

Artigo

MODELAGEM DA INTERAÇÃO RIO-OCEANO NO SUDESTE DO BRASIL: ABORDAGEM INICIAL NA FOZ DO RIO MACAÉ, RIO DE JANEIRO

Miguel Silva, V.V. ^{1,*}, Raggi, F.G.S. ², Lugon Júnior, J. ³, Costa, D.A. ⁴, Silva, S.V. ⁵ e Silva Neto, A. J. ⁶

Instituto Federal Fluminense – Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil –

¹ vinicius.miguel@gsuite.iff.edu.br ;

² fernanda.raggi@gsuite.iff.edu.br ;

³ jader.lugon@gsuite.iff.edu.br ;

⁴ david.costa@iff.edu.br ;

⁵ simonevsinfo@gmail.com ;

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Nova Friburgo, RJ, Brasil –

⁶ ajsneto@ipri.uerj.br

* Correspondência: vinicius.miguel@gsuite.iff.edu.br e viniciusvanderley@gmail.com ; Tel.: +55 2298-103-4477

Recebido: 12/01/22; Aceito: 13/12/22; Publicado: 31/01/23

Resumo: Os efeitos das mudanças climáticas em ambientes influenciados por cursos d'água vêm causando problemas de ordem coletiva que precisam ser monitorados por meio de simulações, a fim de se adotar medidas de prevenção e contenção pelos gestores das cidades. O objetivo deste trabalho foi realizar uma modelagem que representasse o comportamento da interação do oceano atlântico com o Rio Macaé, localizado na Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII), estado do Rio de Janeiro, Brasil. A modelagem computacional foi realizada utilizando o software OpenFlows FLOOD por meio de um modelo tridimensional construído, e FES (Solução de Elementos Finitos), com o banco de dados de marés FES2014. A construção do modelo foi feita em um cenário de vazão constante do rio Macaé de aproximadamente 200 m³/s, durante um período de 24 horas. O modelo computacional inicialmente elaborado ainda necessita de ajustes e calibrações. A modelagem apresentada está em fase inicial, e os dados utilizados na simulação podem ser refinados a fim de atender melhor o desenvolvimento deste e de outros cenários relacionados.

Palavras-chave: modelagem oceânica, modelagem computacional, interação oceano-rio

Article

MODELING THE RIVER-OCEAN INTERACTION IN SOUTHEASTERN BRAZIL: INITIAL APPROACH IN THE MACAÉ RIVER MOUTH, RIO DE JANEIRO

Abstract: The effects of climate change in environments influenced by watercourses have been causing collective problems that need to be monitored through simulations, in order to adopt prevention and containment measures by

city managers. The objective of this work was to carry out a modeling that represents the behavior of the interaction of the Atlantic Ocean with the Macaé River, located in the Macaé and Ostras Hydrographic Region (RH-VIII), state of Rio de Janeiro, Brazil. The computational modeling was performed using the OpenFlows FLOOD software through a built three-dimensional model, and FES (Finite Element Solution), with the FES2014 tidal database. The construction of the model was carried out in a scenario of constant flow of the Macaé River of approximately 200 m³/s, during a period of 24 hours. The computational model initially elaborated still needs adjustments and calibrations. The modeling presented is in its initial phase, and the data used in the simulation can be refined in order to better serve the development of this and other related scenarios.

Keywords: ocean modeling, computer modeling, ocean-river interaction

1. Introdução

Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), é de responsabilidade do poder público em todos os níveis da federação a prevenção e proteção contra eventos de origem hidrológica natural ou resultantes de uso inadequado dos recursos naturais (Brasil, 1997). Esta lei também ficou conhecida como Lei das Águas e estabelece instrumentos para a gestão dos recursos hídricos de domínio federal.

O ciclo hidrológico está diretamente ligado ao clima. Assim, mudanças no clima que alterem o regime de chuvas podem provocar o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como inundações e longos períodos de seca. Esses eventos afetam a oferta e a qualidade de água, ameaçando o suprimento de recursos hídricos para todos (ANA, 2020).

