 - UHE Baguari Barramento*				
56992400 - UHE Mascarenhas Barramento*				
56992480 - UHE Mascarenhas Jusante	0.90	2.44	-8.52	2.35
56998200 - Linhares Cais do Porto	0.93	0.56	-12.62	0.47
56338260 – RDO 05	0.96	0.75	-15.13	0.72
56846200 - RDO 07	0.96	0.74	-13.29	0.72
56001000 - RDO 09	0.93	1.02	-38.77	0.96
56338360 – RDO 11	0.55	0.43	-35.83	-0.04
Mediana	0.93	0.75	-12.96	0.60

* Essas estações não possuíam dados de nível no período avaliado.

A análise das curvas-chave observadas e simuladas para as estações Rio Dantas e Governador Valadares demonstram alta correlação ($R = 0,93$ e $R = 0,94$, respectivamente) e confirmam a subestimativa nas vazões de base, observadas nos hidrogramas já apresentados. Essas subestimativas podem estar associadas às vazões provenientes do modelo MGB, o qual também foi calibrado visando uma melhor representação das vazões máximas.

Percebe-se com os resultados apresentados que as estatísticas para as anomalias indicam melhor desempenho do modelo quando comparadas as estatísticas para níveis absolutos. Além disso, observou-se

um viés considerável nas estações Rio Dantas (a mais próxima da UHE Candonga, que teve suas vazões usadas como CC de montante), Cachoeira dos Óculos e Linhares Cais do Porto. Esses resultados podem estar associados tanto ao baixo detalhamento das cotas de fundo do rio quanto às incertezas sobre os zeros da régua. Destaca-se que no rio Doce muitas estações também se encontram a montante de controles hidráulicos, que são regiões difíceis de serem representadas com precisão no modelo. Esse é o caso das estações Cachoeira dos Óculos, Belo Oriente e Tumiritinga. Seriam necessárias mais seções transversais batimétricas nas regiões próximas a estes pontos para melhor representar estas três regiões específicas. De qualquer maneira o viés nas estações de Cachoeira dos óculos, Dantas e Tumiritinga ainda não é suficiente para alterar significativamente a área alagada pois nas cheias deste período o rio ainda se encontra dentro de sua calha e o vale é encaixado. O viés encontrado em Linhares também não afeta a APDL pois o modelo 1D foi utilizada a montante de Colatina. Na região de Linhares a APDL utiliza o modelo 2D.

Como o foco deste trabalho foi representar melhor os picos dos cotogramas, principalmente aqueles que aconteceram entre novembro de 2015 e janeiro de 2016, avaliou-se os erros médios encontrados nos maiores picos de cada um dos meses desse período. Assim, considerando os níveis absolutos, estimou-se que o erro médio absoluto dos níveis máximos da cheia originada pelo rompimento da barragem de Fundão foi de 72cm, já para a maior cheia de dezembro/15 esse valor foi de 38cm e para a maior cheia do período, em janeiro/16 foi de 44cm. Essa avaliação foi realizada considerando somente as estações da ANA. Se desconsiderarmos as estações que estão em regiões de controle hidráulico, esses erros para o mês de novembro/15, dezembro/15 e janeiro/16 foram, respectivamente, de 70cm, 19cm e 13cm. Esses resultados demonstram que o modelo apresentou boa performance para representar a grande cheia de janeiro de 2016, um evento importante, uma vez que inundou as planícies do rio Doce e será considerada a APDL (Área da passagem e deposição da Lama) que teve, portanto, um erro médio de 13 cm. Na Tabela 6 são apresentados os valores encontrados de forma detalhada para cada uma das estações avaliadas.

Tabela 6 – Valores observados e simulados e erros encontrados nos valores máximos dos níveis nos meses de nov/15, dez/15 e jan/16. A análise foi realizada apenas para as estações que tinham dados no período.

Rio Dantas					Cachoeira dos Óculos			
	Obs	Calculado	Erro (%)	Erro (cm)	Obs	Calculado	Erro (%)	Erro (cm)
Nov/15	253.01	254.07	0.42	106	240.83	242.08	0.52	125
Dec/15	254.25	254.22	-0.01	-3	241.23	242.37	0.47	114
Jan/16	255.17	255.21	0.02	4	242.10	243.17	0.44	107
Belo Oriente					Governador Valadares			
	Obs	Calculado	Erro (%)	Erro (cm)	Obs	Calculado	Erro (%)	Erro (cm)
Nov/15	203.00	202.05	-0.47	-95	153.76	153.92	0.10	16
Dec/15	202.90	202.73	-0.08	-17	154.39	154.47	0.05	8
Jan/16	204.48	204.35	-0.06	-13	156.57	156.69	0.08	12
Tumiritinga					Colatina			
	Obs	Calculado	Erro (%)	Erro (cm)	Obs	Calculado	Erro (%)	Erro (cm)
Nov/15	129.59	129.90	0.24	31	31.07	31.69	2.00	62
Dec/15	130.94	130.34	-0.46	-60	32.42	32.57	0.46	15
Jan/16	133.62	132.31	-0.98	-131	35.33	35.71	1.08	38
Linhares								
	Obs	Calculado	Erro (%)	Erro (cm)				
Nov/15	13.27	14.00	5.50	73				
Dec/15	14.54	15.05	3.51	51				
Jan/16	16.88	16.88	0.00	0				

Quanto a magnitude dos níveis alcançados decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, observa-se nas Figura 56, Figura 57 e Figura 58 que os níveis máximos alcançados em novembro de 2015 não extravasam a calha principal das respectivas seções. Isso indica que a cheia provocada pela barragem foi de baixa magnitude se comparada com outras cheias naturais, como a de janeiro de 2016.

Figura 56 - Seção transversal extraída do modelo HEC-RAS no mesmo local da estação Rio Dantas 56425000 e nível máximo no período de novembro de 2015. Os pontos vermelhos indicam as margens representadas no modelo.

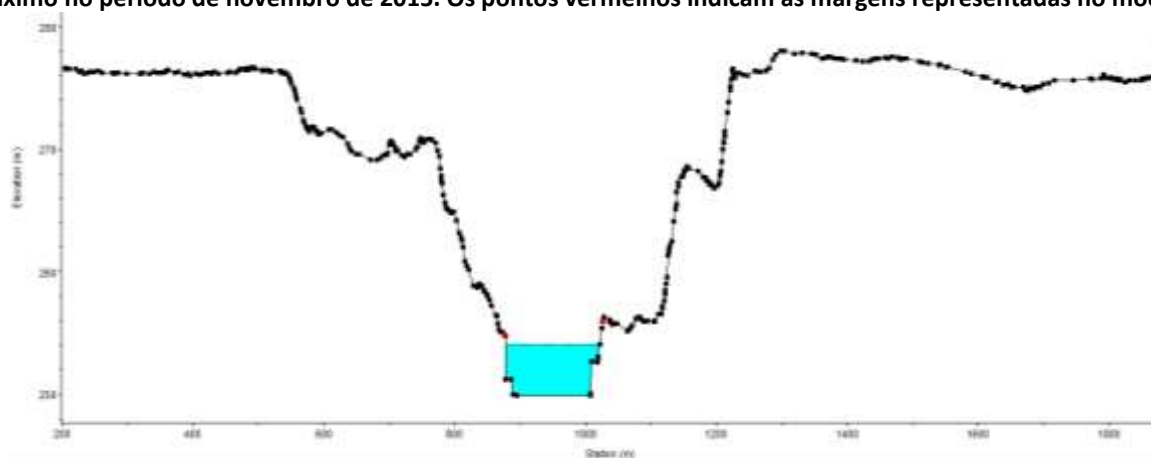


Figura 57 - Seção transversal extraída do modelo HEC-RAS no mesmo local da estação Cachoeira dos Óculos 56539000 e nível máximo no período de novembro de 2015. Os pontos vermelhos indicam as margens representadas no modelo.

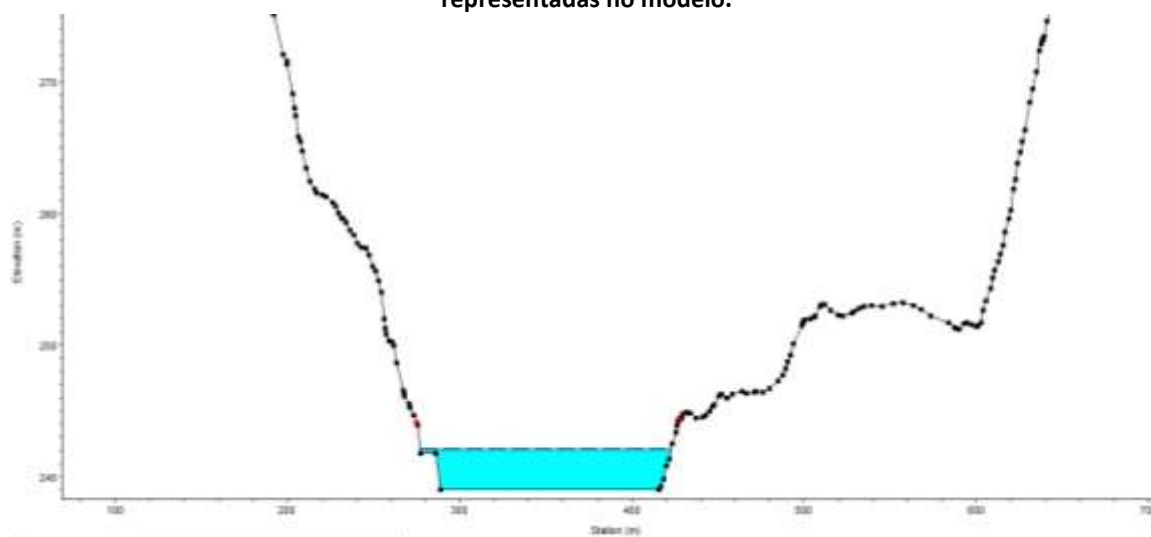
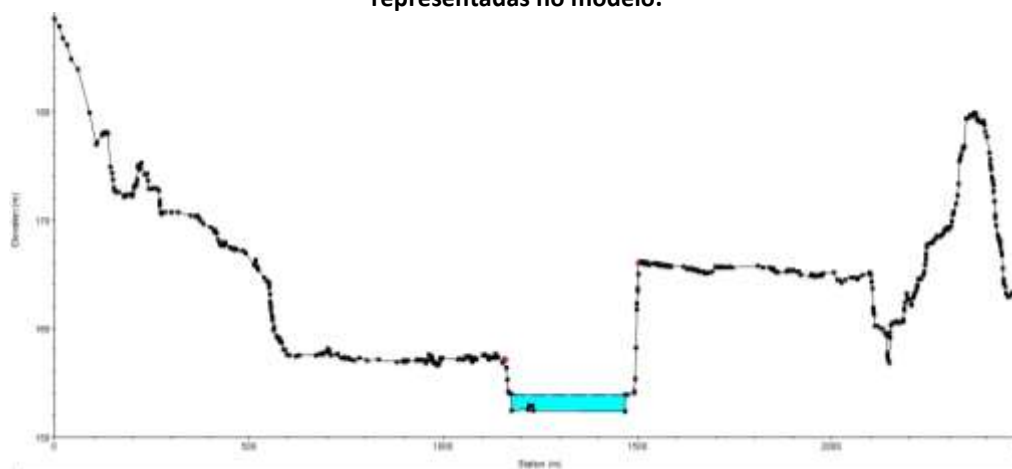


Figura 58 - Seção transversal extraída do modelo HEC-RAS no mesmo local da estação Governador Valadares 56850000 e nível máximo no período de novembro de 2015. Os pontos vermelhos indicam as margens representadas no modelo.



Os resultados mostram que houve concordância entre os dados observados e simulados de níveis e vazão, com o modelo apresentando boa performance estatística. Destaca-se que o RMSE médio para as anomalias de níveis foi da ordem 0,35m, com desconsideração das estações que estão em regiões de controle hidráulico – com erros para os meses de novembro/15, dezembro/15 e janeiro/16, respectivamente, de 56cm, 46cm e 12cm – condizente em sua média com a faixa encontrada em modelos hidrodinâmicos de trechos de rio (FLEISCHMANN et al., 2019).

4 CONCLUSÕES

Para o período compreendido entre novembro de 2015 e março de 2016 não houve turbinagem de água nas UHEs, o que significa que toda a vazão afluente aos reservatórios foi igual a vazão defluente. A nova simulação com o modelo na versão 1D com a inclusão de uma estrutura *inline* permitiu representar de forma mais adequada o espelho d'água do reservatório.

APÊNDICE C

REFINAMENTO DA ÁREA DE PASSAGEM DA LAMA (APDL) UTILIZANDO SIMULAÇÃO

HIDRODINÂMICA 2D

1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados finais da atualização da Área de Passagem da Lama (APDL) no rio Doce, utilizando simulação hidrodinâmica 2D com o modelo HEC-RAS.

