



Calibração automática da plataforma MOHID empregando um método estocástico de otimização e dados reais de um evento climático extremo em Nova Friburgo-RJ: parte 1 – preparação do modelo digital do terreno e aquisição dos dados experimentais de precipitação e nível



W.R. Telles^{a,*}, P.P.G.W. Rodrigues^b e A.J. Silva Neto^a

^a Instituto do Noroeste Fluminense de Educação Superior – Universidade Federal Fluminense, Departamento de Ciências Exatas e da Terra, 28470-000, Santo Antônio de Pádua, RJ, Brasil

^b Instituto Politécnico – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Modelagem Computacional, 28625-570, Nova Friburgo, RJ, Brasil

INFORMAÇÃO SOBRE O ARTIGO

Historial do artigo:

Recebido a 1 de dezembro de 2015

Aceite a 12 de abril de 2016

On-line a 9 de junho de 2016

Palavras-chave:

Nova Friburgo

Interface MOHID GIS

Modelo digital de terreno

Rede de drenagem

R E S U M O

Este é o primeiro de 2 artigos complementares que versam sobre a implementação de uma rotina de calibração automática acoplada a um modelo de simulação do escoamento superficial e comportamento hidráulico da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica durante eventos de cheias, construído no sistema de modelagem de águas MOdelo HIDrodinâmico (MOHID). Como estudos de caso foram analisadas 2 bacias hidrográficas localizadas na cidade de Nova Friburgo, estado do Rio de Janeiro: bacia do rio Cônego e bacia do rio Santo Antônio. Neste primeiro artigo é apresentada a metodologia de construção do modelo digital do terreno (MDT) e rede de drenagem das bacias de interesse na plataforma MOHID, interface MOHID GIS, bem como o processo de aquisição de dados reais de precipitação e níveis de água através do site do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), informações imprescindíveis para a simulação de ondas de cheias na região de interesse. Os resultados foram comparados com o software ArcMap e apresentaram uma boa concordância no que tange à delimitação das bacias hidrográficas e rede de drenagem.

© 2016 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este é um artigo Open Access sob uma licença CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

MOHID platform automatic calibration employing a stochastic optimization method and real data from an extreme climate event in Nova Friburgo-RJ: Part 1–digital terrain model preparation and processing of rainfall and level experimental data

A B S T R A C T

This is the first of two complementary articles that deal with the implementation of an automatic calibration routine coupled to a simulation model of runoff and the flow of two urban watersheds, both located in the city of Nova Friburgo, State of Rio de Janeiro, Brazil. The models were built in the MOHID Waters Modelling System. This first part presents the methodology of the construction of the Digital Terrain Model–DTM and the drainage network of the studied watersheds, made in the MOHID platform, as well as the acquisition of actual rainfall data and water levels through the site of the Instituto Estadual do Ambiente–INEA. The results were compared with ArcMap software and showed a good agreement regarding the delimitation of watersheds and the drainage network.

© 2016 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Keywords:

Nova Friburgo

MOHID GIS Interface

Digital Terrain Model

Drainage Network

* Autor para correspondência. O autor agradece ao CNPq pelo aporte financeiro oriundo do pós-doutoramento, projeto 506463/2013-3, processo 150835/2014-0. Correios eletrônicos: wr.telles@yahoo.com.br (W.R. Telles), pwatts@iprj.uerj.br (P.P.G.W. Rodrigues), ajsneto@iprj.uerj.br (A.J. Silva Neto).

1. Introdução

De acordo com [8], o Brasil possui a mais extensa rede hidrográfica da Terra, sendo a maior parte formada por rios de planalto, os quais têm grande importância econômica devido ao seu potencial energético.

No que se refere à hidrografia brasileira, o Plano Nacional de Recursos Hídricos, por meio da Lei 9433/97, define que a aplicação do quadro normativo hídrico terá como unidade territorial a «bacia hidrográfica» [2]. Estudos envolvendo bacias hidrográficas são importantes, pois é neste local geográfico natural que verificamos a dependência de todos os componentes do crescimento e desenvolvimento da sociedade, além de definir os múltiplos usos de gestão de recursos hídricos [11]. Esses estudos podem ser realizados por meio de modelos investigativos, os quais requerem informações fisiográficas, como a configuração da rede de canais, sua distribuição espacial, bem como características geométricas [15].

A obtenção dessas informações pode ser realizada por meio de sistemas de informações geográficas (geographic information systems [GIS]), os quais representam uma técnica mais rápida, menos subjetiva e fornecem medidas mais reproduzíveis do que as técnicas manuais tradicionais aplicadas aos mapas topográficos [29].

Os GIS permitem unificar todas as informações topográficas da bacia hidrográfica em um modelo digital de terreno (MDT), o qual é utilizado como base para a realização de simulações numéricas referentes aos processos hidrológicos que ocorrem na bacia, tais como o escoamento superficial e na rede de drenagem.

Por outro lado, as simulações numéricas exigem a criação de um modelo conceitual, onde é desenvolvido um esquema que permite uma análise simplificada do sistema real, possibilitando a sua representação em termos de condições iniciais e de contorno, equações de estado, fluídos, propriedades e variáveis termodinâmicas, sendo este conjunto estruturado por informações que devem ser devidamente tratadas, dando origem a um modelo numérico, cujo intuito é sua utilização como entrada de um simulador numérico [1].

Tucci [30] salienta ainda que o uso de modelos hidrológicos apresenta-se como importante ferramenta que permite a representação, entendimento e simulação do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, por meio do equacionamento de seus processos.

A análise e posterior simulação dos processos que ocorrem nas bacias hidrográficas passam, necessariamente, pela obtenção de dados requeridos para o mapeamento da região de interesse, os quais são compostos por 3 categorias gerais [16]:

- Dados topográficos da várzea e bacia hidrográfica para apoiar a modelagem hidrológica e hidráulica.
- Dados físicos sobre as instalações construídas para controle de drenagem e edificações.
- Dados administrativos sobre limites de jurisdição.

