



---

# **Manual Q-Hidropixel**

Versão 4.0.2

---

2025

João Vitor Dias da Silva Lima

Dário Macedo Lima

Adriano Rolim da Paz

## APRESENTAÇÃO

Bem-vindo(a) ao Q-Hidropixel!

Este manual apresenta o *plugin* do modelo hidrológico chuva-vazão Hidropixel para o QGIS. O Hidropixel é um modelo hidrológico distribuído por pixel. Ele estima o tempo de viagem do escoamento até o exutório para cada pixel do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica. Em seguida, calcula a chuva excedente em cada pixel utilizando o método *Curve Number* do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS-CN). Por fim, o hidrograma final da bacia hidrográfica é obtido pela superposição dos hidrogramas gerados individualmente por cada pixel (Costa *et al.*, 2019).

A versão do modelo Hidropixel apresentada no *plugin* é a Hidropixel – *Distributed Linear Reservoirs* (DLR), apresentada em Lima *et al.* (2024). No Hidropixel-DLR, o hidrograma final é amortecido devido à presença de reservatórios lineares associados a cada pixel do MDE.

O *plugin* facilita a aplicação do modelo em estudos hidrológicos, integrando ferramentas para configurar, executar e analisar simulações hidrológicas diretamente em um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

O Hidropixel foi empregado em diversos estudos relacionados à simulação hidrológica, além dos citados, em Veeck *et al.* (2020), Sousa *et al.* (2023) e Pereira *et al.* (2024).

As seções seguintes deste manual abordam todos os aspectos do Q-Hidropixel, como os requisitos do sistema, o download e a instalação, os aspectos da interface gráfica, a preparação de dados, a configuração do modelo e a visualização de resultados.

## SUMÁRIO

<b>1. REQUISITOS DO SISTEMA .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Separador de casas decimais .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Dependências.....</b>	<b>6</b>
<b>1.4 Compatibilidade com o QGIS .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4 Requisitos de hardware.....</b>	<b>6</b>
<b>2. DOWNLOAD, INSTALAÇÃO E ATUALIZAÇÕES.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Download.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Instalação.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 Atualização.....</b>	<b>10</b>
2.3.1 Desinstalação via QGIS.....	11
2.3.2 Desinstalação manual .....	12
<b>3. INTERFACE GRÁFICA DO Q-HIDROPIXEL.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Paginação.....</b>	<b>16</b>
3.1.1 <i>Configuration</i> .....	16
3.1.2 <i>Input Data</i> .....	18
3.1.3 <i>Data Validation Tool</i> .....	19
3.1.4 <i>Run</i> .....	21
3.1.5 <i>Rainfall Interpolation</i> .....	23
<b>3.2 Funcionalidades gerais .....</b>	<b>23</b>
3.2.1 <i>Working Folder</i> .....	23
3.2.2 Importação de arquivos .....	24
3.2.3 Exportação de arquivos .....	26
3.2.4 Gerenciamento de projetos .....	29
Salvamento de projetos.....	29
Leitura de projetos .....	32
3.2.5 <i>Tooltips</i> .....	33
3.2.6 Tabelas.....	35
<b>4. SIMULAÇÃO COM O Q-HIDROPIXEL .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 <i>Flow Travel Time</i>.....</b>	<b>40</b>
4.1.1 Descrição do algoritmo.....	40
4.1.2 <i>Configuration</i> .....	41
General information.....	42
Flow directions code.....	43
River channels without cross sectional data .....	44

<b>4.1.3 Input Data.....</b>	<b>46</b>
Watershed delineation .....	47
Digital Elevation Model (DEM).....	48
Flow directions .....	49
River Drainage Network (RDN).....	49
RDN segmentation into classes .....	50
Flow accumulation drainage area (km <sup>2</sup> ) .....	50
Characteristics of the RDN classes.....	51
Land use/land cover (LULC) map.....	51
Manning roughness coefficient for each LULC .....	52
Rainfall depth for 24-h duration .....	52
<b>4.1.4 Data Validation Tool.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1.5 Run.....</b>	<b>54</b>
Slope relative to downstream pixel (m/m).....	55
All river segments with similar hydrologic conditions.....	55
Hydraulic radius, roughness and slope for all river segments .....	55
River cross-sectional area calculated by regional curves (m <sup>2</sup> ) .....	56
River bankfull width calculated by regional curves (m) .....	56
Flow travel time (min).....	56
<b>4.2 Excess Rainfall .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2.1 Descrição do algoritmo.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2.2 Configuration .....</b>	<b>58</b>
Initial abstraction ( $\lambda$ ) .....	58
Rainfall definition.....	58
<b>4.2.2 Rainfall Interpolation .....</b>	<b>59</b>
Input files.....	60
Output files .....	61
<b>4.2.3 Input Data .....</b>	<b>61</b>
Watershed delineation .....	62
Curve Number map .....	62
Areal average rainfall .....	63
Spatially distributed rainfall .....	63
<b>4.2.4 Data Validation Tool.....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.5 Run.....</b>	<b>64</b>
Map of watershed pixels ID.....	65
Map of maximum potential retention (mm) .....	65

Map of initial abstraction (mm).....	66
Map of total rainfall (mm).....	66
Map of total excess rainfall (mm).....	66
Excess hyetographs per pixel (mm).....	66
<b>4.3 Flow Routing .....</b>	<b>66</b>
4.3.1 Discrição do algoritmo .....	66
4.3.2 Configuration .....	68
4.3.3 Input Data.....	69
Watershed delineation .....	70
Flow travel time.....	70
Excess hyetographs per pixel (mm).....	71
Total excess rainfall per pixel (mm).....	71
Watershed into classes.....	71
4.3.4 Data Validation Tool .....	71
4.3.5 Run.....	73
Map of resulting peak discharge.....	73
Map of resulting runoff volume (m <sup>3</sup> ).....	74
Resulting watershed hydrograph (m <sup>3</sup> /s).....	74
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>

## 1. REQUISITOS DO SISTEMA

O Q-Hidropixel foi desenvolvido com duas linguagens de programação, Python (versão 3.9.5) e VisualBasic.net. Toda a interface do complemento, conexão com a API (*Application Programming Interface*) do QGIS, leitura, escrita e exposição dos resultados é realizada por meio do Python. O processamento interno do modelo é feito em VisualBasic.net. Por isso, os requisitos necessários do Q-Hidropixel são apresentados na sequência.

### 1.1 Sistema operacional

O Q-Hidropixel na versão atual é exclusivo do sistema operacional Windows. Está em desenvolvimento a versão Q-Hidropixel compatível com sistema operacional macOS.

### 1.2 Separador de casas decimais

O sistema operacional deve ser configurado para utilizar o ponto como separador de casas decimais, e não a vírgula, ficando o separador da casa de milhar como vírgula. Caso contrário, ocorrerão erros ao realizar simulações com o modelo. No sistema operacional *Windows*, o delimitador pode ser alterado nas “Configurações Regionais”.

### 1.3 Dependências

O Q-Hidropixel utiliza alguns pacotes, sendo os principais *GDAL*, *Numpy* e *Matplotlib*. O *GDAL* (*Geospatial Data Abstraction Library*) é essencial para a leitura de arquivos TIFF (.tif) e sua conversão em formatos raster compatíveis com o plugin. Já o *Numpy* é fundamental para realizar operações baseadas em *arrays*, possibilitando os cálculos pixel a pixel nos dados *raster* (objetos matriciais). Quanto ao *Matplotlib*, suas funções são utilizadas para plotagem de alguns resultados do Q-Hidropixel.

Todos os pacotes citados são nativos do QGIS.

### 1.4 Compatibilidade com o QGIS

Recomenda-se instalar o Q-Hidropixel a partir da versão 3.28.0 – Firenze do QGIS. Versões mais antigas podem limitar o funcionamento adequado do complemento.

### 1.4 Requisitos de hardware

O *plugin* Q-Hidropixel segue os requisitos de sistema do QGIS. Entretanto, é importante destacar que configurações de *hardware* mais potentes podem reduzir significativamente o tempo de

processamento das simulações com o Q-Hidropixel. A Tabela 1 apresenta os requisitos mínimos e recomendados para o plugin/QGIS.

Tabela 1 – Requisitos mínimos e recomendados de hardware do QGIS.

Componentes	<i>Mínimo</i>	<i>Recomendado</i>
<i>Processador</i>	Core i3 2.7Ghz ou similar	Core i7 3.5Ghz ou similar
<i>Memória RAM</i>	2Gb	8 Gb ou mais
<i>Disco rígido</i>	500 Gb SATA ou similar	SSD de 128Gb ou 500Gb SATA ou similar
<i>Memória de vídeo</i>	1 Gb	2 Gb ou mais
<i>Sistema operacional</i>	Windows 7-11	Windows 7-11

Fonte: Falasy, 2022.

## 2. DOWNLOAD, INSTALAÇÃO E ATUALIZAÇÕES

Nesta seção, são apresentados os meios para realizar o download do Q-Hidropixel, bem como a forma de instalação e atualização.

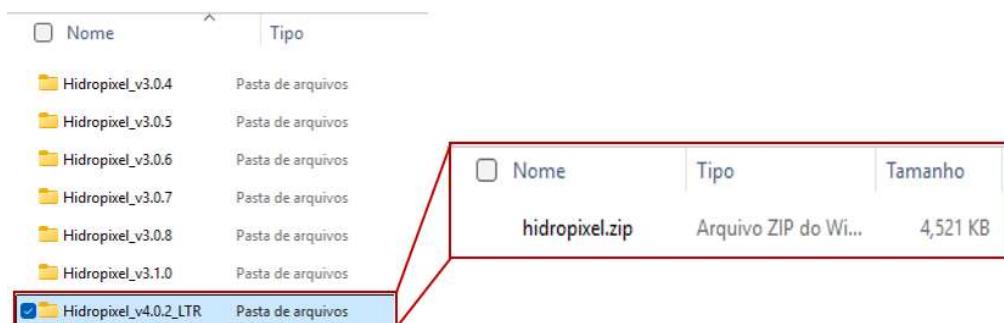
Até versão atual (4.0.2), o Q-Hidropixel não está presente no repositório de complementos do QGIS. Por isso, a instalação difere do padrão dos plugins inseridos no QGIS e se recomenda seguir os passos com cautela.

### 2.1 Download

As versões do Q-Hidropixel estão disponíveis para download na pasta do OneDrive disponibilizada junto com este manual. Nesse repositório existem duas marcações para as versões: *Long Term Release* (LTR) e *Last Version* (LV). A primeira representa a versão mais estável do *plugin*, enquanto a LV caracteriza a última lançada.

Após finalizar o download, deve-se descompactar a pasta da versão (Hidropixel\_vX.Y.Z) que contém o arquivo “hidropixel.zip” a ser adicionado (Figura 1) ao QGIS para instalação, conforme próxima etapa.

Figura 1 – Diretório das versões e arquivo hidropixel.zip.

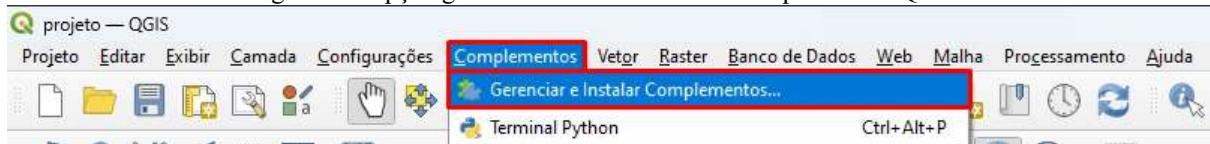


### 2.2 Instalação

Após realizar o download da versão desejada do Q-Hidropixel, deve-se instalar o *plugin* como mostra a sequência abaixo.

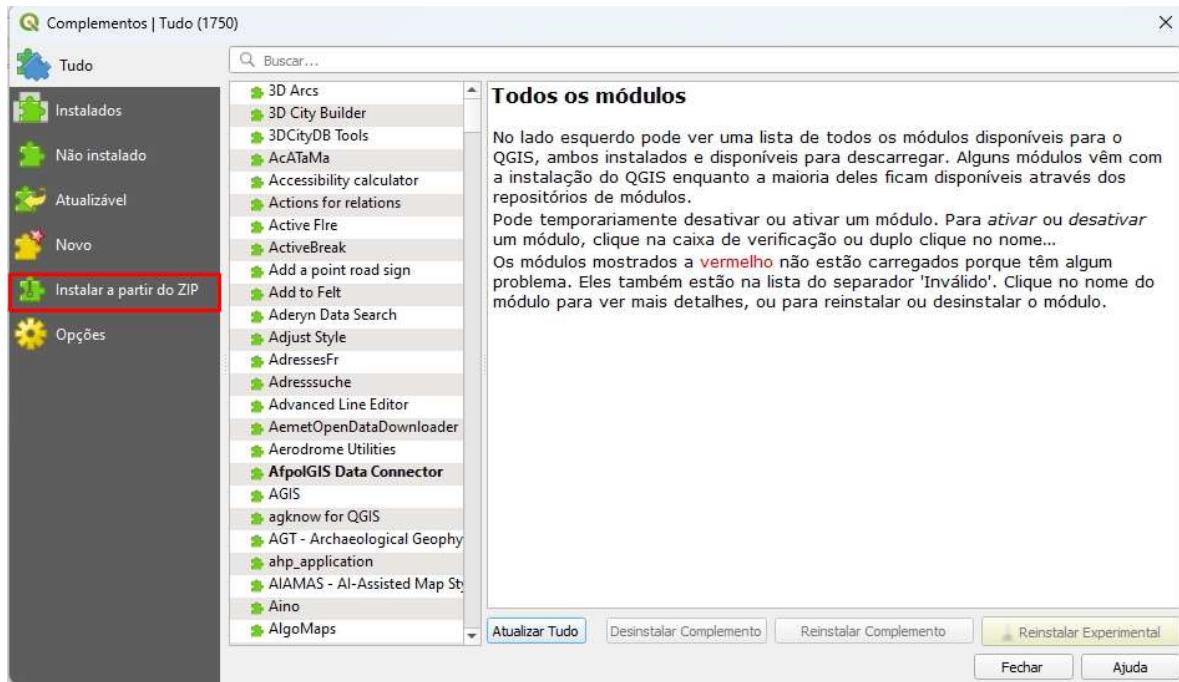
- i. No Menu Barra de Ferramentas do QGIS, selecionar “**Complementos**” e “**Gerenciar e Instalar Complementos**” como destacado na Figura 2.

Figura 2 – Opção gerenciador e instalador de complementos QGIS.



- ii. Na janela “Complementos”, selecionar a opção “Instalar a partir do ZIP”, como mostra a Figura 3.

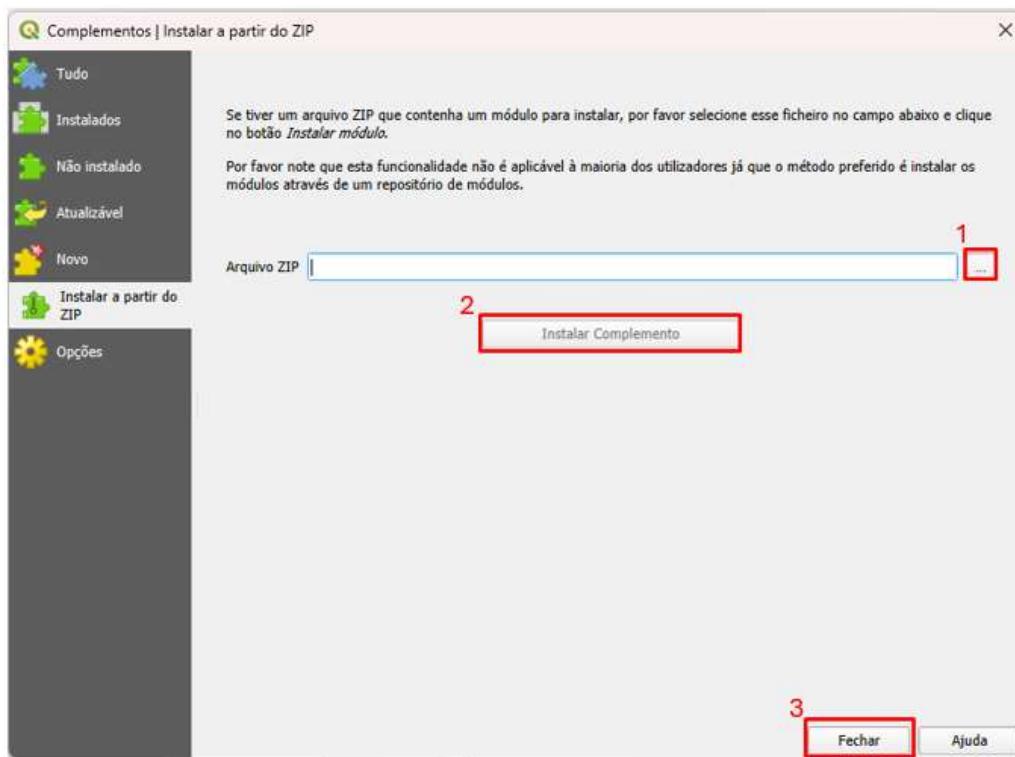
Figura 3 - Opção de instalação do plugin a partir de um arquivo ZIP.



- iii. Ainda na janela “Complementos”, em “Instalar a partir do ZIP”, deve-se clicar no botão indicado pelo número 1 (Figura 4) e então selecionar o arquivo ZIP baixado: hidropixel.ZIP – o nome do arquivo deve ser esse, caso contrário a instalação falhará.

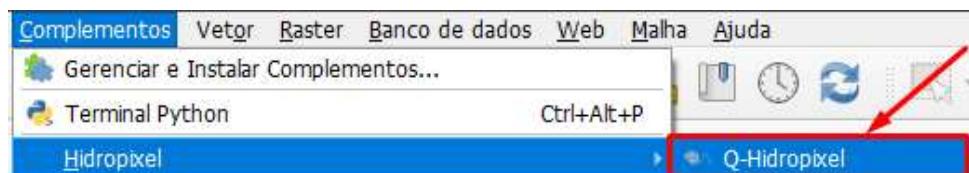
Em seguida, deve-se clicar em “Instalar Complemento” (indicado pelo número 2 na Figura 4). Por fim, clica-se no botão Fechar para voltar à tela inicial do QGIS.

Figura 4 - Seleção do arquivo hidropixel.ZIP contendo o plugin para instalação.



- iv. Após a execução dos passos anteriores, o Q-Hidropixel surgirá no menu “**Complementos**”, na barra de opções (Figura 5).

Figura 5 – Acesso ao Q-Hidropixel na interface principal do QGIS na opção Complementos.



## 2.3 Atualização

Para atualizar a versão do Q-Hidropixel, deve-se inicialmente acompanhar o repositório de versões, descrito no item 2.1. Caso identifique que há uma versão mais atual do Q-Hidropixel e deseje instalá-la, deve-se realizar o download e instalação da nova versão.

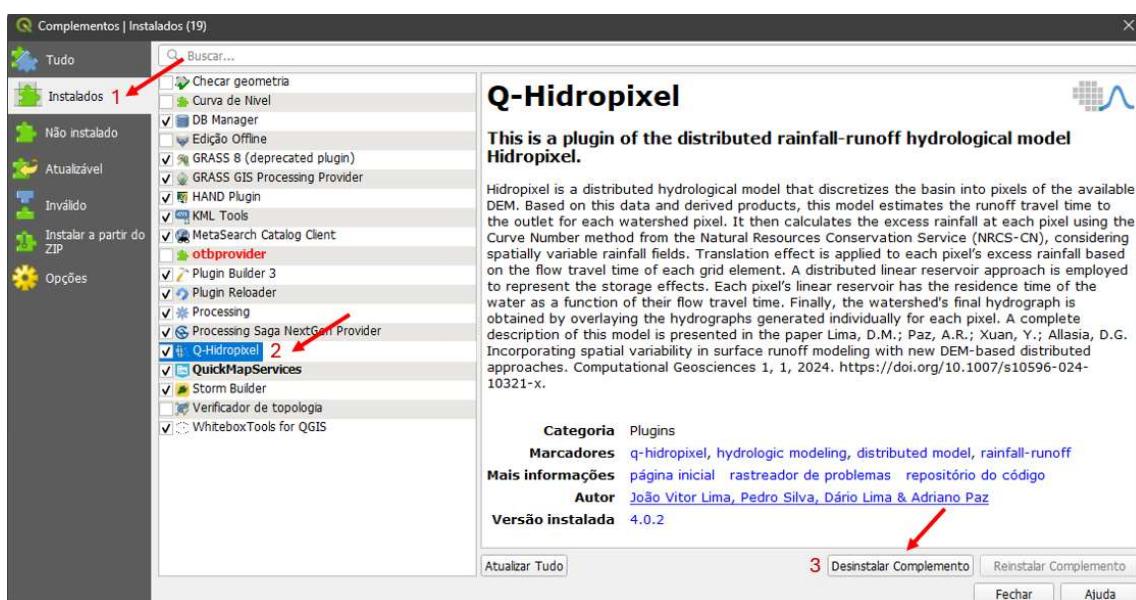
Para instalar a nova versão, **deve-se primeiro desinstalar** a versão anterior do Q-Hidropixel. No QGIS, há dois caminhos para a desinstalação, descritos a seguir.

### 2.3.1 Desinstalação via QGIS

Para efetuar a desinstalação por meio do Gerenciador de Complementos do QGIS, siga os seguintes passos:

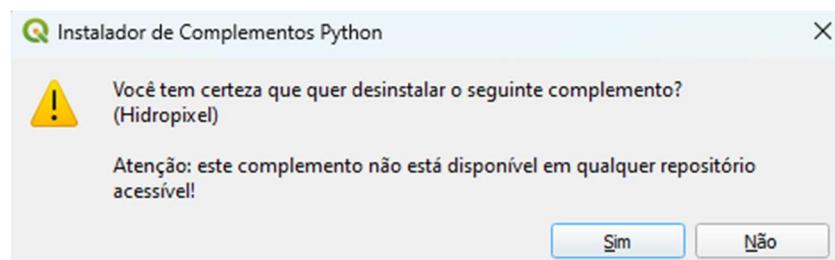
- i) No Menu Barra de Ferramentas do QGIS, selecione “Complementos” e “Gerenciar e Instalar Complementos” (Figura 2)
- ii) Na opção “Instalados” (número 1, Figura 6), da janela que se abre, deve-se selecionar o Q-Hidropixel (número 2, Figura 6) e então clicar em “Desinstalar Complemento” (número 3, Figura 6).

Figura 6 – Desinstalação do Q-Hidropixel no QGIS, 1) Seleção da página dos complementos instalados; 2) Escolha do Q-Hidropixel; e 3) Botão de desinstalação.