São apresentados nesse relatório resultados da simulação hidrodinâmica bidimensional para a cheia de 2016 ocorrida no Rio Doce, utilizando o modelo HEC-RAS 2D. O modelo HEC-RAS utiliza equações que permitem descrever o transporte de água em terrenos considerando processos físicos como efeitos de remanso e interação com planícies de inundação, representando os fluxos longitudinais e laterais, tendo como base um Modelo Digital de Elevação (MDT).

Para esse estudo, também foi considerado a utilização de um MDT para a região de Linhares/ ES, que se baseia em curvas de nível de 5 em 5m. O trecho simulado com o novo MDT e utilizando a abordagem 2D se inicia em Colatina/ ES e vai até a foz do rio Doce, compreendendo cerca de 70 km ao longo do rio Doce e uma área de planície de inundação da ordem de 2000-3000 km² ao longo de cerca de 100 km de costa. Foram realizadas duas simulações para as cheias de 2013-2014 e 2015-2016, que têm relevâncias devido as suas magnitudes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Pré-processamento de MDTs – representação das lagoas

Para uma representação mais adequada do terreno, o MDT de alta resolução e o novo MDT baseado em curvas de níveis, foram escavados nas localidades das diversas lagoas da área de estudo com objetivo de representar as profundidades destas.

Foram utilizadas as informações de profundidades de seis lagoas (Juparanã, Nova, Lagoa do Limão, Areal, Areão e Monsarás). Nestas lagoas foram utilizadas as medições com data mais próxima do levantamento do MDT de alta resolução.

As demais lagoas foram identificadas pelo shape de máscaras d'água da ANA e a profundidade a ser rebaixada foi estimada interpretando o MDT e comparando com o perfil de elevação do Google Earth, conforme exemplo da Figura 59. Para isso, realizou-se uma verificação do desnível entre o nível na lagoa e nas margens. Com esta abordagem ainda há a possibilidade de subestimar as profundidades das lagoas, mas diante da falta de informações esta foi a única estimativa possível de ser utilizada.

A Tabela 7 contém um resumo das lagoas onde o terreno foi rebaixado e a profundidade adotada para cada uma delas.

Figura 59 – Exemplo de perfil de elevação extraído do Google Earth para auxílio na estimativa das profundidades das lagoas.



Tabela 7 – Resumo das profundidades escavadas em cada lagoa

Nome da Lagoa	Profundidade escavada (m)	Método
Lagoa Nova	9.84	Observações in situ pelo LACTEC
Lagoa Juparanã	4.06	Observações in situ pelo LACTEC
Lagoa Areão (Pandolfi)	3.35	Observações in situ pelo LACTEC
Lagoa Areal	3.30	Observações in situ pelo LACTEC

Nome da Lagoa	Profundidade escavada (m)	Método
Lagoa Monsarás	3.47	Observações in situ pelo LACTEC
Lagoa do Limão	7.00	Observações in situ pelo LACTEC
Lagoa das Palminhas	11.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Pau-Grosso	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Martins	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa das Cacimbas	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Nossa Senhora das Graças	4.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Zacarias	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Monte Verde	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Terra Altinha	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa das Palmas	11.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Doutor	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Piaba	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Boa Vista	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa da Piaba	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Salgada	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Pau Gigante	5.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Zacarias	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa da Cobra Verde	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa dos Brás	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Urubu	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Lagoinha	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Aviso	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Delfino	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Boa Vista	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Durão	5.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Santo Antônio	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Terra Alta	4.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Piabanha	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Boa Morte	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Boa Vista	2.00	Interpretação de mapas topográficos

Nome da Lagoa	Profundidade escavada (m)	Método
Lagoa do Sabiá	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Óleo	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa dos Campos	4.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Amarelo	4.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa de Dentro	5.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Meio	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa da Testa	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa das Cacimbas	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Ramos	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Baixa	5.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Parda	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Aguiar	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Nova	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Esgoto do Patrão-Mor	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Camargo	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Nova	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Arural	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Piabanha	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa São João	2.00	Interpretação de mapas topográficos

2.2 Simulação Hidrodinâmica 2DH

O modelo HEC-RAS permite que informações detalhadas a respeito do relevo e da geometria da calha do rio sejam consideradas. Para tanto, na versão 2DH, o modelo utiliza um pré-processamento que extrai as informações detalhadas do modelo digital de terreno utilizado, com um esquema de *subgrid* que permite uma solução robusta no tratamento de processos de secagem e inundação da malha computacional. Nos subitens a seguir são apresentados os detalhes da aplicação do modelo HEC-RAS na porção do rio Doce compreendida entre Colatina e a foz do rio Doce. Para toda as simulações foi utilizado o modelo do tipo difusão que é adequado para simulação de ondas de cheia de rios e planície de inundação, onde forças de gravidade e atrito governam o fenômeno. O intervalo de tempo de simulação foi configurado para realização adaptativa durante a execução no HEC-RAS ($0.45 < \text{Courant} < 3$), resultando em passos de tempo mínimo e

máximo de 5 a 1200 segundos – na prática, as simulações demonstraram trabalhar na faixa entre 28 e 120 segundos –, de forma a atender os critérios de estabilidade.

2.2.1 Definição do domínio computacional

O domínio global para modelagem hidráulica 2DH foi considerado como sendo o trecho no rio Doce, de Colatina até o Oceano Atlântico. Considerou-se os limites dos modelos de terreno disponíveis, a batimetria e o modelo digital de terreno ALOS. Para o contorno de montante, foi considerado trecho adicional entre Baixo Guandu e Colatina, distante em cerca de 20 km de Colatina.

A definição do domínio computacional foi realizada buscando identificar as áreas potencialmente inundáveis, mas também considerando a diferença entre as altitudes da seção transversal nas proximidades de Colatina e o nível do mar, sendo que o trecho simulado passa de um vale encaixado para um terreno de baixo declividade. Por fim, busca-se simular o escoamento de maneira adequada. Foram considerados também aspectos relacionados a capacidade de executar o pré-processamento, execução das simulações e pós-processamento, em tempo hábil. Neste sentido, considera-se a eficiência computacional, bem como a flexibilidade para atualização contínua do modelo. Para execução das atividades, foi utilizado um computador de alto desempenho Intel® Core i7-9750H @2.60Ghz- 4.5Ghz Turbo (6 processadores), SSD e 64GB RAM. A Figura 60 destaca o domínio global para computação (linha preta) e o município de Linhares (linha branca) definido para as simulações.

Figura 60 – Mapa do domínio global selecionado para simulação 2DH (contorno em preto) e altitudes (m). Contorno em branco se refere aos limites geográficos do município de Linhares.



A discretização espacial adotada para o domínio foi de 200 m x 200 m com refinamento da calha principal do rio Doce (100 m x 100 m), lagoa Monsarás (50 m x 50 m) e ao sul próximo a Barra do rio Riacho (50 m x 50 m) resultando em uma malha composta por 141 mil (ordem de grandeza) células computacionais. A Figura 61 ilustra a resolução obtida em trecho próximo à área urbanizada de Linhares, sendo possível observar as seções transversais do rio Doce representadas por um conjunto de células.

Figura 61 – Composição MDT e Google Earth (acima) e malha computacional em 200 x 200m com refinamento na calha principal (abaixo) em trecho próximo ao centro de Linhares.



2.2.2 Condições de contorno e condição inicial

Para as simulações considerou-se que o trecho em análise possui seus fluxos controlados pelas entradas de vazão à montante de Colatina e pelo nível de água do mar em diferentes locais: exutório do rio Doce; rio Barra Seca, rio Ipiranga e rio Barra Nova, que drenam a margem esquerda; rio Riacho, que drena a margem direita, que foram identificados através de interpretação visual de imagens de satélite. De maneira complementar, o modelo permite a drenagem de água no limite norte do MDT, sendo utilizada a condição de contorno de escoamento normal (i.e. normal depth, no HEC-RAS). Para as simulações foram utilizadas séries de vazão médias diárias e estimativas do nível do mar obtidas da análise de dados de tábua de maré, em intervalos de duas horas. No caso, as saídas para o mar foram estendidas 5 km da costa com batimetria estimadas de dados de cartas náuticas da marinha. As simulações foram realizadas utilizando uma condição inicial de terreno seco, considerando um período de aquecimento de pelo menos 5 dias para a análise dos eventos. A Figura 62 apresenta um esquema da abordagem utilizada para condição de contorno do modelo. A Figura 63 exemplifica a representação das linhas de contorno na geometria 2D do modelo HEC-RAS e a Figura 64, a

Figura 65, a Figura 66 e a

Figura 67 apresentam a representação dessas linhas na região costeira. A Figura 68 apresenta detalhe da condição de contorno mais distante, ao norte.

Figura 62 – Representação esquemática do domínio para modelagem 2D



Figura 63 – Localização da condição de contorno de montante.



Figura 64 – Leque na costa onde localiza-se a condição de contorno de jusante no rio Doce e Lagoa Monsarás.



Figura 65 – Leque na costa onde localiza-se a condição de contorno de jusante na barra do rio Riacho (ao sul).

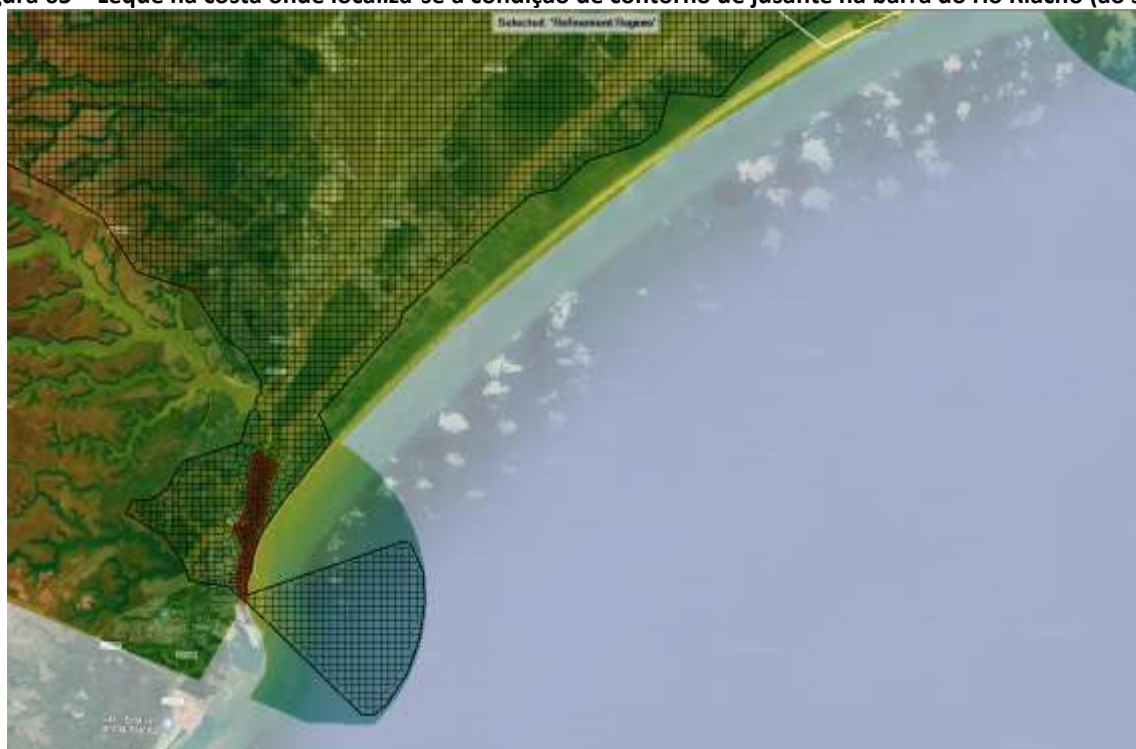


Figura 66 – Leque na costa onde localiza-se a condição de contorno de jusante na Barra Seca e rio Ipiranga.



Figura 67 – Leque na costa onde localiza-se a condição de contorno de jusante em Barra Nova.