Ogden et al. [22] fazem uma descrição de diversos softwares que utilizam como base informações geoespaciais e podem ser aplicados para diversas finalidades no contexto de bacias hidrográficas, as quais vão desde a previsão de variáveis hidrológicas, passando pela análise do escoamento superficial, até à previsão/estimativa de inundações.

Já Fleenor e Jensen [14] apresentam uma comparação entre o software de domínio público do Hydrologic Engineering Center–River Analysis System (HEC-RAS) e o software de propriedade do Danish Hydraulic Institute (DHI), MIKE 11, 2 dos modelos mais comumente usados na previsão de inundações em todo o mundo.

A maior parte desses aplicativos necessita que os dados de entrada estejam armazenados em arquivos previamente construídos em ferramentas GIS, nem sempre disponibilizadas ao

usuário, exigindo, dessa forma, uma prévia manipulação para a sua utilização. Além disso, Sitzenfrie et al. [26] enfatizam que, no campo da análise do sistema de distribuição de água, o estudo de caso é um instrumento bem conhecido para a realização de testes e/ou avaliação comparativa de estratégias de otimização, bem como a avaliação de tecnologias recém-desenvolvidas, comprovando hipóteses, testando novos softwares e analisando incertezas em modelos.

Este trabalho apresenta os resultados do acoplamento de uma rotina de calibração automática ao simulador MOHID, obtidos em 2 estudos de caso. Nesta primeira parte, apresenta-se a descrição metodológica da construção do MDT e rede de drenagem de 2 bacias hidrográficas situadas na cidade de Nova Friburgo, estado do Rio de Janeiro (RJ), Brasil, por meio da interface Sistemas de Informações Geográficas (Geographic Information Systems) do Modelo HIDrodinâmico (MOHID GIS), bem como o processo de aquisição de dados de precipitação e níveis d'água através do site do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), informações imprescindíveis para a simulação de ondas de cheias na região de interesse. Os resultados envolvendo a delimitação das bacias hidrográficas e rede de drenagem também são comparados com o software ArcMap, por este tratar-se de uma ferramenta amplamente utilizada no cenário mundial ao se trabalhar com essa classe de problema.

A escolha dessas bacias justifica-se pelas mesmas estarem localizadas em regiões montanhosas, apresentando geografia e redes de drenagens com trechos de gradientes elevados, o que, por representar um complicador na simulação, oferece uma oportunidade para avaliação da robustez do simulador. Além disso, tais bacias situam-se em região que historicamente apresenta eventos de inundações, entre os quais destaca-se o ocorrido em janeiro de 2011, que se configurou na maior tragédia ambiental registrada no Brasil.

Vale destacar, também, que a interface MOHID GIS ainda não foi utilizada na abordagem envolvendo um rio de montanha, como no estudo apresentado aqui.

2. Materiais e métodos

Para realizar a avaliação da plataforma MOHID no que tange ao processo de construção de modelos digitais de terreno hidrológicamente consistentes, bem como sua rede de drenagem em regiões montanhosas, serão estudadas as bacias hidrográficas do rio Cônego e do rio Santo Antônio, localizadas em uma das áreas mais urbanizadas da cidade de Nova Friburgo.

Assim, a primeira parte deste trabalho propõe-se a construir, com base em um MDT, um modelo da rede de drenagem do município de Nova Friburgo, RJ, e delimitar as bacias hidrográficas do rio Cônego e do rio Santo Antônio por meio da plataforma MOHID, i.e., interface gráfica MOHID GIS.

2.1. Áreas de estudo

O município de Nova Friburgo está localizado na região serrana do estado do RJ, limitado pelas coordenadas geográficas dos paralelos sul 22° 11' e 22° 24' e os meridianos de longitude oeste 42° 37' e 42° 27' [9]. Possui área superficial de aproximadamente 933 km² e está distante da capital do estado cerca de 140 km, possuindo uma altitude ortométrica de 846 m em sua sede. O território do município pode ser subdividido em 3 bacias principais: bacia hidrográfica do rio Grande, bacia hidrográfica do rio Bengalas e bacia hidrográfica do rio Macaé [27].

A bacia hidrográfica do rio Bengalas possui área de aproximadamente 192 km² e abrange a zona mais urbanizada da cidade, tendo como principal curso d'água o rio que dá nome à mesma. Suas 4 principais sub-bacias são: bacia do córrego D'Antas, bacia do rio Cônego, bacia do rio Santo Antônio e bacia do rio Bengalas [12].



Figura 1. Limites municipais da cidade de Nova Friburgo contendo as bacias do rio Cônego e rio Santo Antônio.

Dentre essas sub-bacias, as bacias do rio Cônego e rio Santo Antônio destacam-se como as de maior importância, uma vez que a confluência destes rios, localizada próximo ao centro da cidade, origina o rio Bengalas. Portanto, uma análise investigativa dessas 2 bacias torna-se de substancial importância no que se refere ao monitoramento de eventuais cheias.

Na *figura 1* é mostrada a localização geográfica da cidade de Nova Friburgo e as bacias hidrográficas do rio Cônego e rio Santo Antônio.

Com base no Plano de Águas Pluviais de Nova Friburgo (PAPNF), finalizado em 2007 e disponibilizado pela prefeitura municipal, a seguir é realizada uma breve descrição sobre as 2 bacias de interesse.