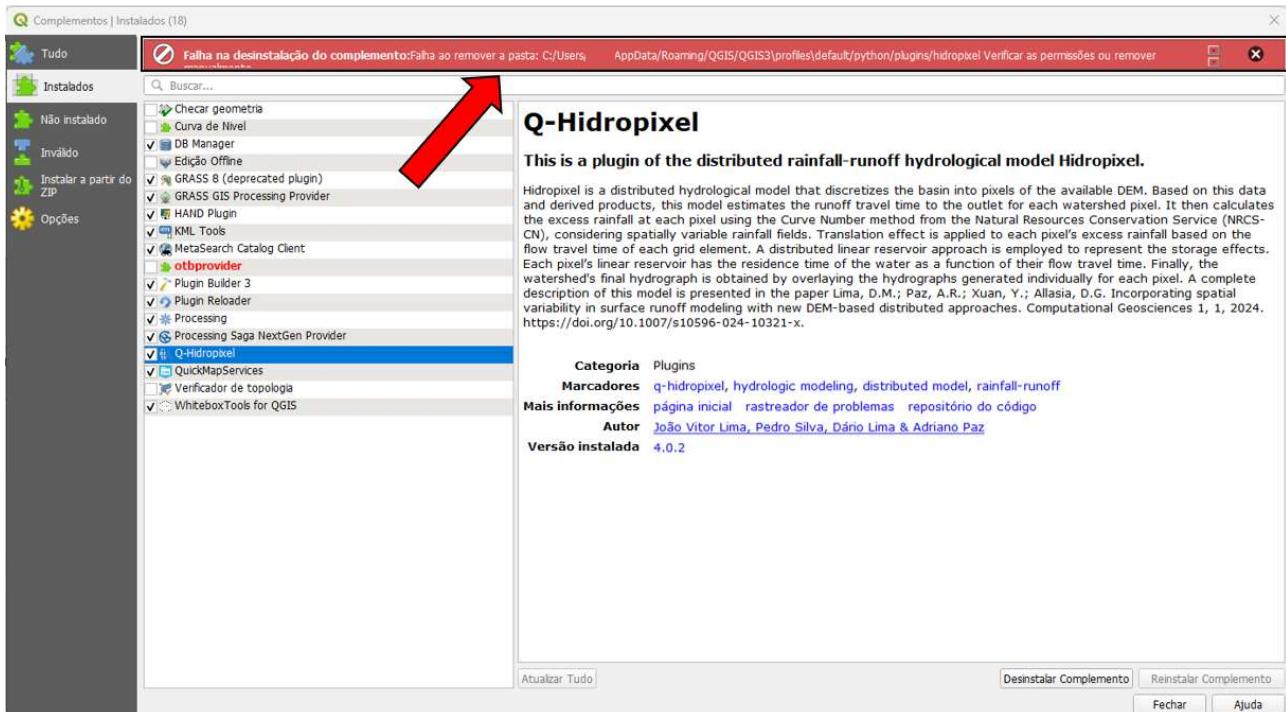
Com isso, surgirá uma mensagem de aviso, deve-se clicar no “Sim” para prosseguir com a desinstalação (Figura 7).

Figura 7 – Aviso de desinstalação do Q-Hidropixel no QGIS.



Para a desinstalação correta do Q-Hidropixel no QGIS, é importante que as janelas e todos os arquivos ligados ao plugin estejam fechados. Caso contrário, o QGIS não permitirá a desativação do *plugin*, pois essa situação configura um erro de permissão (Figura 8). Se isso ocorrer, é preciso realizar a desinstalação manual, que é o segundo caminho de desinstalação.

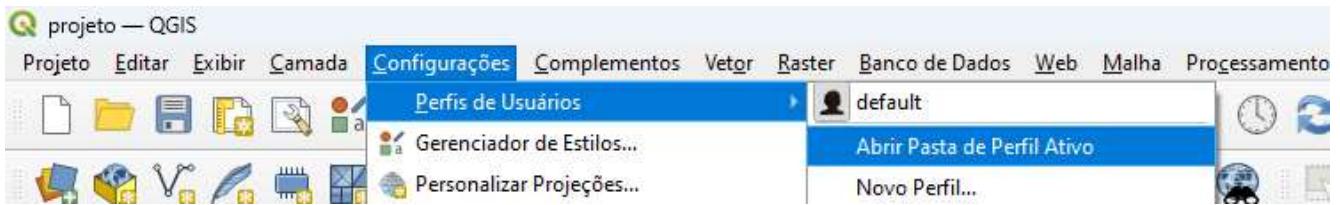
Figura 8 – Mensagem de erro reportada ao tentar desativar o plugin Q-Hidropixel do QGIS.



### 2.3.2 Desinstalação manual

Para a desinstalação manual do Q-Hidropixel no QGIS, na barra de opções do QGIS, selecione “Configurações”, “Perfis de Usuários” e “Abrir pasta de Perfil Ativo”, como indicado na Figura 9.

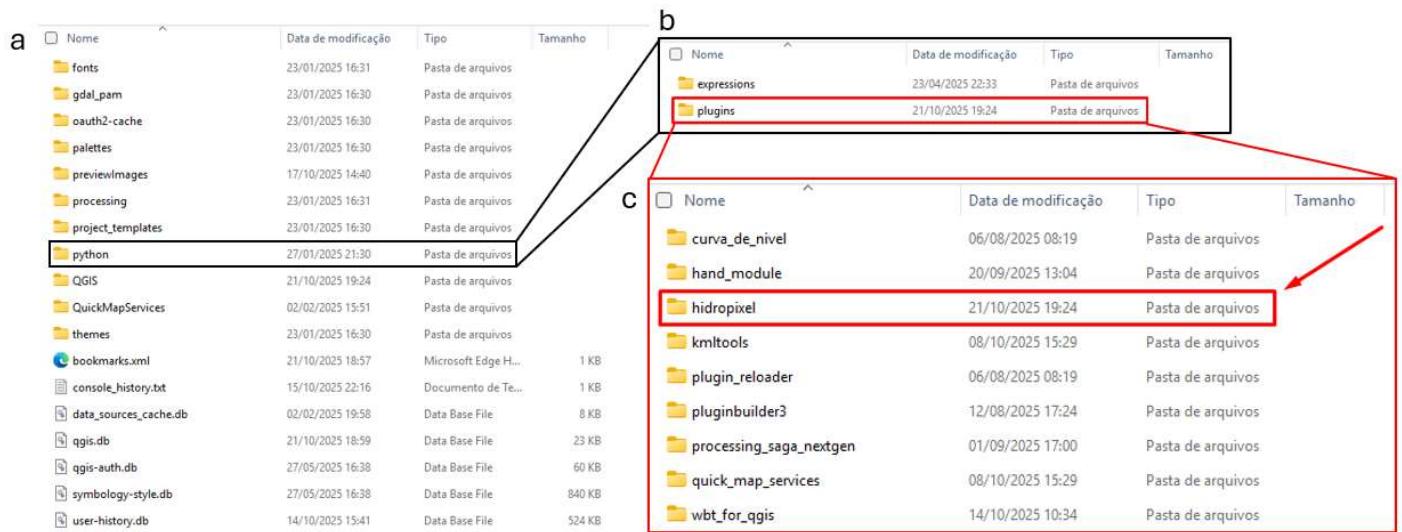
Figura 9 – Acesso à pasta de plugins do QGIS.



Na sequência, deve-se abrir a pasta **Python** e depois a pasta **Plugins**, então selecionar a pasta **hidropixel** e excluí-la (Figura 10). Recomenda-se encerrar o QGIS para realizar o processo de desinstalação manual do plugin.



Figura 10 – Diretórios acessados para desativação manual do Q-Hidropixel. a) pasta do perfil de usuário ativo do QGIS; b) pasta python; c) pasta de plugins instalados no QGIS.



Após concluir a desinstalação com sucesso por algum dos caminhos apresentados, deve-se obter a versão do Q-Hidropixel a ser instalada, como apresentado na seção **2.1 Download**. Em seguida, procede-se à instalação conforme descrito na seção **2.2 Instalação**.

### 3. INTERFACE GRÁFICA DO Q-HIDROPIXEL

Nesta seção são apresentados os aspectos da interface gráfica do Q-Hidropixel, como tipos e funções dos botões, interações com arquivos externos, *tool tips* etc. A leitura desta seção é fundamental, pois as explicações futuras resumem conceitos aqui apresentados em mais detalhe.

Ao iniciar o Q-Hidropixel, a primeira janela apresenta o menu inicial com quatro opções ***Flow Travel Time, Excess Rainfall, Flow Routing*** e ***Help*** (Figura 11).

Figura 11 – Janela principal do Q-Hidropixel no QGIS.



As principais funcionalidades do modelo estão inseridas nas opções mostradas na Figura 8, sendo elas responsáveis por:

- i. *Flow Travel Time* - Determina o tempo necessário para a água escoar de cada pixel até o exutório da bacia hidrográfica, considerando diferentes tipos de escoamento (fluxo laminar, concentrado e em canal).
- ii. *Excess Rainfall* - Realiza a interpolação espacial da precipitação e aplica o método *Curve Number* (CN) do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS-CN) para calcular a fração de chuva que se transforma em escoamento superficial, considerando características do solo e uso do solo.
- iii. *Flow Routing* - Propaga a vazão ao longo da bacia hidrográfica e calcula o hidrograma final no exutório, agregando as contribuições individuais de cada pixel.
- iv. *About* – Apresenta uma visão geral sobre as características do plugin, como descrição, versão instalada, autores etc.

- v. *Help* – Ferramenta que facilita a obtenção de soluções para dúvidas, erros e explicações sobre as funcionalidades do Hidropixel.

### 3.1 Paginação

As interfaces de todas as rotinas apresentam duas abas, denominadas *Parameters* (número 1, Figura 12) e *Log* (número 2, Figura 12). A primeira aba contém os campos com as informações de cada um dos módulos, já o segundo detalha os processos que ocorrem durante a execução das rotinas, com mensagens de início, conclusão, erros etc.

Figura 12 – Paginação da rotina *Flow Travel Time* e *Flow Routing*.

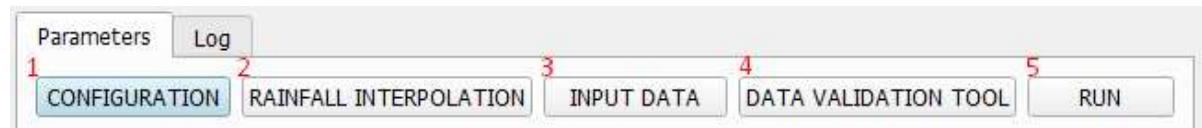


As interfaces das rotinas *Flow Travel Time* e *Flow Routing* apresentam a organização ilustrada na Figura 12, com as janelas: *CONFIGURATION* (número 3), *INPUT DATA* (número 4), *DATA VALIDATION TOOL* (número 5) e *RUN* (número 6).

Nos diferentes *forms* do Q-Hidropixel, há a indicação da janela atual nas quais o usuário se encontra durante a execução. Como mostrado no item 7 da Figura 12, o nome da aba aparece escrito nesse local. A janela atual também é indicada pela cor azul associada ao botão (Figura 12).

Para a interface da rotina *Excess Rainfall*, a divisão é semelhante das rotinas anteriores, mas com um item a mais. Como apresentado na Figura 13, essa interface tem as seguintes janelas: *CONFIGURATION* (número 1), *RAINFALL INTERPOLATION* (número 2), *INPUT DATA* (número 3), *DATA VALIDATION TOOL* (número 4) e *RUN* (número 5).

Figura 13 – Paginação da rotina *Excess Rainfall*.

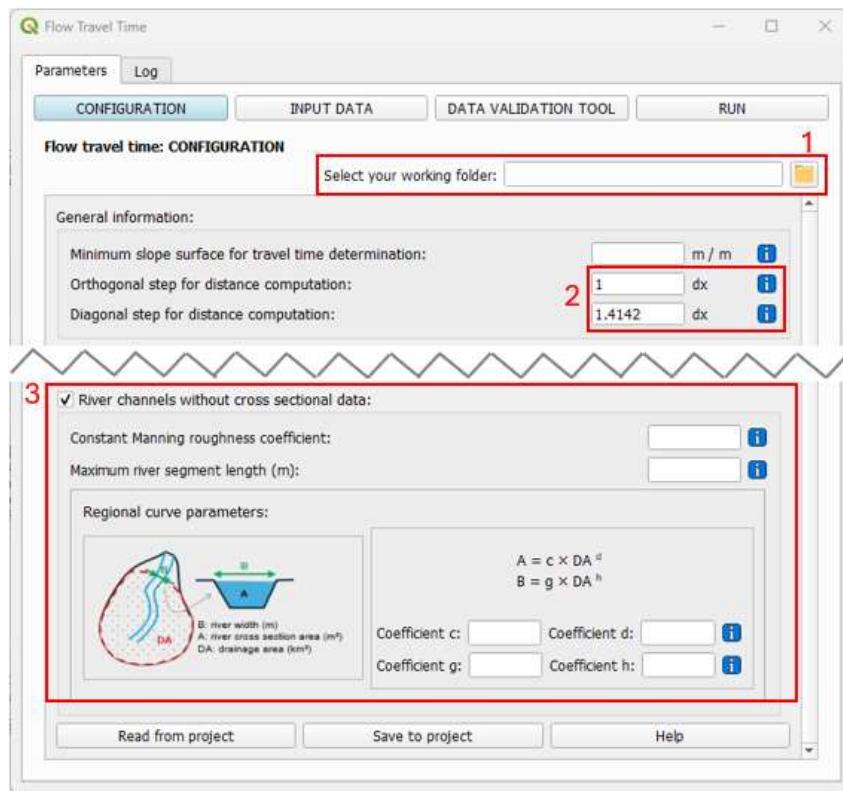


#### 3.1.1 Configuration

A janela *CONFIGURATION* é destinada à adição dos parâmetros do modelo, como, por exemplo, o valor da abstração inicial para cálculo da chuva excedente. Para cada módulo, as explicações detalhadas de cada parâmetro ou campo dessa janela são mostradas em itens específicos deste manual. Aqui, o propósito é apenas passar a visão geral e os aspectos comuns a todas as janelas

*Configuration*, independente da rotina. Para ilustrar, a Figura 14 apresenta a janela *Configuration* da rotina *Flow Travel Time*.

Figura 14 – Janela *Configuration* da rotina *Flow Travel Time*.



Na janela *Configuration*, o usuário pode fornecer a *Working Folder* (número 1, Figura 14), que indica o diretório que o plugin incialmente buscará os arquivos (ver 3.2.1 *Working Folder*).

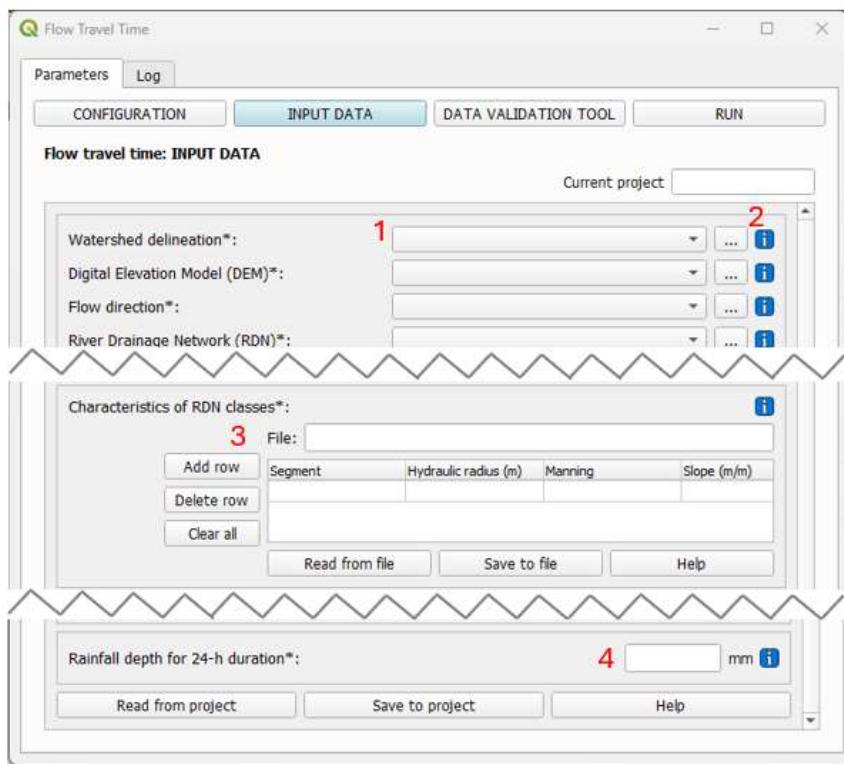
Além disso, alguns parâmetros apresentam valores já definidos, como as dimensões do pixel para cálculo das distâncias em um *raster* (ver número 2, Figura 14). Para outros parâmetros, não há sugestão de valores padrão.

Alguns parâmetros são opcionais, como os ligados ao uso de relações regionais entre características geométricas da seção transversal e área de contribuição - opção **River channels without cross-sectional data** indicada pelo número 3 na Figura 14. Enquanto essa opção está desmarcada, os parâmetros associados ficam desativados, como ilustrado na figura mencionada. Para habilitar a edição dos parâmetros, deve-se primeiro marcar a caixa de seleção ao lado esquerdo da seção desabilitada (ver número 3, Figura 14).

### 3.1.2 Input Data

A janela *INPUT DATA* apresenta os campos para indicação dos arquivos necessários à simulação com o Q-Hidropixel, como, por exemplo, o Modelo Digital de Elevação (MDE). A Figura 15 ilustra a janela de *Input Data* da rotina *Flow Travel Time*.

Figura 15 – Janela *Input Data* da rotina *Flow Travel Time*.



O Q-Hidropixel demanda arquivos em mais de um formato, como, por exemplo, arquivos em formato .tif e .txt. Para isso, o usuário pode selecionar um arquivo já adicionado ao QGIS (número 1, Figura 15) ou clicar no botão indicado no número 2 da Figura 15 para selecionar o arquivo desejado (ver **3.2.2 Importação de arquivos**).

É possível também adicionar os arquivos através de tabelas, como ilustrado na Figura 15, número 3. Nesse caso, a explicação de uso se encontra na seção **3.2.6 Tabelas**.

Alguns campos devem ser preenchidos manualmente pelo usuário, como o valor da precipitação com duração de 24 horas e 2 anos de período de retorno, número 4 da Figura 15.

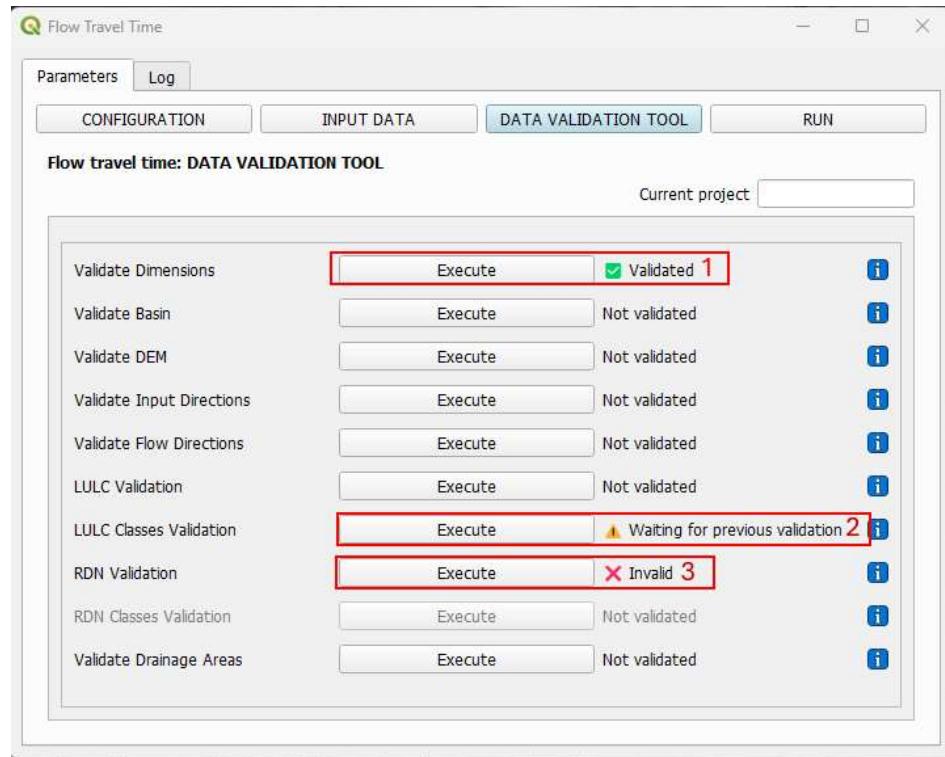
### 3.1.3 Data Validation Tool

A ferramenta de validação de dados (*Data Validation Tool*) de entrada do Q-Hidropixel foi criada para garantir que todos os arquivos utilizados em cada módulo estejam compatíveis entre si e conceitualmente coerentes com o funcionamento do modelo. Antes de rodar os módulos *Flow Travel Time*, *Excess Rainfall* e *Flow Routing*, o usuário deve acionar, na aba “*Data Validation Tool*” de cada módulo, os botões de validação disponíveis.

Em todos os casos, o complemento lê diretamente os *rasters* já carregados no projeto QGIS e selecionados nas *comboboxes* de entrada, por isso é fundamental que os *layers* estejam corretamente nomeados, presentes no projeto e com a mesma extensão, resolução e sistema de coordenadas. A Figura 16 ilustra a referida página do módulo *Flow Travel Time*.



Figura 16 – Janela Data Validation Tool do módulo Flow Travel Time. 1) mensagem de validação realizada com sucesso; 2) mensagem de aviso, indicando dependências para a validação em questão; 3) mensagem de erro, arquivos inconsistentes.

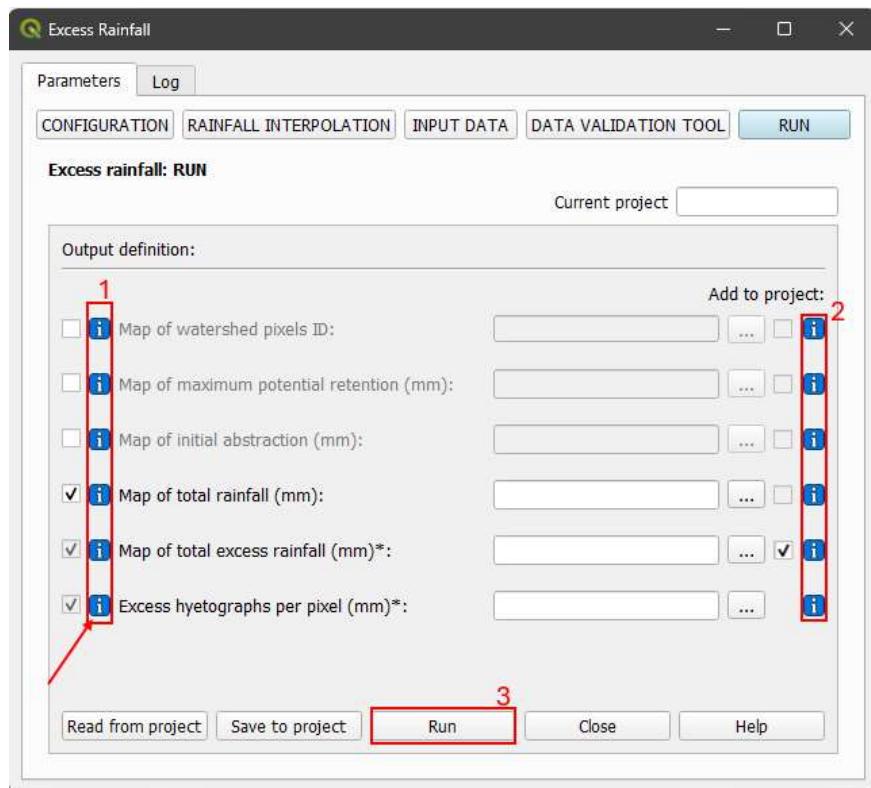


Foram adicionadas marcações visuais (número 1 , número 2 , número 3 Figura 16) indicando os diferentes *status* da validação. Caso ocorra algum aviso ou erro, deve-se analisar o arquivo em questão e realizar a validação novamente. Não é necessário encerrar o Q-Hidropixel.

### 3.1.4 Run

A janela RUN contém os campos para decisão dos produtos demandados após simulação com o Q-Hidropixel. Para maior detalhamento, na Figura 17 é possível visualizar a janela *Run* da rotina *Flow Travel Time*.

Figura 17 – Janela *Run* da rotina *Excess Rainfall*.



Na aba *Run*, o usuário poderá escolher quais arquivos de saída o Q-Hidropixel retornará ao fim do processamento. Como mostra o item 1 da Figura 17, existe um *checkbox* para cada arquivo de saída. Após selecionar o desejado, deve-se escolher o diretório onde o arquivo será criado (ver 3.2.3 **Exportação de arquivos**).

Para adicionar os arquivos de saída no projeto atual do QGIS, deve-se selecionar o *checkbox* da direita (item 2, Figura 17) do arquivo em questão. Observe que na Figura 17, após finalizado o processamento do Q-Hidropixel, será salvo e adicionado no projeto o arquivo *Map of total excess rainfall (mm)*.

Vale destacar que o indicador “\*” representa os arquivos de saída que são fundamentais para a execução do *plugin*, como mostrado na Figura 17, esses já são marcados por padrão e sua interação é bloqueada. Com isso, ao clicar no botão *Run* não definindo o caminho do arquivo de saída desse tipo de arquivo, ocorrerá um erro (Figura 18).