Mudanças climáticas são alterações provocadas nos padrões do clima a longo prazo com base nas alternâncias meteorológicas, ou seja, nas condições do tempo observadas por um período. Elas podem ser causadas por processos naturais e também pela ação do homem. Estudos e pesquisas que simulam cenários de alterações meteorológicas e o comportamento dos corpos hídricos são muitíssimo importantes. A partir dessas pesquisas, a compreensão destes fenômenos naturais é de extrema relevância para auxiliar os gestores das cidades na mitigação dos impactos decorrentes destes, seja através de adoção de legislações específicas ou políticas públicas. Assim, este estudo destaca-se pela relevância social, ambiental e econômica.

Há algumas décadas a simulação desses fenômenos naturais era praticamente impossível de ser executada, devido às limitações dos computadores e softwares existentes. Com o avanço tecnológico neste setor, foi possível a criação de diversos softwares, cada vez mais avançados, que simulam o comportamento da água em vários fenômenos na natureza, como o HMS, HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-HMS, entre outros (Cabral et al. 2015, Oliveira & Salla 2017).

O simulador MOHID (Water Modelling System©) vem sendo desenvolvido desde 1985 por equipes de pesquisadores do Marine and Environmental Technology Research Center (Maretec), pertencente ao Instituto Superior Técnico (IST) da Escola de Engenharia da Universidade Técnica de Lisboa, tendo a cooperação da empresa Hidromod Ltda. A partir do ano 2000 inicia-se o desenvolvimento do MOHID WATER e Land com um modelo 1D-Soil que se expande para incluir outros processos de Bacias Hidrográficas, tais como: aquífero, rio, escoamento superficial e o crescimento da vegetação (Maretec, 2012).

A partir do ano de 2019 a Bentley Infraestrutura adquiriu a interface gráfica do MOHID WATER e Land. Atualmente o software OpenFlows FLOOD utiliza modelos numéricos, tais como o MOHID, para simular os processos hidrológicos e hidráulicos que ocorrem nas bacias e microbacias hidrológicas, incluindo precipitação, infiltração, deslizamento de terra, vazão e escoamento superficial, dentre outros processos. (BENTLEY, 2021).

Dessa maneira, este artigo tem como objetivo principal realizar uma modelagem que representasse o comportamento da interação do oceano atlântico com o Rio Macaé, na bacia hidrográfica do Rio Macaé, localizada na Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII) no estado do Rio de Janeiro, Brasil.

2. Material e Métodos

O presente trabalho apresenta a descrição metodológica da construção do modelo digital, e breve descrição de demais parâmetros considerados, por meio de uma ferramenta computacional, que possibilita a implementação de uma estratégia de resolução numérica, por meio da interface gráfica OpenFlows FLOOD. Essa interface constitui um sistema integrado que permite gerir e criar arquivos de dados, gerar simulações e analisar os resultados do modelo (Maretec 2012).

2.1 Área de estudo: Foz do Rio Macaé

De acordo com a Resolução Nº 107/2013 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERHI-RJ), a Região Hidrográfica VIII do estado do Rio de Janeiro é formada pelas bacias hidrográficas do Rio Macaé, do Rio das Ostras e da Lagoa de Imboassica, na faixa costeira central-norte do estado. A bacia do Rio Macaé é a de maior extensão, sendo a sua área de drenagem, aproximadamente, 157 km², considerando as bacias que estão dentro do estado (CBH Macaé Ostras, 2020).

Dentre os seis municípios que a bacia do Rio Macaé abrange, está o município de Macaé com cerca de 82% (1448 km²) do seu território na bacia. Já os demais municípios, Nova Friburgo, Casimiro de Abreu, Rio das Ostras, Conceição de Macabu e Carapebus, totalizam 317 km² (18%). A transposição das águas da bacia do Rio Macabu, através da Usina Hidrelétrica Macabu colabora com a bacia do Rio Macaé (sub-bacia do Rio São Pedro). É importante destacar que o Rio Macaé, nasce na Serra Macaé de Cima, em Nova Friburgo, fluindo na direção leste-sudeste e percorrendo cerca de 136 km, desaguando no oceano Atlântico junto à cidade de Macaé (Figura 1) (CBH Macaé Ostras, 2020).