2.2. Bacia hidrográfica do rio Cônego

O rio Cônego, cujo formador é o rio Caledônia, nasce na Serra da Boa Vista no Pico do Caledônia, distrito de Nova Friburgo, próximo à divisa do município com Cachoeiras de Macacu. A área drenada por este rio é de aproximadamente 29,1 km² e extensão de 10,6 km até a junção com o rio Santo Antônio. De acordo com o Anexo 06 da Lei de Uso do Solo n.º 2.249 de 8 de dezembro de 1988, a bacia do rio Cônego pertence à 1.ª Região e está inserida na zona urbana do município.

Nas proximidades da confluência com o rio Santo Antônio verifica-se urbanização das margens e a redução da largura do leito. O canal apresenta-se sem revestimento, com ocupação das margens em alguns trechos.

2.3. Bacia hidrográfica do rio Santo Antônio

O rio Santo Antônio nasce no distrito de Mury, no núcleo urbano de Teodoro de Oliveira, próximo à divisa com o município de Cachoeiras de Macacu. Segue até a confluência com o rio Cônego, já no centro da cidade de Nova Friburgo. Sua bacia apresenta área de 57,2 km² e extensão de 16,2 km, apresentando o maior índice de impermeabilização, segundo o Anexo 6 da Lei de Uso do Solo n.º 2.249 de 8 de dezembro de 1988. A calha do Santo Antônio apresenta-se sem revestimento em sua maior parte, com boas condições de manutenção. Quando há ocupação das margens, a mesma apresenta-se com revestimento em pedra argamassa e concreto.

2.4. A plataforma MOHID

O sistema de modelagem de águas MOHID vem sendo desenvolvido e aprimorado há mais de 25 anos, por uma equipe de técnicos colaboradores do centro de investigação Marine and Environmental Technology Research Center (MARETEC), pertencente ao Instituto

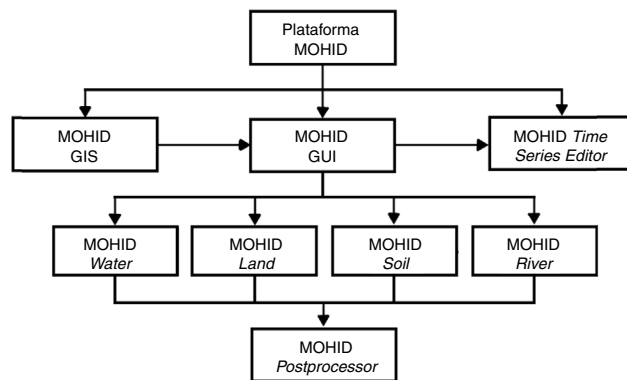


Figura 2. Fluxograma das interfaces gráficas presentes na plataforma MOHID e as ferramentas numéricas utilizadas para as simulações.

Superior Técnico à data integrado na Universidade Técnica de Lisboa [19].

O desenvolvimento da plataforma MOHID iniciou-se em 1985 com base na linguagem FORTRAN 77, sendo, desde então, submetido a um contínuo melhoramento e atualização, devido à sua aplicação em muitas pesquisas e projetos de engenharia [21]. Atualmente, a plataforma MOHID é desenvolvida em ANSI FORTRAN 95, permitindo uma independência diante do sistema operacional com o qual se pretende executar o modelo (Windows, Linux, Unix, etc.), bem como uma fácil implantação do código em qualquer ambiente [24].

Esta plataforma contém as seguintes ferramentas numéricas: MOHID Water (modelagem dos processos hidrodinâmicos, simulação de fenômenos de dispersão, propagação de ondas, transporte de sedimentos, qualidade da água/processos biogeoquímicos na coluna de água e trocas com o fundo), MOHID Land (modelo de bacia hidrográfica), MOHID River Network (simulação de redes hidrográficas) e MOHID Soil (fluxo de água através de meios porosos), as quais estão disponíveis na interface gráfica MOHID GUI [4,6,13,23].

Dentre essas ferramentas, a MOHID Land ainda não apresenta o mesmo nível de maturidade da MOHID Water, uma vez que sua implementação é recente e as aplicações estão mais voltadas para bacias hidrográficas costeiras, como a bacia do Trancão [17] e as bacias da Ribeira da Pradiela, localizadas em Portugal [5].

Para a utilização dessas ferramentas numéricas são necessários arquivos originários da interface gráfica MOHID GIS [5]. As interfaces gráficas disponibilizadas pela plataforma permitem ao usuário construir e manipular arquivos e informações para serem utilizadas em seus diferentes módulos. Essas interfaces estão construídas em formato «.net» para a elaboração do GIS do modelo (MOHID GIS), manipulação de arquivos de entrada, execução e saída (MOHID GUI), até construção das séries temporais (MOHID Time Series Editor) e visualização gráfica dos resultados (MOHID Post Processor). Na *figura 2* é apresentado o fluxograma das interfaces gráficas e ferramentas numéricas disponíveis na plataforma MOHID.

Neste trabalho é utilizada a interface gráfica MOHID Studio, desenvolvida pela empresa Action Modulers (<http://www.actionmodulers.com>). Esta interface é um sistema integrado que permite ao usuário gerir e editar arquivos de dados, criar simulações e analisar os resultados do modelo. Além disso, os dados do mapa podem ser exibidos através de um sistema GIS integrado, assim como dados de séries temporais, os quais são exibidos em uma interface de visualização gráfica integrada [3].

