



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

MIKAEL BERNARDO VASCONCELOS DE ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE MODELO PARA DELIMITAÇÃO DE
BACIAS HIDROGRÁFICAS**

**CAMPINA GRANDE
2017**

MIKAEL BERNARDO VASCONCELOS DE ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE MODELO PARA DELIMITAÇÃO DE
BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rui de Oliveira.

**CAMPINA GRANDE
2017**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A659d Araújo, Mikael Bernardo Vasconcelos de.
Desenvolvimento e aplicação de modelo para delimitação de bacias hidrográficas [manuscrito] : / Mikael Bernardo Vasconcelos de Araújo. - 2017.
34 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.

"Orientação : Prof. Dr. Rui de Oliveira, Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Bacia hidrográfica. 2. Geoprocessamento. 3. Gestão hídrica. 4. Criador de modelos.

21. ed. CDD 628.14

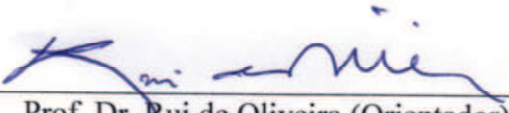
MIKAEL BERNARDO VASCONCELOS DE ARAÚJO

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE MODELO PARA DELIMITAÇÃO DE
BACIAS HIDROGRÁFICAS

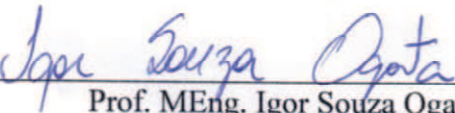
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Sanitária e
Ambiental da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Aprovado em: 09/12/2017.

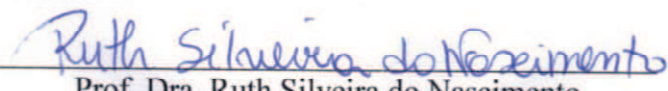
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Rui de Oliveira (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. MEng. Igor Souza Ogata
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dra. Ruth Silveira do Nascimento
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

RESUMO

A água é recurso natural limitado e essencial à vida. Por isso deve ser gerida da forma mais adequada possível. A escassez hídrica vivenciada no Semiárido nordestino requer gestão hídrica ainda mais eficiente, para que a água supra a demanda dos múltiplos usos atuais e futuros. O sensoriamento remoto por possuir capacidade de integrar informações tem sido utilizado como auxílio na gestão dos recursos hídricos. Esse trabalho objetiva o desenvolvimento de um modelo de delimitação de bacias hidrográficas e sua aplicação a bacias do estado da Paraíba. A criação dessa ferramenta foi realizada com a aplicação de geoprocessamento Criador de Modelos (ModelBuilder) no programa computacional ArcGIS® versão 10.3.1. A ferramenta mostrou-se útil na execução de sua função e de fácil processamento, podendo ser utilizada para delimitação de forma automática de bacias e sub-bacias sem necessidade de conhecimento profundo em SIG, necessitando, apenas, da seleção dos arquivos de entrada e dos parâmetros determinados para o processamento.

Palavras-Chave: Bacia hidrográfica. Geoprocessamento. Criador de modelos.

ABSTRACT

Water is a limited and essential natural resource to life. So it should be managed as properly as possible. The scarcity of water experienced in the northeastern semi-arid region requires even more efficient water management, so that water supplies the demand for multiple current and future uses. Remote sensing because it has the capacity to integrate information has been used as an aid in the management of water resources. This work aims the development of a model of watershed delimitation and its application to basins in the state of Paraíba. The creation of this tool was accomplished with the application of geoprocessing Model Builder in the ArcGIS® software version 10.3.1. The tool proved to be useful in the execution of its function and easy to process, and can be used to automatically delimit basins and sub-basins without needing for deep knowledge in GIS, requiring only the selection of input files and parameters for processing.

Keywords: Hydrographic basin. Geoprocessing. Model builder.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Preenchimento de depressão na superfície.....	15
Figura 2 –	Remoção de pico no <i>raster</i>	15
Figura 3 –	Plano de direções de fluxo - código da possível direção para cada pixel.....	16
Figura 4 –	Plano de direções de fluxo - determinação da direção de fluxo a partir da maior declividade entre o pixel e seus vizinhos.....	16
Figura 5 –	Conversão da grade numérica de altitude para direção de fluxo	17
Figura 6 –	Conversão da grade numérica de direção de fluxo na de fluxo acumulado.....	17
Figura 7 –	Esquema de ordens de rede de drenagem – Método de Strahler.....	18
Figura 8 –	Bacias hidrográficas do estado da Paraíba.....	19
Figura 9 –	Mosaico dos <i>rasters</i> de entrada.....	23
Figura 10 –	Mosaico projetado em três dimensões (a) e duas dimensões (b).....	23
Figura 11 –	Área do estado da Paraíba extraída do mosaico.....	24
Figura 12 –	Output da função <i>Flow Direction</i> (Direção de fluxo).....	25
Figura 13 –	Arquivo gerado pela função <i>Flow Accumulation</i> (fluxo acumulado).....	26
Figura 14 –	Hierarquia de drenagem pelo método de <i>Strahler</i>	27
Figura 15 –	Delimitação automática das bacias hidrográficas do estado da Paraíba (<i>raster</i>).....	27
Figura 16 –	Delimitação automática das bacias hidrográficas do estado da Paraíba (vetor).....	28
Figura 17 –	Criador de Modelos: ferramenta de delimitação de bacia (modo de edição)...	30
Figura 18 –	Descrição do parâmetro de entrada da ferramenta <i>Mosaic to New Raster</i>	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ESRI	Environmental Systems Research Institute
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
GCS	Geographic Coordinate System
MDE	Modelo Digital de Elevação
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USGS	United States Geological Survey.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	OBJETIVO GERAL.....	10
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	11
3.1	REGIÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	11
3.2	GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	11
3.3	BACIA HIDROGRÁFICA.....	12
3.4	GEOPROCESSAMENTO APLICADO À GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	12
3.5	DADOS GEOGRÁFICOS.....	13
3.6	CONSTRUTOR DE MODELOS (MODELUILDER).....	13
3.7	FERRAMENTAS HIDROLÓGICAS.....	14
3.7.1	Delimitação da bacia (<i>Basin</i>).....	14
3.7.2	Preenchimento de depressões (<i>Fill</i>).....	15
3.7.3	Direção de fluxo (<i>Flow Direction</i>).....	16
3.7.4	Fluxo Acumulado (<i>Flow Accumulation</i>).....	17
3.7.5	Hierarquização de drenagem (<i>Stream to Order</i>).....	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
4.1	ÁREA DE ESTUDO.....	19
4.2	MATERIAIS.....	20
4.3	MÉTODOS.....	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
6	CONCLUSÃO.....	32
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

A água – imprescindível para existência de vida e desenvolvimento socioeconômico – é recurso natural limitado, dotado de valor econômico e um bem de domínio público. Todavia, a escassez de recursos hídricos no mundo é resultado de problemas reais, como a crescente demanda por água para suprir os múltiplos usos e a variabilidade hidrológica com extensos períodos de secas, além de problemas decorrentes de falhas no processo da gestão desse recurso.

Ademais, a distribuição de água no mundo não é igualitária, o que resulta em regiões com maior disponibilidade e outras com escassez severa. No Brasil, incluído entre os países de maior reserva de água doce do mundo, a região do Semiárido nordestino sofre com graves problemas de déficit hídrico. Essa região possui subsolo rico em rochas cristalinas que, por possuírem baixa permeabilidade, inibem a formação de aquíferos. Outrossim, a região sofre com baixos índices pluviométricos e altas temperaturas médias anuais que favorecem a escassez hídrica na região.

O estado da Paraíba compreende onze bacias hidrográficas, sendo a bacia do Rio Paraíba a segunda maior em área. A maior parte do estado da Paraíba - por estar inserida na região do Semiárido – sofre com a falta de água. Em regiões onde há insuficiência desse líquido essencial, os conflitos pelo seu uso tendem a aumentar em função da alta demanda, da perda de qualidade ou da instabilidade climática. Diante dessa problemática, faz-se necessária uma gestão integrada dos recursos hídricos para fornecer à população água de forma ininterrupta, e em quantidade e qualidade adequadas.

Dada a capacidade de integração de diversos dados e inúmeras possibilidades de analisá-los, as técnicas de sensoriamento remoto têm auxiliado o gerenciamento de bacias hidrográficas através da análise espacial dos recursos hídricos. Entretanto, sua aplicação depende de uma base de dados geográficos consistentes e acessíveis, em especial da rede hidrográfica e do limite da bacia hidrográfica, que não estão disponíveis na maioria dos casos.