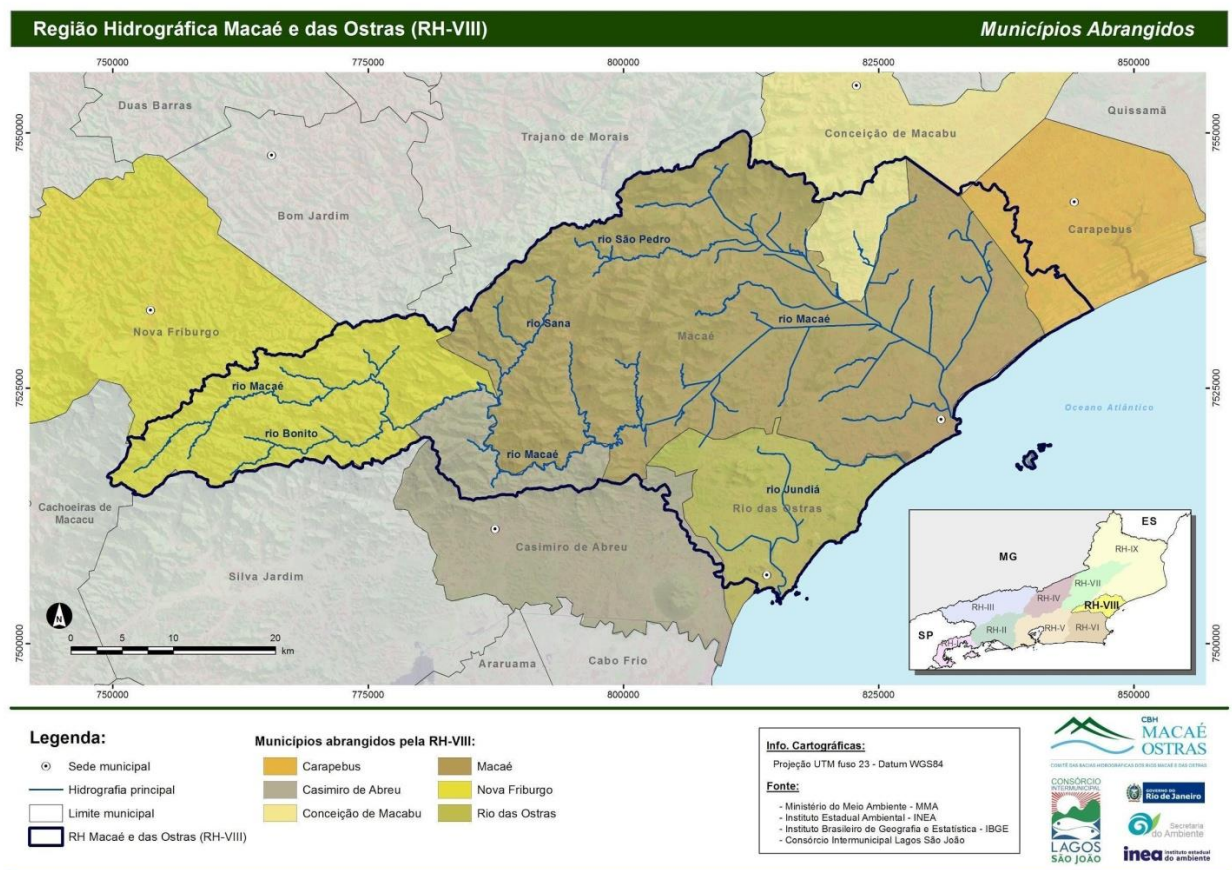


Figura 1. Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII) - Municípios abrangidos. Fonte: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Macaé e das Ostras - CBH Macaé Ostras.

2.2 Modelagem Computacional: OpenFlows FLOOD

O software OpenFlows FLOOD é um modelo 3D capaz de simular os diferentes movimentos da água no oceano e no estuário, especialmente distribuído de forma variável ou contínua. Uma das características do software é que permite estudar o ciclo da água em uma abordagem integrada, possibilitando inclusive a gestão da bacia e a simulação

de diversos eventos como: Cheias e inundações, transporte de poluentes e contaminantes, modelagem da qualidade da água, modelagem da intrusão salina e eventos de seca, dentre outros.