Outro fator importante a ser destacado na interface MOHID Studio é o conjunto de ferramentas que permite ao usuário criar arquivos de dados e o módulo especial, que permite o

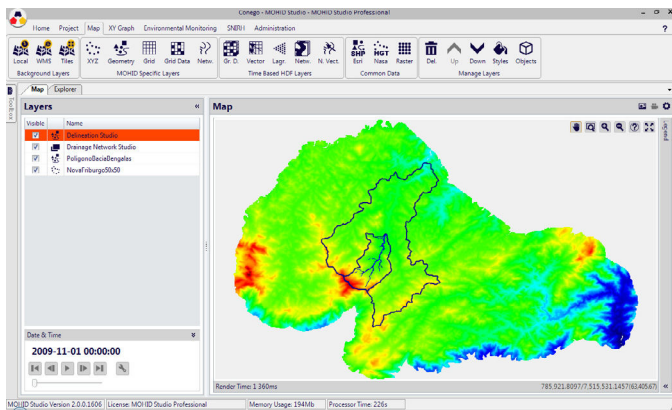


Figura 3. Interface MOHID Studio e os ambientes Map (sistemas de informações geográficas) e Explorer (ferramentas numéricas).

gerenciamento de dados de campanhas de campo e/ou estações automáticas [3]. Na [figura 3](#) é mostrada a tela inicial da interface MOHID Studio e algumas de suas funcionalidades

3. Construção do modelo digital do terreno

Nesta seção é apresentada a metodologia desenvolvida para a delimitação das bacias hidrográficas do rio Cônego e rio Santo Antônio, localizadas em Nova Friburgo, RJ, bem como a rede de drenagem que as compõem por meio da plataforma MOHID Studio, versão 2.0, interface gráfica MOHID GIS. A interface MOHID GIS é um sistema de informações geográficas na qual se pode manipular e gerir os dados das variáveis de tempo e espaço requeridos ou produzidos pelos programas numéricos da plataforma MOHID [4].

Com o intuito de verificar a consistência e confiabilidade dos processos executados, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos pela interface MOHID GIS na delimitação das bacias hidrográficas em análise e suas redes de drenagem com o software ArcGIS, versão 10, contendo a extensão HEC-GeoRAS, versão 10, que é uma extensão criada para ser usada no processamento de dados geoespaciais, desenvolvida dentro de uma cooperação entre o HEC e o Environmental Systems Research Institute (ESRI), usando fundos do United States Army Corps of Engineers (USACE) para pesquisa e desenvolvimento [31].

O uso do software ArcGIS contendo a extensão HEC-GeoRAS na comparação com os resultados obtidos pela interface MOHID GIS justifica-se pelo fato de todas as análises contidas no PAPNF terem sido realizadas com base no referido software. Além disso, o ArcGIS é um software amplamente utilizado em estudos de geo referenciamento, tendo apresentado resultados satisfatórios e confiáveis na construção de MDT [7,10,18,25].

As informações topográficas do município de Nova Friburgo foram obtidas por meio de arquivos disponibilizados pela prefeitura da cidade, contidas no PAPNF realizado em 2007, as quais são originárias de cartas planialtimétricas vetorizadas na escala 1:50.000 fornecidas pelo IBGE, compiladas em arquivos no formato «DWG».

Cabe ressaltar que o procedimento descrito a seguir, apesar de seu enfoque voltado para as bacias dos rios Cônego e Santo Antônio, também pode ser estendido para qualquer bacia hidrográfica da cidade de Nova Friburgo, ou, ainda, para qualquer bacia hidrográfica de interesse global, sendo necessárias apenas as informações topográficas da região de interesse.

3.1. Manipulação dos dados utilizando o software ArcGIS

As informações topográficas do município de Nova Friburgo foram obtidas por meio de arquivos de curvas de nível com equidistância de 20 m no formato DWG. Como a plataforma MOHID

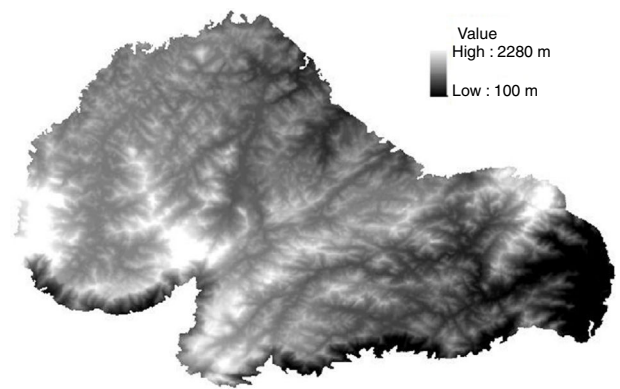


Figura 4. Representação dos dados do arquivo raster construído no ArcGIS decorrente do arquivo TIN.

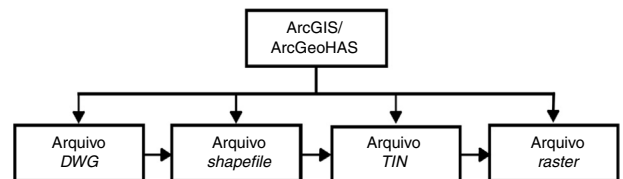


Figura 5. Fluxograma dos processos de conversão dos arquivos necessários à interface MOHID GIS.

não «lê» arquivos nesse formato, os mesmos foram convertidos para o formato shapefile utilizando-se o ArcGIS 10.

De posse desse arquivo shapefile contendo as curvas de nível, ainda no software ArcGIS, criou-se então um arquivo triangulated irregular network (TIN), o qual foi convertido para o formato raster com tamanho de célula 50×50 m. Por fim, este arquivo raster foi exportado para o formato ASCII Raster. Este último, em formato acessível pela interface MOHID GIS.

A [figura 4](#) mostra a representação dos dados do arquivo em formato raster gerado pelo ArcGIS, enquanto a [figura 5](#) apresenta o fluxograma das etapas necessárias para a conversão do arquivo no formato DWG em arquivo ASCII Raster.

3.2. Manipulação dos dados utilizando a interface MOHID GIS

Na interface MOHID GIS foi realizada a importação do arquivo ASCII Raster e a conversão do mesmo em um arquivo XYZ Points, necessário para a construção do MDT hidrologicamente consistente, o qual, posteriormente, é usado pela ferramenta MOHID Land no processo de simulação de eventos de ondas cheias.