Além da limitação na obtenção desses dados, os programas computacionais de geoprocessamento, embora cada vez mais completos, ainda não oferecem modelos com capacidade de executar funções complexas e com linguagem acessível aos usuários não especialistas. As ferramentas disponibilizadas têm algumas barreiras que podem impedir ou dificultar as suas utilizações, dentre elas, cabe citar a oferta de ferramentas restritas ao processamento de uma função específica e com linguagem muita das vezes inacessível ao público leigo na utilização de programas de geoprocessamento.

Diante do exposto e da importância da bacia hidrográfica na gestão dos recursos hídricos, o desenvolvimento de um modelo capaz de sintetizar diversas funções para delimitar automaticamente bacias hidrográficas e com descrições de fácil entendimento mostra-se útil no desenvolvimento de pesquisas, principalmente, em regiões que não possuem registros cartográficos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma ferramenta de geoprocessamento para delimitação de bacias hidrográficas para auxiliar na gestão dos recursos hídricos e aplicar o modelo desenvolvido no estado da Paraíba.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Criar um modelo para delimitação de bacias hidrográficas no programa de geoprocessamento ArcGIS®;
- Aplicar o modelo gerado para delimitar bacias hidrográficas no estado da Paraíba;
- Comparar o arquivo de saída da delimitação com o obtido no sítio da AESA;
- Disponibilizar o modelo na rede mundial de computadores para que usuários possam utilizá-lo e adequá-lo aos seus objetivos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 REGIÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

A Região Semiárida do Nordeste Brasileiro tem o clima como fator mais marcante. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o Semiárido é do tipo BSh, caracterizado por ter regiões predominantemente do tipo quente e seco (FRANCISCO, 2015). A região é, ainda, caracterizada pelas altas temperaturas, precipitações escassas e grande déficit hídrico. A temperatura média anual é superior a 18 °C com grandes intervalos de estiagem e períodos chuvosos. No que diz respeito aos rios da região, na maior parte dos casos, são intermitentes e condicionados ao período em que haja precipitação. Essa intermitência é devida à constituição geológica dominada por terrenos cristalinos com solos rasos ou pouco profundos que favorecem o deflúvio e dificultam a infiltração (ARAÚJO, 2011).

Outrossim, concorrendo para essa escassez hídrica, a vegetação – possível aliada na retenção da água no solo – tem sofrido diversos processos de degradação. O processo de degradação dessa vegetação deu-se pelo uso da lenha, por queimadas e desmatamento para uso do solo na agropecuária. Além disso, a flora dessa região é escassa e esparsa, resultando em um solo propenso à erosão pelo vento ou água – que arrastam as partículas que o compõem degradando a qualidade do solo.

O semiárido nordestino apresenta irregularidades no regime de precipitação e uma alta taxa de evapotranspiração, acarretando problemas de escassez de água e necessidade de adoção de regime de racionamento desse recurso em aglomerados urbanos de portes variados, a exemplo de Recife – PE e Campina Grande – PB. A gestão adequada e eficiente dos recursos hídricos, frente a essa problemática, influenciaria diretamente na mitigação dos problemas de escassez.

De acordo com Yassuda (1993), devido à escassez de recursos hídricos nessa região, a gestão dos recursos hídricos torna-se imprescindível. Essa gestão objetiva assegurar a preservação, o uso, a recuperação e a conservação das águas em condições suficientes para satisfazer e suprir os múltiplos usos e garantir o desenvolvimento equilibrado e sustentável da região.

3.2 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Em razão da grande disponibilidade e abundância da água – que era vista como recurso inesgotável –, a gestão desses recursos era dirigida ao suprimento. Contudo, com o desenvolvimento econômico e populacional e a crise ambiental causada pela industrialização e urbanização, surge o conceito de gestão integrada das águas. No Brasil, a gestão integrada dos recursos hídricos inicia-se de forma mais efetiva com a promulgação em 1997 da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) – Lei nº 9.433.

A supracitada lei, além dos fundamentos, das diretrizes e dos objetivos, estatui os instrumentos da PNRH. Entre esses cabe destacar a cobrança pelo uso de recursos hídricos, como também a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos cujo principal objetivo é o controle do balanço entre disponibilidade e demanda por água pois traduzem a ideia de que a água passa a ser um recurso dotado de valor econômico.

Mais, a gestão das águas passa a ser descentralizada e ser realizada por bacia hidrográfica o que favorece o melhor controle sobre essa riqueza natural.

3.3 BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica, conforme Barrella (2001), é definida como um conjunto de terras formadas por divisores de água – regiões mais altas do relevo –, nas quais as águas das chuvas escoam superficialmente para as partes mais baixas formando os rios e riachos e/ou infiltram no solo dando origem a nascentes e lençóis freáticos. Pode também ser definida como área delimitada por um divisor de água, que serve para captar água de precipitação através de superfícies vertentes. As águas escoadas convergem para um único ponto de saída, a seção exutória (BORSATO e MARTONI, 2004).

Ainda, consoante os autores supraditos, no que diz respeito à sub-bacia, essa pode ser definida como área de drenagem dos tributários do curso d'água principal. Entretanto, a literatura apresenta divergências quanto à dimensão da área para ser considerada sub-bacia e quanto às unidades de medidas utilizadas.

3.4 GEOPROCESSAMENTO APLICADO À GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

O sensoriamento remoto, dada sua capacidade de integração de diversas informações, tem sido utilizado para auxiliar na gestão desses recursos hídricos (PEREIRA, 2016). Devido à capacidade de considerar de forma integrada diferentes variáveis no espaço e suas alterações com o tempo em uma base de dados georreferenciados – visualizados por meio de mapas –, o

uso de geoprocessamento é crescente para estudos ambientais. Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é uma ferramenta complexa e abrangente de análises, que permite que várias informações sejam sobrepostas e sintetizadas de forma integrada em um banco de dados unificado, sem limite de número de variáveis e com atualizações constantes. Esses mapas, quando sobrepostos, permitem a compilação e organização de dados, além da elaboração de um mapa síntese que integra todos esses temas (PINHEIRO, 2009).

Segundo a Agência Nacional de Águas (2008), um SIG é indispensável no gerenciamento de bacias hidrográficas por permitir a integração de dados espaciais e não espaciais, além de ter a capacidade de realizar análises baseadas nesses dados. Contudo, sua aplicação tem como pré-requisito uma base de dados geográficos consistente e de fácil acesso, em especial, da rede hidrográfica e divisões de bacias hidrográficas.

3.5 DADOS GEOGRÁFICOS

Conforme Lisboa Filho (1995), os sistemas computacionais com capacidade de capturar, processar e gerenciar dados geográficos são definidos como sistemas de geoprocessamento. A base para esses sistemas são dados georreferenciados – objetos com informações sobre sua localização geográfica dentro de um sistema de coordenadas. Os dados matriciais e vetoriais são os dois formatos principais de representação dos componentes espaciais associados às informações geográficas (PRICE, 1963).

Os dados matriciais (*rasters*) são obtidos a partir da divisão da área em questão em uma grade regular de células. Cada célula contém um valor específico correspondente à sua posição na superfície terrestre (LISBOA FILHO, 1995). As imagens *rasters* incluem fotografias aéreas e dados de satélites. No que diz respeito aos dados vetoriais, esses representam o mundo real com pontos, linhas e polígonos. Diferentemente dos *rasters*, nos vetores, nem todas as posições do espaço precisam ser referenciadas no modelo.

Outrossim, conforme explica Aronoff (1989), “a obtenção de dados em aplicações de geoprocessamento é um processo bem mais complexo quando comparado com a maioria das aplicações convencionais”. Segundo o autor, essas dificuldades são causadas por dois motivos principais: os dados de inserção não são apenas alfanuméricos, tratando-se de informações gráficas – naturalmente mais complexas, e os dados nem sempre estão disponíveis, fazendo-se necessária a obtenção desses diretamente nas fontes brutas (rios, montanhas, bacias, etc.).