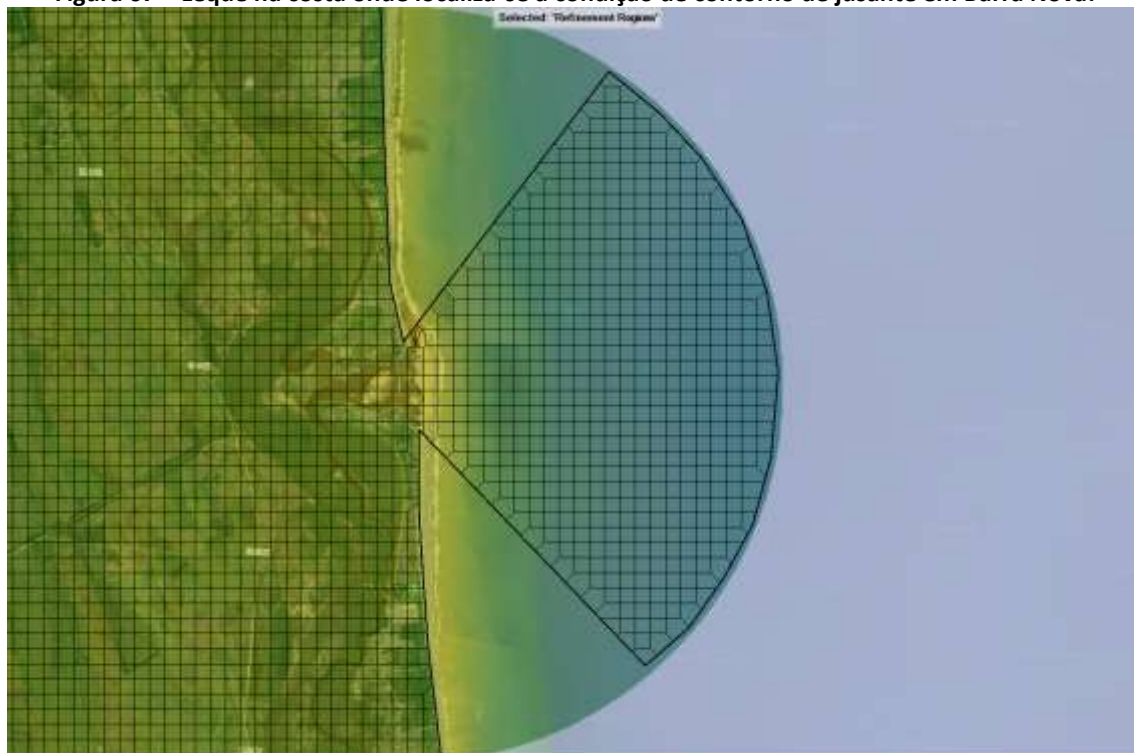


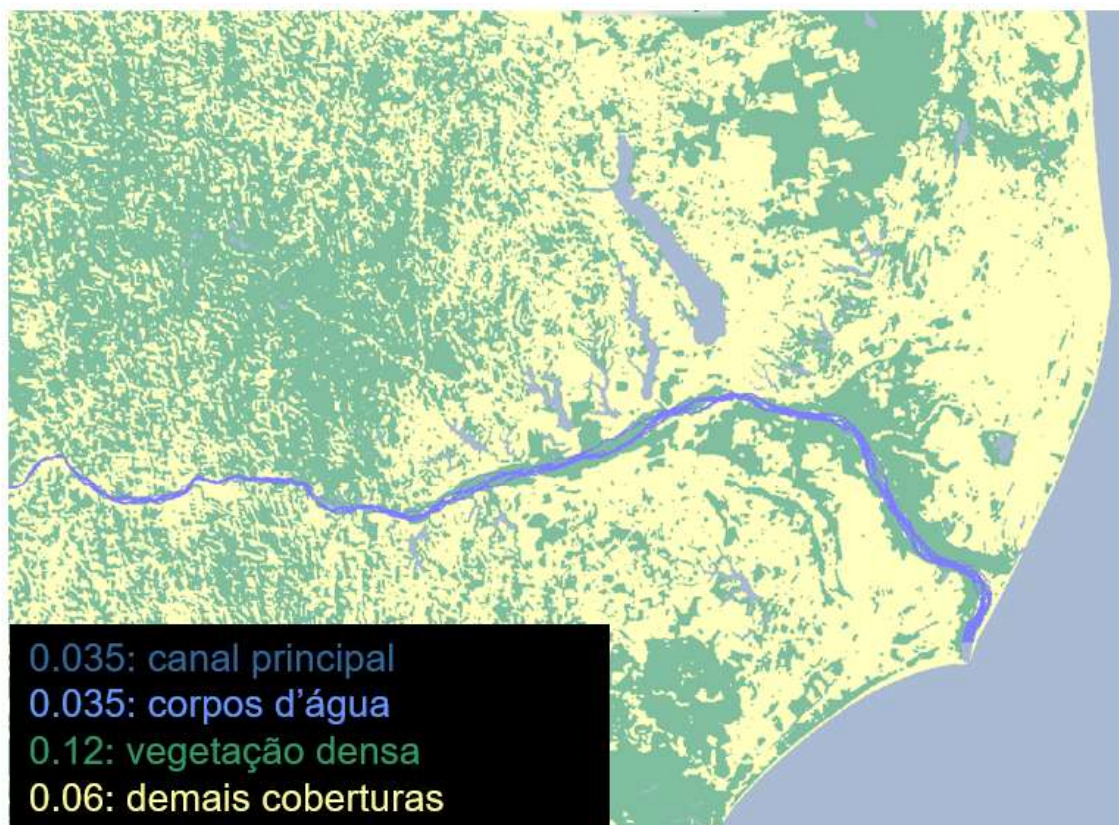
Figura 68 – Localização da condição de contorno ao norte.



2.2.3 Definição do coeficiente de rugosidade de Manning

Para representação da rugosidade do terreno na modelagem 2D, um mapa com categorias de rugosidade foi elaborado com base em classificação de imagens de satélite (Figura 69). Para tanto, foi utilizado o algoritmo de classificação não-supervisionada e a base de dados *Landsat 7 annual composite* da plataforma Google Earth Engine, considerando três classes: corpos d'água ($n=0,035$); vegetação densa ($n=0,12$); e áreas inundáveis ($n = 0,06$). O canal do rio Doce ($n=0,035$) foi definido por meio por uma máscara de água obtida de simulação preliminar.

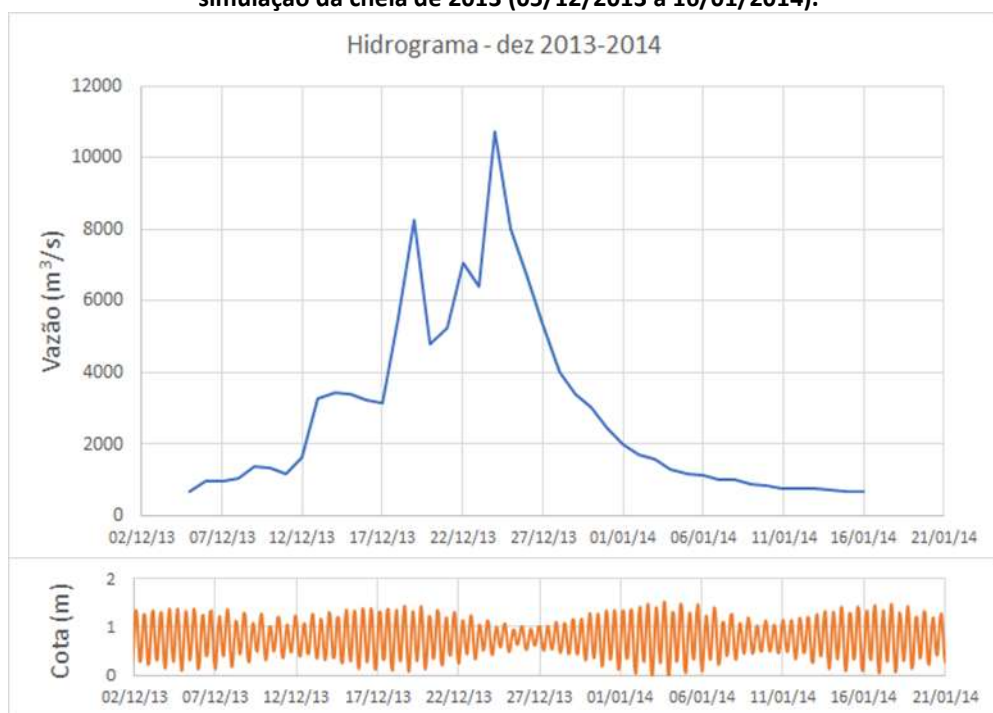
Figura 69 – Representação da rugosidade de Manning para modelagem 2D. Na legenda é mostrado o valor de rugosidade adotado.



2.2.4 Simulação do evento de 2013

Uma simulação para evento da cheia de 2013 foi realizada, no intervalo entre 05/12/2013 a 16/01/2014. A Figura 70 apresenta o hidrograma utilizado no contorno de montante, sendo os dados observados de vazão média diária do posto fluviométrico de Colatina (56994500). Essa figura também apresenta os dados de maré utilizados para condição de contorno nas fronteiras com o oceano. Por se tratar de um evento recente e que apresentou vazões mais elevadas, essa simulação permite uma verificação inicial da modelagem 2D.

Figura 70 – Hidrograma de montante (acima) e cotograma de maré (abaixo) para condição de contorno na simulação da cheia de 2013 (05/12/2013 a 16/01/2014).



2.2.5 Simulações de eventos de 2015-2016

Foram realizadas simulações para eventos de 2015 e 2016, sendo o primeiro compreendido no intervalo entre 14/11/2015 a 31/12/2015, e o segundo de 01/01/2016 a 15/02/2016. A Figura 71 e a Figura 72 apresentam os hidrograma utilizados no contorno de montante, sendo os dados observados de vazão média diária do posto fluviométrico de Colatina (56994500), enquanto a Figura 73 apresenta os dados de maré utilizados para condição de contorno nas fronteiras com o oceano.

Figura 71 – Hidrograma de montante para evento da cheia de 2015 (14/11/2015 a 31/12/2015).

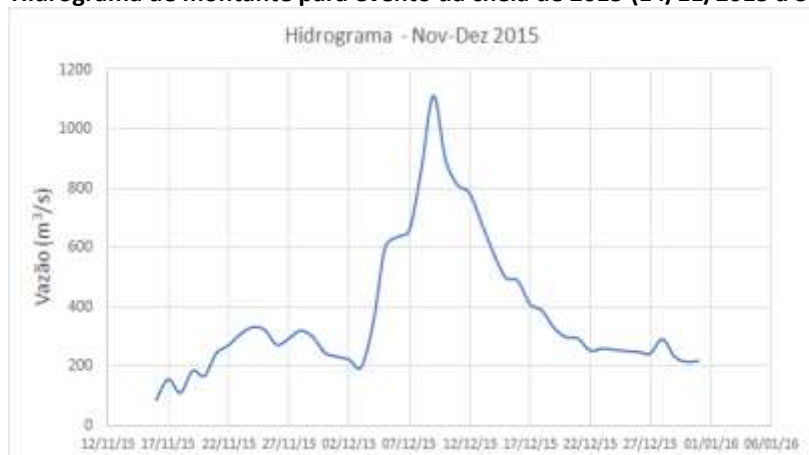


Figura 72 – Hidrograma de montante para evento da cheia de 2016 (01/01/2016 a 15/02/2016).

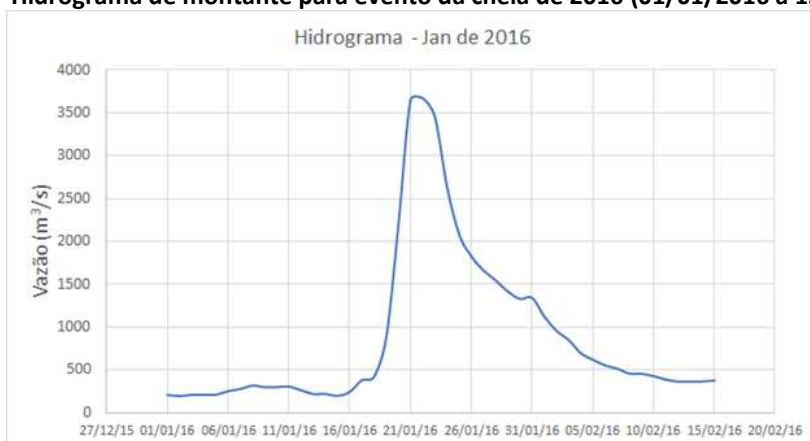


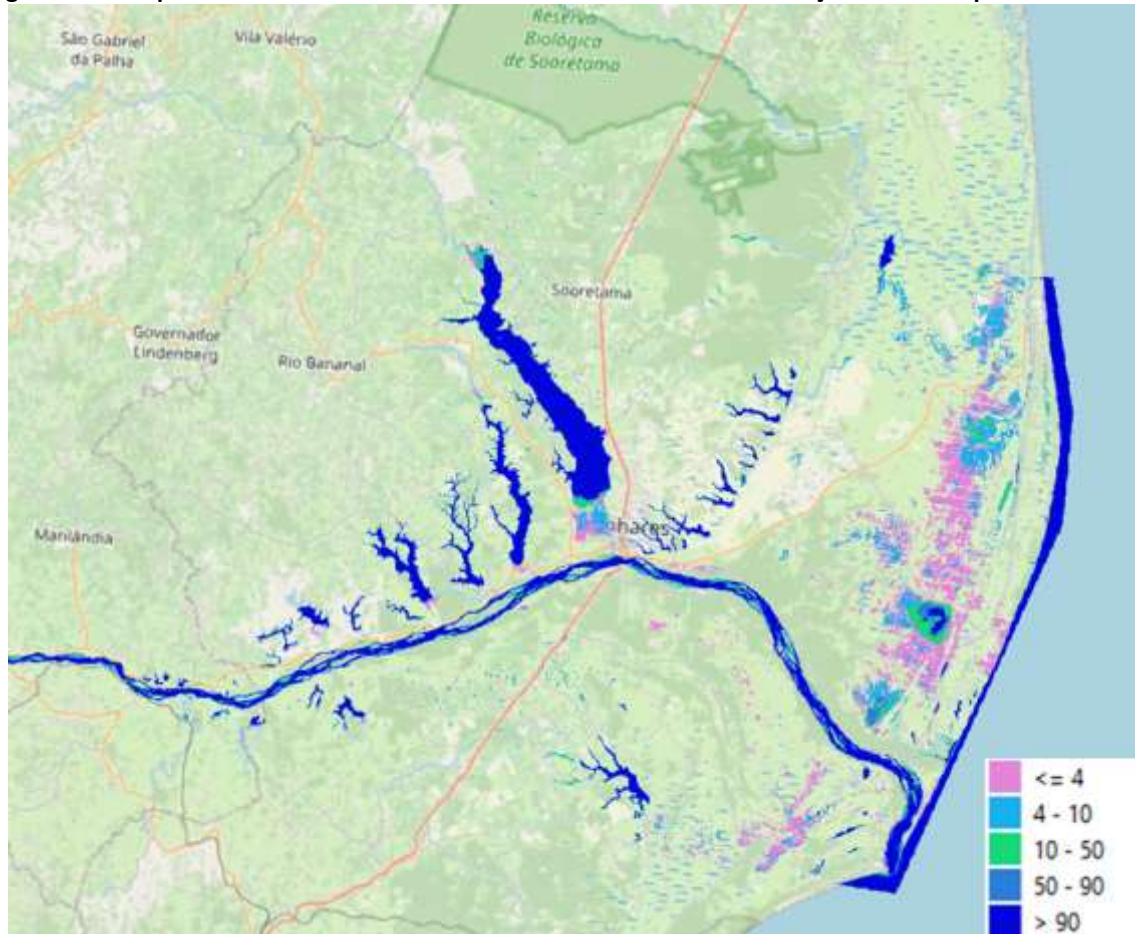
Figura 73 – Cotagrama de maré para eventos de 2015 e 2016 (14/11/2015 a 15/02/2016).