Como a ferramenta MOHID Land é um modelo espacialmente distribuído e de regime variável, sua aplicação passa pela conversão de todos os dados de entrada para uma malha computacional (MDT, por exemplo) ou sob uma forma evolutiva no tempo [4].

Visando o posterior desenvolvimento de um modelo robusto na ferramenta MOHID Land para as bacias do rio Cônego e rio Santo Antônio – onde as mesmas possam ser analisadas de maneira independente, também foram construídas 2 malhas regulares com 50 m^2 de resolução. Esses arquivos deram origem aos modelos digitais de terreno, os quais devem passar pelo processo de remoção das possíveis depressões que porventura possam vir a conter, permitindo que o terreno digital se assemelhe com o meio físico, evitando, assim, o surgimento/desaparecimento de canais na rede de drenagem ou, ainda, locais de armazenamento indevidos.

Na versão MOHID Studio, a remoção de depressões é realizada de maneira iterativa, onde cada célula do arquivo contendo o MDT é analisada, levando-se em consideração as células vizinhas, de modo a evitar que depressões espúrias inexistentes no meio físico, como por exemplo, sumidouros que possam aparecer no arquivo digital [28].

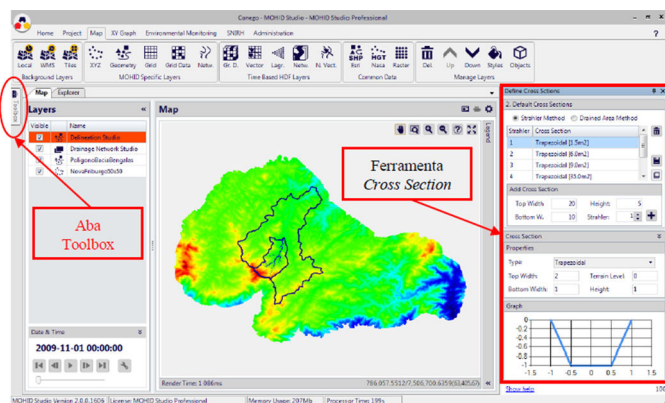


Figura 6. Ferramenta de construção das seções transversais da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica.

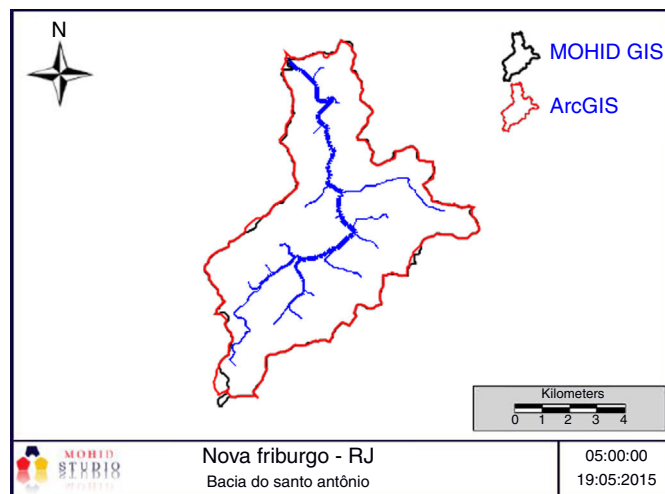


Figura 8. Polígono delimitador da bacia do rio Santo Antônio construído pela interface MOHID GIS e pelo software ArcGIS 10.

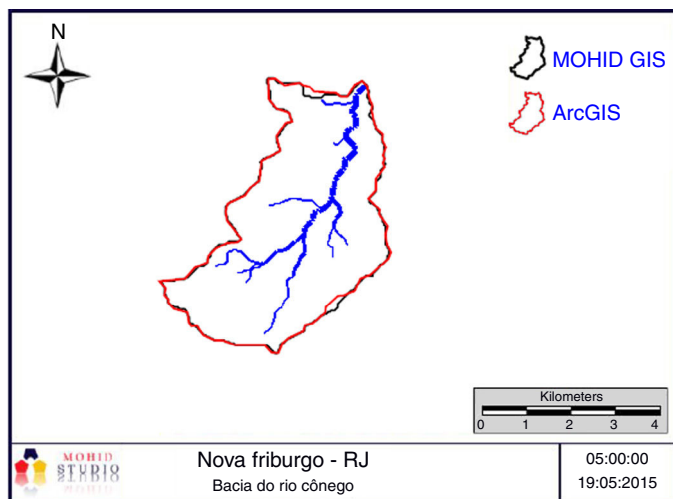


Figura 7. Polígono delimitador da bacia do rio Cônego construído pela interface MOHID GIS e pelo software ArcGIS 10.

Posteriormente, com base no MDT, livre de depressões, deve-se realizar a construção dos arquivos referentes à declividade das células, direção do fluxo, área drenada, rede de drenagem e delimitação das bacias hidrográficas de interesse. Na interface MOHID GIS a delimitação de uma bacia hidrográfica pode ser feita de 2 formas: por meio da determinação de um ponto (célula) de saída na rede de drenagem – considerado o exutório da bacia – ou pela área mínima a partir da qual irá começar a formação dos canais. Neste trabalho adotou-se a primeira opção. Paralelamente, também foi realizada a construção do polígono delimitador das bacias do rio Cônego e rio Santo Antônio e redes de drenagem no software ArcGIS, de modo a verificar a confiabilidade dos resultados obtidos na plataforma MOHID.

Por fim, o próximo passo é a construção das seções transversais para cada nó dos canais de drenagem, as quais podem ser obtidas por meio da ferramenta Cross Section Definition, localizada em Toolbox => MOHID Land => Cross Sections, situada na lateral esquerda da aba Map. Essa ferramenta permite ao usuário construir seções transversais de 2 maneiras distintas: relacionadas ao número de Strahler ou à área drenada, sendo de geometria trapezoidal.