Figura 18 – Erro ocasionado pelo não fornecimento de um diretório válido para salvar os arquivos de saída.



### 3.1.5 Rainfall Interpolation

Para a rotina Excess Rainfall, há a janela RAINFALL INTERPOLATION, além das citadas. Sua função é realizar a interpolação da precipitação para toda a bacia hidrográfica a partir das informações dos postos pluviométricos presentes (ver **4.2.2 Rainfall Interpolation**).

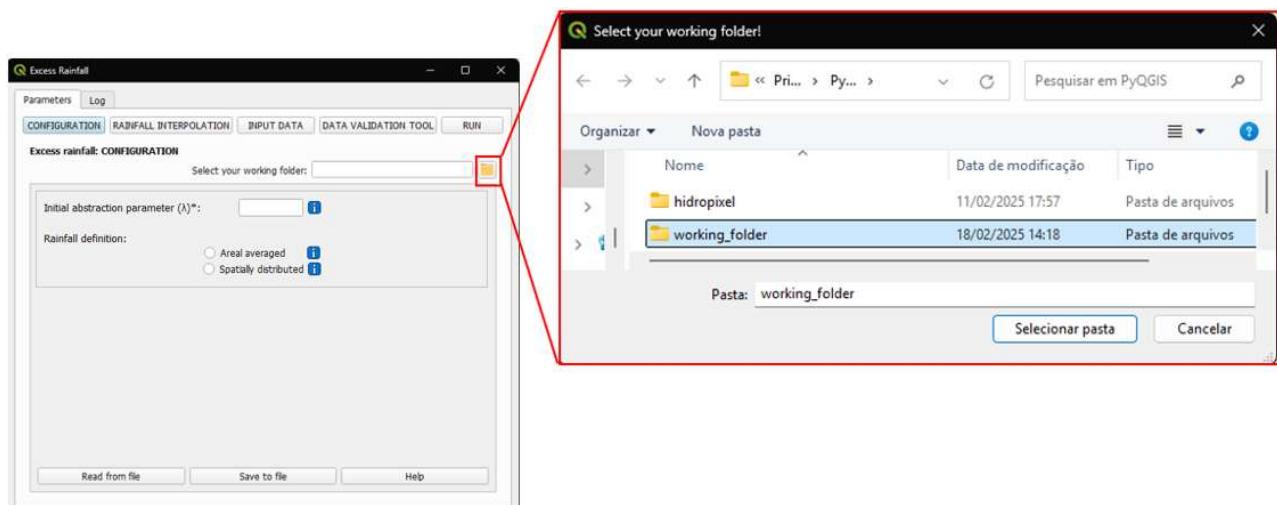
## 3.2 Funcionalidades gerais

Esta seção apresenta a funcionalidade dos objetos presentes nas rotinas do Q-Hidropixel, como botões, tabelas etc.

### 3.2.1 Working Folder

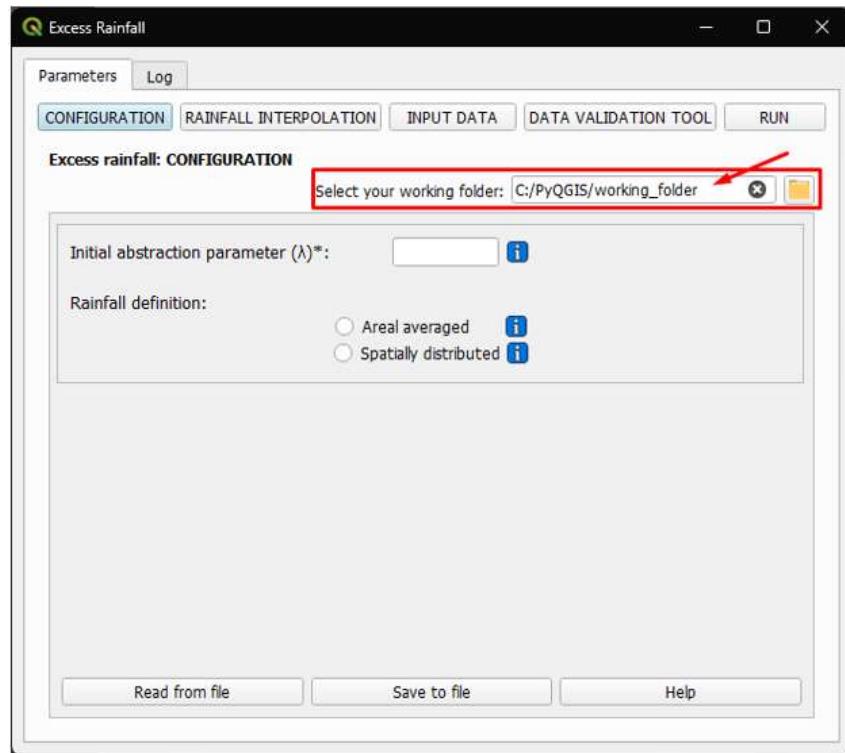
Na janela *Configuration* das rotinas do Q-Hidropixel, o usuário pode fornecer o diretório da sua pasta de trabalho. Essa adição pode ocorrer por meio do click no botão e seleção do arquivo (Figura 19).

Figura 19 – Formulário de seleção da *working folder*.



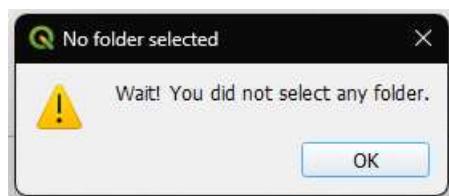
Após selecionar a pasta, seu diretório será adicionado no campo anterior ao botão, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Indicação da *working folder* no Q-Hidropixel.



Caso não seja selecionada nenhuma pasta, surgirá uma mensagem notificando isso (Figura 21). Portanto, basta clicar no botão “OK” para retornar ao plugin.

Figura 21 – Mensagem de aviso informando a não seleção de uma pasta.



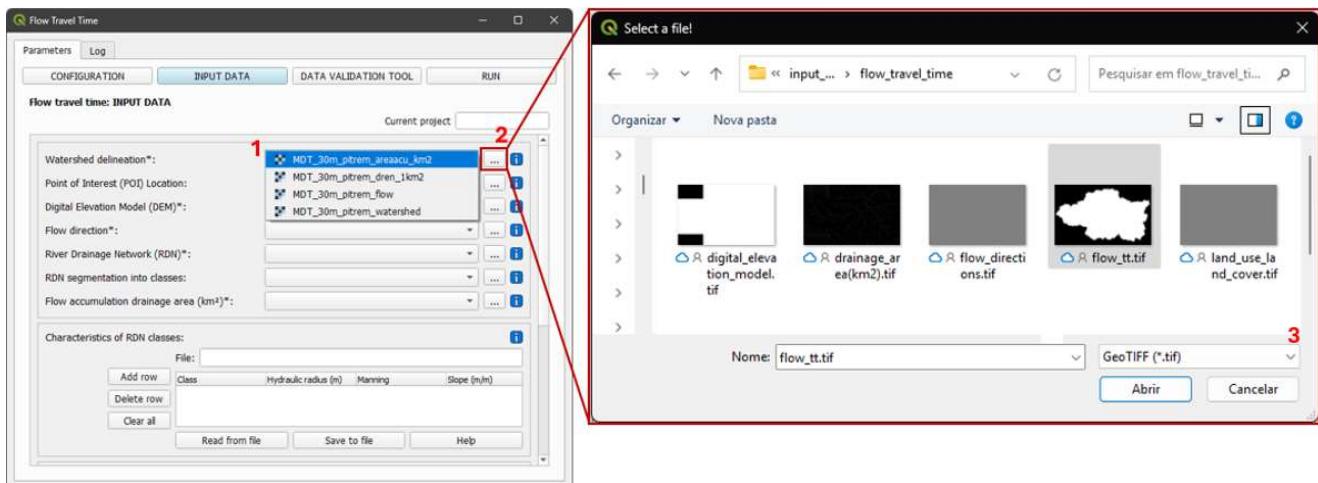
### 3.2.2 Importação de arquivos

Na janela *Input Data* das rotinas, o usuário deverá inserir os arquivos necessários (marcados com “\*”) ao processamento do Q-Hidropixel. Para isso, existem duas opções:

- 1- Selecionar um arquivo presente no projeto atual do QGIS, através da lista presente no *ComboBox* (ou clicar no botão à direita do *ComboBox* (número 1, Figura 22)).
- 2- Clicar no botão indicado no número 2 da Figura 22 e selecionar um arquivo. Nesse caso, o arquivo escolhido será adicionado ao QGIS e na lista mostrada no número 1 da Figura 22.



Figura 22 – Importação de arquivos no Q-Hidropixel.



Ao clicar no botão (número 2, Figura 22), surgirá a janela “Select a file!”, assim, deve-se escolher um arquivo. O Q-Hidropixel pode solicitar arquivo em formato .tif ou .txt, essa informação pode ser visualizada no filtro da janela aberta (número 3, Figura 22). A forma de seleção é a mesma, independentemente do tipo de arquivo.

Caso nenhum arquivo seja selecionado, surgirá uma mensagem notificando isso (Figura 23). Portanto, basta clicar no botão “OK” para retornar ao plugin.

Figura 23 – Mensagem de aviso informando a não seleção de uma pasta.



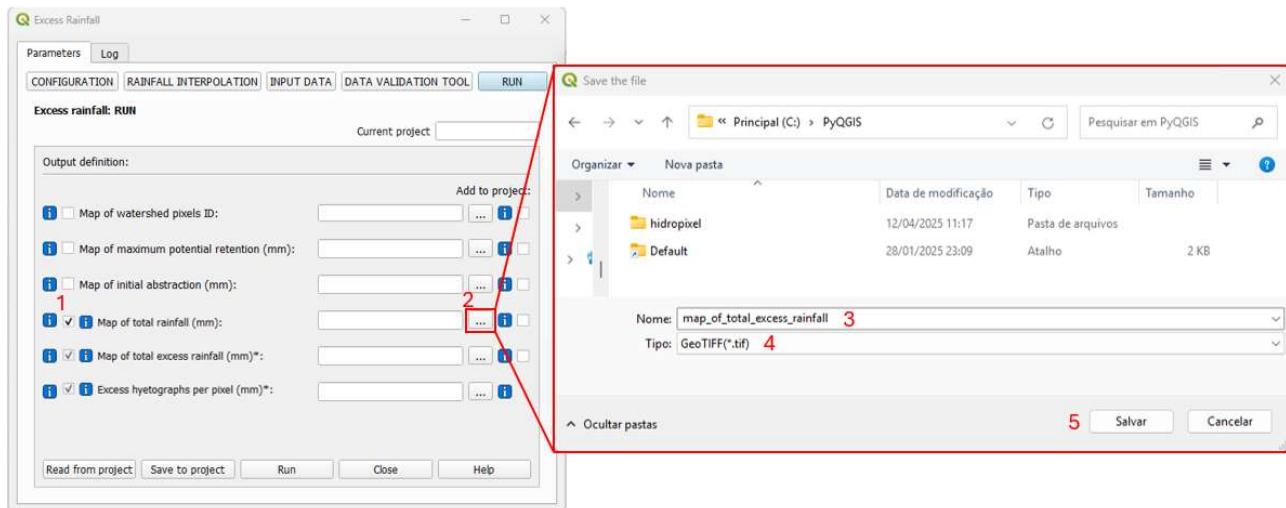
### 3.2.3 Exportação de arquivos

Na janela *Run* das rotinas é possível exportar os arquivos selecionados. Para isso, deve-se marcar o *checkbox* da esquerda referente ao output desejado (ver seção 3.1.4 Run). Na sequência, deve-se fornecer um caminho válido para que o arquivo seja salvo. Esse deve seguir a sintaxe: pathName\filename.tif(.txt) – a extensão do arquivo é definida pelo Q-Hidropixel.

Após marcar o *output* escolhido (número 1, Figura 24), deve-se clicar no botão indicado no número 2, Figura 24. Surgirá uma nova janela para seleção da pasta e definição do nome do arquivo (número 3, Figura 24) – a extensão do arquivo é definida automaticamente (número 4, Figura 24). Definido o nome do arquivo, deve-se clicar no botão salvar (número 5, Figura 24).

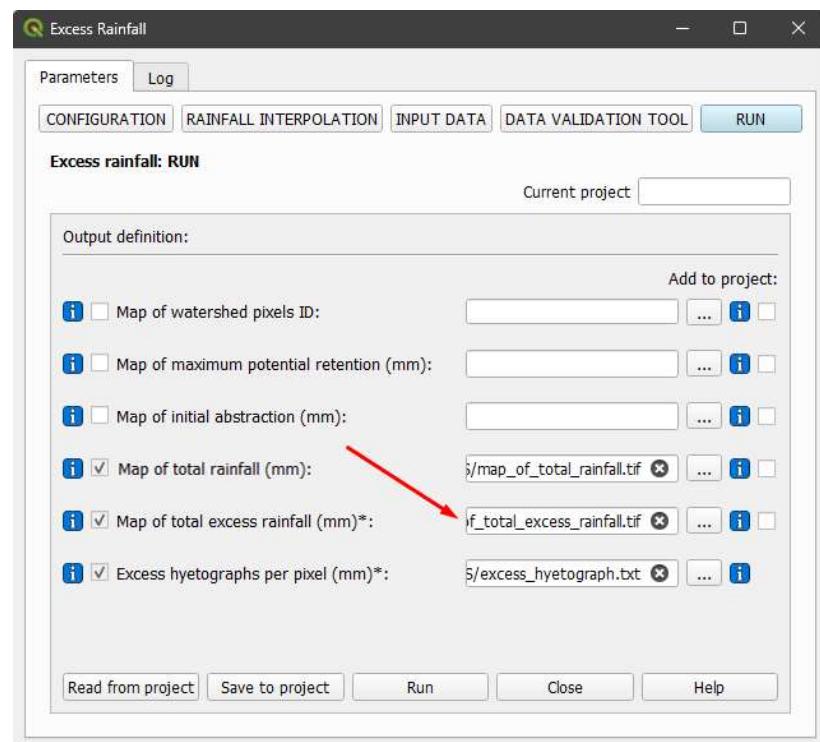


Figura 24 - Definição do diretório do arquivo para exportação no Q-Hidropixel.



Ao fim do processo descrito, o diretório será inserido no Q-Hidropixel (Figura 25). Recomenda-se a revisão dos registros dos arquivos inserido antes de iniciar o processamento (clique no botão *Run*).

Figura 25 – Exemplo de preenchimento dos campos para exportação dos arquivos obrigatório ao fim do processamento do Q-Hidropixel.



Outra possibilidade de exportação é apenas a definição do nome do arquivo e sua extensão (.tif ou .txt – observar a *tooltips*) no campo definido para tal. **Porém, o fornecimento da Working folder é obrigatório, caso contrário ocorrerá um erro, pois o diretório será inválido.**

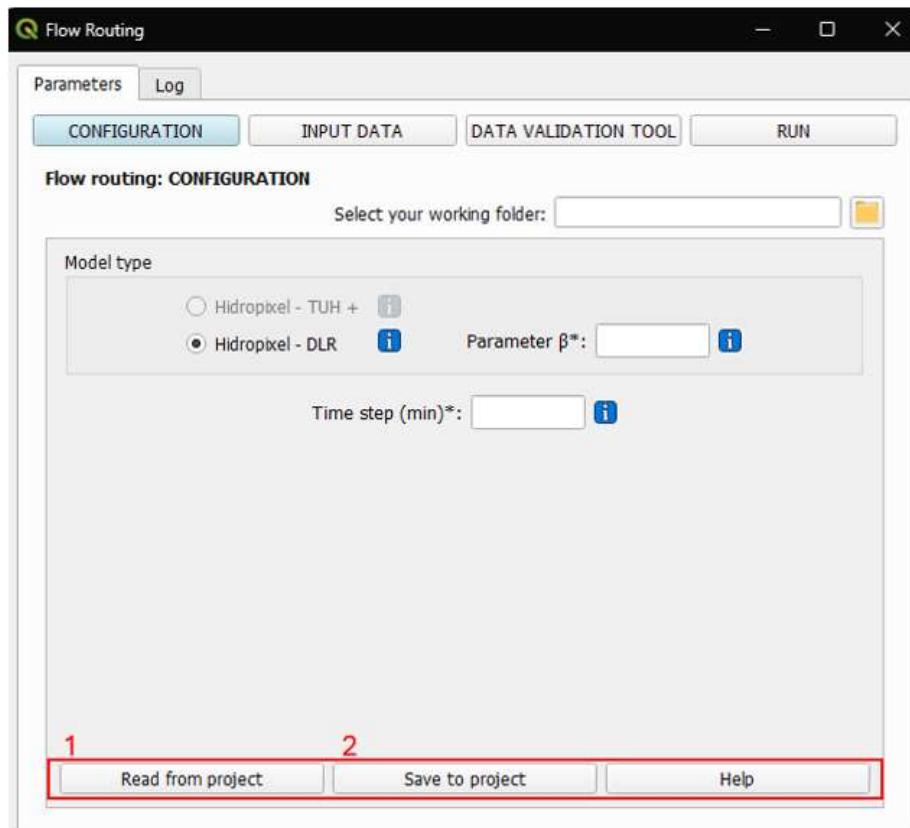
### 3.2.4 Gerenciamento de projetos

O Q-Hidropixel permite que as informações inseridas sejam salvas e lidas posteriormente. Isso ocorre para todas as janelas das diferentes rotinas do *plugin*. Os projetos são arquivos com extensão “.hpx” (Hidropixel project) que armazenam as informações enviadas pelo usuário.

#### Salvamento de projetos

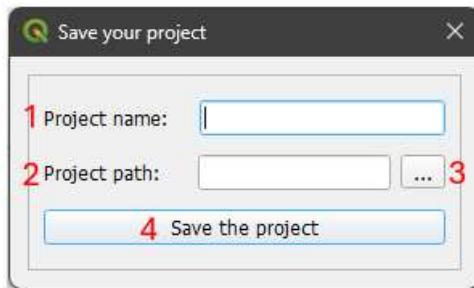
Para salvar um projeto, após adição dos dados, deve-se clicar no botão *Save to project* (Número 2, Figura 26) posicionado na parte inferior das janelas das rotinas do Q-Hidropixel.

Figura 26 – Janela *Configuration* da rotina *Excess Rainfall* indicando os botões *Save to project* e *Read from project*.



Ao clicar no botão *Save to project* surgirá uma nova janela, *Save your project*, com dois campos para inserir as informações sobre o projeto a ser salvo, como o nome (número 1, Figura 27) e pasta do projeto (número 2, Figura 27).

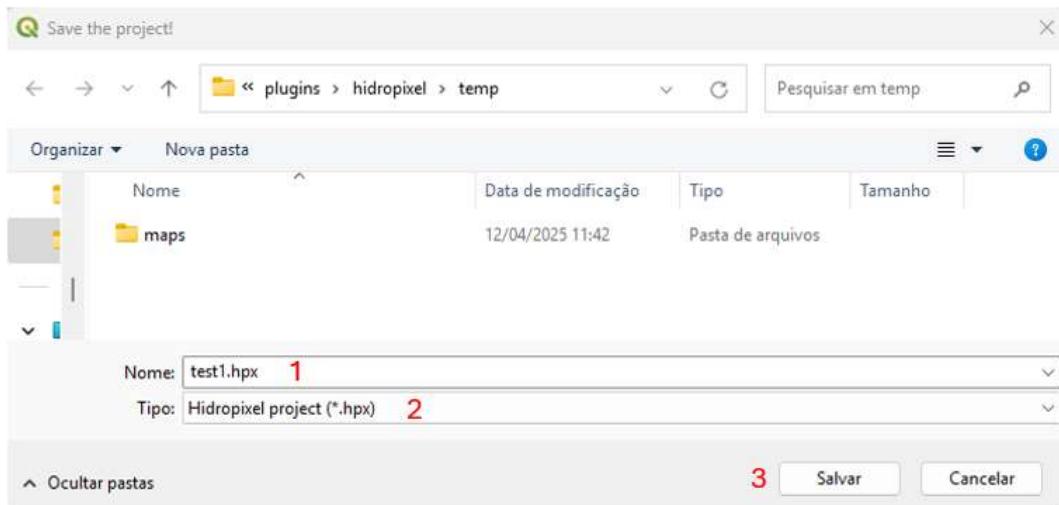
Figura 27 – Interface gráfica de configuração do projeto a ser salvo.



Caso tenha sido informada uma *Working folder*, não é preciso preencher o *Project path*, pois o projeto a ser salvo será armazenado na pasta de trabalho do usuário. **Por outro lado, se não existir Working folder, a definição de uma pasta é obrigatória.**

O funcionamento do botão de importação (número 3, Figura 27) é semelhante aos demais apresentados. A Figura 28 ilustra o *form* de escolha de uma pasta: o nome do arquivo é definido automaticamente, se o *Project name* for definido (número 1, Figura 28); a extensão do arquivo é “.hpx” (número 2, Figura 28). Por fim, deve-se clicar no botão salvar (número 3, Figura 28)

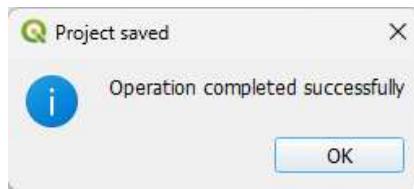
Figura 28 – Formulário para escolha da pasta de salvamento do projeto Q-Hidropixel.



Se ao clicar no botão *Save the Project*, não ocorrer nenhum erro, o plugin retornará uma mensagem avisando o fim da operação com sucesso (Figura 29).

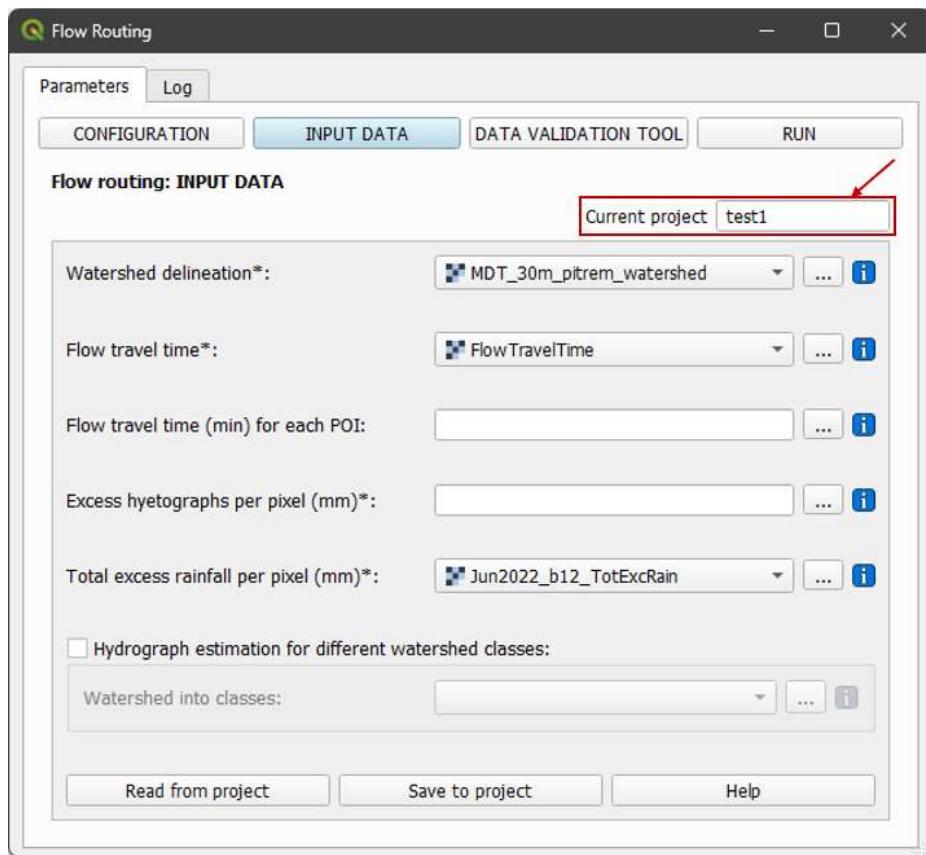


Figura 29 – Mensagem de operação realizada com sucesso ao salvar o projeto.