2.2.6 Considerações sobre as áreas úmidas e hidrografia da região

Para aprofundar o conhecimento das áreas úmidas da região em análise, um mapa de frequência foi elaborado utilizando metodologia proposta por Fassoni-Andrade et al. (2020) que processa séries de dados de satélite de 1984 a 2015 do JRC Global Surface Water Dataset, baseado em imagens Landsat (Pekel et al. 2016). Em linhas gerais, utiliza-se a série temporal de máscaras de água disponíveis no período mencionado para contabilizar o percentual de ocorrência de pixels identificados como água. A Figura 74 demonstra que o Rio Doce e as lagoas nos terrenos encaixados entre o município de Colatina e Linhares apresentam uma grande regularidade. Por outro lado, existe uma região próximo à costa do Oceano Atlântico, em área plana, onde a ocorrência de áreas úmidas é menos frequente, ou de banhados que podem decorrer eventos locais de chuva ou canais de irrigação.

Figura 74 – Frequência de ocorrência de áreas úmidas baseado em observações multitemporais de satélite



A Figura 75 destaca a rede de drenagem obtida da BHO-ANA_5K (Base Hidrográfica Ottocodificada 5K – Agência Nacional de Águas) na região, onde também fica evidente a existência de canais de drenagem retificados no domínio de estudo, embora não representados no modelo de terreno. A Figura 76 compara um trecho onde é possível observar as diferenças de representação das barreiras e canais naturais (ou

artificiais) nos modelos de terrenos utilizados para compor o domínio. A rede de canais e valas na área plana foi incluída parcialmente no MDT, removendo os bloqueios de forma somente a permitir a drenagem, embora a largura seja a única característica hidráulica que foi estimada com maior confiança via imagem de satélite. Por fim, foi utilizada uma representação simplificada das lagoas, sendo as mesmas escavadas no MDT, a partir de registros de profundidade, considerando a referência da linha de água no dia da coleta de dados de altimetria (ver seção 2.1). A Figura 77, Figura 78, Figura 79 e Figura 80 exemplificam as regiões escavadas.

Figura 75 – Rede de drenagem (BHO-ANA_5K)

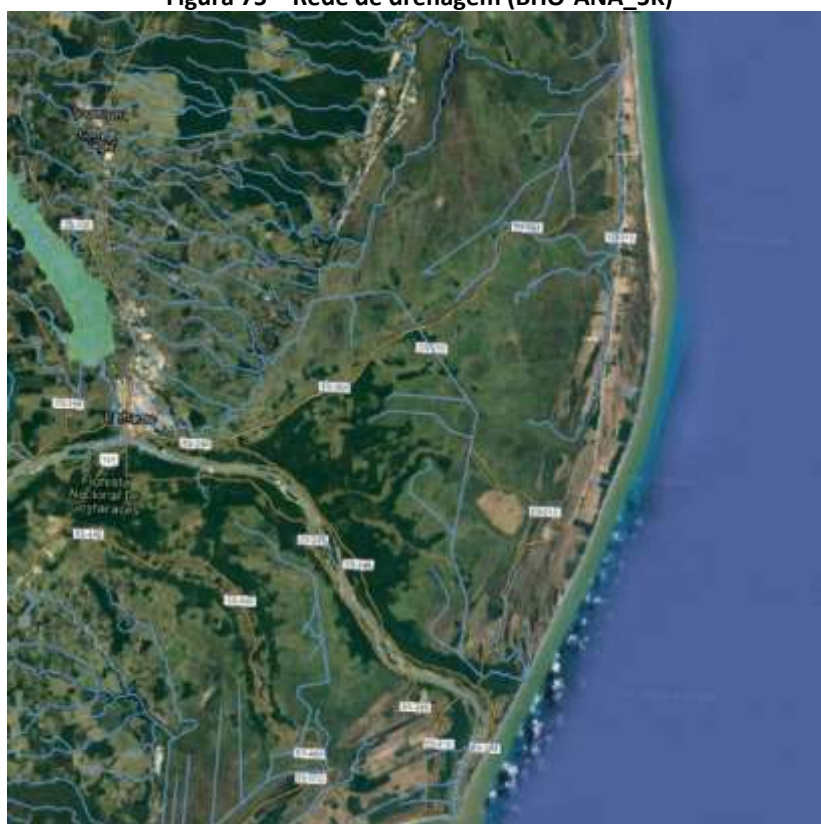


Figura 76 – Canais e barreiras naturais: sobreposição de satélite e MDT (esquerda) e MDT (direita)

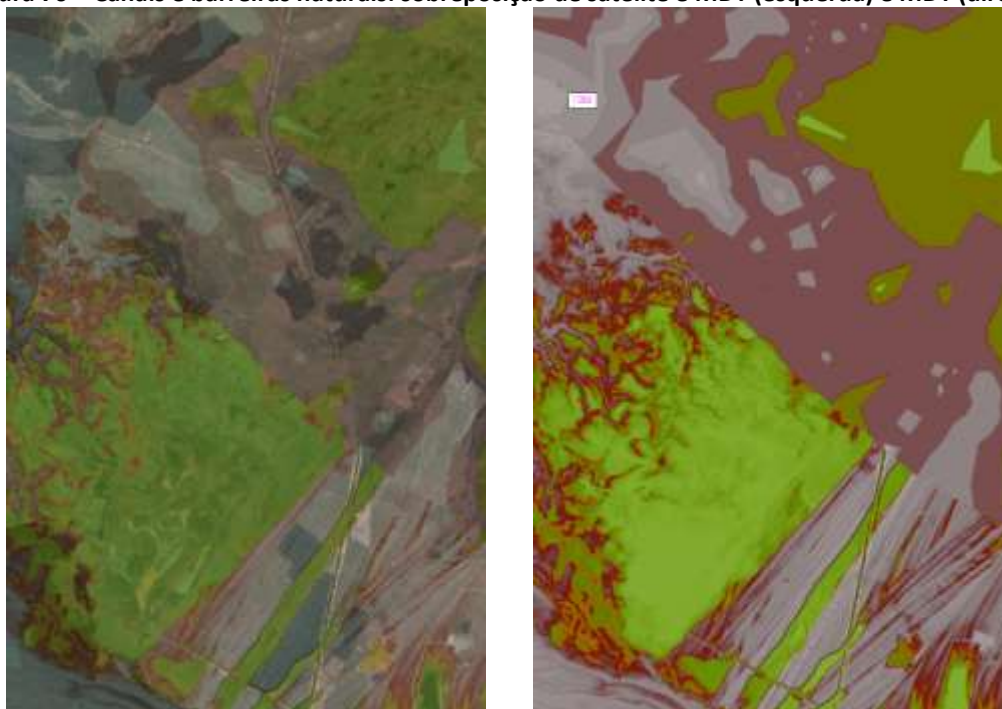


Figura 77 – Exemplo de canais identificados (acima) e escavado (abaixo) na margem esquerda do rio Doce – drenagem para norte



Figura 78 – Exemplo de canais identificados (acima) e escavado (abaixo) na margem direita do rio Doce – drenagem para Barra do Rio Riacho



Figura 79 – Exemplo de canais identificados (acima) e escavado (abaixo) na margem esquerda do rio Doce – drenagem para sul

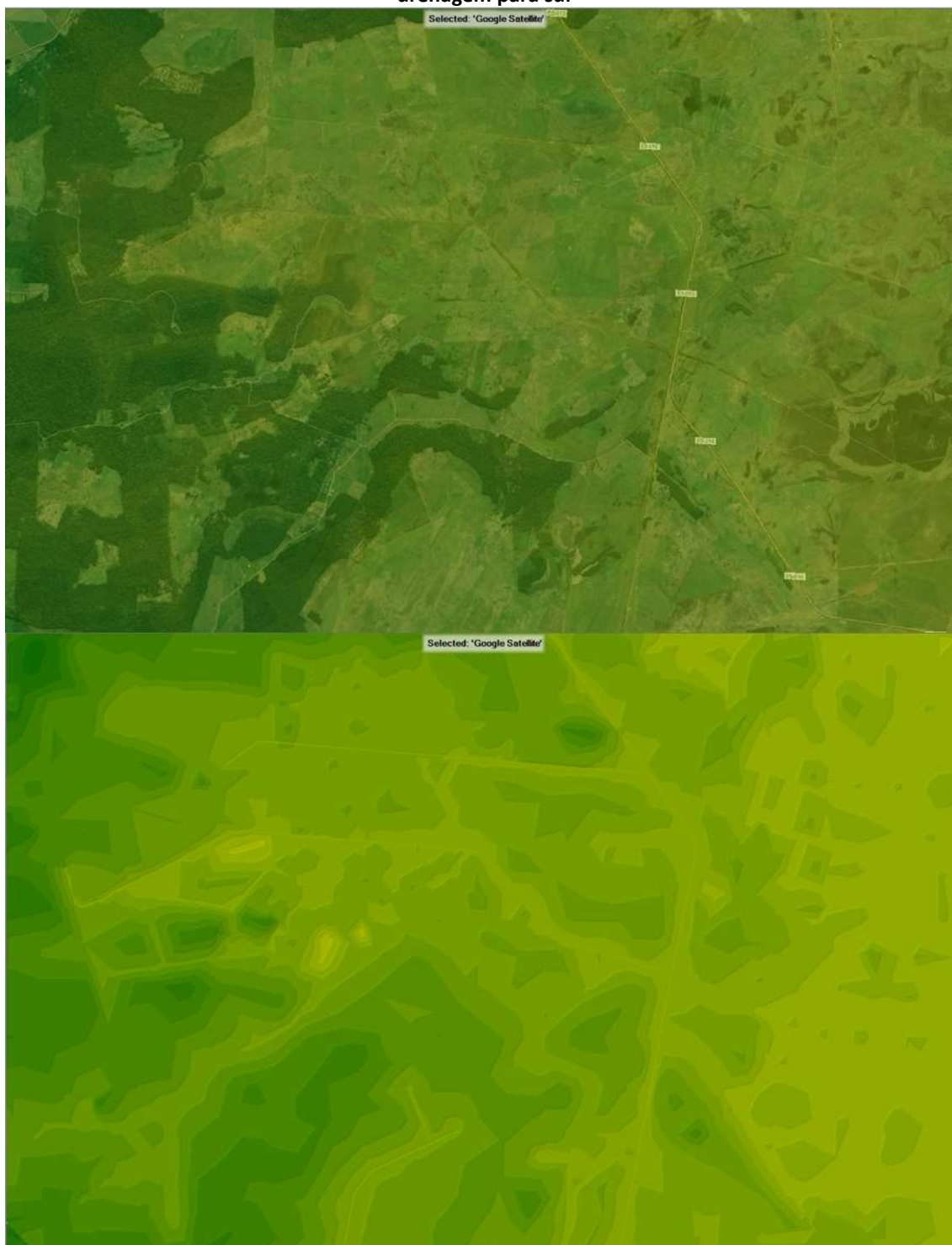
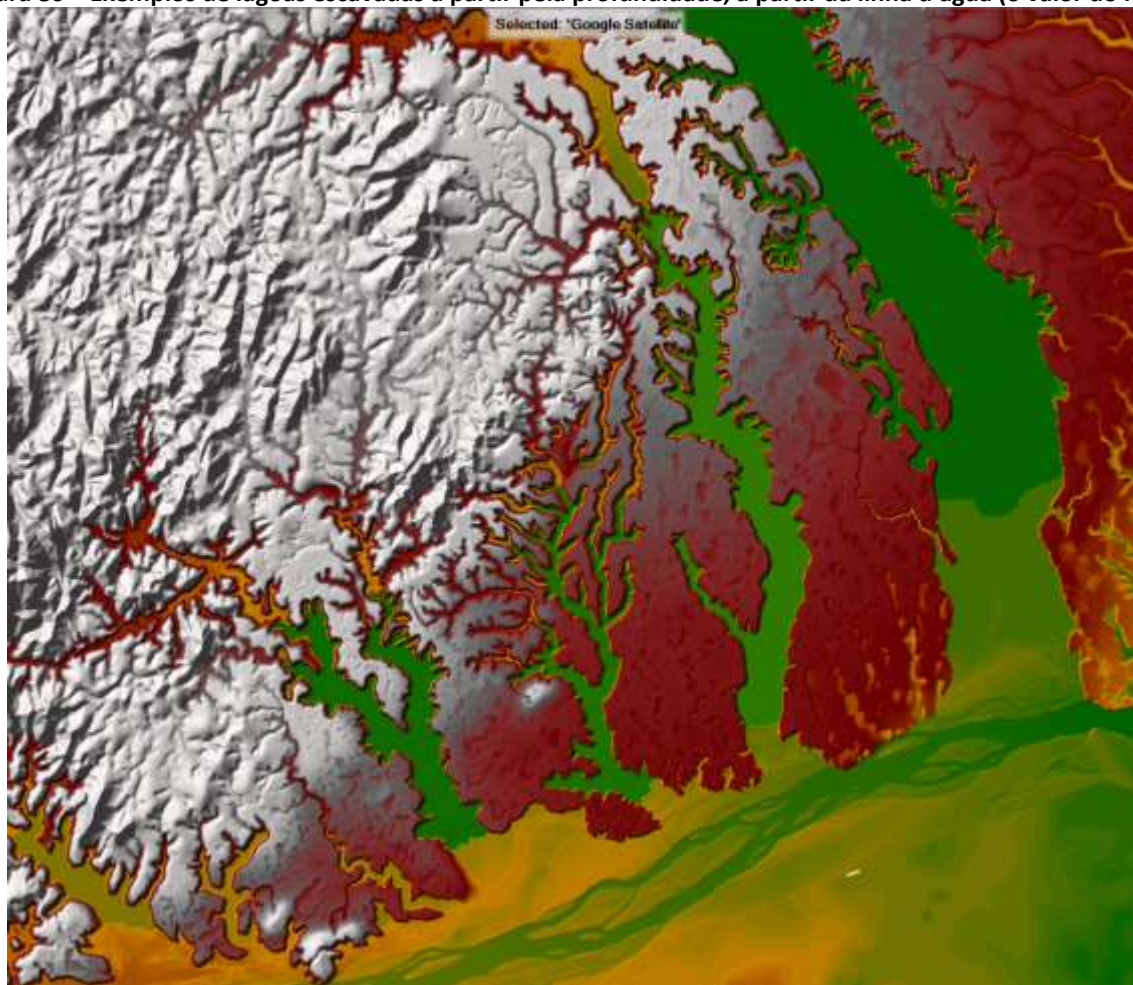