Para essa finalidade, deve-se informar a largura do topo, do fundo e altura da seção para cada um dos números de Strahler que a rede contém ou para as áreas drenadas, de acordo com a escolha do usuário. Geometrias triangulares e retangulares também podem ser criadas, bastando, respectivamente, informar a largura do fundo como «0» ou, então, de mesma medida do topo [3].

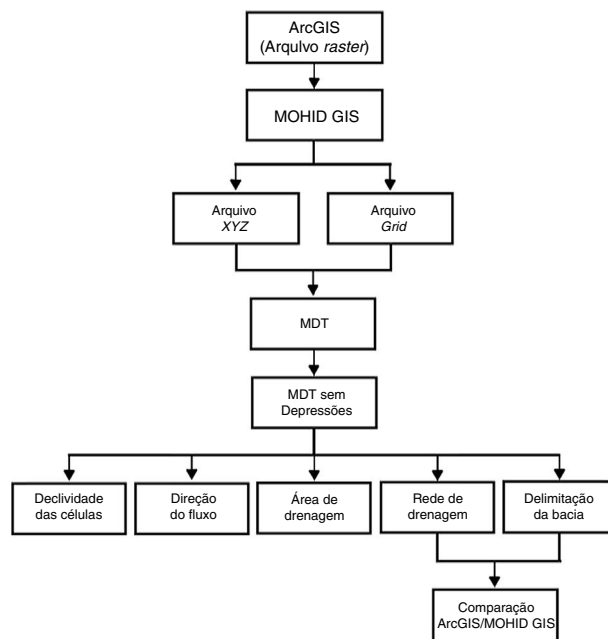


Figura 9. Fluxograma dos processos realizados na interface MOHID GIS para a delimitação das bacias do rio Cônego e rio Santo Antônio e a construção de suas redes de drenagem, tendo como base o arquivo ASCII Raster criado no software ArcGIS.

O usuário pode ainda acompanhar o layout das seções transversais construídas em um ambiente gráfico que acompanha a ferramenta, localizado no lado direito. Após esse procedimento, basta salvar o arquivo contendo a rede de drenagem.

Na figura 6 é apresentada a tela da plataforma MOHID contendo a ferramenta de seção transversal e a visualização das construções realizadas.

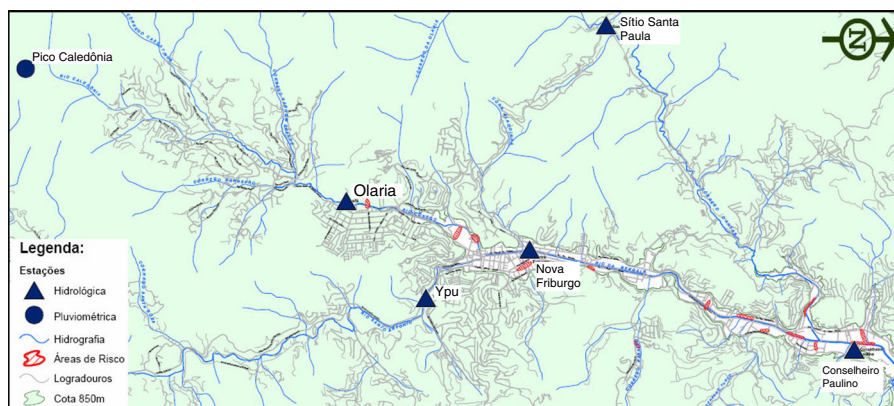
As figuras 7 e 8 mostram a comparação dos resultados obtidos pela interface MOHID GIS e o ArcGIS nas construções citadas acima. Observa-se que, utilizando-se o arquivo sem depressões construído na versão MOHID Studio, foi possível obter uma boa aproximação para o polígono delimitador das bacias do rio Cônego e rio Santo Antônio, tendo apenas um local de maior discrepância em cada uma das construções, como destacado nas figuras em análise.

Já a figura 9 apresenta o fluxograma dos passos realizados na interface MOHID GIS para a construção do MDT, contendo a

Tabela 1

Coordenadas das estações telemétricas localizadas na bacia do rio Bengalas

Estação	Latitude	Longitude	Rio monitorado
Conselheiro Paulino	22°13'42,47"S	42°31'12,49"W	Rio Bengalas
Olaria	22°18'31,83"S	42°32'31,96"W	Rio Cônego
Pico Caledônia	22°21'33,11"S	42°34'02,52"W	–
Nova Friburgo (Suspiro)	22°16'46,43"S	42°32'05,36"W	Rio Bengalas
Sítio Santa Paula (Venda das Pedras)	22°16'42,47"S	42°34'53,51"W	Córrego D'Antas
Ypu	22°17'45,09"S	42°31'35,41"W	Rio Santo Antônio

**Figura 10.** Estações telemétricas do Sistema de Alerta de Cheias localizadas na bacia do rio Bengalas [32].

delimitação das bacias hidrográficas e suas respectivas redes de drenagem.

4. Obtenção dos dados experimentais

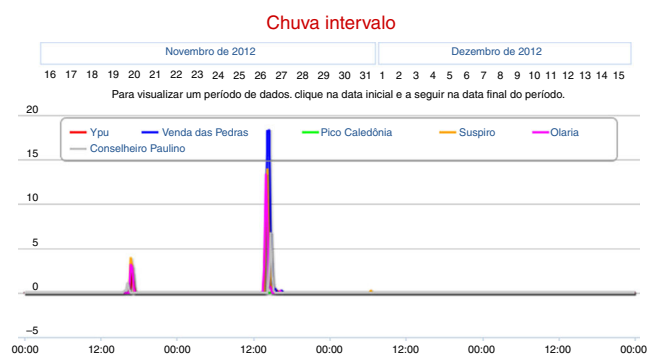
De acordo com a Defesa Civil Nacional, no ano de 2009 foram registrados 1.406 desastres no Brasil, sendo o estado do RJ um dos 6 estados brasileiros com maior número de ocorrências no período de 2007–2010, ficando em terceiro lugar em 2007 e segundo lugar em 2009 [20].