Além disso, o nome do projeto salvo será adicionado no campo *Current project* possibilitando o usuário visualizar qual o projeto atual de trabalho (Figura 30).

Figura 30 – Indicação do projeto atual na rotina *Flow Routing* após salvar/importar um projeto.

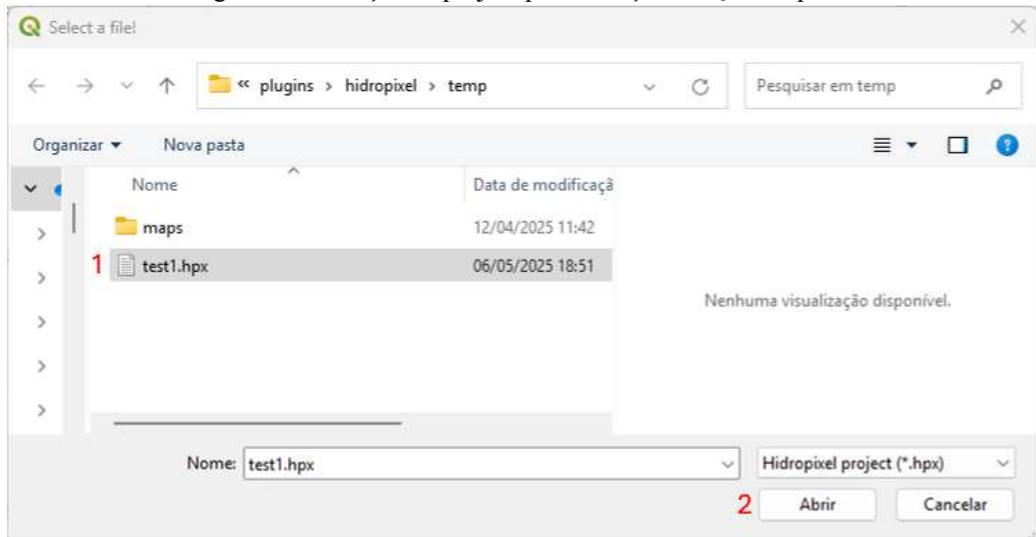


## Leitura de projetos

Os projetos salvos podem ser carregados. Isso facilita a repetição de simulação com o modelo sem precisar ajustada toda a configuração, definição de arquivos e parâmetros, como para a calibração dos parâmetros, simulações de teste etc.

Para ler um projeto, deve-se clicar no botão *Read from project*. Surgirá o formulário *Windows* intitulado *Select a file!* para escolha do arquivo “.hpx” (Hidropixel project), como ilustrado na Figura 31, número 1.

Figura 31 – Seleção de projeto para inserção no Q-Hidropixel.



Ao clicar no botão Abrir (número 2, Figura 31), as informações salvas anteriormente serão adicionadas em suas respectivas funções no Q-Hidropixel. O nome do projeto é adicionado no campo *Current project* (Figura 30)

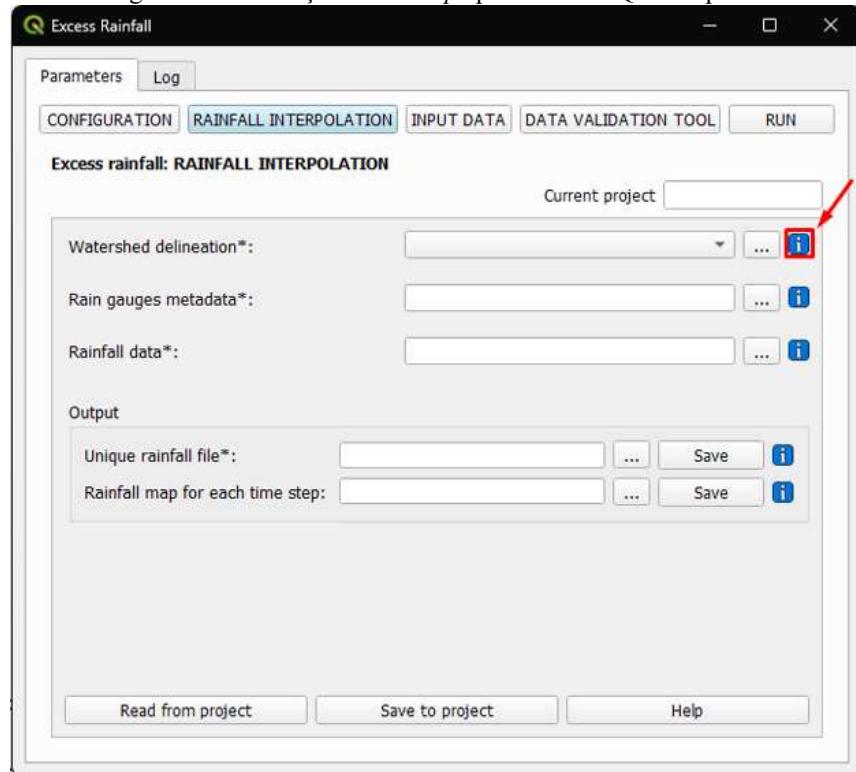
#### Carregamento dos *rasters*

Atenção especial deve ser dada aos arquivos matriciais. Como citado na seção **3.2.2 Importação de arquivos**, o Q-Hidropixel está conectado ao QGIS. Assim, para carregar os *rasters* do projeto, é imprescindível que eles estejam inseridos no projeto atual do QGIS. Caso contrário, o usuário deverá adicioná-los novamente (ver **3.2.2 Importação de arquivos**).

#### 3.2.5 *Tooltips*

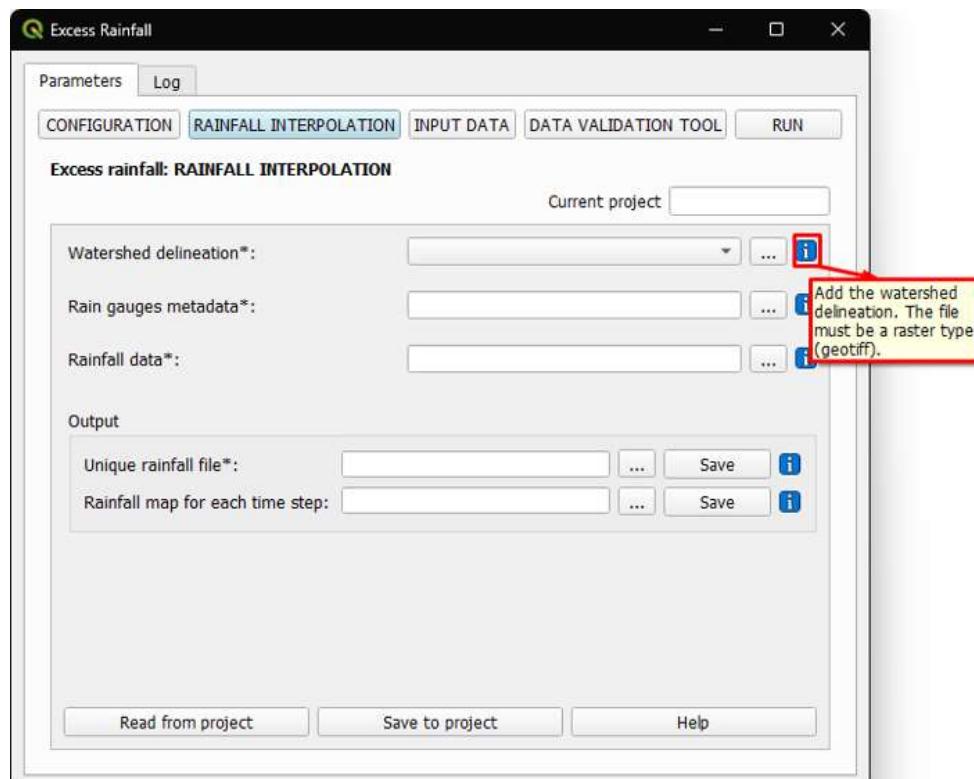
O Q-Hidropixel conta com o recurso de *tooltips*, elementos de ajuda que fornecem uma descrição breve e clara sobre a função de cada objeto ou campo da interface, facilitando o entendimento e o uso do plugin. Como mostrado na Figura 32, os ícones de informação ("i" em um círculo azul) estão localizados à direita dos campos, como, por exemplo, *Watershed delineation*, *Flow travel time*, e outros.

Figura 32 – Indicação das *tooltips* presentes no Q-Hidropixel.



Para visualizar o conteúdo das *tooltips*, basta passar o mouse sobre o ícone correspondente, sem a necessidade de clicar. Com isso, surgirá um novo elemento com a descrição do objeto em questão (Figura 33).

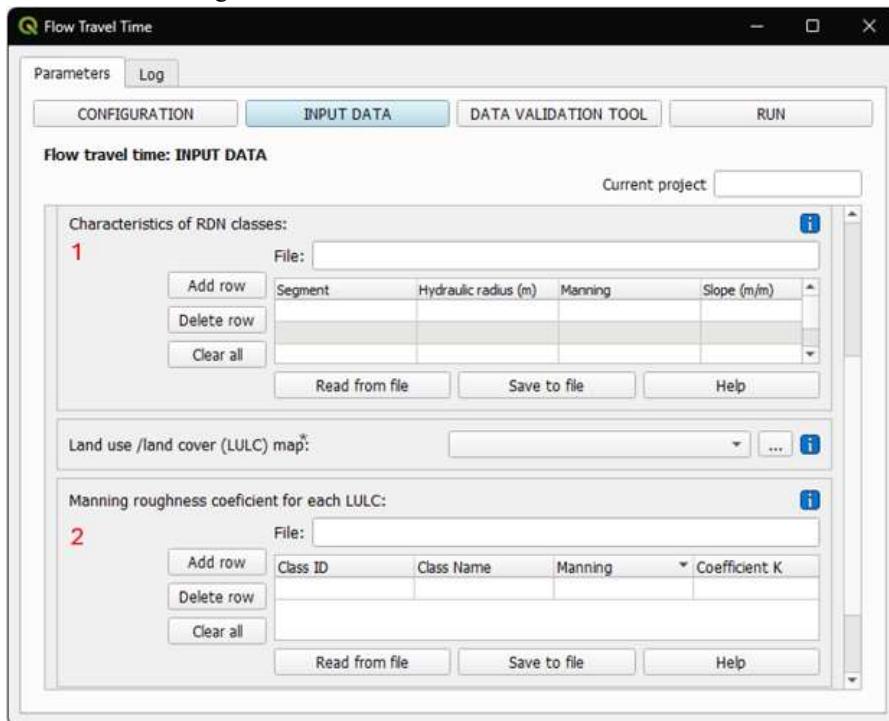
Figura 33 – Janela da rotina *Excess Rainfall* mostrando a *tooltip* do campo *watershed delineation*.



### 3.2.6 Tabelas

O módulo *Flow Travel Time* possui tabelas para inserção de parâmetros que caracterizam a rede de drenagem (número 1, Figura 34) e o uso e cobertura do solo (número 2, Figura 34) da bacia hidrográfica estudada.

Figura 34 – Tabelas da rotina *Flow Travel Time*.

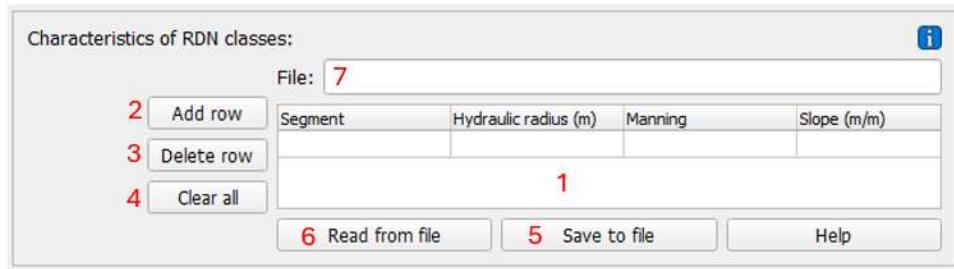


A funcionalidade das tabelas é semelhante. Para inserir as informações, pode-se efetuar de duas formas:

- I. Digitar os valores manualmente
- II. Ler de um arquivo

No primeiro caso, deve-se se atentar à informação pedida em cada coluna; as linhas representam os segmentos ou classes (número 1, Figura 35). Por padrão, as tabelas iniciam com uma única linha – indicadas pela alternância das cores. Para adicionar outra linha, pode-se clicar no botão *Add row* (número 2, Figura 35).

Figura 35 – Elementos funcionais presentes na tabela das características da rede de drenagem.



Para excluir, o botão *Delete row* (número, 3 Figura 35) pode ser utilizado. Uma observação: deve-se selecionar qual linha será deletada. O botão *Clear all* (número 4, Figura 35) é utilizado para excluir todas as informações adicionadas na tela.

O botão *Save to file* (número 5, Figura 35) salva as informações inseridas na tabela em um arquivo que pode ser lido futuramente. Os dados armazenados possuem a vírgula como delimitador. Ao clicar no botão o processo é igual ao apresentado na seção **3.2.3 Exportação de arquivos**.

A leitura é feita com o botão *Read from file* (número 6, Figura 35) e a escolha do arquivo segue lógica apresentada em **3.2.1 Importação de arquivos**. Após adicionar o arquivo na tabela, seu diretório será inserido no campo “*File*” (número 7, Figura 35). Deve-se se atentar para a configuração do arquivo fornecido, a qual deve possuir a vírgula como separador das colunas (Figura 36).

Figura 36 – Exemplo de sintaxe aceita pelas tabelas do Q-Hidropixel.

Trecho	R <sub>b</sub> (m)	n	S (m/m)
1	2.262827236	0.035	0.11662801
2	2.08749444	0.035	0.01385579
3	1.557974254	0.035	0.00920209
4	2.150574423	0.035	0.00105513
5	1.884857157	0.035	0.00123802
6	1.911404893	0.033	0.00005756
7	2.058632564	0.033	0.00038060
8	2.422586273	0.035	0.00310211
9	2.210040747	0.05	0.00309416
10	1.966899098	0.035	0.00047893
11	2.007085114	0.035	0.00021403
12	1.906933786	0.033	0.00001951
13	2.065690125	0.033	0.00058200

A Figura 37 exemplifica as duas maneiras possíveis para adicionar informações nas tabelas: a Figura 37.a mostra o resultado da leitura de um arquivo; a Figura 37.b a adição manual.

Figura 37 – Exemplo de preenchimento das tabelas do Q-Hidropixel. a) resultado da leitura de um arquivo. b) adição manual das informações.

a)

Characteristics of RDN classes:			
File: hidropixel_plugin/flow_travel_time/characteristics_of_rdn_classes.txt			
Segment	Hydraulic radius (m)	Manning	Slope (m/m)
1	2.262827236	0.035	0.11662801
2	2.08749444	0.035	0.01385579
3	1.557974254	0.035	0.00920209

**Buttons:** Add row, Delete row, Clear all, Read from file, Save to file, Help.

b)

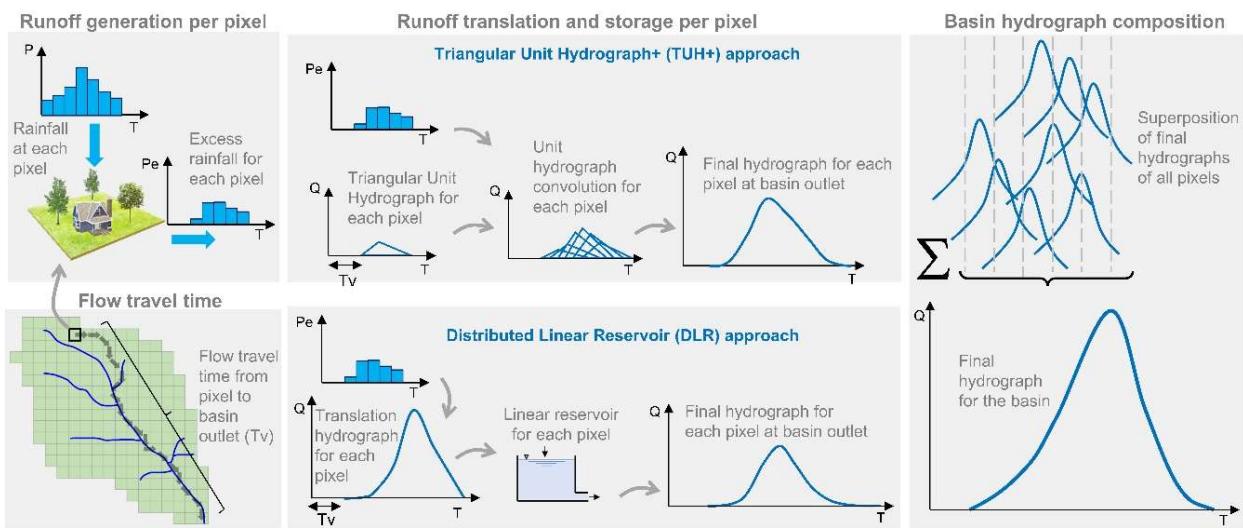
Manning roughness coefficient for each LULC:			
File:			
Class ID	Class Name	Manning	Coefficient K
1	Water	0.05	15.7

**Buttons:** Add row, Delete row, Clear all, Read from file, Save to file, Help.

#### 4. SIMULAÇÃO COM O Q-HIDROPIXEL

O Q-Hidropixel é um modelo hidrológico chuva-vazão, distribuído e baseado em eventos (Costa *et al.*, 2019). Ele pode ser dividido em cinco etapas: (1) processamento do MDE, (2) cálculo do tempo de concentração de cada pixel até o exutório da bacia hidrográfica, (3) cálculo da chuva excedente para cada pixel, (4) geração do hidrograma de chuva efetiva para pixel e (5) composição do hidrograma total da bacia hidrográfica (Figura 38).

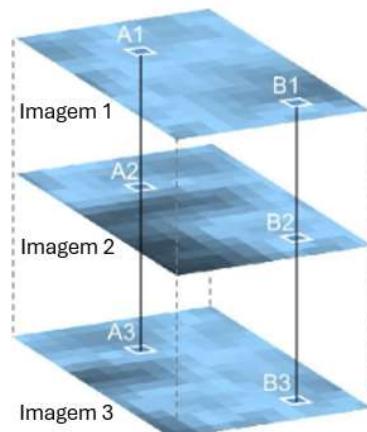
Figura 38 – Lógica de processamento do Q-Hidropixel para transformação da precipitação excedente em vazão.



Fonte: Lima *et al.*, 2024.

As operações do Q-Hidropixel são realizadas pixel-a-pixel através da superposição dos arquivos matriciais enviados (Figura 39).

Figura 39 - Sobreposição de matrizes para realização de operações pixel-a-pixel.

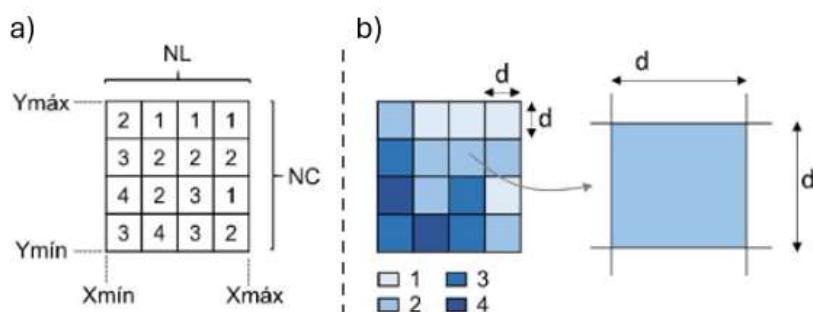


Fonte: adaptado de Paz, 2024.

Devido às características das operações aritméticas com os *rasters*, todas as imagens fornecidas pelo usuário devem respeitar as seguintes condições:

- i. Sistema de coordenadas planas, com unidade de medida em metros (m).
- ii. Mesma abrangência geográfica, ou seja, o Ymax, Ymin, Xmax, Xmin, número de linhas (NL) e colunas (NC) devem ser iguais (Figura 40.a).
- iii. Resolução espacial idêntica - as dimensões do pixel (Figura 40.b).

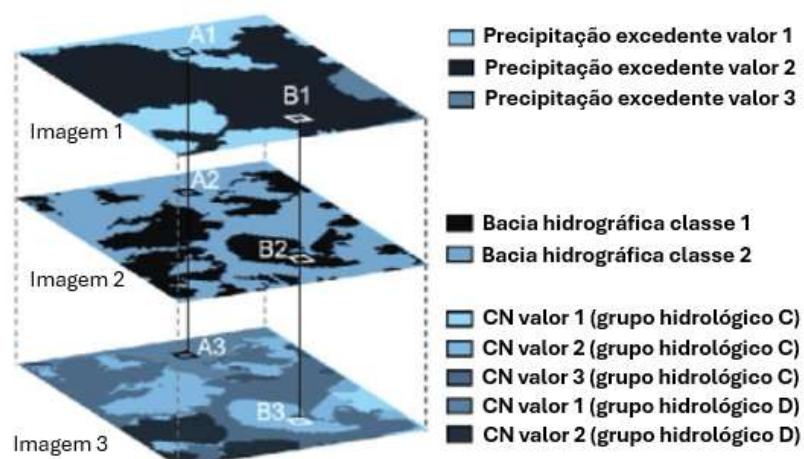
Figura 40 - Características de uma imagem raster. a) dimensões da imagem: número de linhas, colunas, valores dos vértices (Ymax, Ymin, Xmax, Xmin - limites das coordenadas cartesianas); b) representação do comprimento e largura de um pixel do raster.



Fonte: adaptado de Paz, 2024.

Esses aspectos devem ser respeitados pois cada pixel da imagem representa uma área homogênea da superfície terrestre com dimensão  $d \times d$  (Figura 40.b). Assim, quando o modelo realizar o cruzamento entre as imagens, as informações da mesma área serão utilizadas (Paz, 2024). Por exemplo, a chuva excedente do pixel A1 (imagem 1, Figura 41) é definida em função do valor de CN (*Curve Number*) presente no pixel A3 (imagem 3, Figura 41).

Figura 41 – Exemplo de superposição de rasters de precipitação (imagem 1), classes da bacia hidrográfica (imagem 2) e valores de *Curve Number* por grupo hidrológico (número 3)



Fonte: adaptado de Paz, 2024.

Diante das considerações apresentadas, as seções futuras apresentam os princípios para simulação com o Q-Hidropixel. Iniciando com a preparação dos dados de entrada para respeitar os critérios supracitados e seguindo pela descrição dos parâmetros, arquivos de entrada e saída de cada rotina do modelo.

#### 4.1 Flow Travel Time

A rotina *Flow Travel Time* (FTT) estima o tempo que a água leva para percorrer cada pixel do MDE até o exutório da bacia hidrográfica segundo os caminhos de fluxo, usos do solo e rede de drenagem.