Figura 80 – Exemplos de lagoas escavadas a partir pela profundidade, a partir da linha d'água (o valor do MDT)



3 RESULTADOS

3.1 Simulação hidrodinâmica 2DH

Nessa seção são apresentados os resultados da modelagem hidrodinâmica 2DH. Para os eventos observados, as manchas de inundação simuladas foram comparadas com imagens de satélite, limitadas pela disponibilidade.

Para o evento de nov-dez de 2015, em Colatina a correlação entre níveis observados e simulados foi de 0,982, RMSE de 0,14 m e diferença no pico de -0,04 m. Para o evento de nov-dez de 2015, em Linhares a correlação entre níveis observados e simulados foi de 0,995, RMSE de 0,28 m e diferença no pico de +0,10 m.

Para o evento de 2016, em Colatina a correlação entre níveis observados e simulados foi de 0,991, RMSE de 0,17 m e diferença no pico de -0,14 m. Para o evento de 2016, em Linhares a correlação entre níveis observados e simulados foi de 0,997, RMSE de 0,28 m e diferença no pico de +0,39 m.

Portanto a APDL teve um diferença entre observado e simulado entre 4 cm a 39 cm que é considerado muito bom.

3.1.1 Simulação de validação – Cheia de 2013

A Figura 81 apresenta a mancha máxima de inundação para o período considerado na simulação. Para comparação pode-se observar também a mancha simulada (Figura 82) e frente a imagem de satélite (Figura 83) disponível para 26 de dezembro de 2013 que mostra uma coerência entre os resultados simulados e observados. Cabe destacar que as simulações indicam uma inundação da linha costeira, algo que não é observado nas imagens de satélite, mas também que a existência de nuvens dificulta a interpretação. A seguir, apresenta-se uma comparação da mancha de inundação alguns dias a frente, em 04 de janeiro e 2014 (Figura 84 e Figura 85), o que pode ser considerado um pós evento. Nesta avaliação é possível observar que boa parte de região apresenta indícios de processos de inundação e alagamento. Nesta simulação é possível observar também efeitos de aprisionamento em “piscinas” na mancha de inundação que pode estar relacionado a limitações do MDT utilizado.

A curva-chave calculada em Colatina apresentou coerência com os dados observados de resumo de descarga, bem como a série temporal do hidrograma e cotagrama (e anomalias) calculados (Figura 86 e Figura 87). Nota-se que os níveis simulados foram maiores do que os obtidos pela curva-chave consistida no Hidroweb, embora apresente boa coerência com os dados mais recentes (não consistidos). Por outro lado, mediante a incerteza da curva-chave, a avaliação sobre as anomalias dos níveis simulados em Colatina indica bons resultados. A comparação entre os cotagramas simulados e observações em Linhares (Figura 88) demonstra a capacidade do modelo em representar a hidrodinâmica da cheia do rio Doce. Os erros máximo nos nível d'água foram relativamente baixos (RMSE:24 cm, pico:41 cm) e da mesma ordem de grandeza ao obtido com o modelo hidrodinâmico 1 D.

Figura 81 – Resultado da mancha de inundação (máximo) para Cheia de 2013

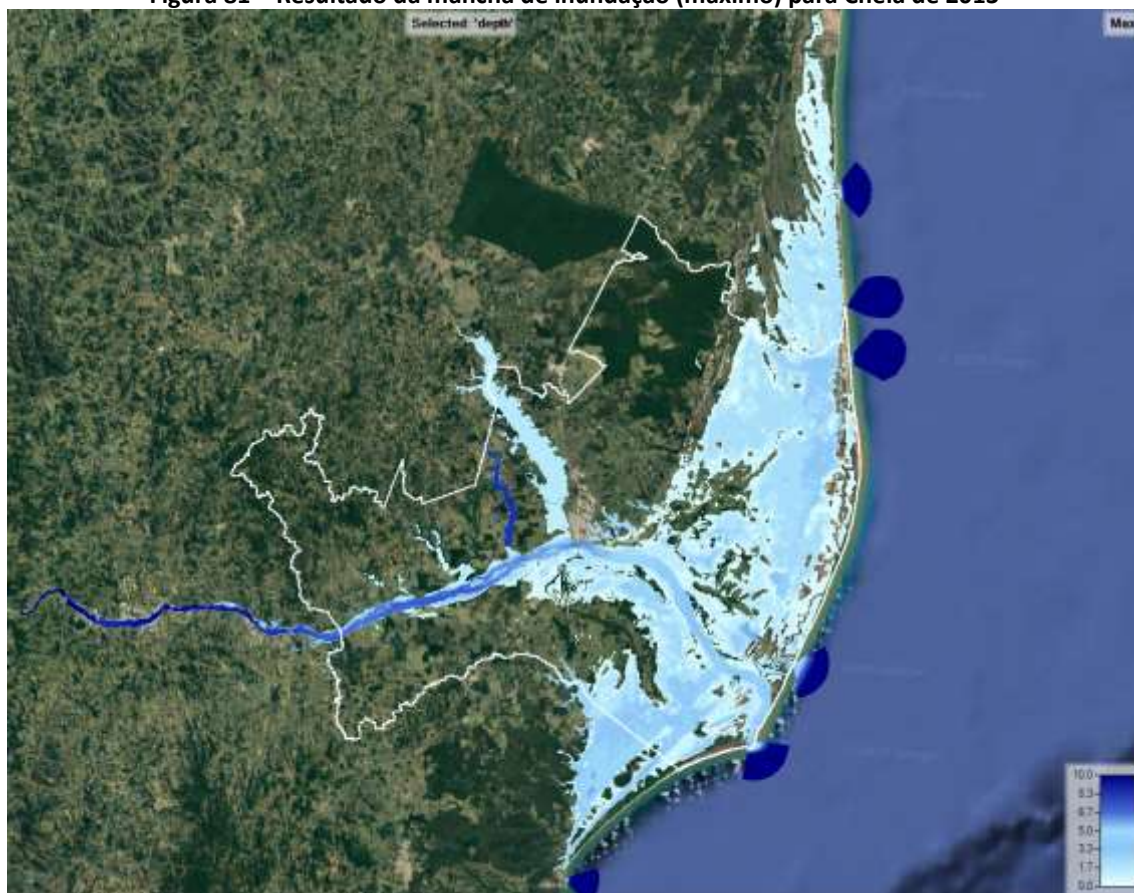


Figura 82 – Resultado da mancha de inundação simulada para 26/12/2013

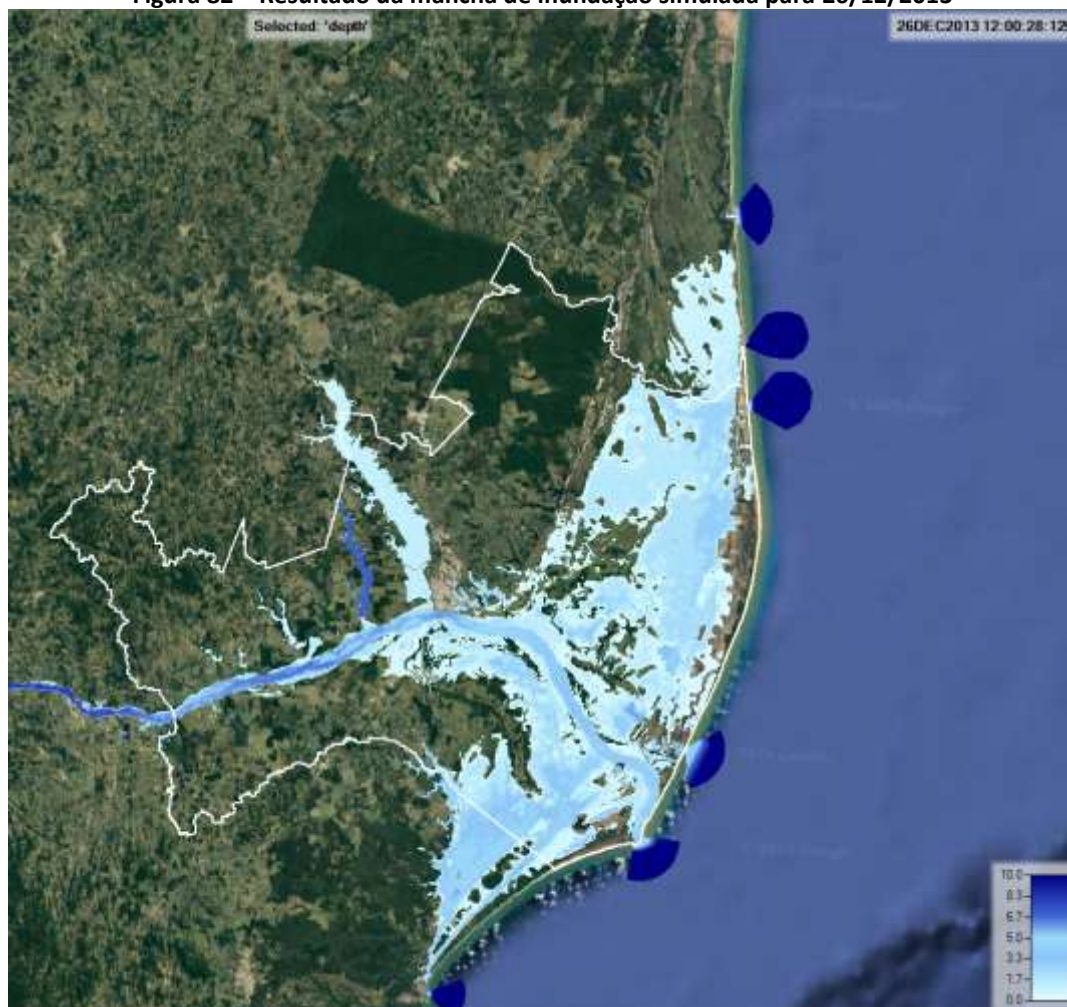


Figura 83 – Imagem pancromática de satélite Landsat 8 para cheia de 2013, em 26/12/2013. Fonte: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.