3.6 CONSTRUTOR DE MODELOS (*ModelBuilder*)

Devido às restrições das ferramentas disponíveis nos aplicativos de geoprocessamento e a dificuldade para obter dados consistentes, alguns programas computacionais disponibilizam a opção de criação de modelos para automatizar tarefas de geoprocessamento. O *ArcGIS*, programa utilizado para elaboração da ferramenta de delimitação da bacia, disponibiliza o Construtor de Modelos (*ModelBuilder*). A ferramenta permite a criação, edição e gerenciamento de modelos. Os modelos são definidos como fluxos que agrupam sequências de ferramentas de geoprocessamento presentes no *ArcToolBox* e uma base de dados (ArcGIS, 2017).

Embora a base da construção dos modelos sejam ferramentas disponíveis no próprio programa, faz-se necessária a determinação dos arquivos de entrada (*input*) e de saída (*output*) para cada ferramenta. Nesse fluxo de sequências, a saída de uma ferramenta torna-se entrada em outra ferramenta. Ademais, alguns dos arquivos de entrada e configurações são definidos como parâmetros (*model parameter*) pois precisam ser definidos pelo usuário final durante a execução do modelo.

3.7 FERRAMENTAS HIDROLÓGICAS

As ferramentas hidrológicas, dentre seus diversos usos, são usadas em modelos de escoamento superficial de água e são baseadas no entendimento de onde a água nasce para onde flui. Essas são imprescindíveis para os diversos segmentos, como agricultura e silvicultura, que necessitam entender como a água escoar e como mudanças na superfície podem afetar o fluxo de água (PRICE, 1963). As ferramentas hidrológicas podem ser aplicadas individualmente ou usadas em sequência no *ModelBuilder* para delimitação de bacias hidrográficas. As principais ferramentas hidrológicas disponibilizadas no programa ArcGIS são *Basin*, *Fill*, *Flow Accumulation*, *Flow Direction*, *Flow Length*, *Stream Order*, *Stream to Feature*.

3.7.1 Delimitação da bacia (*Basin*)

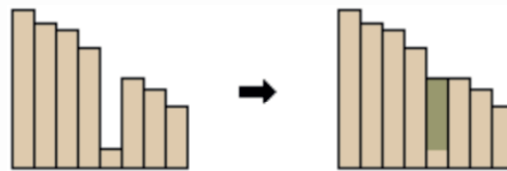
Um dos aspectos mais importantes e primordiais em análises hidrológicas ou ambientais é o delineamento da bacia hidrográfica. Com o avanço tecnológico e surgimento das formas digitais de representação do relevo, como os Modelos Digitais de Elevação, a delimitação de bacias tem sido feita de forma automática (CARDOSO, 2006).

A ferramenta é utilizada para delimitação da área da bacia de drenagem. No delineamento, a *Basin Tool* identifica e une as linhas de crista para limitar a região da bacia hidrográfica. O *raster* de direção do fluxo é analisado de modo a identificar todos os conjuntos de células conectadas que pertencem à mesma bacia de drenagem. As bacias de drenagem são criadas localizando as cristas (pontos que limitam a bacia hidrográfica).

3.7.2 Preenchimento de depressões (*Fill*)

Devido à qualidade e resolução dos dados obtidos, o *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM pode apresentar depressões, áreas de drenagem interna e vazios ou erros. A *Fill Tool* é uma ferramenta utilizada para o preenchimento de pequenas imperfeições ou remoção de picos que apresentem elevação maior do que seria esperado pela área próxima ao ponto analisado. A Figura 1 exemplifica a situação no qual o dado de superfície apresenta depressão que não corresponde à tendência da região circundante.

Figura 1 – Preenchimento de depressão na superfície



Fonte: Sítio do ArcGIS® (2017).

Por outro lado, a Figura 2 representa a situação oposta, na qual o *raster* em análise apresenta pico desconforme com a área circunvizinha. Nesse caso, ocorre o arredondamento do pico discordante para o valor inteiro mais próximo.

Figura 2 – Remoção de pico no *raster*



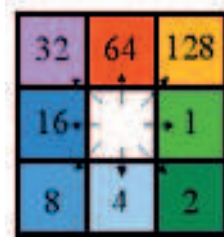
Fonte: Sítio do ArcGIS® (2017).

3.7.3 Direção de fluxo (*Flow Direction*)

A direção de fluxo determina as relações hidrológicas entre diferentes pontos pertencentes a uma mesma bacia hidrográfica (RENNÓ, 2008). De acordo com Alves Sobrinho (2010), a função *Flow Direction*, baseada na linha de maior declividade do terreno, gera uma grade regular definindo as direções de fluxo. O *input* da ferramenta é o *raster* de altimetria – Modelo Digital de Elevação (MDE). Esse é convertido em valores numéricos de acordo com a elevação de cada célula.

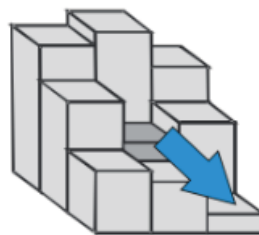
Nesse processo, cada célula do *raster* é cercada por oito *pixels* vizinhos e a partir da diferença de elevação da célula examinada e das que a cercam é determinada a direção para onde o fluxo escoar. As Figuras 3 e 4 determinam como será o plano de direções de fluxo. A Figura 3 mostra as 8 codificações possíveis para um dado pixel, indicando em qual sentido ocorre a drenagem.

Figura 3 – Plano de direções de fluxo - código da possível direção para cada pixel



Fonte: Sítio do ArcGIS® (2017).

Figura 4 – Plano de direções de fluxo - determinação da direção de fluxo a partir da maior declividade entre o *pixel* e seus vizinhos



Fonte: BUARQUE; ROLIM DA PAZ; COLLISCHONN (2008).

A Figura 5 exemplifica o processo de conversão da grade numérica de elevação para a grade numérica de direção de fluxo. Cada pixel é analisado a partir dos pixels que o cerca. Para melhor compreensão, analisar-se-á o pixel de número 72 – destacado em vermelho na Figura 5. Esse pixel é cercado pelos pixels de número 78, 74, 67, 56 e 69. O sentido do escoamento será para o pixel de menor valor numérico, que para o pixel destacado é o 56.

Observa-se que o fluxo tende a escoar no sentido sudeste, que, de acordo com o código da Figura 3, corresponde ao valor numérico 2. Portanto, atribui-se ao pixel analisado o valor 2. O processo é feito para todas as células da grade numérica do *raster* analisado.

Figura 5 – Conversão da grade numérica de altitude para direção de fluxo



Fonte: Sítio do ArcGIS® (2017).

3.7.4 Fluxo acumulado (*Flow Accumulation*)

Esse parâmetro indica o grau de confluência do escoamento. Valeriano (2007) explica que o fluxo acumulado reúne as características do comprimento de rampa (conexão com divisores de água a montante) e a curvatura horizontal (confluência e divergência das linhas de fluxo).

As células com alta acumulação de fluxo (valor numérico maior) podem ser utilizadas para identificar os canais de fluxo, onde ocorre a maior viabilidade de drenagem. As células com acumulação de fluxo de valor numérico igual a 0 (zero) são máximos topográficos (pontos mais elevados), sendo utilizados para identificar as cristas da bacia. Caso não seja atribuído um peso para cada célula, o *software* aplica, automaticamente, o valor numérico 1 (um). Na Figura 6, é possível observar que o fluxo de água escoar no sentido sudeste.

Figura 6 – Conversão da grade numérica de direção de fluxo na de fluxo acumulado



Fonte: Sítio do ArcGIS® (2017).

3.7.5 Hierarquização de drenagem (*Stream to Order*)

Essa função é utilizada para determinação da hierarquia dos cursos d'água em uma dada bacia hidrográfica. O método mais amplamente utilizado é o de *Strahler* que inicia a identificação do rio principal por aqueles que não recebem nenhum afluente – chamados de rios de primeira ordem. A confluência entre dois rios de primeira ordem gera um de segunda ordem. O processo é repetido até que se atinja o rio principal. Quando ocorre a confluência entre dois rios de hierarquias distintas, o rio com número de ordem maior prevalece. A Figura 7 exemplifica como o processo ocorre.