##### 4.1.1 Descrição do algoritmo

No Q-Hidropixel, esse tempo é determinado utilizando uma versão adaptada do método da velocidade (NRCS 2004), que calcula o tempo de viagem com base em equações derivadas da fórmula de Manning e considera que três tipos de escoamento que podem ocorrer na bacia: *sheet flow*, *shallow concentrated flow* e *channel flow*. O primeiro ocorre geralmente nas partes superiores da bacia, onde o escoamento superficial se dá sobre superfícies planas com profundidades rasas e uniformes (Equação 1). O segundo tipo ocorre após certa distância, cerca de 30-30,8 metros, acarretando a concentração do fluxo de água em depressões lineares, pequenos sulcos e ravinas devido à topografia (Equação 2 e 3). No último, o escoamento se dá nos pixels da rede de drenagem (Equação 4 e 5). Por fim, o tempo de viagem de cada pixel até o exutório da bacia hidrográfica é obtido somando-se o tempo que o escoamento leva para atravessar cada pixel a jusante ao longo do caminho de fluxo até o exutório (Equação 6) (Lima 2023).

$$Ts_i = \frac{5.474 \cdot (ns_i \cdot Ls_i)^{0.8}}{P_{24}^{0.5} \cdot Is_i^{0.4}} \quad \text{Equação 1}$$

$$Vsc_i = k_i \cdot Isc_i^{0.5} \quad \text{Equação 2}$$

$$Tsc_i = \frac{Lsc_i}{60 \cdot Vsc_i} \quad \text{Equação 3}$$

$$Vc_i = \frac{Rhc_i^{2/3} \cdot Ic_i^{1/2}}{nc_i} \quad \text{Equação 4}$$

$$Tc_i = \frac{Lc_i}{Vc_i} \quad \text{Equação 5}$$

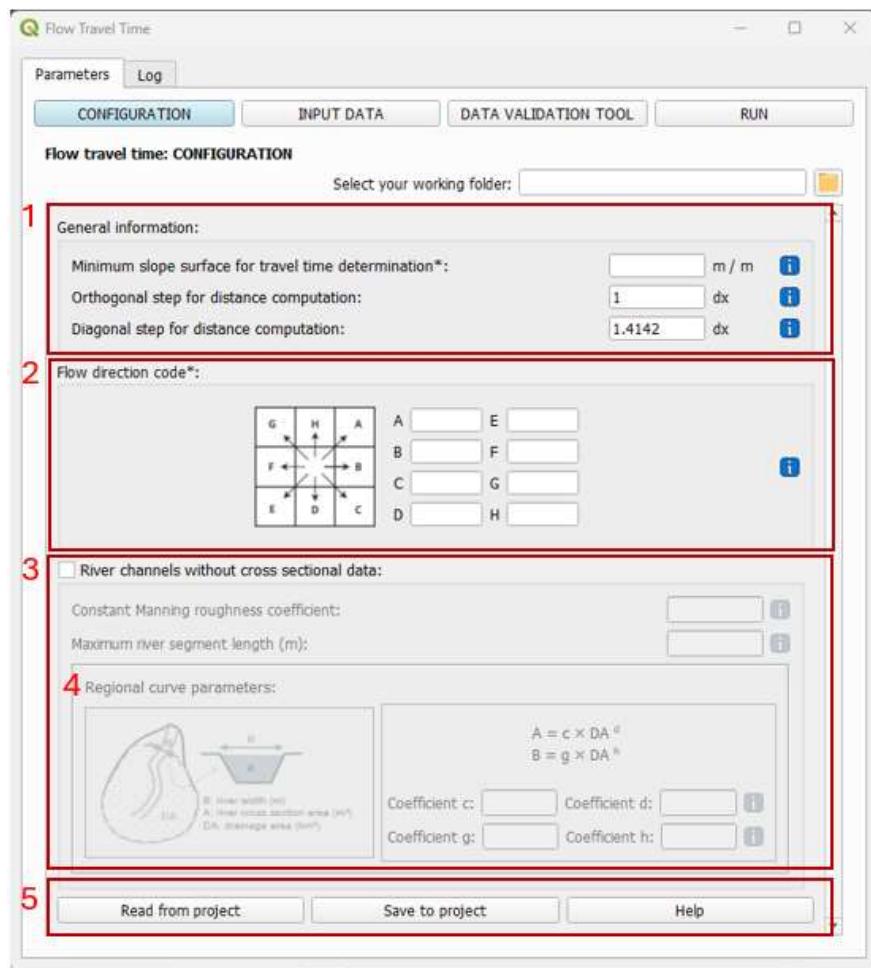
$$Tv_i = \sum_{i=1}^{Ns} Ts_i + \sum_{i=1}^{Nsc} Tsc_i + \sum_{i=1}^{Nc} Tc_i \quad \text{Equação 6}$$

Onde o índice  $i$  refere-se ao  $i$ -ésimo pixel da grade do MDE;  $T_{s_i}$ ,  $T_{sc_i}$  e  $T_{c_i}$  são os tempos de viagem dos escoamentos do tipo *sheet flow*, *shallow concentrated flow* e *channel flow*, respectivamente (minutos);  $I_{s_i}$ ,  $I_{sc_i}$  e  $I_{c_i}$  são as declividades ao longo dos escoamentos *sheet*, *shallow* e canal, respectivamente ( $m/m$ ); P24 é a lâmina de chuva para duração de 24 horas e tempo de retorno de 2 anos ( $mm$ );  $n_{s_i}$  e  $n_{c_i}$  são os coeficientes de rugosidade de Manning para o *sheet flow* e *channel flow*, respectivamente;  $L_{s_i}$ ,  $L_{sc_i}$  e  $L_{c_i}$  são as distâncias percorridas pelos *sheet flow*, *shallow concentrated flow* e *channel flow*, respectivamente (metros);  $V_{sc_i}$  e  $V_{c_i}$  são as velocidades médias dos escoamentos *shallow concentrated flow* e *channel flow*, respectivamente ( $m/s$ );  $k_i$  é um coeficiente que incorpora o valor do raio hidráulico e o coeficiente de rugosidade de Manning para o *shallow concentrated flow*, podendo ser obtido a partir de tabelas da literatura relacionadas ao uso do solo;  $R_{hc_i}$  é o raio hidráulico do rio para o nível de margens plenas do escoamento em canal ( $m$ );  $N_s$ ,  $N_{sc}$  e  $N_c$  são o número de pixels a jusante classificados como escoamento *sheet flow*, *shallow concentrated flow* e *channel flow*, respectivamente.

#### 4.1.2 Configuration

O detalhamento dos parâmetros da FTT segue a divisão apresentada na Figura 42.

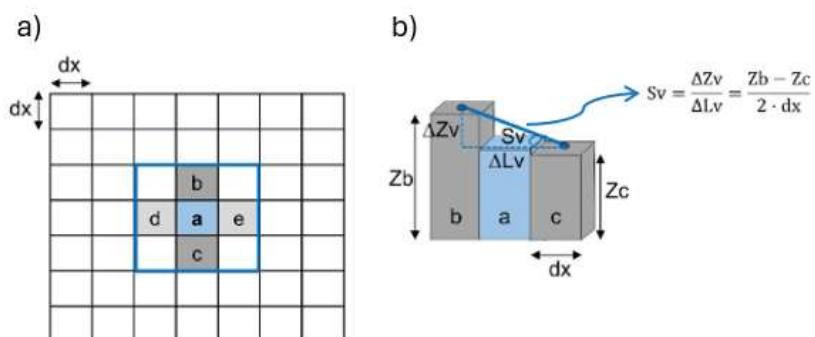
Figura 42 – Janela da rotina *Flow Travel Time* com divisão dos parâmetros solicitados.



### General information

Na primeira parte (número 1, Figura 42), o usuário deve informar o valor para **minimum slope surface**, que consiste na declividade mínima que o modelo irá considerar caso ocorram problemas numéricos durante o processamento do MDE para cálculo da declividade (Figura 43), pois podem resultar valores extremamente baixos ou iguais a zero. Declividades muito pequenas geram velocidades de escoamento excessivamente baixas e tempos de viagem irreais.

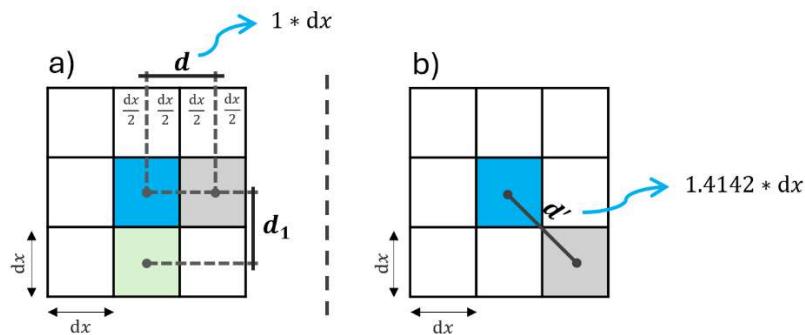
Figura 43 – Esquema de cálculo da declividade de um pixel. a) vizinhança (“b”, “c”, “d”, “e”) do pixel analisando “a” para determinação da declividade; b) representação da declividade do eixo vertical (Sv) do pixel central “a”.



Fonte: adaptado de Paz, 2024.

Os parâmetros ***Orthogonal step*** e ***Diagonal step*** são utilizados para o cálculo da distância entre pixels durante o processamento do MDE. O primeiro corresponde ao comprimento horizontal ( $d$ , Figura 44.a) ou vertical ( $d_1$ , Figura 44.b) entre pixels adjacentes, equivalente a  $1 \text{ dx}$ , onde  $\text{dx}$  é a resolução espacial, considerando a distância entre os centros das células. O segundo representa a distância diagonal entre pixels vizinhos, que corresponde à diagonal do quadrado do pixel, calculada como  $\text{dx}$  multiplicado por  $\sqrt{2}$  (aproximadamente 1,4142). Por exemplo, quando o pixel vizinho está na posição sudeste em relação ao pixel analisado, a distância considerada será a resolução espacial multiplicada por esse fator ( $d'$ , Figura 44.b).

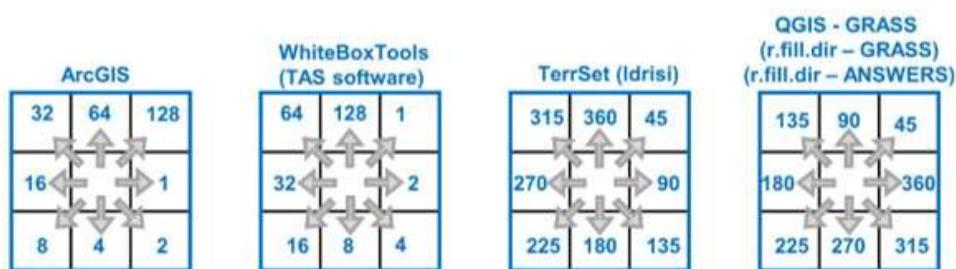
Figura 44 – Representação do cálculo da distância em rasters. a) distância horizontal ( $d$  - entre o pixel azul e o cinza) e vertical ( $d_1$  - entre o pixel azul e o verde) em rasters; b) distância ortogonal ( $d'$  – entre o pixel azul e o cinza) de pixels adjacentes.



#### Flow directions code

As direções de fluxo definem as conectividades hidrológicas entre os pixels do MDE. Elas representam os caminhos preferenciais do escoamento da água nos pixels. Existem diferentes formas de defini-los. O Q-Hidropixel considera a metodologia do *Deterministic Eight-Neighbors* (D8), que estabelece uma janela 3x3 para um pixel central analisado, com 8 possibilidades de direção para ele (Paz, 2024). Na seção número 2 da Figura 42, o usuário deverá fornecer o código das direções de fluxo considerado. Os valores devem ser **inteiros, positivos e diferentes entre si**. A Figura 45 ilustra exemplos de códigos de direções de fluxo que podem ser enviados.

Figura 45 – Exemplos de códigos de direções de fluxo por diferentes métodos.



Fonte: adaptado de Paz, 2024.

### River channels without cross sectional data

Para o cálculo do tempo de viagem em canais, é preciso fornecer o raio hidráulico ( $R_h$ ), a declividade ( $I$ ) e o coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) para os rios da bacia hidrográfica (Equação 4 e 5). Na ausência dessas informações, o usuário poderá marcar a opção *River channels without cross sectional data* (número 3, Figura 42) e fornecer os parâmetros para que o Q-Hidropixel calcule o tempo de viagem nos canais sem dados de seção transversal.

Primeiro, deve-se informar, em ***Constant manning roughness coefficient***, o valor do coeficiente de Manning que será considerado para o cálculo do tempo de concentração dos canais sem informação da seção transversal.

No Q-Hidropixel os rios da rede de drenagem sem informação da seção transversal são segmentados em classes com características homogêneas (raio hidráulico, rugosidade, declividade). Para isso, deve-se informar o comprimento máximo em metros (***Maximum river segment length***) considerado para cada um dos segmentos.

Para estimar o raio hidráulico, o Q-Hidropixel utiliza o método das Curvas Regionais, uma técnica empírica que relaciona características geométricas de um canal (como área da seção transversal ou largura – determinadas para o nível de margens plena), com a área de drenagem acumulada a montante. Assumindo uma seção transversal com ***talude de 1:3***, os coeficientes  $c$ ,  $d$ ,  $g$  e  $h$  (Número 3, Figura 42) são utilizados na Equação 7 e 8 para definir a área molhada e a largura superior do canal onde não há informação da seção transversal.

$$A_i = cDA_i^d \quad \text{Equação 7}$$

$$B_i = gDA_i^h \quad \text{Equação 8}$$

Onde o índice  $i$  refere-se ao  $i$ -ésimo pixel da grade do MDE;  $A_i$  é a área da seção transversal em nível de margens plenas ( $m^2$ );  $B_i$  é a largura superior do canal em nível de margens plenas ( $m$ );  $DA_i$  é a área de drenagem acumulada ( $km^2$ ); e  $c$ ,  $d$ ,  $g$  e  $h$  são coeficientes empiricamente determinados. Assim, para os pixels da rede de drenagem (Figura 46.a) que não apresentam informações conhecidas (pixels azuis, Figura 46.b) o Q-Hidropixel aplicará as Equações 7 e 8 para definir o raio hidráulico a partir da área molhada ( $A_i$ ) e da largura do canal ( $B_i$ ) (Figura 46.c).

As novas classes (Figura 46.c) possuirão comprimento e coeficiente de rugosidade de Manning conforme informado (Número 3, Figura 42) e declividade calculada com base no processamento do MDE.

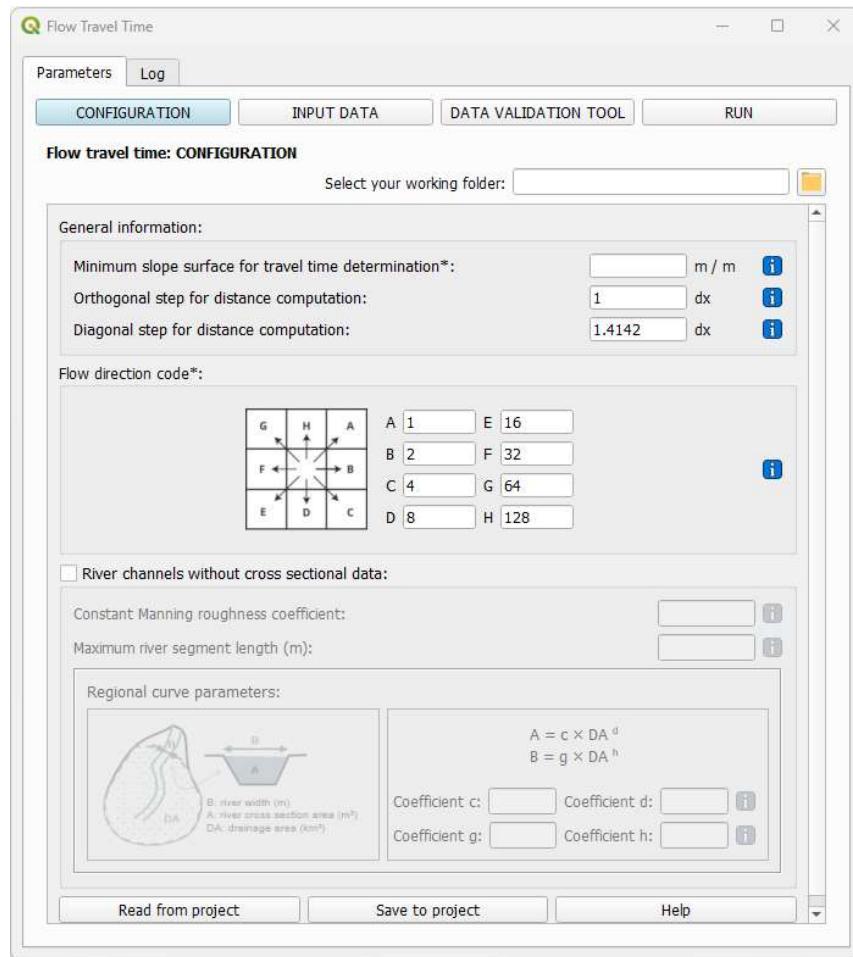
Figura 46 – Esquematização do processo de definição das características das classes dos pixels da rede de drenagem sem informação da seção transversal do canal. a) matriz da rede de drenagem, onde os pixels iguais a 1 representam os rios. b) matriz dos rios segmentados em classes com características homogêneas (raio hidráulico, rugosidade e

declividade) conhecidas. c) classe definida com base nos parâmetros fornecidos com raio hidráulico calculado por meio do método das Curvas Regionais.

a)	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	2	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	2	2	0	0	0	3	0	0	4	4	4	3	0	0	0	0	0	3	0	0
1	0	0	0	1	1																																																																																																										
0	1	0	1	0	0																																																																																																										
0	0	1	0	1	1																																																																																																										
0	0	0	1	0	0																																																																																																										
1	1	1	1	0	0																																																																																																										
0	0	0	1	0	0																																																																																																										
1	0	0	0	1	1																																																																																																										
0	1	0	1	0	0																																																																																																										
0	0	1	0	2	2																																																																																																										
0	0	0	3	0	0																																																																																																										
0	0	0	3	0	0																																																																																																										
0	0	0	3	0	0																																																																																																										
1	0	0	0	1	1																																																																																																										
0	1	0	1	0	0																																																																																																										
0	0	1	0	2	2																																																																																																										
0	0	0	3	0	0																																																																																																										
4	4	4	3	0	0																																																																																																										
0	0	0	3	0	0																																																																																																										

Na Figura 47 é possível observar o preenchimento dos parâmetros apresentados nesta seção para uma bacia hidrográfica.

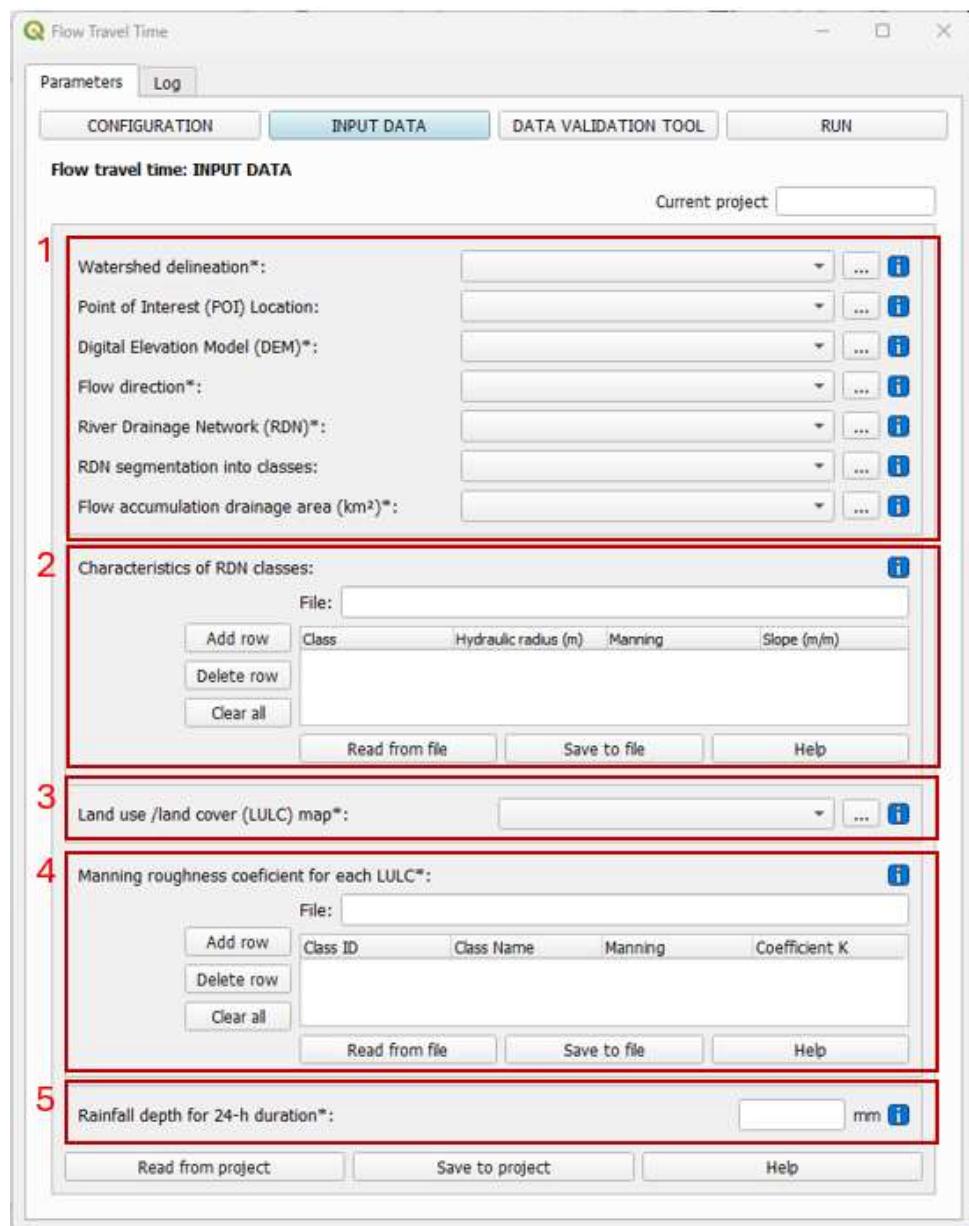
Figura 47 – Parâmetros da janela Configuration do Q-Hidropixel com valores característicos para uma bacia hidrográfica.



#### 4.1.3 Input Data

Na janela *Input Data* (Figura 48) o usuário deve adicionar os arquivos necessários a simulação. Nesta seção, serão explicados os arquivos de entrada esperados, bem como os critérios associados a eles.

Figura 48 – Janela input data da rotina Flow Travel Time do Hidropixel Plugin.



**Observação:** os *rasters* que serão adicionados nos grupos 1 e 3 da Figura 48 devem respeitar os critérios apresentados em **4. Simulação com Q-Hidropixel**.

#### *Watershed delineation*

O arquivo matricial da bacia hidrográfica é obtido a partir do processamento do MDE. Ele deve possuir **apenas** dois valores: 0 (pixels que não drenam para o exutório da bacia hidrográfica) e 1 (pixel com área contribuinte ao pixel exutório) (Figura 49). O Q-Hidropixel irá considerar apenas os pixels que são bacia hidrográfica para realizar as operações e simular o processo chuva-vazão.

Figura 49 - Representação da matriz da bacia hidrográfica, onde valores iguais a 0 (zero) representam áreas com pixels que não compõem a bacia e 1 (um) os pixels que integram a bacia.

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	
0	0	1	1	1	1	0	0	
0	1	1	1	1	1	0	0	
0	0	1	1	1	1	0	0	
0	0	0	1	1	1	0	0	
0	0	0	0	1	0	0	0	
0	0	0	0	1	0	0	0	
0	0	0	0	1	0	0	0	

### *Point of Interest (POI) Location*

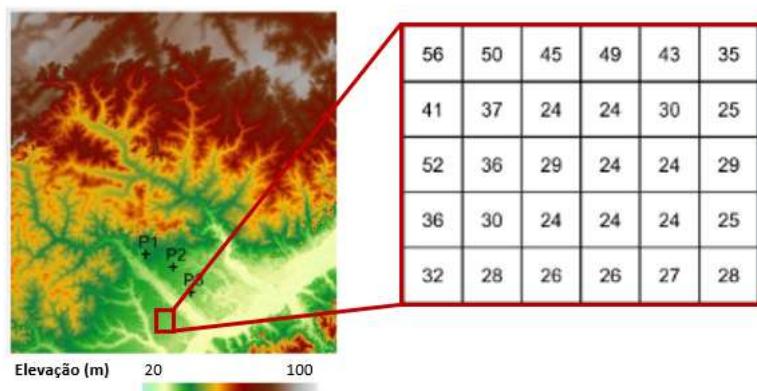
O Q-Hidropixel permite a geração de hidrogramas para pontos de interesse na bacia hidrográfica. Para tal, exige-se que eles estejam corretamente associados à rede de drenagem, de modo a garantir a coerência espacial e hidrológica do modelo. Os pontos devem ser fornecidos em um arquivo shapefile de geometria tipo pontos, cujos identificadores (IDs) sejam inteiros positivos e organizados de forma crescente. Recomenda-se que essa numeração siga a lógica da hierarquia fluvial, partindo de jusante para montante, de modo que os valores menores representem pontos a montante e os valores maiores estejam associados a seções próximas ao exútorio da bacia.