O Sistema de Modelagem de Água MOHID foi construído usando uma abordagem orientada para facilitar a integração de novos processos e modelos. O Método dos Volumes Finitos é a abordagem numericamente adotada, que é o método numérico mais aplicável para resolver problemas de escoamento. O sistema de módulos facilita o acoplamento de diferentes processos além de permitir a conservação de massa e continuidade do movimento (Trancoso et al. 2009, Iona 2013, Lugon et al. 2019, Tutorial MOHID, 2020).

2.3 Modelagem Computacional: FES (Finite Element Solution)- Global tide

A modelagem FES (Solução de Elementos Finitos) é um método que consiste em discretizar o sistema sob análise em vários elementos, fornecendo respostas sobre o fenômeno que está sendo estudado. Desta forma, o banco de dados de marés FES2014 inclui 3 componentes: elevações de maré, correntes de maré e carga de maré em uma grade de $1/16^\circ \times 1/16^\circ$.

Considerando o componente de elevações de maré, o modelo de maré oceânica FES2014. Sendo o modelo calculado usando as novas grades de carregamento de maré FES2014. São disponibilizadas duas versões: A primeira não extrapolada, onde o modelo é definido em uma malha de $1/16^\circ$ diretamente interpolada da malha nativa de elementos finitos do modelo e a versão extrapolada, para as costas, de modo a abranger quase inteiramente as regiões costeiras.

Em relação às correntes de maré, estas são derivadas do modelo FES2014a, diretamente interpoladas da grade nativa de elementos finitos, sendo que nenhuma extrapolação é feita nas costas para as correntes (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>).

Considerando a maré geocêntrica, utiliza-se o FES2014_load, na seguinte equação (1):

$$\text{FES2014b maré geocêntrica (elástica)} = \text{FES2014b maré oceânica} + \text{FES2014a maré de carregamento.} \quad (1)$$

O FES2014 pode ser utilizado para modelar e simular diversas situações de oceanografia costeira, oceanografia operacional e circulação oceânica. A cobertura geográfica do projeto e de todo o globo terrestre, pesquisadores e cientistas de diversas regiões do mundo têm utilizado os dados do FES2014 para a simulação de oceânica.

2.4 Construção do modelo

Neste modelo inicial foi simulado um cenário de vazão constante do rio Macaé de aproximadamente $200 \text{ m}^3/\text{s}$, durante um período de 24 horas seguidas, e verificado seus efeitos na foz da bacia do rio Macaé. Para realizar esta simulação foi utilizado o Software OpenFlows FLOOD.

Primeiramente foi definida a área de estudo: Bacia hidrográfica do Rio Macaé, mais especificamente na região do exutório da bacia. Em seguida foram adquiridos os dados de batimetria da região na missão TOPODATA (2020). Estes dados são fundamentais para elaboração do modelo digital.

O modelo digital (Figura 2) foi estruturado em uma grade horizontal constante, de células de 50×50 metros. Devido à alta resolução da grade modelada, um esforço computacional elevado foi necessário para rodar o modelo, porém como consequência na redução da grade, foram obtidos resultados mais refinados.

Após definidas as especificações de tamanho das células, a grade foi então projetada sobre a área de interesse empregando a ferramenta Constant Spaced Grid. Posteriormente, houve a exclusão da costa do modelo através da ferramenta Construct Named Polygons, separando apenas a região da foz do rio Macaé, de interesse do estudo.



Figura 2. Rio Macaé na região da sua Foz e seu deságue no oceano atlântico (Software OpenFlows FLOOD). Fonte: Elaborada pelos autores.

Para simular a interação Rio-Oceano, empregando o módulo de Discharges, foi inserida na simulação uma vazão constante de $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Já para a simulação das marés do oceano atlântico foi ativado o módulo Tide, com os parâmetros, apresentados no quadro 1.

Quadro 1. Parâmetros do módulo Tide, Software OpenFlows FLOOD. Fonte: Elaborada pelos autores.