Figura 7 – Esquema de ordens de rede de drenagem – Método de Strahler



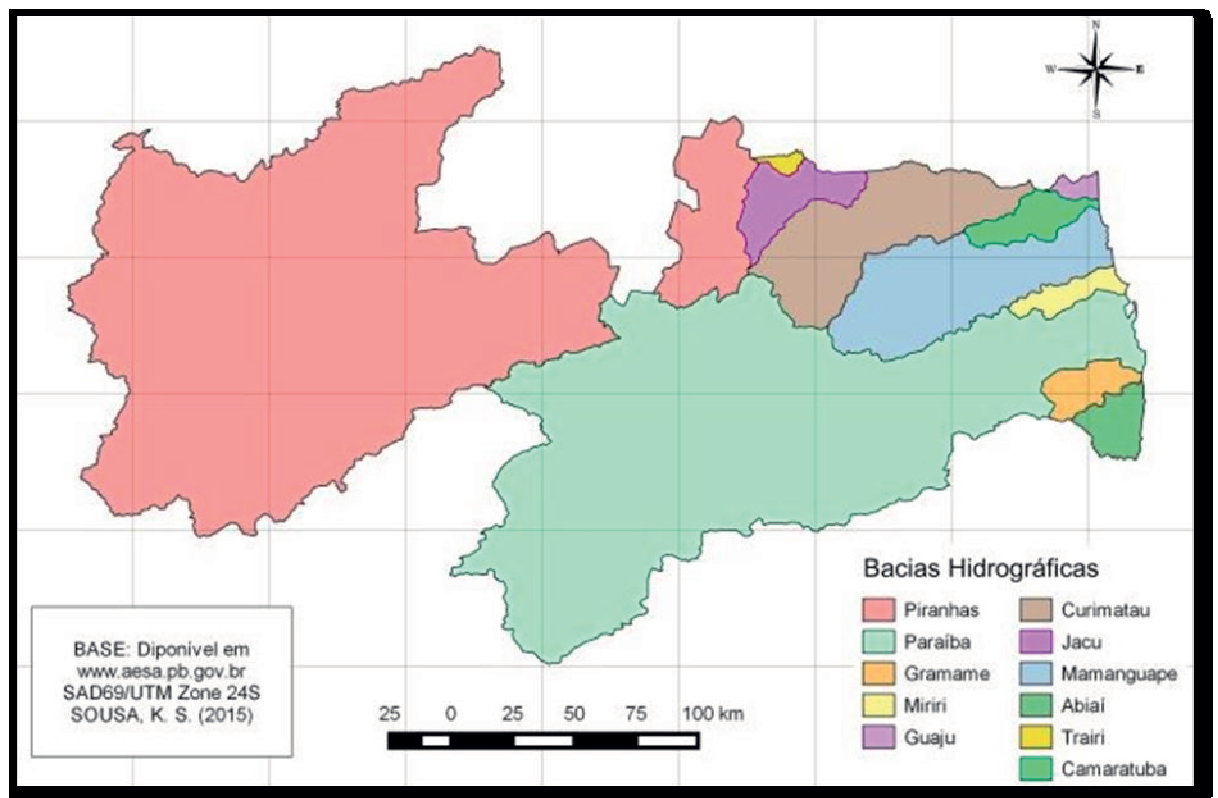
Fonte: Sítio do ArcGIS® (2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O Estado da Paraíba, cuja área de 56.439 km² está quase totalmente inserida na região do Semiárido, está situado a leste da região Nordeste. O estado faz divisa com o estado do Rio Grande do Norte ao norte, com o estado de Pernambuco ao sul, com o oceano Atlântico a leste e com o estado do Ceará a oeste. A Paraíba é dividida em 4 mesorregiões e 23 microrregiões. O estado da Paraíba, como ilustrado na Figura 8, está dividido em onze bacias hidrográficas: Rio Paraíba; Rio Abiaí; Rio Gramame; Rio Miriri; Rio Mamanguape; Rio Camaratuba; Rio Guaju; Rio Piranhas; Rio Curimataú; Rio Jacu; e Rio Trairi. No que tange às cinco últimas bacias, essas são de domínio federal.

Figura 8 – Bacias hidrográficas do estado da Paraíba



Fonte: AESA (2015).

A bacia hidrográfica do Paraíba está completamente inserida no estado da Paraíba. A bacia do Paraíba possui área de 19.456,73 km² e perímetro de 1.077,98 km. Na bacia, estão inseridos 78 municípios, sendo o de maior território, o município de Monteiro, e o de menor

território, o município de Sobrado. Quanto ao clima dessa bacia, a região apresenta temperaturas elevadas durante todo o ano, com temperaturas amenas nos meses de inverno, e concentração da pluviosidade entre o final do verão e o início do inverno, com outono chuvoso.

A bacia do Rio Paraíba é composta pela sub-bacia do Rio Taperoá e Regiões do Alto, Médio e Baixo cursos do Rio Paraíba. O Rio Paraíba, o mais extenso do estado, é o principal da bacia. O Rio Paraíba nasce a mais de mil metros de altitude na Serra de Jabitacá, município de Monteiro, e banha uma área de 20.071,83 km². A sua bacia é a segunda maior do estado, abrangendo 38% do território, com população de 1.828.178 habitantes, tendo como principal reservatório o Epitácio Pessoa.

4.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados podem ser divididos em programa computacional e dados. O ArcGIS foi o aplicativo de geoprocessamento utilizado para construção do modelo de delimitação de bacia hidrográfica. Os dados geográficos utilizados foram arquivos vetoriais no formato *shapefile* e dados geográficos e planilhas digitais disponibilizados pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AES/A). O MDE foi obtido diretamente do website do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

4.3 MÉTODOS

O modelo de delimitação automática de bacia hidrográfica foi criado através da aplicação de geoprocessamento *ModelBuilder*. Para aplicação da metodologia proposta, foi necessária a coleta dos dados de entrada (*input*). Os dados de MDE foram baixados do TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do INPE. Os sete *rasters* de altimetria selecionados – com extensão TIF – cobrem toda a área territorial do estado da Paraíba. Para a delimitação da área do estado, foi feito o *download* de um arquivo vetorial no formato *shapefile* com o limite do território do estado. O arquivo foi baixado do sítio do Geo Portal da AES/A. Os dados *rasters* e vetoriais foram alocados em pastas separadas para posterior aplicação do modelo criado.

Os *rasters* de entrada devem ser selecionados – como parâmetro – de forma simultânea. Todos os *rasters* foram convertidos em um único *raster* pela ferramenta (*Mosaic to New Raster*). As coordenadas geográficas do *raster* gerado foram definidas com o auxílio da ferramenta *Define Projection*. A ferramenta *Project Raster* foi utilizada para converter as coordenadas geográficas definidas para a superfície terrestre em duas dimensões. O último

processo, antes da utilização das ferramentas hidrológicas, foi a delimitação do MDE (*raster*) por meio do *Extract by Mask tool*. O processo consistiu no *input* da área definida e a extração das células dos *rasters* que estavam contidas na área determinada.

Para correção das pequenas imperfeições encontradas na superfície do SRTM foi utilizada a ferramenta *Fill*. O *Flow Direction* foi utilizado para gerar a direção de fluxo de cada célula. O *raster* gerado foi um dos mais importantes do modelo, sendo *input* para algumas outras ferramentas como a *Basin*, *Flow Accumulation*, *Stream Order* e *Stream to Feature*.

Na sequência do fluxo de ferramentas do modelo proposto, o *output* da ferramenta *Flow Accumulation* foi um *raster* com os locais onde ocorre o fluxo de água acumulada. A partir da determinação dos caminhos por onde ocorre a drenagem da bacia, foi determinada a ordem de cada fluxo de água através do Método de *Strahler* com a ferramenta *Stream Order*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