Para cada um dos pontos informados, o modelo define a bacia drenante e aplica as equações necessárias para definição do tempo de concentração para cada pixel da bacia contribuinte.

### *Digital Elevation Model (DEM)*

O Modelo Digital de Elevação (MDE) representa em uma matriz a topografia de uma área. No Hidropixel Plugin ele é necessário para o cálculo da declividade dos pixels. Deve-se garantir que na região da bacia hidrográfica não existam valores incoerentes, como NaN – *Not a Number* – por exemplo. Na Figura 40 é apresentado um recorte de um MDE SRTM de uma região do sul do Brasil (Paz, 2024).

Figura 50 - Recorte de um MDE SRTM de uma região do sul do Brasil.

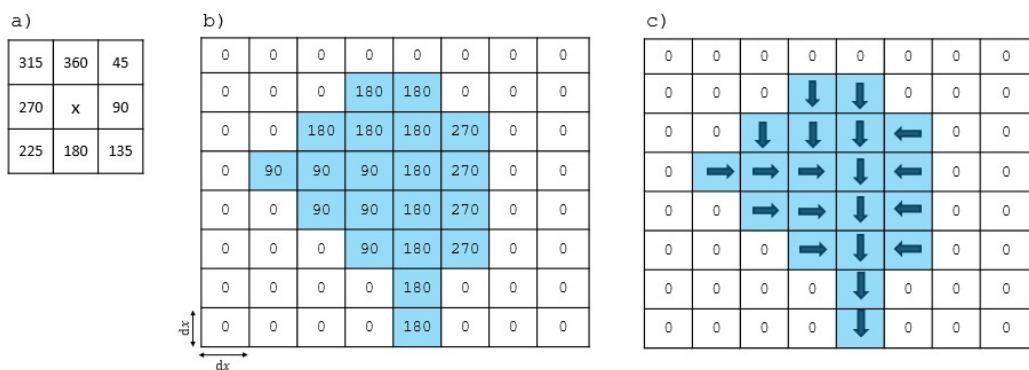


Fonte: adaptado de Paz, 2024.

### Flow directions

O raster das direções de fluxo é resultado do processamento do MDE e representa os sentidos preferenciais do escoamento da água. O arquivo adicionado deve possuir os valores iguais aos códigos adicionados na aba Configuration (ver **4.2.2 Configuration**). Por exemplo, na Figura 51 é apresentado uma combinação de código de direções de fluxo - deve ser informado na aba Configuration - (Figura 51.a) e matriz de direções de fluxo (Figura 51.c). No Q-Hidropixel, o *raster* de direções de fluxo é utilizado para emular o escoamento da água na bacia hidrográfica.

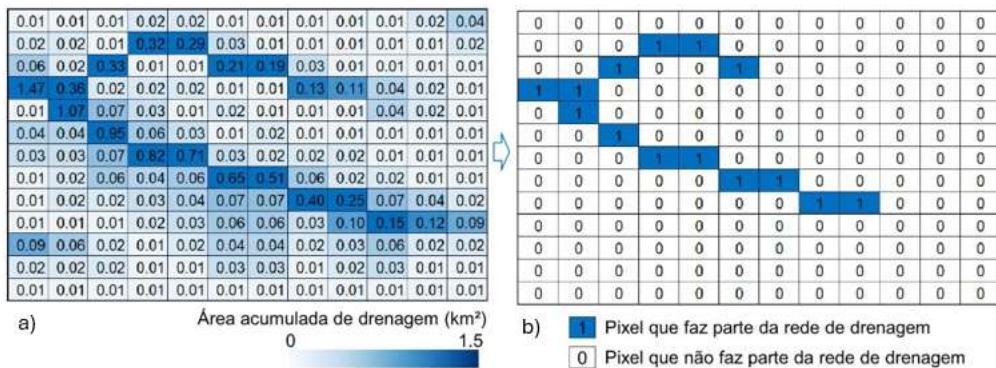
Figura 51 - Representação de código de direções de fluxo e matriz de direções de fluxo. a) Código de direções de fluxo do TerrSet (Idrisi). b) Matriz com direções de fluxo na região da bacia hidrográfica (zona em azul). c) Sentidos do escoamento da água.



### River Drainage Network (RDN)

O *raster* da rede de drenagem pode ser obtido através de subprodutos do processamento do MDE, como por exemplo, o raster de área de drenagem acumulada, que quantifica a área drenante de cada pixel. O arquivo da rede de drenagem deve possuir apenas dois valores: 0 para pixels não rio e 1 para pixels que compõem a rede de drenagem da bacia hidrográfica. Na Figura 52 é possível visualizar um exemplo da forma correta do arquivo que deve ser enviado.

Figura 52 – Matriz de área da acumulada de drenagem (a) e matriz de rede de drenagem com apenas os pixels que são rio (b).



Fonte: adaptado de Paz, 2024.

### RDN segmentation into classes

No Hidropixel Plugin, a estimativa do tempo de viagem em canais (Equação 4 e 5) depende do coeficiente de rugosidade de Manning, da declividade e do raio hidráulico de toda a rede de drenagem da bacia hidrográfica estudada. Com isso, o usuário pode segmentar os trechos da rede de drenagem em classes que representam pixels com valores iguais de coeficiente de Manning, declividade e raio hidráulico. As classes definidas devem possuir valores inteiros, positivos e diferente de zero (Figura 46).

Quando fornecido o raster de classes dos rios, o usuário deverá adicionar os valores dos parâmetros das Equações 4 e 5.

O ideal é que para cada pixel da rede de drenagem existam valores de coeficiente de Manning, declividade e raio hidráulico. Porém, quando não existirem tais informações, pode-se definir um valor constante de coeficiente de Manning, um comprimento máximo para os trechos sem informação e utilizar o método da Curva Regional para estimar o raio hidráulico (ver **River channels without cross-sectional data**). Para os trechos sem informações enviadas, o Hidropixel Plugin irá utilizar os valores fornecidos pelo usuário em **River channels without cross-sectional data**.

### Flow accumulation drainage area (km<sup>2</sup>)

O raster de área acumulada de drenagem é derivado do MDE onde cada pixel representa a quantidade de pixels ou a quantidade de área (m<sup>2</sup> ou Km<sup>2</sup>) na qual o fluxo drena para ele. Para o Hidropixel Plugin, o usuário deve enviar o **raster com área em quilômetros quadrados (km<sup>2</sup>)**.

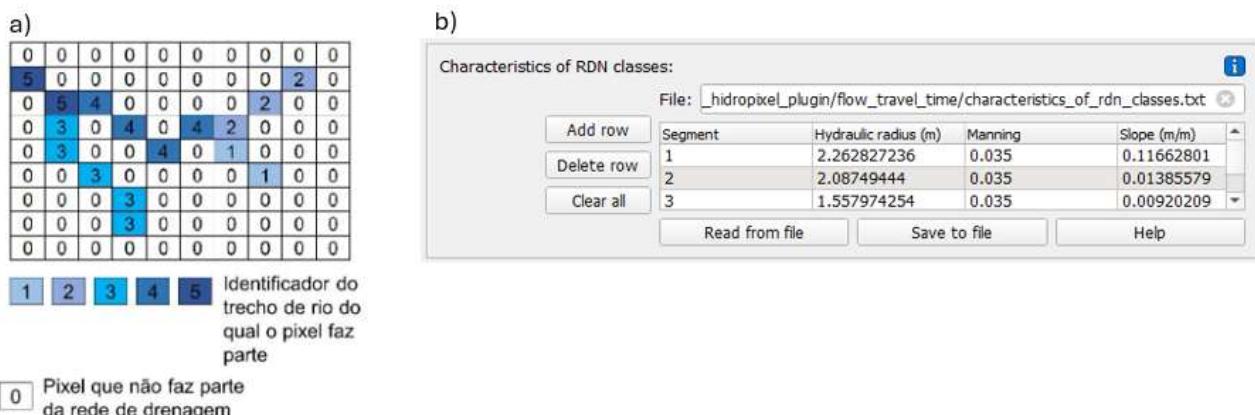
A matriz com a área acumulada de drenagem é utilizada para determinação do raio hidráulico por meio do método das curvas regionais (ver **River channels without cross sectional data**). Um exemplo de área acumulada de drenagem pode ser visualizado na Figura 52.a.

### Characteristics of the RDN classes

Para cada trecho presente no raster com a rede de drenagem segmentada (ver **RDN segmentation into classes**) o usuário deve informar o ID do segmento (primeira coluna da tabela, Figura 53.b), o raio hidráulico em metros (segunda coluna da tabela, Figura 53.b), o Manning (terceira coluna da tabela, Figura 53.b) e a declividade (quarta coluna da tabela, Figura 53.b). O preenchimento das informações pode ser realizado manualmente ou a partir da leitura de um arquivo (ver **3.2.6 Tabelas**).

A codificação das classes de trechos do arquivo raster (Figura 53.a) deve coincidir com as informações adicionadas na tabela (na Figura 53.b).

Figura 53 - Representação de matriz da rede de drenagem segmentada em classes (a) e tabela de características das classes da rede de drenagem preenchida no Hidropixel Plugin (b).



Fonte: adaptado de Paz, 2024.

### Land use/land cover (LULC) map

O arquivo matricial de uso e ocupação da bacia hidrográfica contém pixels que armazenam um código numérico correspondente a uma classe de cobertura e uso do solo, por exemplo: florestas, áreas agrícolas, pastagens, áreas urbanas etc. No Q-Hidropixel, esse raster é fundamental para atribuir a cada pixel dois parâmetros para o cálculo do tempo de escoamento em superfície: o coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) para o *sheet flow* (Equação 1) e o coeficiente  $k$  para o *shallow concentrated flow* (Equação 2).

Os códigos das diferentes classes devem ser valores numéricos, inteiros, positivos, diferentes entre si e maiores que zero (Figura 54).

Figura 54 – Matriz de uso e cobertura do solo com diferentes classes numéricas.



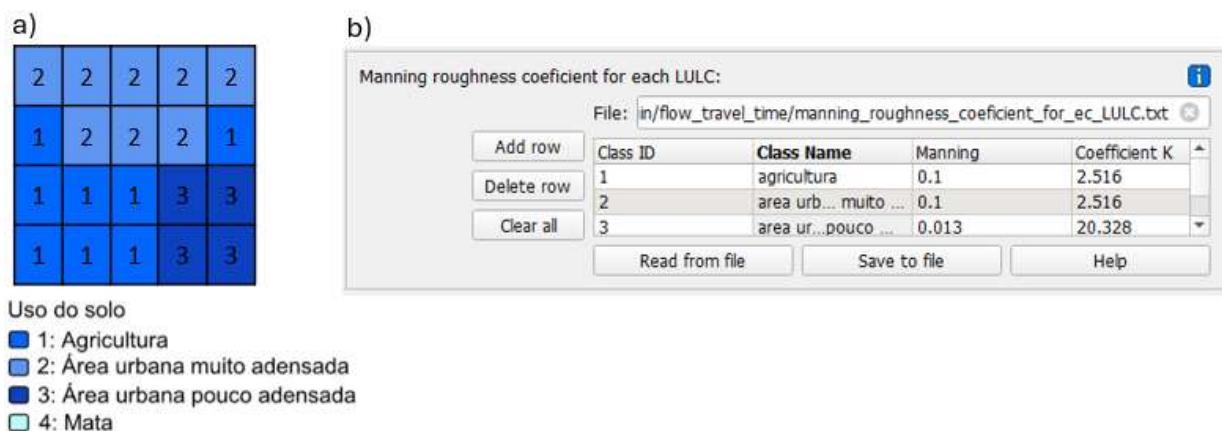
Fonte: adaptado de Paz, 2024.

#### *Manning roughness coefficient for each LULC*

Para cada classe de uso e cobertura do solo, o usuário deve adicionar o valor do coeficiente de rugosidade de Manning (n) (coluna 3) e o coeficiente K (Equação 2) para o cálculo do tempo de viagem em superfície – o *sheet flow* e *shallow concentrated flow*, respectivamente. O preenchimento das informações pode ser realizado manualmente ou a partir da leitura de um arquivo (ver **3.2.6 Tabelas**).

A codificação das classes de trechos do arquivo raster (Figura 55.a) deve coincidir com as informações adicionadas na tabela (Na Figura 55.b).

Figura 55 – Matriz com classes de uso do solo (a) e tabela de característica das classes preenchida no Q-Hidropixel (b).



Fonte: Adaptado de Paz, 2024.

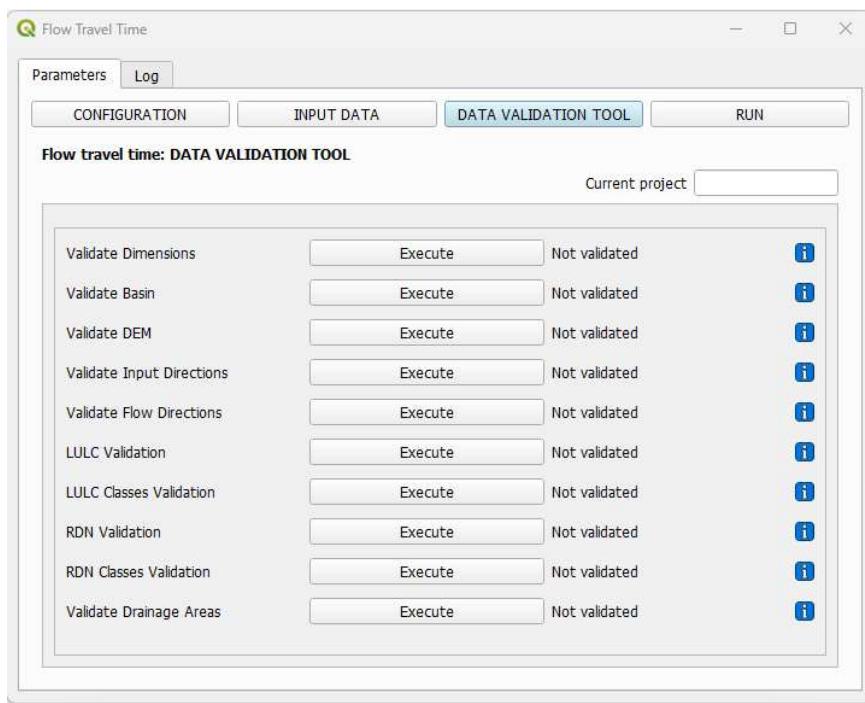
#### *Rainfall depth for 24-h duration*

Para calcular o tempo de viagem do escoamento do tipo *sheet flow*, o Q-Hidropixel utiliza a lâmina de chuva denominada P24, que corresponde à precipitação acumulada em 24 horas para um evento com tempo de retorno de 2 anos. Esse valor é extraído das curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) da região de estudo.

#### 4.1.4 Data Validation Tool

No módulo *Flow Travel Time*, são checados o raster de delimitação da bacia, o MDE, o raster de direções de fluxo, de áreas acumuladas, a rede de drenagem, o raster de segmentos de rede e o raster de uso e cobertura do solo (Figura 56). Por exemplo, na primeira checagem, denominada *Validate dimensions*, se qualquer um desses arquivos de entrada (Figura 48) tiver resolução espacial ou número de linhas ou colunas diferente dos demais, a validação falha. Para tal, o usuário deve garantir que todos esses *rasters* foram gerados a partir da mesma base (mesmo MDE, mesmo recorte e projeção).

Figura 56 – Página *Data Validation Tool* do módulo *Flow Travel Time* do Q-Hidropixel.



A Tabela 2 apresenta as validações realizadas no módulo *Flow Travel Time* com suas respectivas descrições.

Tabela 2 - Checagens de validação e coerência de dados da janela *Flow Travel Time* desenvolvidas no Q-Hidropixel.

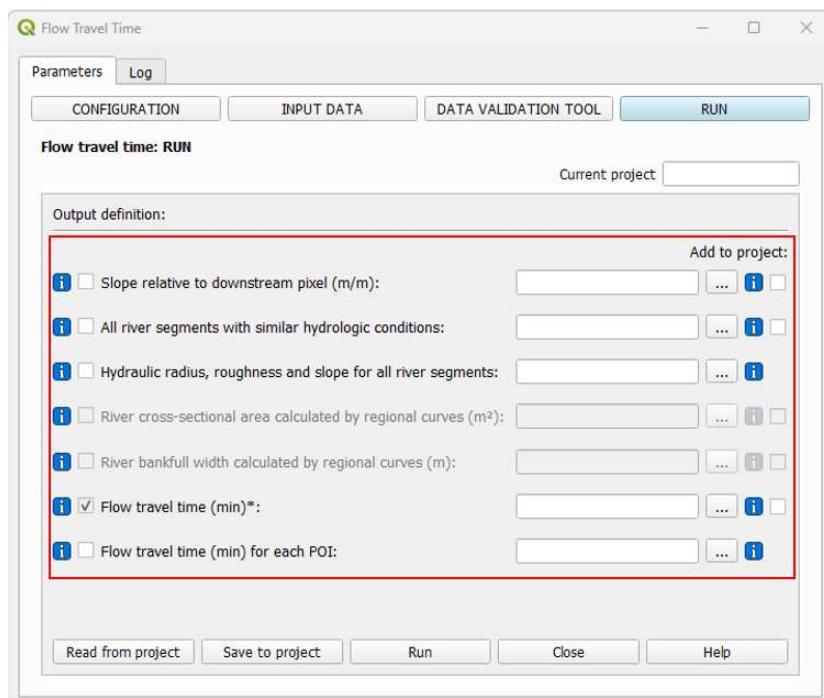
Módulo	Checagens
<i>Flow Travel Time</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abrangência e discretização espacial dos rasters de entrada</li> <li>2. Conteúdo do arquivo raster de delimitação da bacia (1 dentro da bacia; 0 fora)</li> <li>3. Conteúdo do arquivo raster de MDE (valores válidos dentro da bacia)</li> <li>4. Codificação das direções de fluxo: 8 valores distintos, inteiros e positivos</li> <li>5. Conteúdo do arquivo raster de direções de fluxo: valores segundo a codificação e todos os caminhos de fluxo a jusante de cada pixel alcançam o exutório da bacia</li> <li>6. Conteúdo do arquivo raster de rede de drenagem: 1 (rede) ou 0 (não-rede) e caminho contínuo a jusante cada pixel da rede até exutório</li> <li>7. Conteúdo do arquivo raster de segmentos da rede: 1 a Ns (pixels da rede), 0 (demais), onde Ns é a quantidade de segmentos, com valores inteiros</li> <li>8. Conteúdo do arquivo raster de classes de uso e ocupação do solo: pixels da bacia com valores inteiros positivos</li> <li>9. Conteúdo do arquivo raster de áreas acumuladas de drenagem: valores reais positivos para pixels da bacia, sendo crescentes para jusante de cada caminho de fluxo</li> </ol>
<i>Flow Travel Time</i>	#arquivos raster, GeoTIFF (.tif). *arquivos de texto (.txt)

#arquivos raster, GeoTIFF (.tif). \*arquivos de texto (.txt)

#### 4.1.5 Run

A rotina Flow Travel Time possui como principal resultado a matriz do tempo de escoamento da bacia hidrográfica. Porém, outros outputs são gerados paralelamente ao primeiro, como ilustrado na Figura 57. Nesta seção são abordados os outputs da rotina Flow Travel Time.

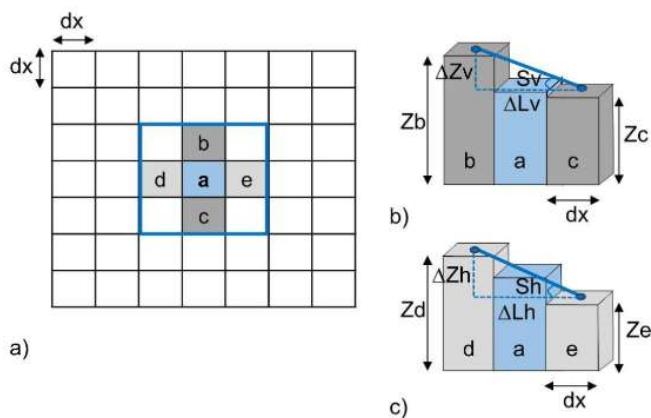
Figura 57 – Página *Run* da rotina *Flow Travel Time* do Q-Hidropixel.



### *Slope relative to downstream pixel (m/m)*

O primeiro output apresentado na Figura 57 é um *raster* cujo atributo dos pixels é a sua declividade calculada entre esse pixel do MDE e seu pixel vizinho a jusante (para onde o fluxo está direcionado, seguindo as direções de fluxo). Essa declividade é obtida pela diferença de elevação entre o pixel avaliado e o pixel imediatamente a jusante, dividida pela distância horizontal ou vertical entre eles, conforme o caso (Figura 58).

Figura 58 - Indicação esquemática da determinação da declividade da superfície a partir de um MDE com resolução espacial igual a  $dx$ : a) MDE com destaque para um pixel central 'a' e seus quatro vizinhos ortogonais b, c, d, e em uma janela 3x3; b) Representação da declividade do pixel central no eixo vertical da janela 3x3 ( $S_v$ ), em função das elevações  $Z_b$  e  $Z_c$  dos pixels vizinhos na vertical e da distância entre eles ( $\Delta L_v$ ); c) Representação da declividade do pixel central na horizontal ( $S_h$ ), em função das elevações  $Z_d$  e  $Z_e$  dos pixels vizinhos na horizontal e da distância entre eles ( $\Delta L_h$ )



Fonte: Paz, 2024.

### *All river segments with similar hydrologic conditions*

O segundo arquivo de saída (Figura 57) é um raster contendo a segmentação da rede de drenagem em trechos com características semelhantes, isto é, raio hidráulico, declividade e coeficiente de rugosidade de Manning. Esse output complementa o arquivo enviado em **RDN segmentation into classes** caso o usuário não possua as informações para toda a rede de drenagem. Os trechos não informados têm seus aspectos hidráulicos definidos por meio do método da Curva Regional.

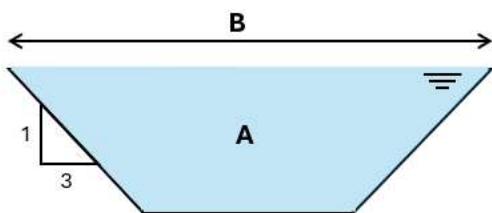
### *Hydraulic radius, roughness and slope for all river segments*

Complementar ao output acima (Figura 57), este arquivo de saída cria um arquivo de texto (.txt) contendo as informações de cada um dos trechos, tanto os definidos pelo usuário, quanto os resultantes do processamento do Q-Hidropixel (quando o usuário não possuir informações de todos os rios da rede de drenagem). A sintaxe é igual àquela apresentada na Figura 36.

### River cross-sectional area calculated by regional curves (m<sup>2</sup>)

Quando marcada a opção para utilizar o método da Curva Regional, esta opção ficará disponível (ver **River channels without cross sectional data**). Este raster contém como atributo o valor da área da seção transversal para cada pixel da rede de drenagem ('A', Figura 59). O valor é o resultado da Equação 7.

Figura 59 – Seção transversal considerada no método das Curvas Regionais, onde A é a área da seção transversal e B é a largura superior da seção trapezoidal do canal.



### River bankfull width calculated by regional curves (m)

Quando marcada a opção para utilizar o método da Curva Regional, esta opção ficará disponível (ver **River channels without cross sectional data**). Cada pixel deste raster contém o resultado do cálculo da largura do canal ('B', Figura 59) por meio da Equação 8.

### Flow travel time (min)

O *Flow Travel Time* é um raster que indica o tempo que a água leva para escoar de cada pixel do MDE até o exutório da bacia. Esse tempo é calculado considerando a topografia, o uso do solo e as características hidráulicas da rede de drenagem. Para cada pixel, o tempo de viagem final é resultado da Equação 6, que acumula o tempo de viagem em superfície (*sheet* e *shallow concentrated flow*) e em canal (*channel flow*). A unidade do tempo de escoamento total é minutos.

O raster resultante é utilizado nas etapas seguintes do modelo Q-Hidropixel para simular a propagação do escoamento e gerar os hidrogramas.