Figura 84 – Resultado da mancha de inundação simulada para 04/01/2014

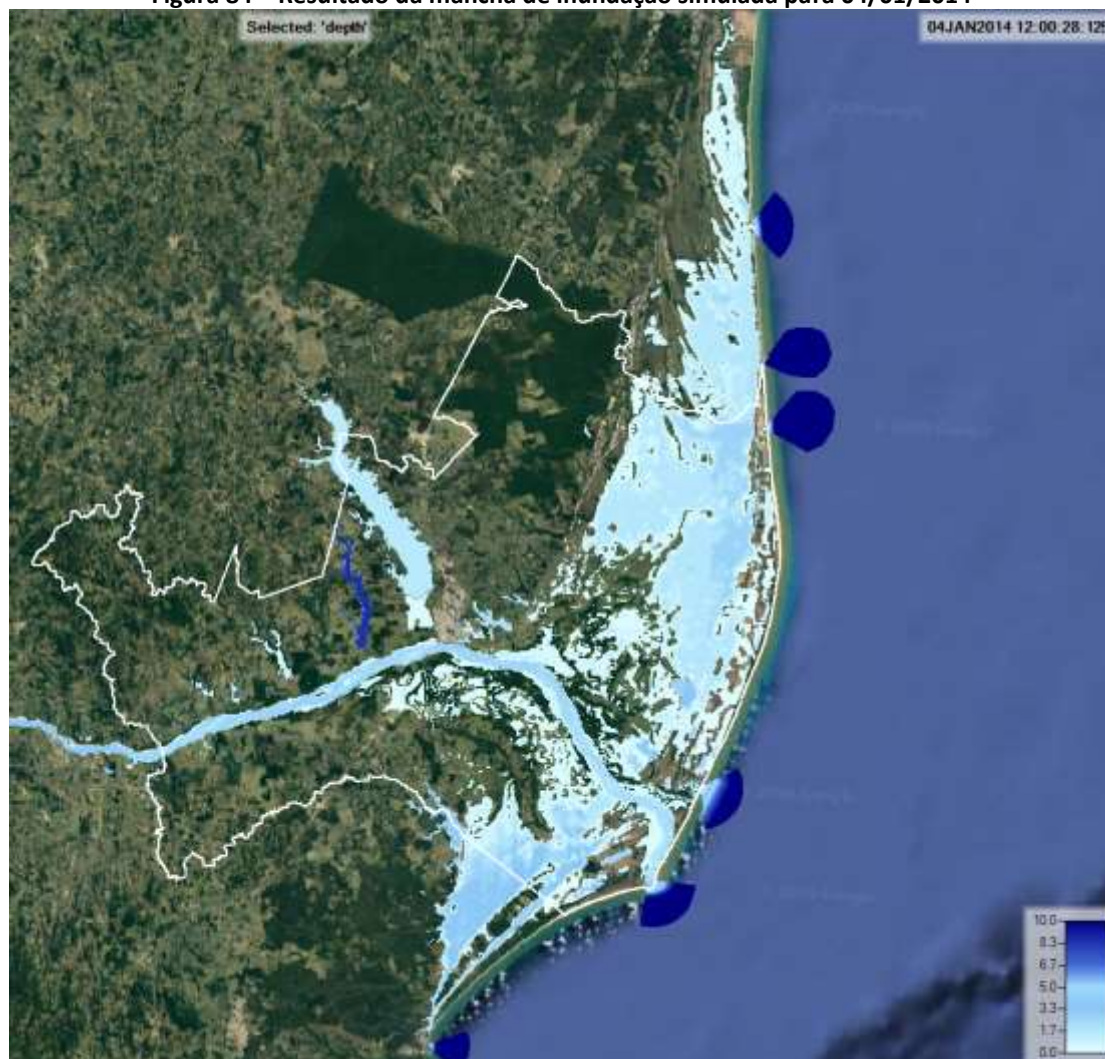


Figura 85 – Imagem de satélite Planet pós evento da cheia de 2013, em 04/01/2014. Fonte: planet.com.



Figura 86 – Curvas-chave – HEC-RAS 2D – Colatina – Evento de 2013

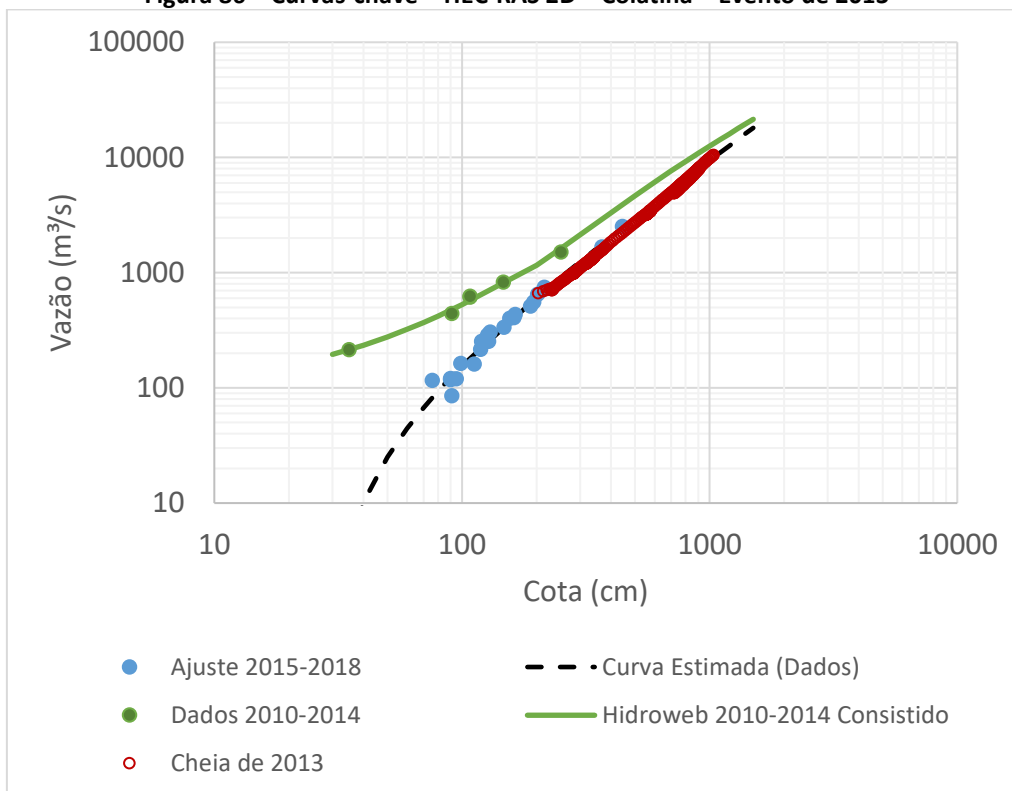


Figura 87 – Hidrograma e cotagrama – HEC-RAS 2D – Colatina – Evento de 2013

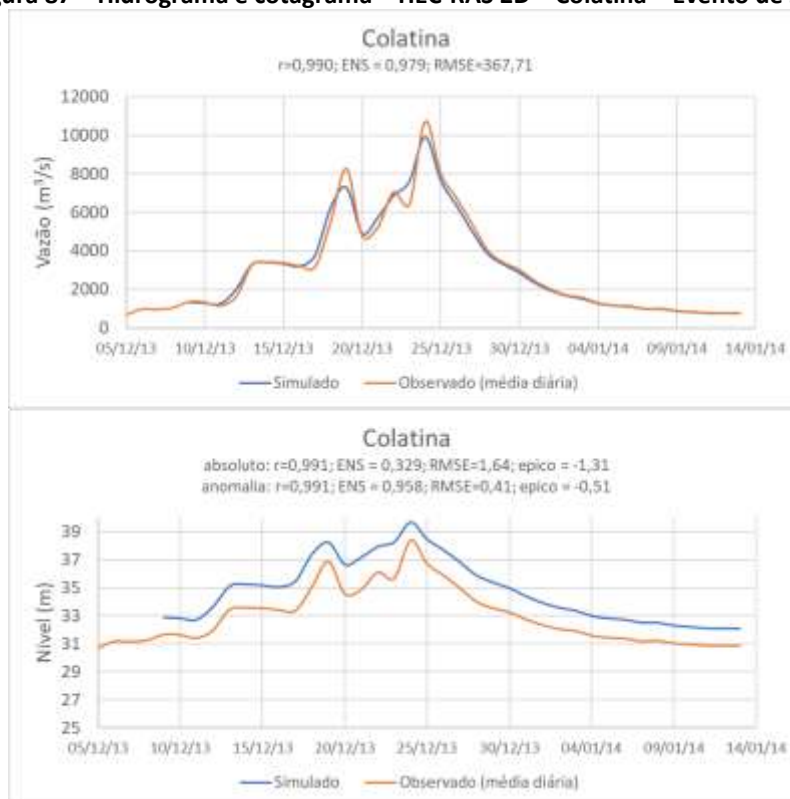


Figura 88 – Cotograma – HEC-RAS 2D – Linhares – Evento de 2013.



3.1.2 Simulação das Cheias de 2015-2016

A Figura 89 apresenta a mancha de inundação para o evento de dezembro de 2015, enquanto a Figura 90 apresenta imagens de satélite referentes ao mesmo período. Em geral, as imagens não demonstram um extravasamento ou inundação severa das margens do rio Doce nestas condições.

A Figura 91 apresenta a mancha de inundação para o evento de janeiro de 2016, seguido também de uma momento pós-evento em 9 de fevereiro de 2016 (Figura 92). Conforme esperado o resultado da cheia de janeiro apresenta uma área inundável menor do que a da simulação preliminar para a cheia de 2013, embora ao comparar com uma imagem de satélite (Figura 93) algumas áreas inundadas podem estar relacionados à possíveis limitações do MDT e modelagem, como o fato de o MDT representar depressões no terreno e o modelo hidráulico não representar os processos de infiltração e de evaporação da água na planície. Isto leva a ocorrência de mais áreas inundadas na simulação para o período pós-evento em comparação com o observado em imagens de satélite. Mais considerações sobre o MDT foram apresentadas no capítulo 3.2 deste texto.

Figura 89 – Resultado da mancha de inundação máxima para evento de dezembro de 2015

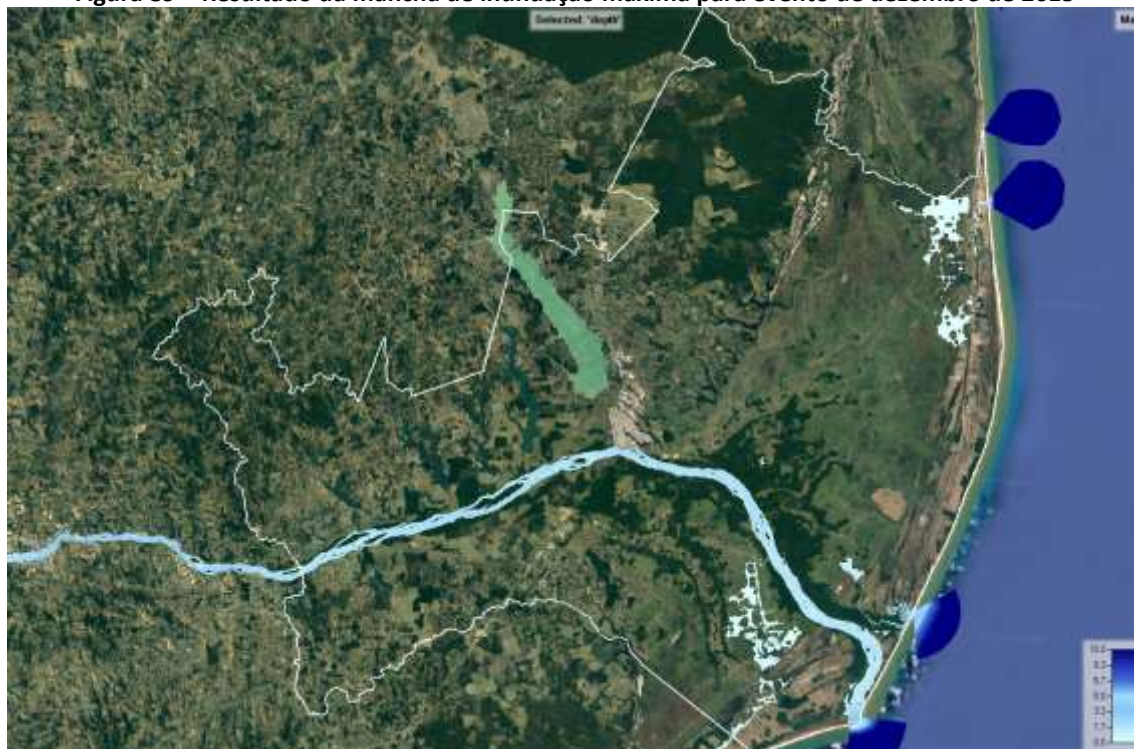


Figura 90 – Imagem de satélite Planet pós evento em dez-2015, em 04/01/2014. Fonte: planet.com.