EXTRAPOLATE	1
HARMONICS	1
EXTRACT_ HARMONICS	1
SPATIAL_ INTERPOL	1
HARMONICS_ FIELD_DIM	M2/amplitude
NAME	water level
UNITS	m
LONGITUDE	25 40 18.00
LATITUDE	16 56 31.88
METRIC_X	-16.942188
METRIC_Y	32.627598

Neste modelo, foram utilizados dados da missão FES (Finite Element Solution)- Global tide, para a simulação oceânica. Após a realização das etapas anteriores responsáveis pela elaboração do Modelo Digital, iniciou-se a fase de configuração da primeira simulação. Destaca-se que houve a definição do início e do fim da simulação por meio do Model_1 (Time Options), para um período de 24 horas seguidas.

3. Resultados e Discussão

No quadro 2 é apresentado o resultado da simulação durante um período de 24 horas, onde foi possível notar que apesar de uma vazão constante de 200 m³/s, há uma variação da velocidade (velocity_modulos) e nível da água (water_level), devido às variações da maré ao longo do dia.

O modelo computacional inicialmente elaborado ainda necessita de ajustes e calibrações, porém pode ser utilizado em várias áreas de estudo. Pode-se ressaltar que os dados utilizados na simulação podem ser refinados com estudos mais detalhados de batimetria e vazão do rio Macaé. Alterando a vazão constante para uma vazão variável, como consequência ter-se-á resultados mais refinados da interação Rio (vazão) com o Oceano (marés).

Quanto ao tempo de simulação, em simulações futuras, deverão ser utilizados períodos de tempo maiores, como por exemplo: Dias, semanas e até meses de simulação. Com isso será possível verificar a estabilidade do modelo a longo prazo e simular de maneira mais refinada a interação Rio x Oceano.

```

Time Serie Results File
NAME : Virtual_Macaefoz_Hydrodynamic_6
LOCALIZATION_I : 175
LOCALIZATION_J : 25
LOCALIZATION_K : 1
SERIE_INITIAL_DATA : 2022. 5. 5. 0. 0. 0.0
TIME_UNITS : SECONDS
Seconds YY MM DD hh mm ss water_level velocity_modulus
<BeginTimeSerie>
0.00 2022 5 5 0 0 0.0000 0.198505842686E+001 0.000000000000E+000
3600.00 2022 5 5 1 0 0.0000 0.188435316086E+001 0.440247580409E-001
7200.00 2022 5 5 2 0 0.0000 0.187582242489E+001 0.347809344530E-001
10800.00 2022 5 5 3 0 0.0000 0.190897905827E+001 0.219594556838E-001
14400.00 2022 5 5 4 0 0.0000 0.201038432121E+001 0.458511104807E-002
18000.00 2022 5 5 5 0 0.0000 0.220740103722E+001 0.528517588973E-001
21600.00 2022 5 5 6 0 0.0000 0.237699794769E+001 0.276833195239E-001
25200.00 2022 5 5 7 0 0.0000 0.242874813080E+001 0.256746113300E-001
28800.00 2022 5 5 8 0 0.0000 0.241475629807E+001 0.335353193805E-002
32400.00 2022 5 5 9 0 0.0000 0.235246443748E+001 0.585172278807E-002
36000.00 2022 5 5 10 0 0.0000 0.216643023491E+001 0.402466952801E-001
39600.00 2022 5 5 11 0 0.0000 0.192748093605E+001 0.350802130997E-001
43200.00 2022 5 5 12 0 0.0000 0.177447652817E+001 0.150080211461E-002
46800.00 2022 5 5 13 0 0.0000 0.169524693489E+001 0.338429957628E-002
50400.00 2022 5 5 14 0 0.0000 0.163641035557E+001 0.247332584113E-001
54000.00 2022 5 5 15 0 0.0000 0.163738942146E+001 0.166648917366E-002
57600.00 2022 5 5 16 0 0.0000 0.176786363125E+001 0.418583117425E-001
61200.00 2022 5 5 17 0 0.0000 0.198432338238E+001 0.377553626895E-001
64800.00 2022 5 5 18 0 0.0000 0.217710757256E+001 0.729128019884E-002
68400.00 2022 5 5 19 0 0.0000 0.231155920029E+001 0.731895957142E-002
72000.00 2022 5 5 20 0 0.0000 0.240424275398E+001 0.176340881735E-001
75600.00 2022 5 5 21 0 0.0000 0.243011450768E+001 0.501525308937E-002
79200.00 2022 5 5 22 0 0.0000 0.234277868271E+001 0.189706906676E-001
82800.00 2022 5 5 23 0 0.0000 0.220439696312E+001 0.866289343685E-002
86400.00 2022 5 6 0 0 0.0000 0.208898925781E+001 0.109019670635E-001