### Flow travel time (min) for each POI

Ao selecionar esta opção, o usuário deverá informar uma pasta para salvar os arquivos raster do tempo de viagem para os pontos de interesse. Para cada ponto enviado, o Q-Hidropixel retornará os *rasters* da bacia hidrográfica e do tempo de viagem. A identificação dos arquivos seguirá o ID do *shapefile* enviado em *Point of Interest (POI) Location*.

## 4.2 Excess Rainfall

A rotina Excess Rainfall estima para cada pixel do MDE a chuva excedente por meio do método *Curve Number* (CN) do *Natural Resource Conservation Service* (NRCS). Além disso, ela gera também o mapa da chuva espacializada na bacia hidrográfica através de interpolação.

### 4.2.1 Descrição do algoritmo

No Hidropixel Plugin, a chuva excedente é determinada por meio do método *Curve Number* (CN) do *Natural Resource Conservation Service* (NRCS) com base nas equações 9, 10 e 11.

$$Pe_{ac}(t)_i = \begin{cases} \frac{[P(t)_i - Ia_i]^2}{P(t)_i - Ia_i + S_i} & \text{if } P(t)_i > Ia_i \\ 0 & \text{if } P(t)_i \leq Ia_i \end{cases} \quad \text{Equação 9}$$

$$S_i = \frac{25400}{CN_i} - 254 \quad \text{Equação 10}$$

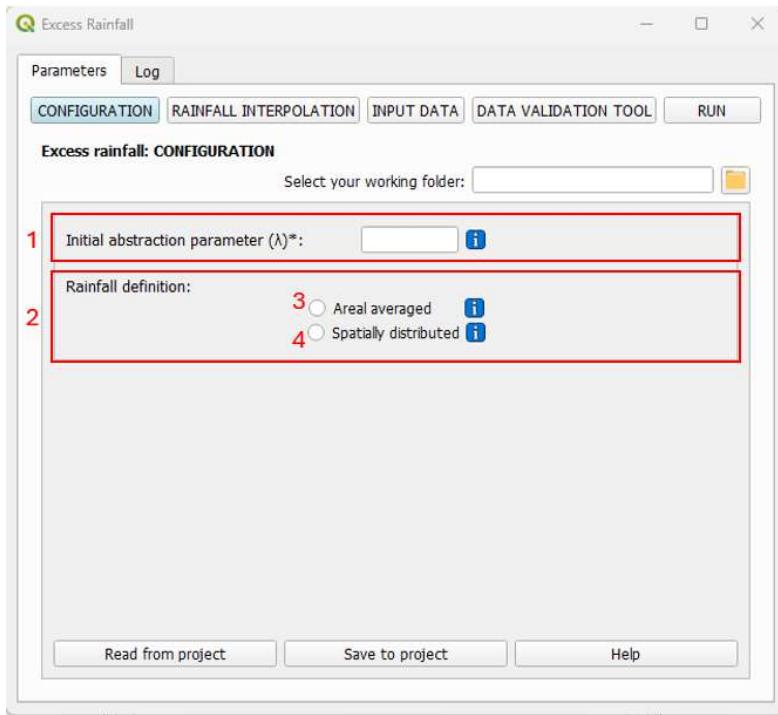
$$Ia_i = \lambda \cdot S_i \quad \text{Equação 11}$$

onde o subscrito  $i$  se refere ao  $i$ -ésimo pixel e o índice  $t$  se refere ao instante de tempo;  $Pe_{ac}(t)_i$  é a chuva excedente acumulada (mm);  $P(t)_i$  é a precipitação acumulada (mm);  $Ia_i$  é a abstração inicial (mm);  $S_i$  é a retenção máxima potencial após o início do escoamento (mm);  $\lambda$  é a razão de abstração inicial; e  $CN_i$  é o parâmetro adimensional do número de curva.

#### 4.2.2 Configuration

A descrição dos parâmetros da rotina *Excess Rainfall* segue a divisão ilustrada na Figura 60.

Figura 60 – Janela *Configuration* da Rotina *Excess Rainfall*.



#### *Initial abstraction ( $\lambda$ )*

O parâmetro *initial Abstraction ( $\lambda$ )* representa a quantidade inicial de chuva retida ou perdida antes do início do escoamento superficial efetivo, incluindo interceptação pela vegetação, infiltração inicial e outras perdas superficiais. No modelo Hidropixel, esse parâmetro é fundamental para o cálculo da chuva excedente (Equação 11), pois determina o volume mínimo acumulado de precipitação necessário para que o escoamento comece a ocorrer em cada pixel.

A definição adequada do valor de *initial abstraction* influencia diretamente a estimativa da vazão gerada, sendo comumente relacionado a uma fração da capacidade máxima de retenção do solo, conforme o método do Curve Number (CN), e deve ser ajustado conforme as características do uso do solo e do tipo de solo na bacia (Lima, 2023).

#### *Rainfall definition*

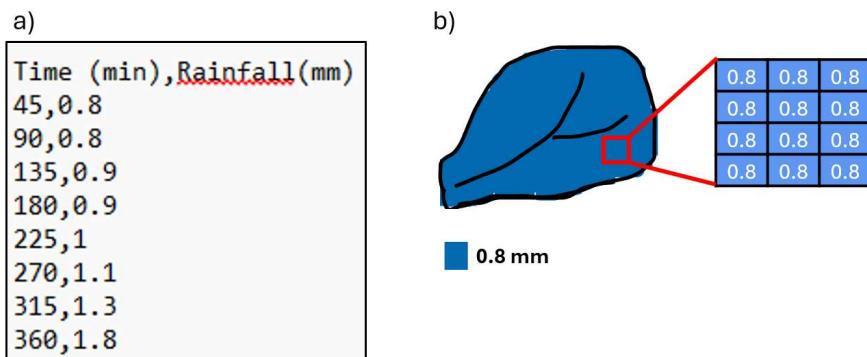
A seção *Rainfall Definition* do Q-Hidropixel permite ao usuário escolher como será considerada a precipitação na simulação: como chuva média para toda a bacia hidrográfica (*Areal Averaged*, número 3, Figura 60) ou como chuva distribuída espacialmente (*Spatially Distributed*,

número 4. Figura 60). Em ambos os casos, o arquivo de entrada é do tipo texto (.txt), porém as estruturas desses arquivos são diferentes.

### *Areal Averaged*

Para a chuva média, o arquivo contém a série temporal da precipitação média da bacia. A estrutura do arquivo aceito no Hidropixel Plugin deve ser montada da seguinte forma: primeira coluna com o tempo, em minutos; segunda coluna com a precipitação acumulada em milímetros para o respectivo tempo (Figura 61).

Figura 61 – Representação da estrutura do arquivo da precipitação média aceito pelo Hidropixel Plugin (a) e esquematização da chuva média em uma bacia hidrográfica fictícia para o tempo de 45 minutos (b).



Nesse caso, para cada valor da coluna tempo, o Hidropixel irá considerar a precipitação correspondente para aplicação das Equação 9, 10 e 11.

### *Spatially Distributed*

Já para a chuva distribuída, o arquivo deve ser gerado a partir do módulo *Rainfall Interpolation* (Ver 4.2.2 *Rainfall Interpolation*), pertencente à rotina *Excess Rainfall* do Hidropixel Plugin, e representa a precipitação espacialmente distribuída para cada pixel da bacia.

#### 4.2.2 Rainfall Interpolation

Para cada passo de tempo do evento considerado, a precipitação para cada pixel do modelo Hidropixel é estimada utilizando o método de interpolação ponderada pelo inverso do quadrado da distância (Equação 12).

$$Pm_i = \frac{\sum_{j=1}^{NP} \frac{P_j}{(d_{i,j})^2}}{\sum_{j=1}^{NP} \frac{1}{(d_{i,j})^2}}$$

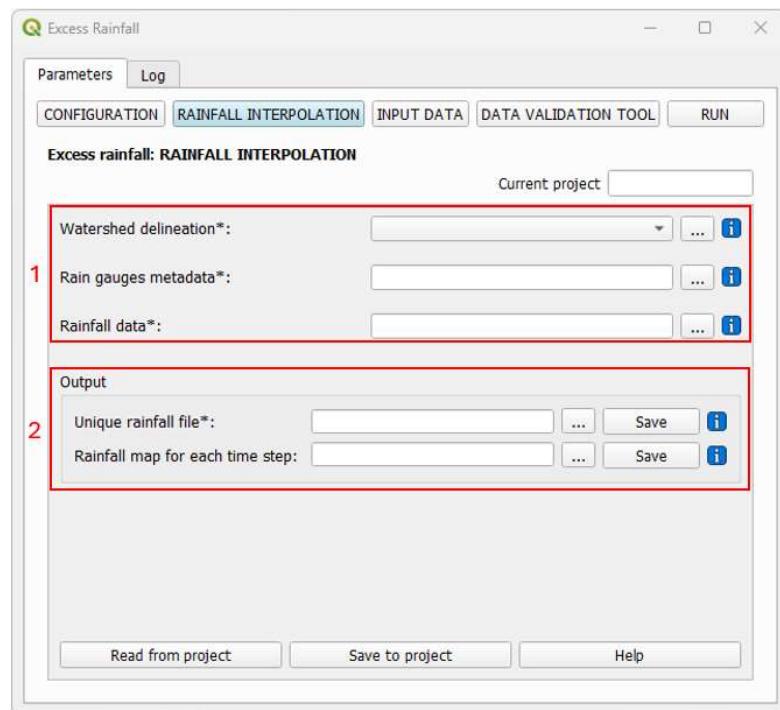
Equação 12

Onde o índice  $i$  refere-se ao  $i$ -ésimo pixel da grade do MDE; o índice  $j$  refere-se à  $j$ -ésima estação pluviométrica;  $NP$  é o total de estações pluviométricas;  $d_{i,j}$  é a distância entre o pixel  $i$  e a estação pluviométrica  $j$ ; e  $P_j$  é a precipitação registrada pela estação pluviométrica  $j$ .

### *Input files*

Para o módulo *Rainfall Interpolation* (Figura 62) o usuário deve fornecer o arquivo raster da bacia hidrográfica obedecendo aos seguintes critérios: abrangência geográfica compatível, resolução espacial uniforme, sistema de coordenadas planas e valores inteiros nas células (ver Figura 40).

Figura 62 – Interface gráfica do módulo *Rainfall Interpolation* da rotina *Flow Routing*.



Para cada posto pluviométrico (*rain gauges*), as informações, como **ID, latitude e longitude**, devem ser enviadas um arquivo de texto (txt) seguindo a ordem ilustrada na Figura 63.

Figura 63 – Estrutura do arquivo de metadados dos postos pluviométricos (*rain gauges metadata*)

<u>id,LAT,LONG</u>
4,136100,546300
2,140300,546600
8,139500,558500
6,132000,555200
7,141400,552400
9,135400,540600
3,139900,539300
5,128400,552940
1,127840,559620

Finalmente, é crucial fazer o upload das medições de precipitação em milímetros registradas por cada estação pluviométrica. A Figura 64 mostra o exemplo de tabela onde cada coluna corresponde à série de precipitação de uma estação pluviométrica específica. A linha do cabeçalho na tabela fornece o ID de cada estação pluviométrica.

Figura 64 – Esquematização do arquivo contendo as precipitações medidas para as estações selecionadas.

Time (min),1,2,3,4,5,6,7,8,9
15,0,0,0,0,0,0,0,0,0
30,0,0,0,0,0,0,0,0,0
45,0,0,0,0,0,0,0,0,0
60,0,0,0,0,0,0,0,0,0
75,0,0,0,0,0.2,0.2,0,0,0
90,0,0,0,0,0,0,0.2,0
105,0,0.2,0.2,0.2,0.2,0.2,0,0,0
120,0,0,0.2,0.2,0.4,0.2,0,0.2,0.4
135,0,0.2,0,0.2,0,0.4,0.2,0.2,0
150,0,0,0,0.2,0,0,0,0,0
165,0,0,0.2,0.2,0,0,0,0,0

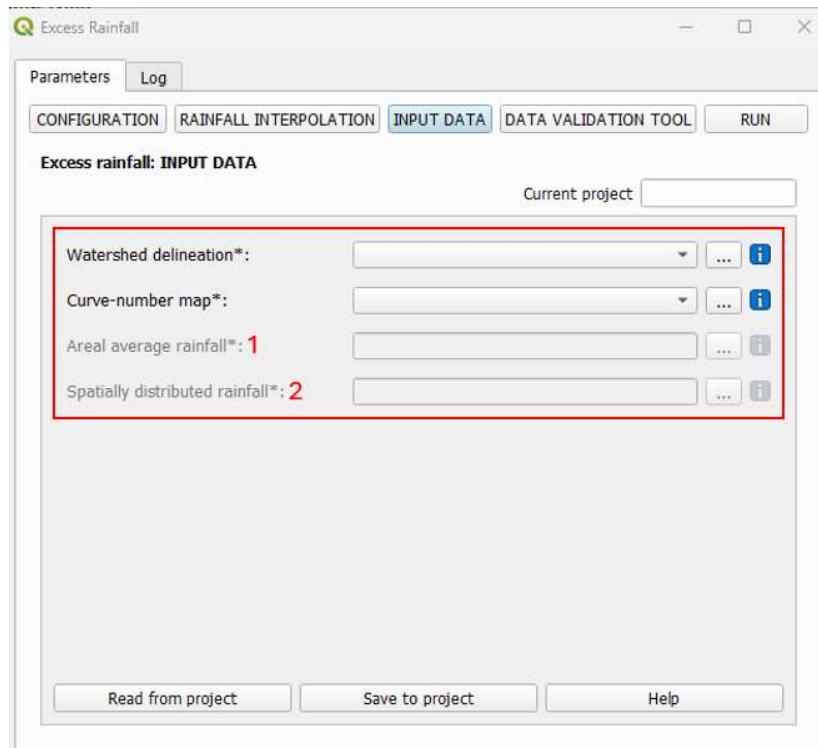
### Output files

O principal resultado desse módulo (*unique rainfall file*, marcação “\*”, número 2, Figura 57) é um arquivo binário que contém os dados de precipitação para cada passo de tempo.

#### 4.2.3 Input Data

Na janela *Input Data* da rotina *Excess Rainfall* (Figura 65) o usuário deve adicionar os arquivos necessários à simulação. Nesta seção, são explicados os arquivos de entrada esperados, bem como os critérios associados a eles.

Figura 65 – Janela *Input data* da rotina *Excess Rainfall* do Hidropixel Plugin.



**Observação:** os *rasters* que serão adicionados devem respeitar os critérios apresentados em 4.  
**Simulação com Hidropixel Plugin.**

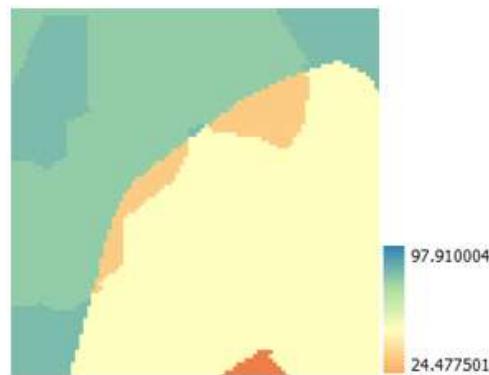
#### *Watershed delineation*

O arquivo matricial da bacia hidrográfica é obtido a partir do processamento do MDE. Ele deve possuir **apenas** dois valores: 0 (pixels que não drenam para o exutório da bacia hidrográfica) e 1 (pixel com área contribuinte ao pixel exutório) (Ver Figura 49). O Hidropixel Plugin irá considerar apenas os pixels que são bacia hidrográfica para realizar as operações e simular o processo chuva-vazão.

#### *Curve Number map*

O Curve Number Map é um arquivo raster necessário para simulação com o Hidropixel Plugin, pois define o valor do CN de cada pixel dentro da bacia hidrográfica, usado para estimar a chuva excedente (Equação 10) e, consequentemente, o escoamento. O *Curve Number* é um parâmetro que relaciona a capacidade de absorção do solo, o uso do solo e a cobertura vegetal, determinando a quantidade de precipitação que se transforma em escoamento. No arquivo do mapa de *Curve Number*, cada pixel da bacia hidrográfica recebe um valor correspondente ao CN, com base nas características do solo e do uso da terra naquele local (Figura 66).

Figura 66 – Exemplo de raster contendo valores de CN para os pixels da bacia hidrográfica.



#### *Areal average rainfall*

Para enviar o arquivo da chuva média na bacia o usuário deve selecionar a opção *Areal averaged* (número 3, Figura 61), então adicionar o arquivo de texto com sintaxe igual à apresentada na Figura 61.a.

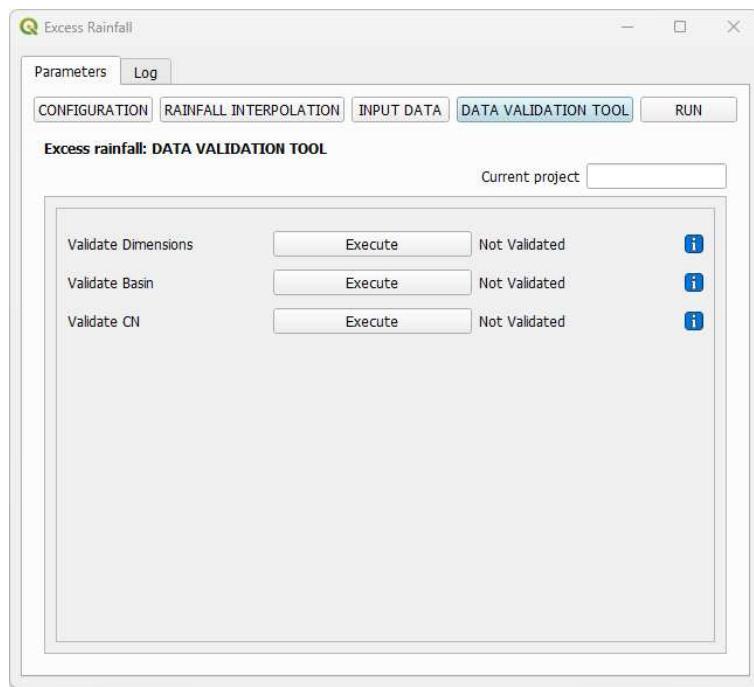
#### *Spatially distributed rainfall*

O arquivo da chuva espacialmente distribuída é resultado do módulo **4.2.2 Rainfall Interpolation**. Para habilitar o envio, deve-se escolher a respectiva opção na janela *Configuration* da rotina *Excess Rainfall* (número 4, Figura 60).

#### **4.2.4 Data Validation Tool**

No módulo *Excess Rainfall*, além de reutilizar as validações de dimensões de raster e de bacia, há uma validação específica do raster de Curve Number (CN) (Figura 67). O plugin lê o raster de CN e, usando a máscara de bacia, extrai apenas os valores internos à bacia. Em seguida, verifica se todos os valores são numéricos, se não há células sem dados dentro da bacia e se todos os CN estão dentro do intervalo esperado, maiores que 0 e menores ou iguais a 100.

Figura 67 – Checagens do módulo *Excess Rainfall*.



Todas as validações realizadas no *Excess Rainfall* e suas descrições podem ser visualizadas na Tabela 3

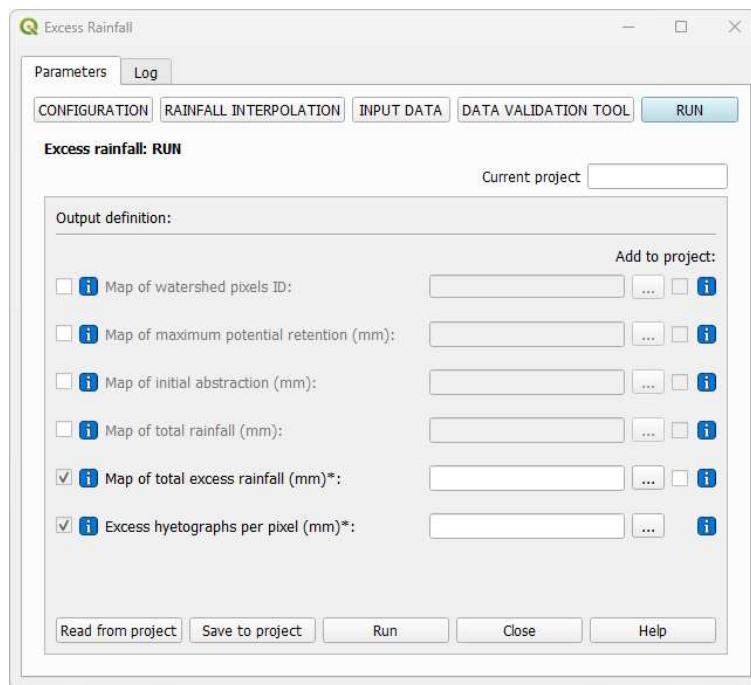
Tabela 3 - Checagens de validação e coerência de dados da janela *Excess Rainfall* desenvolvidas no Q-Hidropixel.

Módulo	Checagens
<i>Excess Rainfall</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abrangência e discretização espacial dos rasters de entrada</li> <li>2. Conteúdo do arquivo raster de delimitação da bacia (1 dentro da bacia; 0 fora)</li> <li>3. Conteúdo do arquivo raster de CN (valores positivos e <math>\leq 100</math> dentro da bacia)</li> </ol>

#### 4.2.5 Run

Esta seção apresenta os outputs da rotina *Excess Rainfall* (Figura 68) do Hidropixel Plugin. Todos os rasters possuem mesma dimensão (número de linhas, colunas e abrangência geográfica) do arquivo original enviado (*Watershed delineation* e *Curve Number map*).

Figura 68 – Janela *Run* da rotina *Excess Rainfall* do *Hidropixel Plugin*.



#### *Map of watershed pixels ID*

O *Map of Watershed Pixels ID* é um arquivo raster georreferenciado em formato TIF, que contém os identificadores únicos (ID) pixels da bacia hidrográfica, obtidos através da enumeração das células da matriz da bacia hidrográfica que possuem valor igual a 1.

#### *Map of maximum potential retention (mm)*

O *Map of Maximum Potential Retention* é um arquivo raster em TIF, georreferenciado, que representa a capacidade máxima de retenção de água para cada pixel da bacia, medida em milímetros. Esse mapa é baseado no Curve Number (Equação 10) de cada pixel e indica a quantidade de precipitação que pode ser retida antes que o escoamento comece a ocorrer.

### *Map of initial abstraction (mm)*

O *Map of Initial Abstraction*, é um arquivo raster georreferenciado que mostra o valor da abstração inicial para cada pixel, ou seja, a quantidade de precipitação retida antes do escoamento, levando em consideração fatores como infiltração e interceptação pela vegetação obtida pela aplicação da Equação 11.

### *Map of total rainfall (mm)*

O *Map of Total Rainfall* é um arquivo raster em TIF que contém a precipitação total acumulada para cada pixel, representando a lâmina precipitada na bacia hidrográfica durante o evento considerado.

### *Map of total excess rainfall (mm)*

O *Map of Total Excess Rainfall* mostra a precipitação excedente, ou seja, a quantidade de chuva que ultrapassou a abstração inicial e contribui efetivamente para o escoamento (Equação 9). Este mapa também é gerado em formato raster georreferenciado e é essencial para estimar a quantidade de água que irá escoar para a rede de drenagem, sendo ele input da rotina *Flow Routing*.

### *Excess hyetographs per pixel (mm)*

O *Excess Hyetographs per Pixel* é um arquivo binário com sintaxe idêntica à do arquivo de precipitação distribuída espacialmente (*Spatially Distributed Rainfall*). Esse arquivo fornece uma representação temporal da precipitação excedente ao longo de um evento de chuva.

## **4.3 Flow Routing**

A rotina *Flow Routing* estima a resposta em termos de vazão para cada um desses pixels do MDE até o exutório da bacia hidrográfica. Depois superpõe temporalmente as vazões dos pixels e gera o hidrograma final da bacia hidrográfica.