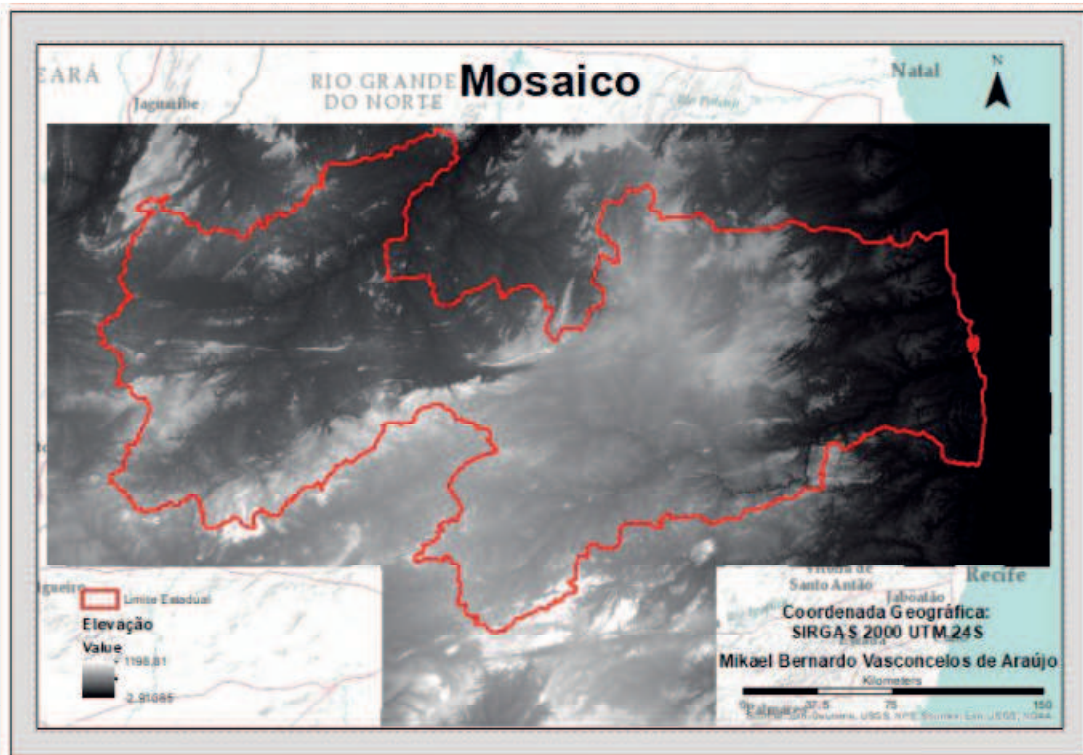
A ferramenta foi desenvolvida no software de geoprocessamento ArcGIS® versão 10.3.1, pois esse apresenta maior estabilidade – quando comparado com programas *open source* (Código fonte aberto). A estabilidade do ArcGIS® é justificada por ele ter sido, diferentemente dos programas “livres” – desenhados por voluntários, desenvolvido pela empresa americana *Environmental Systems Research Institute* – ESRI. Ademais, cabe ressaltar que todos os passos discutidos neste trabalho foram realizados de forma automática pelo modelo desenvolvido.

O modelo desenvolvido é composto por uma série de ferramentas agrupadas sequencialmente. Cada ferramenta precisa de arquivo(s) de entrada e gera arquivo(s) de saída. Como se trabalha com uma sequência de ferramentas, os dados gerados serão, na maioria das vezes, arquivos de entrada da ferramenta posterior. Todas as funções (*tools*) utilizadas internamente no modelo criado foram descritas na metodologia deste.

A função *Mosaic to New Raster* é a primeira realizada pelo modelo. Segundo Bagli (2005), o mosaico de imagens – processo de agrupar imagens e gerar uma imagem maior – é importante pois possibilita a visão global de uma determinada cena. Para cumprimento do objetivo geral proposto por este trabalho, foi preciso unir todos os *rasters* contidos no limite do estado. A seleção dos *rasters* foi feita com base no mapa e os limites territoriais apresentados no sítio do INPE. A Figura 9 ilustra o mosaico criado a partir dos sete *rasters* de entrada.

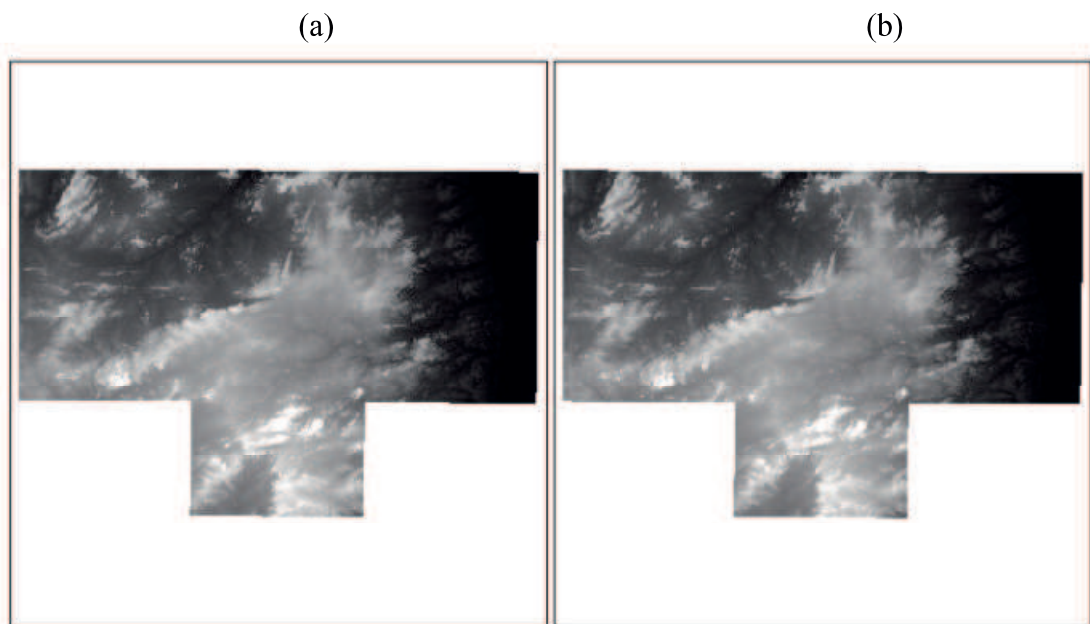
Posteriormente, o modelo desenvolvido determinará o sistema de coordenadas. Esse deverá ser inserido pelo usuário a depender da área de estudo. Neste trabalho, foi utilizado o sistema de coordenadas UTM, por ser o mais atual. Entretanto, para evitar distorções em áreas ou distâncias, o mosaico, até então projetado no globo esférico, foi projetado no plano (duas dimensões) por meio da ferramenta *Project Raster*. Conforme Price (1963), o sistema de coordenadas em três dimensões não pode ser exibido em um mapa plano. Mais, as funções dos programas de geoprocessamento tratam essas imagens – em 3D – como se no plano estivesse, o que ocasiona distorções e resultados incorretos nas leituras de área e distância, fazendo-se indispensável a projeção em 2D. Apesar de visualmente não apresentar diferenças, a Figura 10 apresenta os mapas projetados na esfera (a) e no plano (b).

Figura 9 – Mosaico dos *rasters* de entrada



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

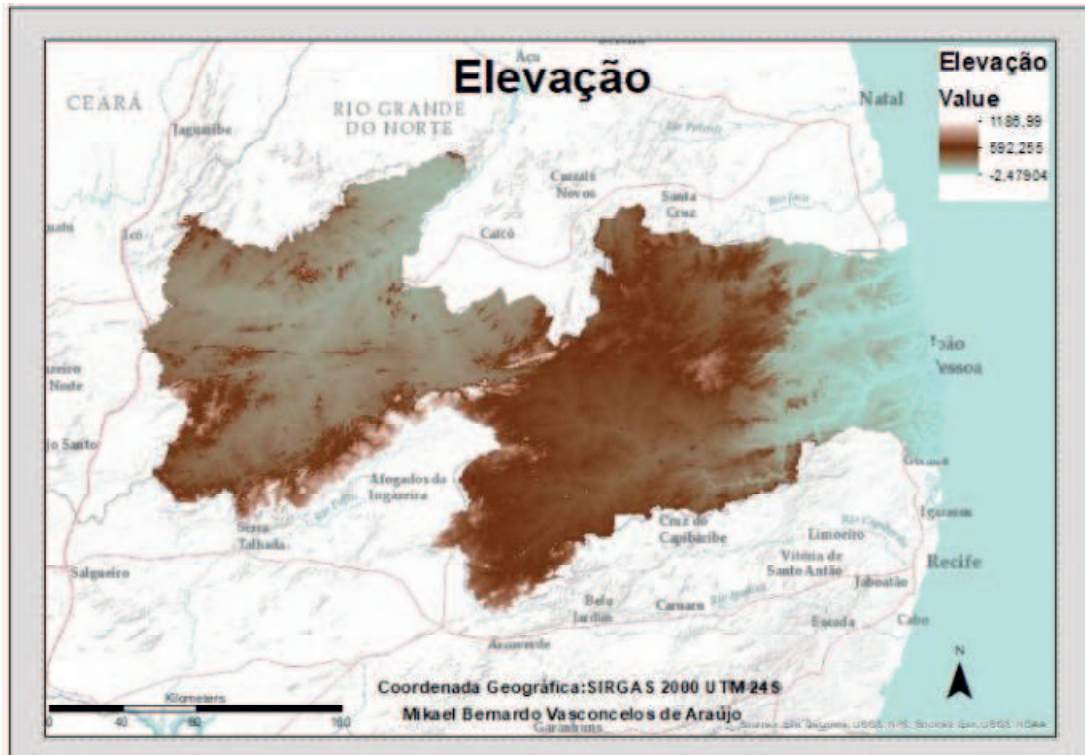
Figura 10 – Mosaico projetado em três dimensões (a) e duas dimensões (b).