Figura 91 – Resultado de mancha de inundação máxima para evento de janeiro de 2016

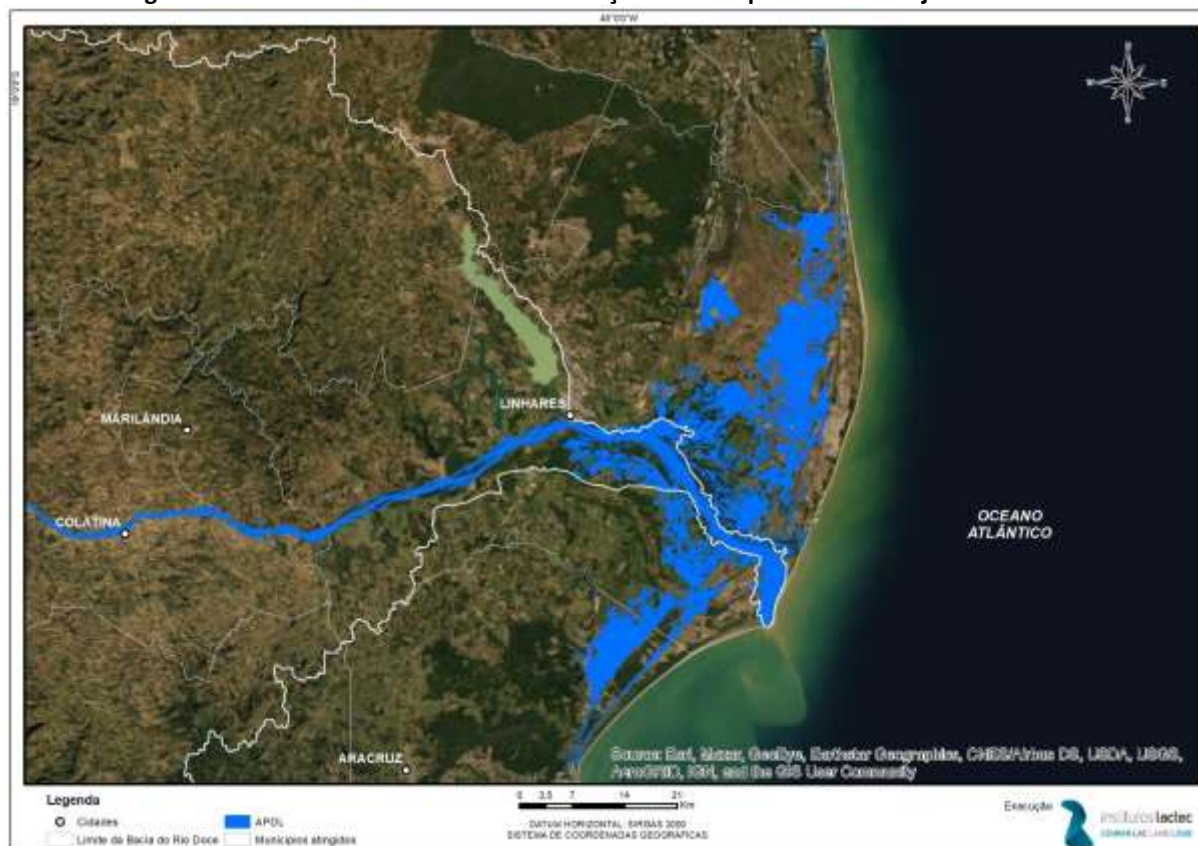


Figura 92 – Resultado de mancha de inundação pós evento em 09 de fevereiro de 2016



Figura 93 – Imagem de satélite Planet pós evento da cheia de 2016, em 09/02/2016. Fonte: planet.com.



Os resultados da simulação da cheia de nov-dez de 2015 sugerem que não houve troca de água do rio Doce para as lagoas na entrada de Linhares, ou mesmo na área urbanizada (Figura 94 e Figura 95).

Figura 94 – Resultado da mancha de inundação para evento de nov-dez 2015 próximo à divisa de Linhares



Figura 95 – Resultado da mancha de inundação para evento de nov-dez 2015 - próximo à área urbanizada



Por outro lado, a simulação da cheia de 2016 sugere que algumas lagoas próximas a divisa de Colatina e Linhares, na área urbanizada e no trecho a jusante de Linhares poderiam ter recebido água da calha do rio Doce, tal como observado nas Figura 96 a Figura 99.

Figura 96 – Resultado da mancha de inundação para evento de janeiro de 2016 – entrada de Linhares



Figura 97 – Resultado da mancha de inundação para evento de janeiro de 2016 - próximo à divisa de Linhares



Figura 98 – Resultado da mancha de inundação para evento de janeiro de 2016 – próximo à área urbanizada



Figura 99 – Resultado da mancha de inundação para evento de janeiro de 2016 – próximo à costa

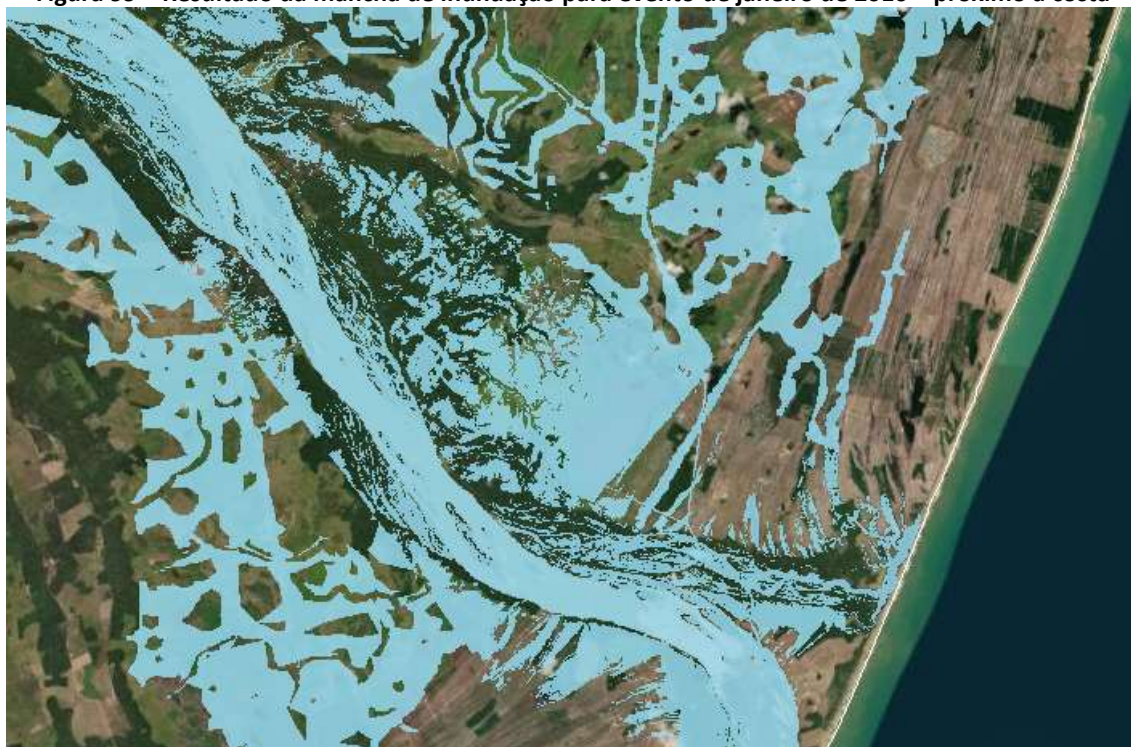


Figura 100 – Curvas-chave – HEC-RAS 2D – Colatina – Eventos de 2015 e 2016

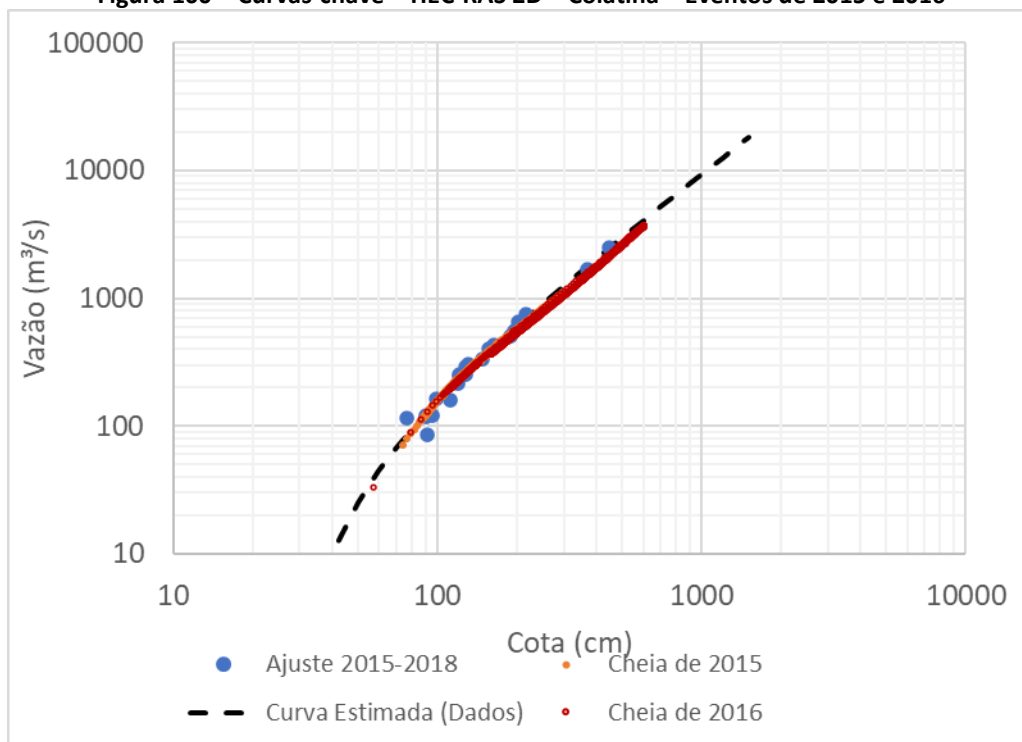


Figura 101 – Hidrograma e cotograma – HEC-RAS 2D – Colatina – Evento de 2016

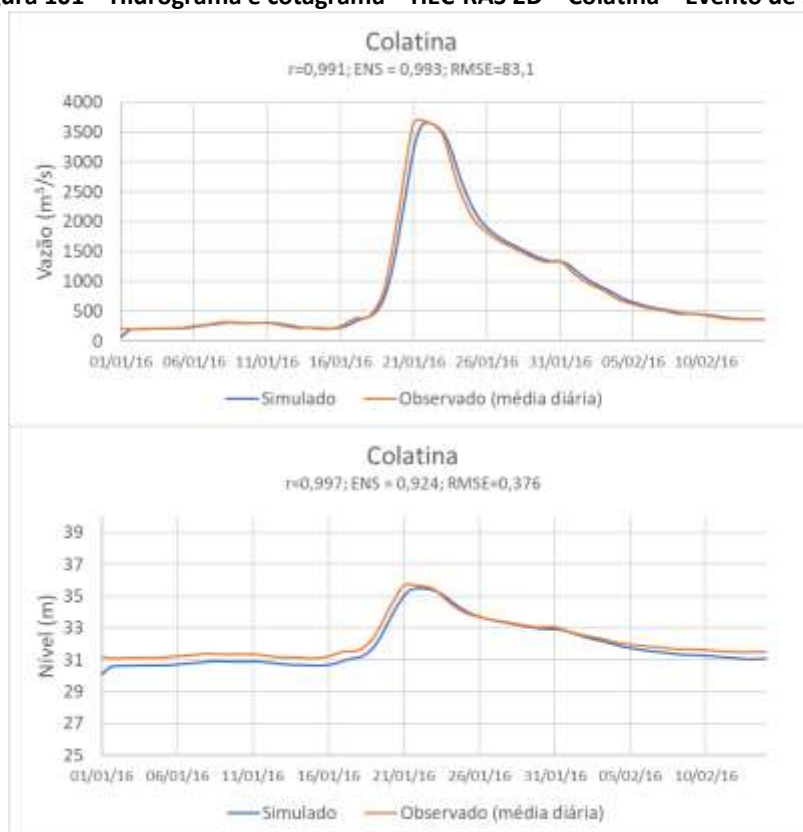


Figura 102 – Cotagrama – HEC-RAS 2D – Linhares – Eventos de 2016.