Ressalta-se ainda que, em janeiro de 2011, a cidade de Nova Friburgo sofreu com intensas chuvas e deslizamentos de encostas, levando a severos danos materiais e a perda de vidas. Diante desse cenário, nos últimos anos, o estado do RJ vem trabalhando no aperfeiçoamento da gestão estadual de riscos a desastres naturais, com o intuito de prevenir, preparar e responder a esses eventos [32]. Neste contexto, cabe ao INEA o papel de gestão de riscos associados a inundações, incêndios florestais, acidentes com produtos perigosos, entre outros.

No que diz respeito aos eventos de inundações, o INEA criou o Sistema de Alerta de Cheias, cujo objetivo é alertar as populações ribeirinhas sobre riscos de ocorrência de inundações, através da comunicação com as defesas civis municipais em todo o estado.

A implantação desse sistema teve início em outubro de 2007, com a instalação de 10 estações telemétricas na região da Baixada Fluminense, e foi expandido para a região serrana do estado, com a instalação, em dezembro de 2008, de mais 6 estações telemétricas na bacia hidrográfica do rio Bengalas, com o objetivo de proteger a cidade de Nova Friburgo [32]. Particularmente, as estações telemétricas distribuídas sobre a bacia do rio Bengalas dispõem de informações sobre a precipitação (medida em milímetros) e altura/nível da lâmina de água (medida em metros).

Na [tabela 1](#) estão descritas as coordenadas de localização das referidas estações, bem como os rios a elas associados. Já a [figura 10](#) apresenta a localização dessas coordenadas na rede de drenagem da bacia do rio Bengalas, onde é possível observar as 2 estações

**Figura 11.** Índices de precipitação (mm) medidos nas estações telemétricas do Sistema de Alerta de Cheias localizadas na bacia do rio Bengalas.

Fonte: <http://inea.infoper.net/inea/>.

localizadas nas bacias hidrográficas de interesse, a saber: bacia do rio Cônego e bacia do rio Santo Antônio.

No Sistema de Alerta de Cheias, o monitoramento das precipitações e níveis de água é realizado de forma contínua, durante 24 horas por dia, e os dados podem ser obtidos diretamente no site <http://inea.infoper.net/inea/>, os quais são atualizados em intervalos de 15 minutos.

Esses dados podem ser obtidos para cada estação de forma isolada ou ainda para todas de uma única vez (em um único plano gráfico). Além disso, é possível obter as informações sobre as chuvas acumuladas em um dado período, bem como a cota de transbordamento da rede de drenagem em cada uma das referidas estações. Também é possível fazer um levantamento de uma série histórica de qualquer período, sendo necessário apenas clicar nos dias de início e fim do período desejado. O site disponibiliza a opção de exportação dos dados de precipitação e vazão em formato “xls”, os quais são utilizados nas simulações numéricas. A título de exemplo, na [figura 11](#) são mostrados os índices de precipitação ocorridos na bacia do rio Bengalas referentes às 6 estações telemétricas

instaladas pelo INEA durante o período das 00:00 horas de 28 de novembro de 2012 até às 00:00 horas do dia um de dezembro do mesmo ano.

5. Conclusões

Neste trabalho é apresentada a metodologia para a construção de um MDT hidrológicamente consistente por meio de GIS. Mais especificamente, foi verificada a utilização da plataforma MOHID Studio – interface gráfica MOHID GIS – na delimitação da rede de drenagem do município de Nova Friburgo e as bacias hidrográficas localizadas em seu território, notadamente as bacias do rio Cônego e rio Santo Antônio, os quais são os formadores do rio Bengalas, ambos situados na área mais urbanizada da referida cidade.

Ao se analisar os resultados obtidos, verifica-se que a interface MOHID GIS foi capaz de modelar satisfatoriamente as bacias do rio Cônego e do rio Santo Antônio, podendo construir a rede de drenagem e a delimitação da bacia dos referidos rios com uma boa precisão, como pode ser visto nas figuras 7 e 8, onde há uma boa similaridade entre as construções realizadas no ArcGis 10 e na plataforma MOHID.

Além disso, também foi descrito o procedimento para obtenção dos dados experimentais de precipitação e níveis de água na rede de drenagem da bacia do rio Bengalas e, conseqüentemente, nas bacias do rio Cônego e rio Santo Antônio. É possível concluir que trata-se de um procedimento eficiente e de substancial relevância, uma vez que, a partir destas informações, é possível construir séries históricas, assim como curvas-chave, relacionando a cota do escoamento fluvial com a vazão escoada e ano hidrológico de uma região de interesse.

Na segunda parte deste trabalho é apresentada a análise de sensibilidade e a estimativa de parâmetros hidrológicos empregando a malha computacional do MDT aqui descrito.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro proveniente da CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e da FAPERJ, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do estado do Rio de Janeiro.

Referências

- [1] P. Berry, S. Bonduá, V. Bortolotti, C. Cormio, E.M. Vasini, A GIS-based open source pre-processor for georesources numerical modeling, EMS 62 (2014) 52–64.
- [2] Brasil. Plano Nacional de Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente/Secretaria dos Recursos Hídricos, Brasília, 2006.
- [3] F. Braunschweig, L. Fernandes, F. Lourenço, User Guide for MOHID Studio Express and Professional Edition, Portugal, Action Modulers, 2012.
- [4] F. Braunschweig, L. Fernandez, MOHID. Manual do Usuário, Campos dos Goytagazes, Essentia Editora, 2010.
- [5] F. Braunschweig, C.P. Leitão, L. Fernandes, P. Pina, R. Neves, The object oriented design of the integrated modelling system MOHID, in: 15th International Conference on Computational Methods in Water Resources, Chapel Hill, USA, 2004.