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Por consistir em um objetivo deste trabalho, o mosaico foi limitado ao estado da Paraíba, como mostra a Figura 11, e todas as funções posteriores utilizaram esse novo *raster* projetado e limitado como *input*.

Figura 11 – Área do estado da Paraíba extraída do mosaico

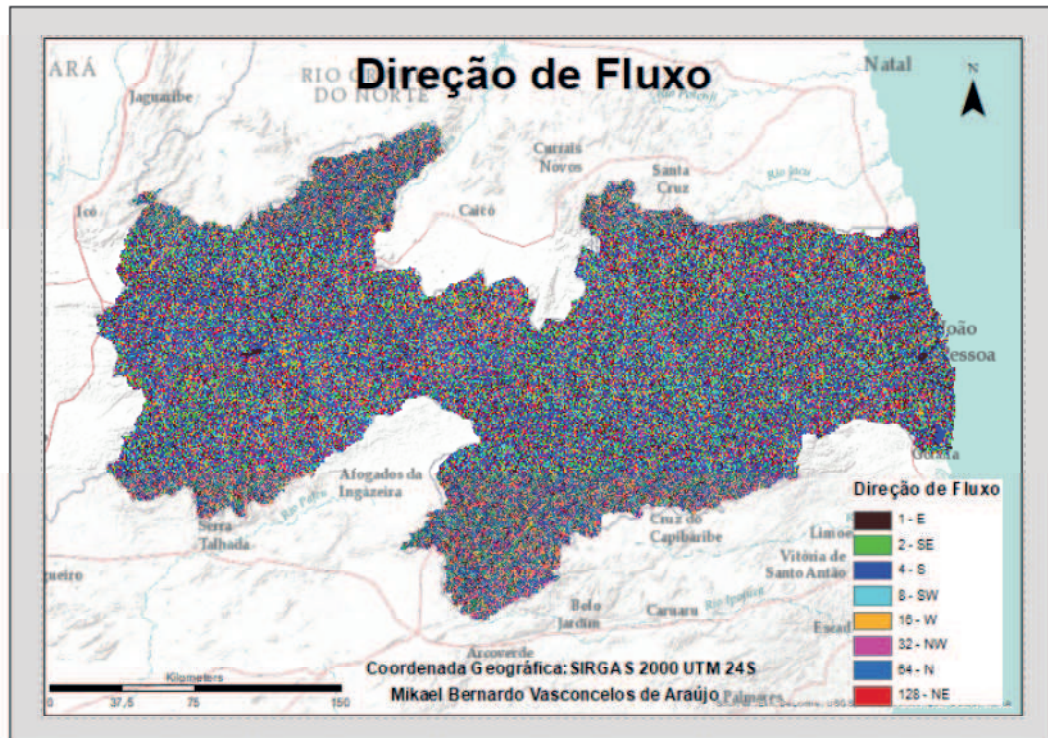


Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Após o delineamento da área da Paraíba - última etapa de preparação do *raster* –, o modelo inicia o processamento com as ferramentas hidrológicas. Embora não tenham sido visualmente observadas falhas no SRTM utilizado, optou-se por utilizar a ferramenta de preenchimento de falhas e remoção de picos (*Fill*). A justificativa tem duas vertentes. A primeira é que, embora não se observe, devido à área ser de grande dimensão, é provável que o *raster* tenha diversas falhas. Segundo, a ferramenta não será aplicada apenas para a área de estudo deste trabalho, podendo ser utilizada em áreas com péssima qualidade, tornando-se imprescindível a utilização do *Fill* para correção na imagem.

A Figura 12 apresenta o resultado da função *Flow Direction*. A cada célula do *raster* foi atribuído um valor podendo ser 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 ou 128, e a cada valor numérico é atribuída uma cor, como mostra a Figura 3. Esse valor foi atribuído a partir da maior declividade entre o pixel analisado e seus 8 circunvizinhos. Devido à dimensão da área de estudo, a Figura 12 não apresenta claramente as cores atribuídas. Como explicitado na metodologia, o *output* do *Flow Direction* será input das diversas ferramentas que o seguem.

Figura 12 – Output da função *Flow Direction* (Direção de fluxo)

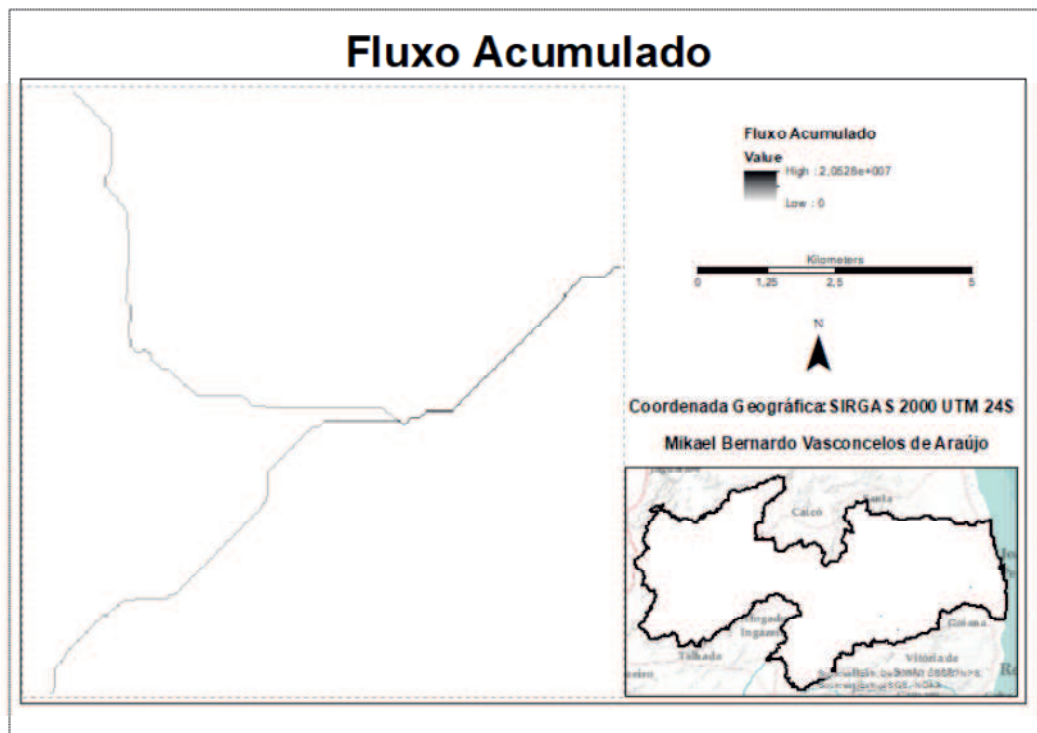


Fonte: Dados da pesquisa (2017).

O primeiro arquivo que o modelo processa utilizando como *input* a direção de fluxo é o fluxo acumulado. “A partir da direção de fluxo, o fluxo acumulado é obtido somando-se a área das células (quantidade de células) na direção do fluxo (ou escoamento)” (ALVES SOBRINHO, 2010). Cada pixel do *raster* de direção de fluxo recebeu um novo valor que correspondeu ao número de pixels que contribuíram para que a água chegasse até ele, possibilitando a determinação dos possíveis caminhos preferenciais de fluxo que originam a rede hidrográfica das bacias do estado da Paraíba. A Figura 13 é resultado da aplicação da ferramenta *Flow Accumulation* e apresenta os caminhos de escoamento da água nas bacias hidrográficas.

Para complementar as informações geradas, os rios das bacias do estado da Paraíba foram hierarquizados pela ferramenta *Stream Order*, utilizando-se o método de *Strahler*. De acordo com o *output* e analisando o estado da Paraíba como se fosse uma única bacia hidrográfica, a função determinou a presença de 12 possíveis hierarquias da rede de drenagem, como ilustra a Figura 14. Embora se saiba que o estado não se comporta como uma única bacia, o número de ordens, para aferir se a ferramenta estava funcionando de modo correto, foi determinado.