### 4.3.1 Discrição do algoritmo

A partir da precipitação efetiva, obtida por meio da Equação 9, o Q-Hidropixel estima o hidrograma de cada um dos pixels até o exutório da bacia hidrográfica. Para isso, os hidrogramas são primeiramente calculados sem considerar o efeito de amortecimento (linha azul, Figura 69.a; Equação 13). O hidrograma transladado de cada pixel é em seguida direcionado até um reservatório linear (Equação

14, 15, 16), que representa os efeitos de armazenamento ao longo do caminho de fluxo a jusante do pixel até o exutório da bacia.

$$Q_{in}(t)_i = \frac{Pe(t - Tv_i)_i}{60 \cdot d} \cdot Ap_i \quad \text{Equação 13}$$

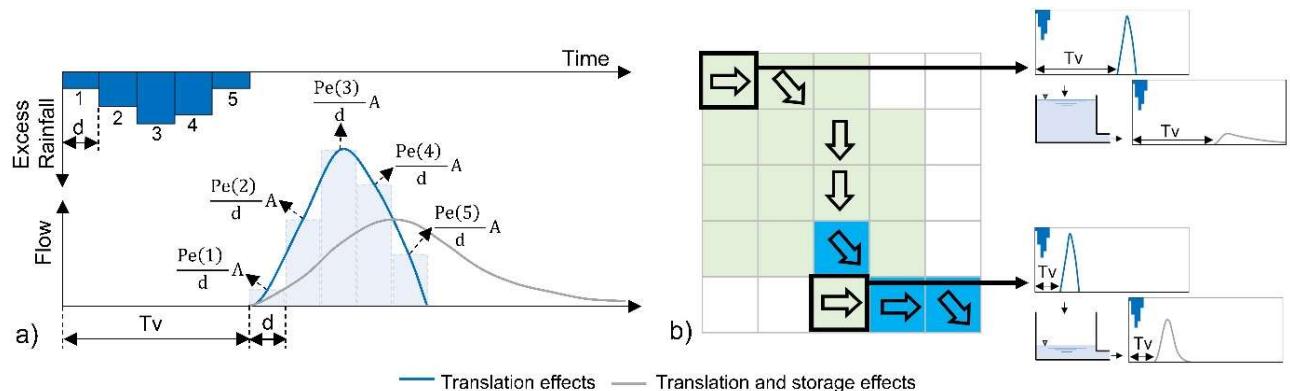
$$Q(t)_i = C_{0i} \cdot Q_{in}(t)_i + C_{1i} \cdot Q_{in}(t-d)_i + C_{2i} \cdot Q(t-d)_i \quad \text{Equação 14}$$

$$C_{0i} = C_{1i} = \frac{d}{2K_i + d} \quad \text{Equação 15}$$

$$C_{2i} = 1 - 2C_{0i} \quad \text{Equação 16}$$

Onde  $Q_{in}(t)_i$  é a taxa média de escoamento superficial no exutório da bacia ( $m^3/s$ );  $Pe(t - Tv_i)_i$  é a precipitação excedente incremental ( $m$ );  $Ap_i$  é a área do pixel ( $m^2$ );  $d$  é a duração da precipitação excedente (min);  $Q(t)_i$  é a taxa de saída do reservatório ( $m^3/s$ );  $C_0$ ,  $C_1$ , e  $C_2$  são os coeficientes de roteamento do reservatório linear; e  $K_i$  é o coeficiente de atenuação de armazenamento do reservatório (min).

Figura 69 - (a) Determinação do hidrograma de um determinado pixel no exutório da bacia e (b) Ilustração da relação entre o tempo de viagem e o efeito de armazenamento.



Fonte: adaptado de Lima *et al.*, 2024.

O coeficiente  $K_i$  representa o tempo de detenção da água no reservatório e é calculado considerando que a razão  $\beta$  entre o coeficiente de armazenamento e a soma do tempo de viagem e o coeficiente de armazenamento é constante para toda a bacia (Equação 17 e 18).

$$\beta = \frac{K_i}{Tv_i + K_i} \quad \text{Equação 17}$$

$$K_i = \frac{Tv_i}{\frac{1}{\beta} - 1} \quad \text{Equação 18}$$

O valor de  $\beta$  é determinado por calibração e varia entre 0 e 1. Se  $\beta$  estiver próximo de 1, o escoamento é dominado pelos efeitos de armazenamento na bacia, resultando em valores mais altos de  $K_i$ . Por outro lado, se  $\beta$  estiver próximo de 0, valores mais baixos de  $K_i$  são obtidos, indicando que os efeitos de armazenamento na bacia são mínimos. Deve-se notar  $K_i$  também é função de  $Tv_i$ , e, portanto, os efeitos de armazenamento são mais significativos para os pixels localizados longe do exutório da bacia (Figura 69.b).

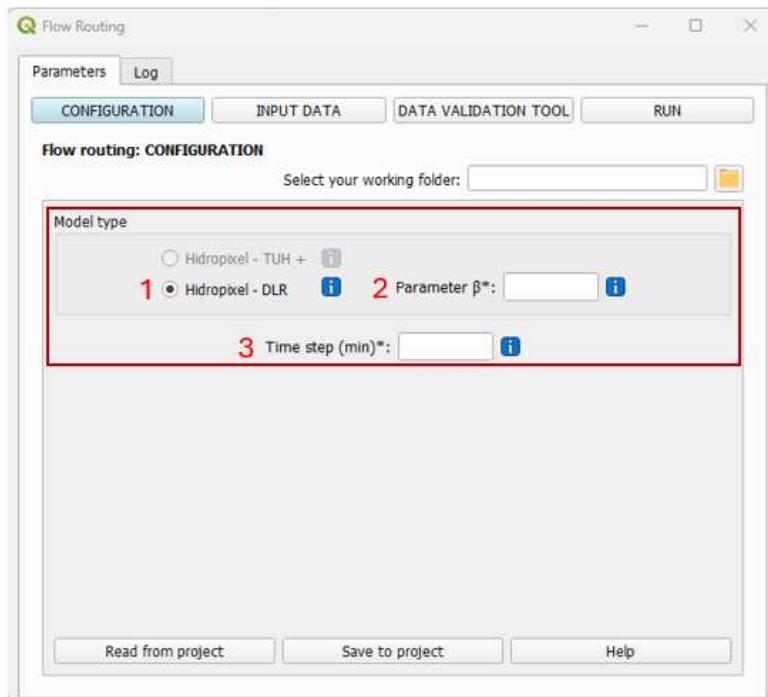
O hidrograma final para toda a bacia é obtido pela agregação dos hidrogramas produzidos por todos os pixels da bacia. Em outras palavras, a taxa de escoamento resultante  $Q_{tot}(t)$  no exutório da bacia no passo de tempo  $t$  é dada pela soma dos escoamentos de cada pixel (Equação 19).

$$Q_{tot}(t) = \sum_{i=1}^{N_p} Q(t)_i \quad \text{Equação 19}$$

#### 4.3.2 Configuration

A descrição dos parâmetros da rotina *Flow Routing* segue a divisão ilustrada na Figura 70.

Figura 70 – Janela *Configuration* da rotina *Flow Routing*.



##### *Model type*

Função que possibilita selecionar em qual versão do modelo hidrológico Hidropixel a simulação será executada (número 1, Figura 70). Na versão 4.0.2 do Q-Hidropixel, apenas a versão *Distributed Linear Reservoirs* (DLR) está disponível.

### Parameter $\beta$

O parâmetro  $\beta$  (adimensional) da versão Hidropixel-DLR controla o efeito de armazenamento do hidrograma dos pixels da bacia hidrográfica. Ele varia de 0 a 1, é obtido por calibração com base em dados observados de chuva e vazão. Um valor de  $\beta$  próximo de 1 indica que o escoamento é dominado pelos efeitos de armazenamento, enquanto um valor próximo de 0 sugere um armazenamento mínimo.

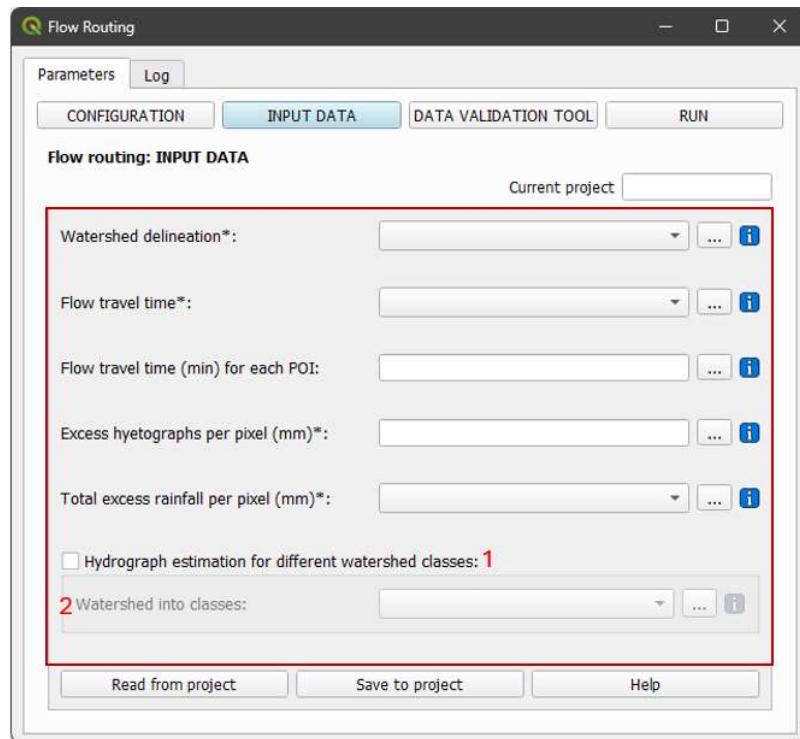
### Time step (min)

O passo de tempo deve ser inserido em minutos, além de ser igual ao considerado para a precipitação.

#### 4.3.3 Input Data

Na janela *Input Data* (Figura 71) da função *Flow Routing*, o usuário deve adicionar os arquivos necessários a simulação. Nesta seção, são explicados os arquivos de entrada esperados, bem como os critérios associados a eles.

Figura 71 – Janela *Input Data* da rotina *Flow Routing*.



**Observação:** os *rasters* que serão adicionados devem respeitar os critérios apresentados em 4.  
**Simulação com Hidropixel Plugin.**

#### *Watershed delineation*

O arquivo matricial da bacia hidrográfica é obtido a partir do processamento do MDE. Ele deve possuir **apenas** dois valores: 0 (pixels que não drenam para o exutório da bacia hidrográfica) e 1 (pixel com área contribuinte ao pixel exutório) (Ver Figura 49). O Hidropixel Plugin irá considerar apenas os pixels que são bacia hidrográfica para realizar as operações e simular o processo chuva-vazão.

#### *Flow travel time*

O raster do tempo de viagem é resultado da rotina *Flow Travel Time* (ver 4.1.5 Run). Ele contém o tempo de viagem do escoamento de cada pixel da bacia hidrográfica até seu exutório em minutos.

#### *Flow travel time (min) for each POI*

Para gerar os hidrogramas para os pontos de interesse, deve-se fornecer o diretório da pasta que contém todos os arquivos matriciais do tempo de concentração para cada um dos pontos. A paste

deve conter apenas os arquivos referentes ao tempo de viagem, obtidos a partir da rotina *Flow Travel Time*.

#### *Excess hyetographs per pixel (mm)*

Este é um arquivo binário (.bin), produto da rotina *Excess Rainfall*, que contém os hietogramas de precipitação para todos os pixels da bacia hidrográfica em diferentes passos de tempo (ver **4.2.5 Run**).

#### *Total excess rainfall per pixel (mm)*

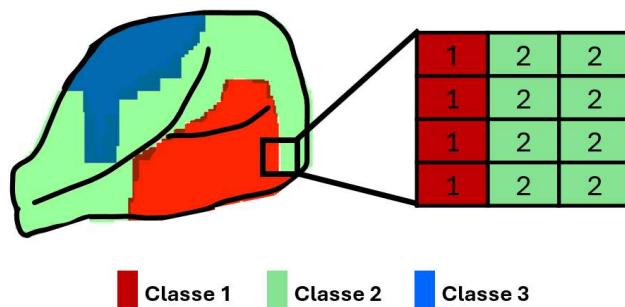
O raster *Map of Total Excess Rainfall* possui como atributo precipitação excedente total para cada pixel em milímetros (mm). Ele é resultado da rotina *Excess Rainfall* (ver **4.2.5 Run**).

#### *Watershed into classes*

Por ser um modelo distribuído, considerando cada pixel do MDE uma unidade de resposta hidrológica, o Q-Hidropixel possibilita que o usuário avalie a contribuição de cada pixel para o hidrograma final da bacia. Para isso, recomenda-se o agrupamento dos pixels segundo o interesse do usuário (Figura 72).

As classes devem seguir as condições: valor inteiro, positivo, diferente de zero, crescente na ordem que  $n_{i+1} = n + 1$ , onde  $n$  é a classe do pixel atual. O arquivo enviado deve possuir mesma extensão geográfica que os demais, bem como mesmo número de linhas e de colunas.

Figura 72 - Esquema contendo segmentação de uma bacia hidrográfica em classes.

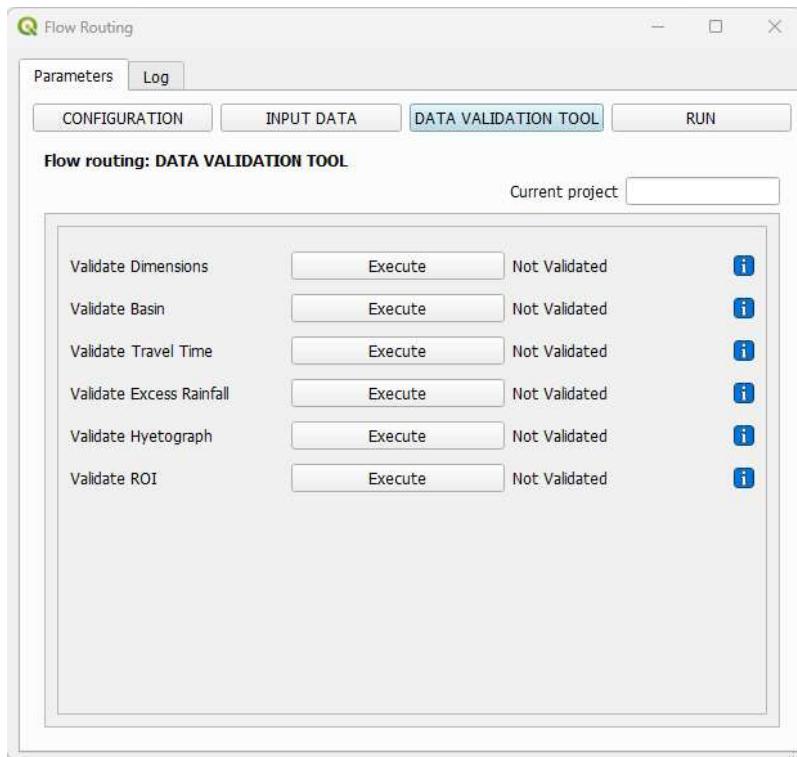


Para utilizar esta função, deve-se marcar a opção indicada no número 1, Figura 71.

#### *4.3.4 Data Validation Tool*

No módulo Flow Routing, a validação inicia pelo raster de tempo de viagem, conferindo, com apoio do raster da bacia, do D8 e da rede de drenagem, se cada pixel possui valor numérico, positivo e crescente ao longo do fluxo; qualquer violação interrompe o processo indicando o pixel inconsistente. Em seguida, o módulo valida o raster de chuva excedente total, restringindo a análise aos pixels da bacia e verificando se todos os valores são numéricos e não negativos, reprovando o arquivo caso haja valores negativos, NaN ou vazios. Por fim, quando o usuário opta por gerar hidrogramas para áreas específicas, o plugin também valida o raster de regiões de interesse, assegurando que todos os pixels dentro da bacia apresentem valores inteiros não negativos, rejeitando valores fracionários ou negativos por representarem codificação incorreta das regiões (Figura 73).

Figura 73 – Checagens do módulo *Flow Routing*.



Na Tabela 4 apresenta um resumo das verificações realizadas com os arquivos de entrada do módulo *Flow Routing*.

Tabela 4 - Checagens de validação e coerência de dados da janela *Flow Routing* desenvolvidas no Q-Hidropixel.

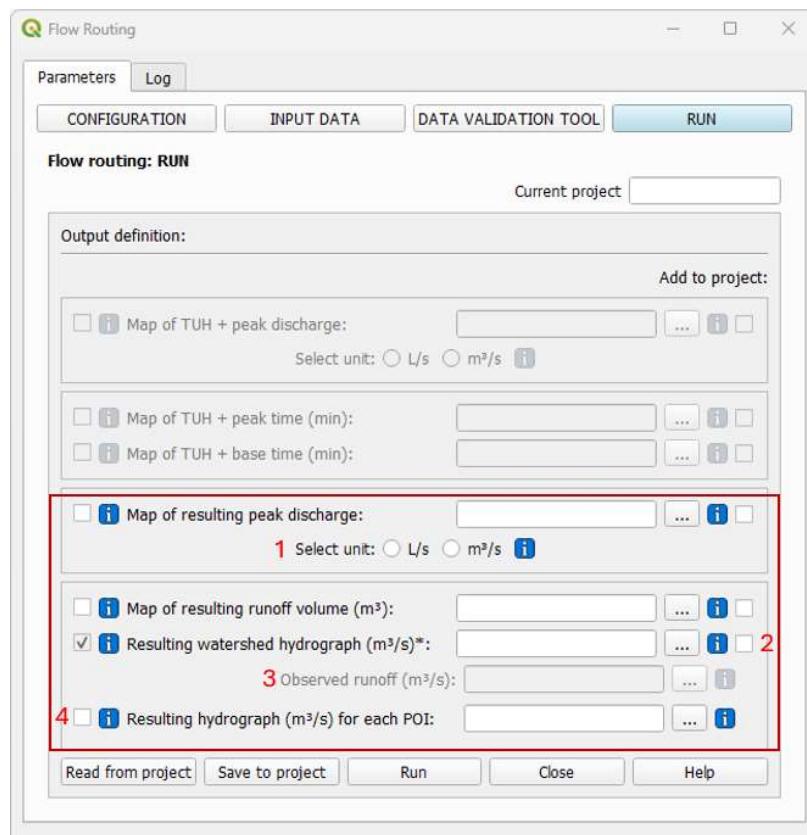
Módulo	Checagens
Flow Routing	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abrangência e discretização espacial dos rasters de entrada</li> <li>2. Conteúdo do arquivo raster de delimitação da bacia (1 dentro da bacia; 0 fora)</li> <li>3. Conteúdo do arquivo raster de tempos de viagem do escoamento: valores reais positivos para pixels da bacia, sendo crescentes para jusante ao longo de cada caminho de fluxo</li> <li>4. Conteúdo do arquivo raster de chuva excedente total por pixel: valores reais positivos ou nulos para pixel dentro da bacia</li> <li>5. Conteúdo do arquivo de hietogramas de chuva excedente por pixel: valores reais positivos ou nulos para todos os pixels da bacia ao longo do tempo</li> </ol>

6. Conteúdo do arquivo raster de regiões de interesse do usuário: valores inteiros positivos ou nulos dentro da bacia

#### 4.3.5 Run

O principal produto da rotina *Flow Routing* é o hidrograma da bacia hidrográfica para o evento considerado. Mas, existem outras saídas que podem trazer outras análises acerca da resposta da bacia ao evento. Com isso, nesta seção são explanados os outputs da rotina *Flow Routing* (Figura 74).

Figura 74 – Janela *Run* da rotina *Flow Routing* do Q-Hidropixel.



Lembrando que todos os rasters possuem mesma dimensão (número de linhas, colunas e abrangência geográfica) do arquivo original enviado (ver 4.3.3 *Input Data*).

#### *Map of resulting peak discharge*

O *Map of resulting peak discharge* é um arquivo raster em TIF, georreferenciado, que representa a vazão máxima dos hidrogramas de cada pixel presente na região da bacia hidrográfica, medida em metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ) ou litros por segundo (L/s) – o usuário deve escolher a unidade antes de clicar no botão *Run* (número 1, Figura 74).

### *Map of resulting runoff volume (m<sup>3</sup>)*

O *Map of resulting runoff volume* é um arquivo raster em TIF, georreferenciado, cujo atributo do pixel é o volume total escoado para cada um dos hidrogramas dos pixels presentes na bacia hidrográfica. Esse valor é resultado da aplicação da Equação 20.

$$Vol_{pi} = \frac{Pe_{pi}}{10^3} \times dx^2$$

Equação 20

Onde  $Vol_{pi}$  é o volume total disponível para escoar no pixel  $pi$ , em m<sup>3</sup>,  $Pe_{pi}$  é a precipitação efetiva acumulada no pixel, em mm,  $dx$  é a resolução espacial do pixel, em m.

### *Resulting watershed hydrograph (m<sup>3</sup>/s)*

O *Resulting watershed hydrograph* é o arquivo de texto (.txt) que contém o hidrograma final da bacia hidrográfica para o evento considerado. Ele é obtido pela agregação dos hidrogramas produzidos por todos os pixels. Na Figura 75.a tem-se um exemplo da sintaxe do arquivo criado para quando o usuário não envia o raster contendo a bacia hidrográfica segmentada em classes (ver **4.3.3 Input Data**). Já na Figura 75.b, a estrutura do arquivo muda, os hidrogramas das parcelas da bacia são agrupados na sequência. O numeral presente no título da coluna representa a classe.

Figura 75 – Estrutura do arquivo contendo os hidrogramas resultantes: a) organização do arquivo com apenas o hidrograma total, gerado pelo agrupamento de todos os pixels presentes na bacia hidrográfica; b) sintaxe do arquivo possuindo tanto o hidrograma total, quanto os hidrogramas das diferentes parcelas consideradas.

a)

```
Time(min),Total_Discharge(m3/s)
0,0
15,0
30,0
45,0
60,0
75,0
90,0
```

b)

Time(min)	Total_Discharge(m3/s)	Discharge_Class_1(m3/s)	Discharge_Class_2(m3/s)
0,0	0,0,0, 0		
15,0	15,0,0, 0		
30,0	30,0,0, 0		
45,0	45,0,0, 0		
60,0	60,0,0, 0		

Caso o usuário marque o *checkbox* da direita (número 2, Figura 74), o hidrograma final será plotado automaticamente após o processamento. Com isso, é possível fornecer o hidrograma observado para que o Q-Hidropixel calcule as métricas de comparação, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), erro relativo do volume, tempo de pico etc.

### *Resulting hydrograph (m<sup>3</sup>/s) for each POI*

Se marcada a opção *Resulting hydrograph (m<sup>3</sup>/s) for each POI*, o usuário deve fornecer um diretório de uma pasta para salvar os hidrogramas dos pontos de interesse informados (envio do *Flow travel time (min) for each POI*). Os arquivos gerados no formato .txt possuem sintaxe semelhante ao exemplo apresentado na Figura 75.a e sua nomenclatura é baseada no arquivo do tempo de viagem enviado.

## 6. REFERÊNCIAS

ILLINOIS DRAINAGE GUIDE. **QGIS download & installation guide.** [S.l.]: University of Illinois Urbana-Champaign, 2022. Disponível em: <<https://publish.illinois.edu/illinoisdrainageguide/files/2022/07/QGIS-DOWNLOADINSTALLATION-GUIDE.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2024.

Lima, D.M. “Abordagens distribuídas para simulação do escoamento superficial baseadas no modelo digital de elevação”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – UFPB, João Pessoa, 2021.

Lima, D.M., da Paz, A.R., Xuan, Y. *et al.* Incorporating spatial variability in surface runoff modeling with new DEM-based distributed approaches. *Comput Geosci* **28**, 1331–1348 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10596-024-10321-x>

Pereira, A. B. S., Lima, J. V. D. S., Lima, D. M., & Paz, A. R. D. A. (2024). *Avaliação de Modelos Hidrológicos e Hidrodinâmicos Distribuídos Empregados em Bacia de Médio Porte e Dados Diários*. In XVII SRHNe - Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.

VEECK, S.; DA COSTA, F.F.; CORREIA LIMA, D. L.; DA PAZ, A. R.; ALLASIA PICCILLI, D.G.(2021). “*Scale dynamics of the HIDROPIXEL high-resolution DEM-based distributed hydrologicmodeling approach*”. Environmental Modelling & Software, Vol. 127. 104695, ISSN 1364-8152.