- [6] F. Braunschweig, A.R. Trancoso, M. Gamboa, M.J. Franca, Análise de risco de cheias utilizando um modelo hidrológico distribuído em regime variável, in: In 10th Congresso da Água, Alvor, 2010.
- [7] C.A.C. Cardoso, H.C.T. Dias, C.P.B. Soares, S.V. Martins, Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ, SIF 30 (2) (2006) 241–248.
- [8] A.M.T.M. Cordeiro Gestão dos recursos hídricos no Brasil do ponto de vista legal, 2010 [consultado 7 Ago 2013]. Disponível em: www.hidroamazon.ufam.edu.br/pesquisa6.pdf
- [9] E.F.G. Correia Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, Utilizando o Potencial de Geotecnologias na Definição de Áreas de Risco de Inundação. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio Janeiro (UERJ), 2011.
- [10] S.B. Corvalán, G.J. García, N.R. Caetano, Inventário ecoturístico da bacia do rio Passa-Cinco-SP, com o auxílio de geotecnologias, Geociências 26 (3) (2007) 203–213.
- [11] EcoEco. Bacias Hidrográficas Nova gestão de recursos hídricos. In 1st Encontro Nacional da EcoEco. Campinas-SP, 1996.
- [12] FCTH, Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. Plano de Águas Pluviais de Nova Friburgo-PAPNF. São Paulo, 2007.
- [13] R. Fernandes, Modelação Operacional no Estuário do Tejo. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST), Lisboa, Portugal, 2005.
- [14] W.E. Fleenor, M.R. Jensen, Evaluation of numerical models. . . HEC-RAS and DHI-MIKE 11, Draft version submitted to ASCE (2003).
- [15] J. Garbrecht, L.W. Martz, Digital elevation model issues in water resources modeling, in: 19th Esri Users Conference, San Diego, CA, 1999.
- [16] L.E. Johnson, Geographic Information Systems in Water Resources Engineering, CRC Press, 2008.
- [17] P.C. Leitão, F., Braunschweig, L., Fernandes, R., Neves, P. Galvão Integration of MOHID model and tools with SWAT model. In 4th International Swat Conference, 2007.
- [18] F.B. Lopes, E.M. Andrade, A.S. Teixeira, R.F. Caitano, L.C.G. Chaves, Uso de geoprocessamento na estimativa de perda de solo em microbacia hidrográfica do semiárido brasileiro, Revista Agro@mbiente On-line 5 (2011) 88–96.
- [19] Maretec. MOHID. Descrição do MOHID. Essentia Editora: Campos dos Goytagazes, 2012.
- [20] Ministério da Integração Nacional (MI). Desastres Notificados a Secretaria Nacional de Defesa Civil/Ministério da Integração Nacional (SEDEC/MI) [consultado 3 Mar 2011]. Disponível em: <http://www.defesacivil.gov.br/desastres/desastres.asp>
- [21] R.J.J. NEVES. Étude Experimentale et Modélisation des Circulations Transitoire et Résiduelle dans l'Estuaire du Sado. Tese de Doutorado, Universidade de Liège, 1985.
- [22] F.L. Ogden, J. Garbrecht, P.A. de Barry, L.E. Johnson, GIS and distributed watershed models. II: Modules, interfaces, and models, ASCE 6 (6) (2001).
- [23] C.M.D. Pessanha, J. Lugon Jr., M.I.P. Ferreira, P.R.N. Souza, H.M.C. Hora, Uso de modelagem computacional aplicada à gestão sanitário-ambiental: uma proposta de adaptação da plataforma MOHID Water para corpos léticos aplicada à lagoa Imboacica, Macaé-RJ, BOAL 5 (2) (2011) 45–70.
- [24] C.H.O. Precioso, F.A. Kalas, P.P.G.W. Rodrigues, J. Lugon Jr., Avaliação da variabilidade de parâmetros ambientais numa lagoa urbana (Campos dos Goytacazes, RJ) com auxílio do sistema MOHID, BOAL 4 (2010) 185–204.
- [25] E.J. Ramme, C.M. Krüger, Delimitação de bacias hidrográficas com auxílio de geoprocessamento, in: In 17th Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, 2007.
- [26] R. Sitzenfrei, M. Möderl, W. Rauch, Automatic generation of water distribution systems based on GIS data, EMS 47 (2013) 138–147.
- [27] W.R. Telles Previsão do Comportamento Hidráulico de um Rio com Base na Estimativa de Coeficientes que Controlam seu Escoamento. Estudo de Caso: Rio Bengalas, Nova Friburgo-RJ. Tese de Doutorado, Universidade do Estado do Rio Janeiro (UERJ), 2014.
- [28] W.R. Telles, A.J. Silva Neto, P.P.G.W. Rodrigues Avaliação do Sistema de Modelagem MOHID na delimitação de bacias hidrográficas. In Congresso de Matemática Aplicada e Computacional, Natal, 2012.
- [29] A. Tribe, Automated recognition of Valley Heads from digital elevation models, ESPL 16 (1992) 33–49.
- [30] C.E.M. Tucci. Modelos Hidrológicos Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. pp. 669.
- [31] Usace. HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HECRAS Using ArcGIS–User's Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2010.
- [32] L.P.S. Viana, J.E.F. Farias Júnior, C.L. Oliveira, Sistema de Alerta de Cheias do Estado do Rio de Janeiro. In 18th Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, RS, 2010.