Figura 13 – Arquivo gerado pela função *Flow Accumulation* (fluxo acumulado)

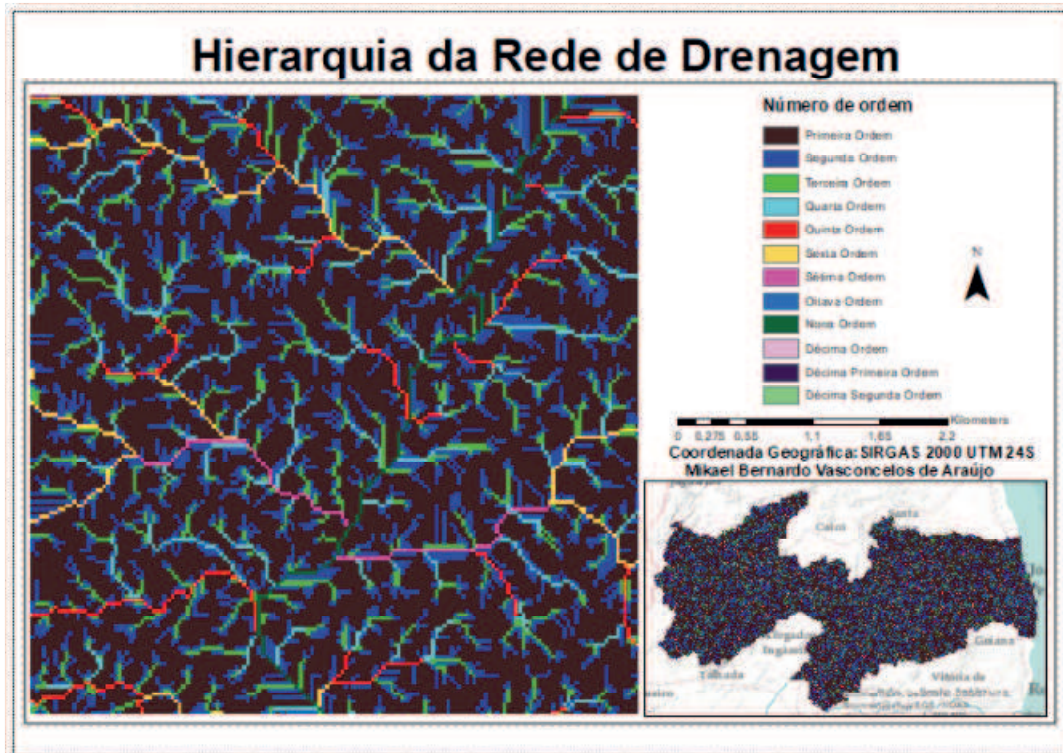


Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Aconselha-se, no entanto, que, quando a área de estudo for um estado, após a delimitação das bacias hidrográficas por meio desse modelo desenvolvido, o usuário utilize as áreas das bacias delimitadas separadamente no modelo. Ao utilizar como arquivo de entrada apenas o limite de uma bacia, obtém-se a hierarquia da rede de drenagem de modo coerente. Embora fizesse parte do modelo a conversão do arquivo de saída da ferramenta de hierarquização da rede de drenagem (*Stream Order*), preferiu-se sua remoção devido à morosidade para sua geração – cerca de 6 horas (processador Intel Core i7).

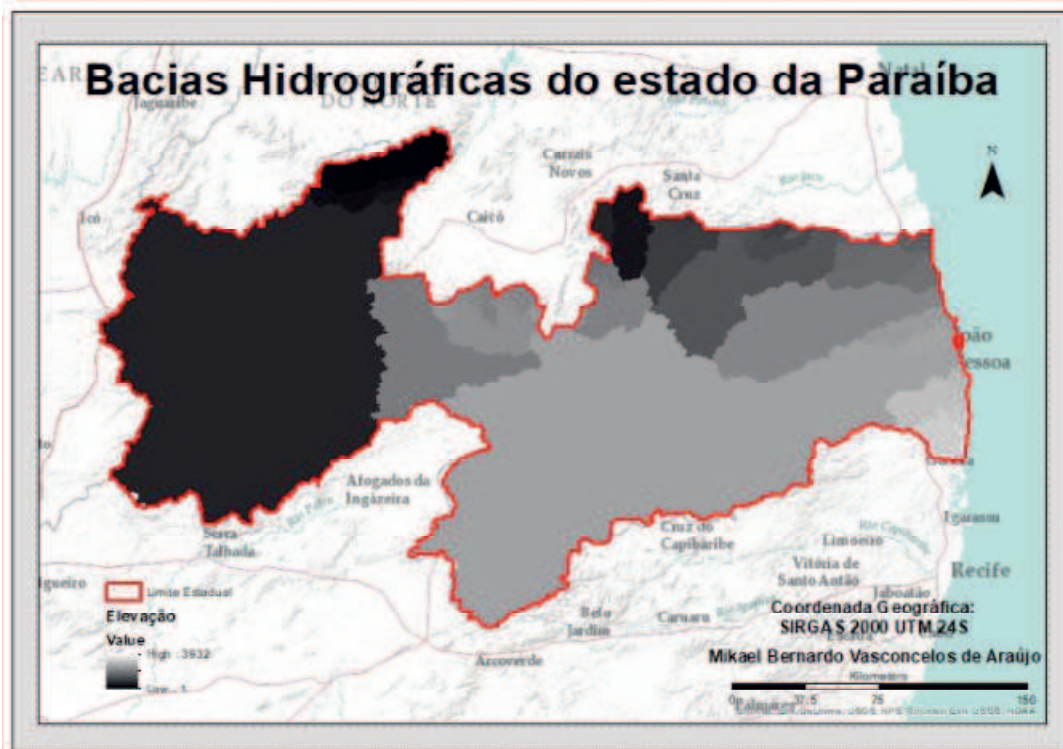
A delimitação da bacia hidrográfica foi o último processo desenvolvido pelo modelo. O *output* gerado (Figura 15) exhibe as diferentes bacias hidrográficas que compõem o estado da Paraíba.

Figura 14 – Hierarquia de drenagem pelo método de *Strahler*



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Figura 15 – Delimitação automática das bacias hidrográficas do estado da Paraíba (*raster*).



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Por fim, o modelo, ainda, converte o arquivo de saída da ferramenta *Basin* (Figura 15) em um vetor, como mostra a Figura 16 (a). A partir dessa geração buscou-se comparar esse arquivo com o fornecido pela AESA – Figura 16 (b). A conversão dos dados vetoriais foi baseada na informação de que esses não sofrem distorções ao serem manuseados, garantindo a integridade do arquivo analisado.

Figura 16 – (a) Delimitação automática das bacias hidrográficas do estado da Paraíba (vetor).