```

Quadro 2. Evolução do velocity_modulus e water level (Software OpenFlows FLOOD). Fonte: Elaborada pelos autores.

4. Considerações Finais

Os resultados alcançados indicam a viabilidade técnica de aplicação da simulação computacional com uso do software OpenFlows FLOOD como ferramenta de análise da interação Rio (vazão) X Oceano (marés), em rios e estuários de formação complexa. Considerando-se a diversidade da rede de canais e das características do relevo e da batimetria do oceano, no caso estudado de Macaé, conclui-se também que a técnica pode ser aplicada em qualquer bacia hidrográfica, com características semelhantes.

É importante destacar que a modelagem apresentada está em fase inicial e de aperfeiçoamento, onde os dados utilizados na simulação podem ser refinados a fim de atender melhor o desenvolvimento deste e de outros cenários como cheias e inundações, transporte de poluentes e contaminantes, modelagem da qualidade da água, modelagem da intrusão salina e eventos de seca, dentre outros cenários relacionados.

Como recomendação de pesquisas futuras, com o intuito de aprimorar a modelagem e obter resultados mais refinados, indica-se o levantamento de parâmetros *in situ* como vazão diária na foz do rio Macaé, monitoramento do movimento das marés, próximo à foz do rio, além de monitoramento no nível da água.

Agradecimentos: Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPERJ, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e da CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Código de Financiamento 001).

Referências Bibliográficas

1. Brasil (1997) Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em: 16 de agosto de 2020.
2. ANA (2020) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/mudancas-climaticas-recursos-hidricos>>. Acesso em: 02 de setembro 2020.
3. Cabral SL, Campos JNB, Silveira CDS, Teixeira FADA (2015) Hydrologic and Hydraulic Modelling Integrated With Gis: A Study of the Acaraú River Basin - CE. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, p. 167–174, 9 jun. 2015.
4. Oliveira JMS, Salla MR (2017) Modelling the Impacts of Wildfire on Surface Runoff in the Upper Uberabinha River Watershed Using HEC-HMS. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, p. 88–98, 21 maio 2017.
5. Maretec (2012) Descrição do Mohid. Campos dos Goytacazes: Essentia.
6. BENTLEY INFRAESTRUTURA Disponível em: <<https://www.bentley.com/pt/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/openflows-flood>>. Acesso em 15 de dezembro de 2021.
7. CBH Macaé Ostras. Comitê das bacias hidrográficas dos rios macaé e das ostras - CBH MACAÉ OSTRAS - Bacia Hidrográfica. Disponível em: <<https://cbhmacae.eco.br/a-bacia/>>. Acesso em: 02 de setembro de 2020.
8. Trancoso AR, Braunschweig F, Leitão PC, Obermann M, Neves R (2009) An advanced modelling tool for simulating complex river systems. *Science of The Total Environment*, v. 407, n. 8, p. 3004–3016, abr. 2009.
9. Iona P (2013) Modeling Floods In Enxoé Watershed. IST Technical University Of Iasi, Roménia.
10. Lugon Junior J, Tavares LPDS, Kalas FDA, Rodrigues PPGW, Wasserman JCA (2019) Reservoir implantation for flood dampening in the Macaé River basin using the Mohid Land model. *Ciência e Natura*, v. 41, p. e29, 4 out. 2019.
11. Tutorial MOHID. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/326564608/MOHID-Land-Quick-Start-Guide-v3> Acesso em: 01 de agosto de 2020.
12. Topodata. Arquivos em colunas xyz (ASCII, extensão .txt). Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/data/txt/>. Acesso em: 01 de agosto de 2020.