3.2 Considerações sobre a composição do MDT

Um aspecto evidente nos resultados, é um efeito de borda entre as regiões representadas pelo modelo de terreno de alta resolução próximo a calha do rio e o restante do domínio. A Figura 103 ilustra como o processo de inundação é representado de maneira mais simplificada com efeito de inundar “grandes piscinas” onde o terreno é menos detalhado, ao contrário do que ocorre quando é possível representar os canais principais de escoamento e barreiras em melhor resolução. Neste sentido, as limitações de representação de feições internas no modelo de terreno também podem resultar em superestimativa de áreas inundáveis. A Figura 104 apresenta a diferença de altitude entre o modelo de terreno detalhado e modelo de terreno obtido pelas curvas de nível, sendo possível observar a existência de diferenças significativas. Por fim, a Figura 105 demonstra a propagação da cheia de 2016 e o processo de extravasamento da calha principal, onde é possível verificar uma drenagem coerente na região de alta resolução, enquanto outras regiões aparentam possuir artefatos que tendem a reter o processo de drenagem.

Figura 103 – Efeito de transição de terreno de alta resolução (2m) e curvas de nível na representação do escoamento por pequenos canais e piscinões.

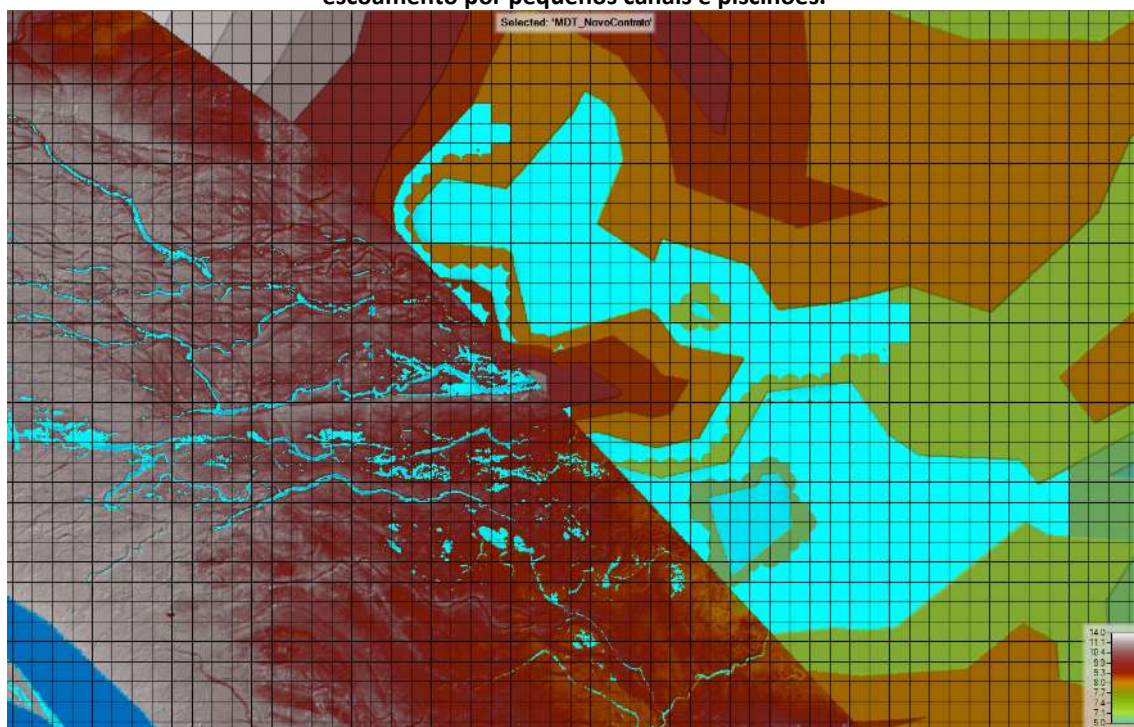


Figura 104 – Diferença entre os modelos de terreno: [MDT 2m] - [MDT Curvas de Nível]

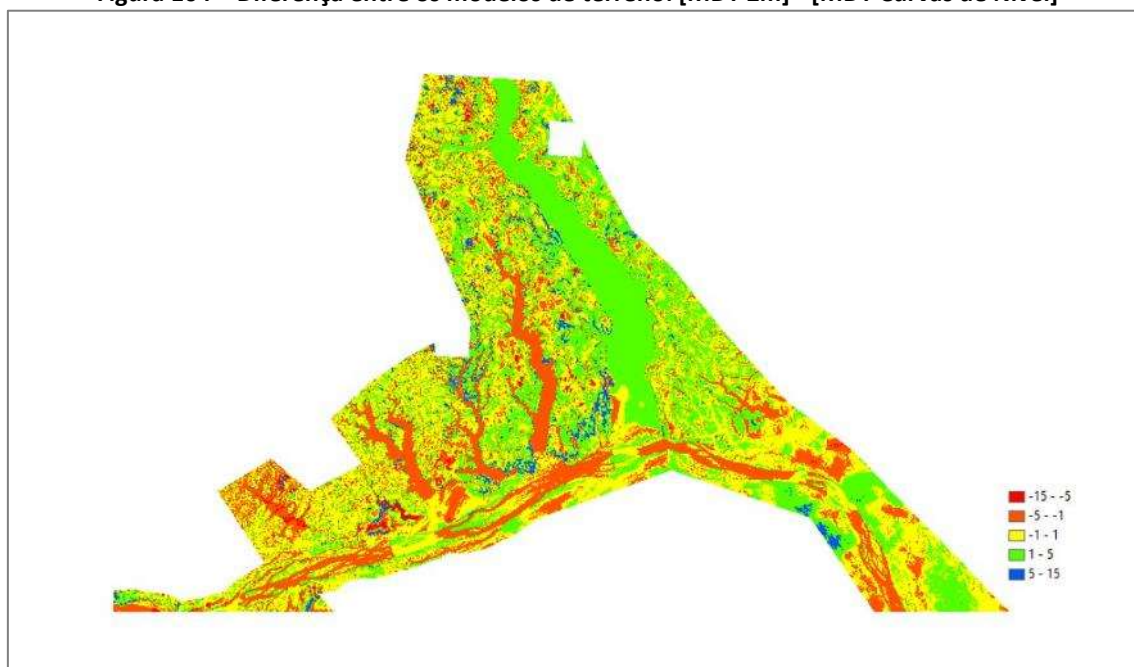
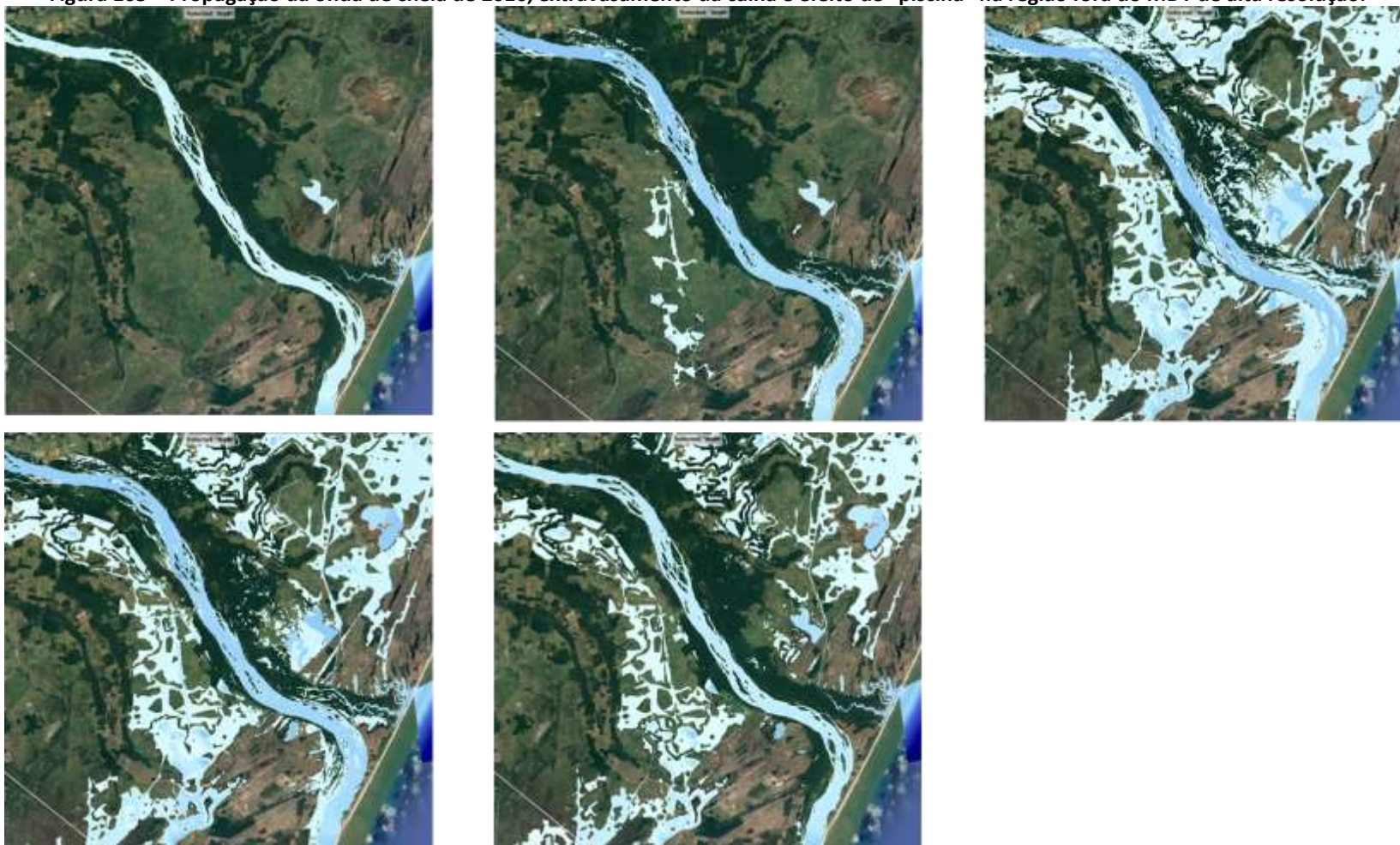


Figura 105 – Propagação da onda de cheia de 2016, extravasamento da calha e efeito de “piscina” na região fora do MDT de alta resolução.



4 CONCLUSÕES

As simulações hidrodinâmicas bidimensionais realizadas com o modelo HEC-RAS para os eventos de cheia 2013-2014 e 2015-2016 permitiram obter estimativas da mancha de inundação para a porção mais baixa do rio Doce, localizada entre Colatina e a foz do rio Doce. Com relação a elas, apresenta-se a seguir os principais pontos observados.

- As simulações destacaram artefatos decorrentes da composição de modelos digitais de terreno com diferentes detalhamentos (e.g. LiDAR 2m *versus* curva de nível), tais como degraus e barreiras, dentre outros, com efeitos na propagação do escoamento (drenagem por canais *versus* piscinões);
- Recomenda-se para estudos futuros, o levantamento de modelo digital de elevação detalhado em toda região da várzea do Doce;
- Um número vasto de canais que atuam na drenagem interna e fronteira da região que não são identificadas no modelo digital de terreno limita a capacidade de representar os processos de escoamento de maneira precisa. Entretanto as modificações no MDT realizadas com base em imagens de satélite e bases vetoriais (ANA OpenStreetMaps), permitiram a drenagem da área, o que *a priori* não ocorreria no MDT bruto. A abordagem adotada pode ter efeitos nos resultados obtidos, devido as limitações de conhecimento sob as características hidráulicas (e.g. declividades, profundidade, etc). Assim, os resultados são mais precisos na região onde o MDT apresenta alta resolução (LiDAR 2m), próximo a calha do rio Doce.
- A simulação do cenário de validação de 2013 teve coerência com imagens de satélites durante e após o evento, embora tenha apresentado áreas inundadas maiores do que as observadas;
- A simulação do cenário de nov-dez de 2015 teve coerência com imagem de satélite, sem evidências de trocas efetivas do rio Doce com lagoas;
- As lagoas foram representadas de maneira simplificada, atribuindo a cota de fundo pela profundidade registrada em dados, mas a partir do valor obtido do valor modelos digitais de terreno.
- Resalta-se a ótima qualidade da modelagem que obteve uma diferença média entre observado e simulado de apenas 14 cm na representação da cotas maxmas da cheia de 2016 (APDL).

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. 1º Relatório Parcial de Resultados. Curitiba: Lactec, 2018.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. TOMO I – Contextualização. Diagnóstico de Danos. Curitiba: Lactec, 2020.
- CHAKRAVARTI, LAHA, ROY (1967). Handbook of Methods of Applied Statistics, Volume I, John Wiley and Sons, pp. 392-394.
- FASSONI-ANDRADE AC, PAIVA RCD, FLEISCHMANN AS (2020) Lake topography and active storage from satellite observations of flood frequency. (Pre-print), Earth and Space Science Open Archive. <https://www.essoar.org/doi/10.1002/essoar.10502735.1>
- FUNDAÇÃO RENOVA. Modelo digital de terreno obtida de dados oriundos de perfilamento aéreo a laser executado no período entre 30/11/2018 e 19/06/2019, pela empresa Fototerra.
- INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO (IEMA). Dados topográficos de um levantamento realizado por “Hiparc Geotecnologia”, entre os anos de 2012 a 2015. Disponível em: http://geobases.static.es.gov.br/MAP_ES_2012_2015/MAP_ES_2012_2015_MDT_URL_LIST.txt.