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

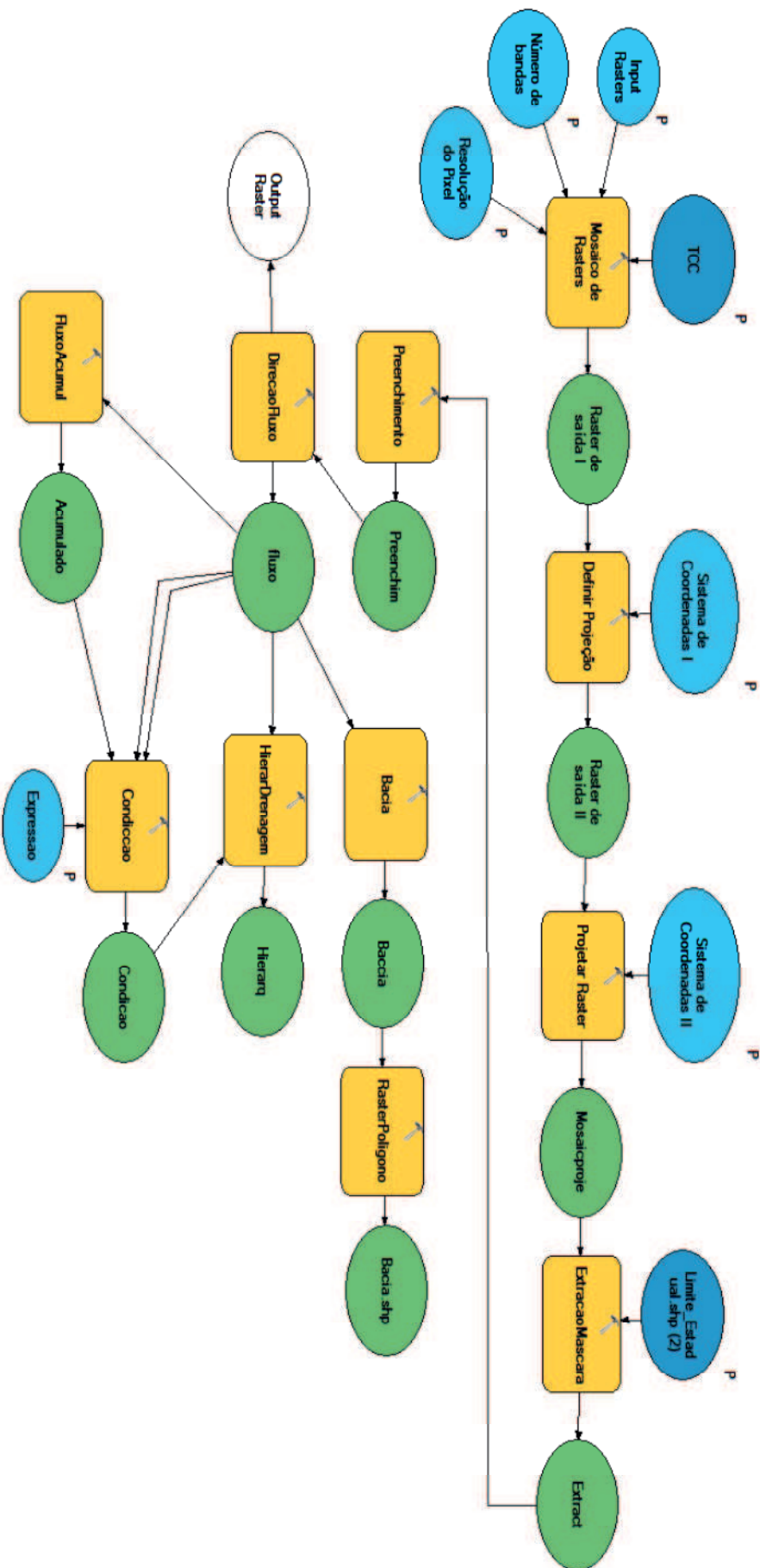
(b) Bacias hidrográficas do estado da Paraíba



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Na Figura 17 pode-se observar o modo de edição do Criador de Modelos (*ModelBuilder*) do ArcGIS®, no qual foi desenvolvido o modelo de delimitação automática de bacia hidrográfica. Nesse modo, foi possível, além de criar a ferramenta, determinar quais parâmetros (identificados pela letra P) devem ser inseridos pelo usuário e a descrição, em Português, de todos os *inputs* requeridos. Outrossim, o local de destino dos arquivos gerados deve ser determinado pelo usuário. Por padrão, o modelo de delimitação desenvolvido, caso não seja determinado outro, criará uma pasta para cada *output* gerado, estando todos contidos na mesma pasta raiz.

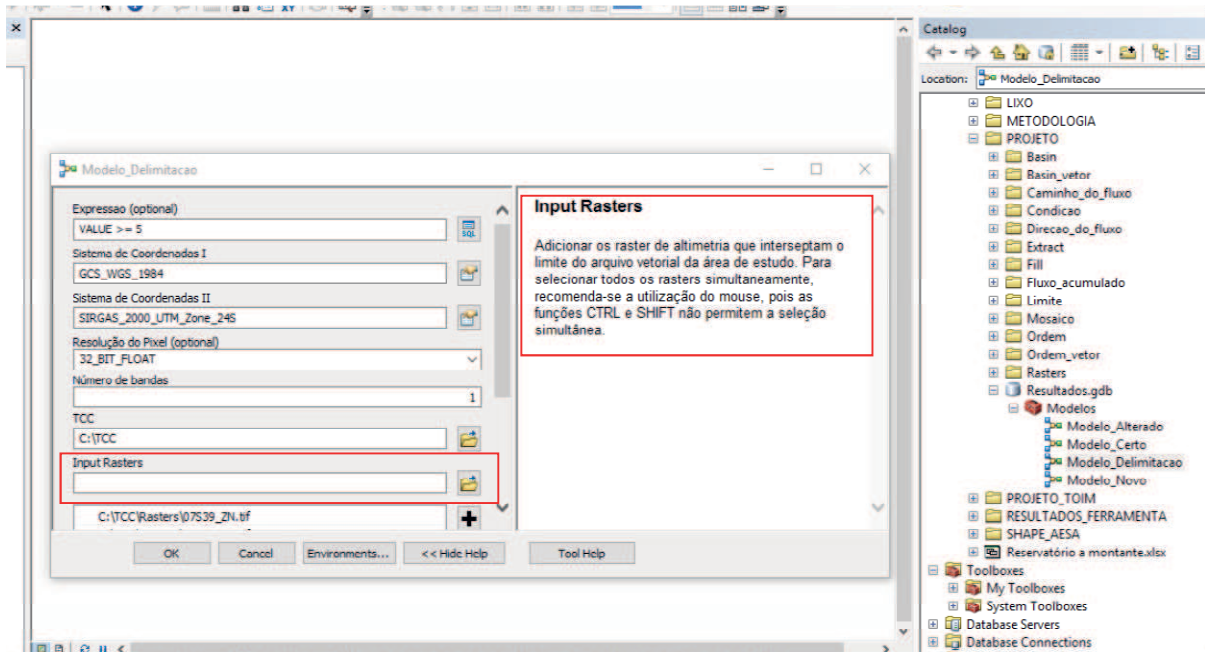
Figura 17 – Criador de Modelos: ferramenta de delimitação de bacia (modo de edição)



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

A Figura 18 exemplifica a descrição do parâmetro *rasters*. De acordo com a ferramenta, o usuário deverá adicionar a pasta contendo todos os *rasters* que utilizará na delimitação e, opcionalmente, adicionar um filtro, para que o modelo só selecione arquivos que atendam a uma condição pré-definida, e o formato dos *rasters* de entrada.

Figura 18 – Descrição do parâmetro de entrada da ferramenta *Mosaic to New Raster*



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

6 CONCLUSÃO

O modelo desenvolvido mostra-se adequado e de fácil utilização para delimitação de bacias e sub-bacias hidrográficas, podendo ser empregado a estudos em outras localidades, fazendo-se necessária apenas a seleção dos arquivos de entrada corretamente para cada área analisada.

A delimitação automática da bacia hidrográfica do estado da Paraíba obtida a partir de dados do SRTM apresenta semelhança àquela disponibilizada no sítio da AESA. No entanto, o modelo identificou as bacias hidrográficas de forma mais detalhada, fazendo-se necessário estudo aprofundado da forma de delimitação das bacias da Paraíba pela AESA.

O modelo desenvolvido pode ser base para a construção de modelos com a mesma função em *softwares* livres, como o QGIS. Vale comentar, que o ArcGIS® não permite a importação de suas ferramentas por outros programas computacionais de geoprocessamento. Ainda, esse será disponibilizado e poderá ser editado para incorporação de novas funções. Recomenda-se, contudo, que a edição seja feita por usuário experiente para que não haja problemas no processamento. Por se tratar de uma sequência de funções dependentes entre si, a inserção ou remoção de uma única ferramenta pode interromper o fluxo de informações e comprometer seu processamento.

Para as regiões que não possuem registros cartográficos, a utilização de dados do SRTM mostra-se eficaz pois, além desses serem disponibilizados gratuitamente, viabiliza a realização de diversas pesquisas.

O delineamento automático de bacias hidrográficas tendo como bases *rasters* de altimetria (dados do SRTM) em ambiente de sistema de informação geográfica, no caso o ArcGIS®, mostra-se conveniente por estabelecer a área da unidade elementar de gestão de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Dados Hidrológicos. Brasília, Distrito Federal. 2008. Disponível em: <<http://www.hidroweb.ana.gov>>. Acesso em: 14 ago. 2017.

ALVES SOBRINHO, T. et. al. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.46-57, 2010.

ARCGIS, **ModelBuilder tutorial**. Disponível em:< <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/modelbuilder-tutorial.htm>>. Acesso em: 07 dez. 2017.

ARONOFF, S. **Geographic Information Systems: a management perspective**. Canada: WDL Publications, 1989.

ARAÚJO, S. M. S. A Região Semiárida do Nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Rios Eletrônica - Revista Científica da FASETE**. Ano 5, n. 5, p.89-98, 2011.

BAGLI, Vantier Veronezi. **Mosaico de imagens de sensoriamento remoto**. São José dos Campos - SP. INPE. Proposta de Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada, orientada pela Dra. Leila Maria Garcia Fonseca. Instituto nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.

BARRELLA, W. et al. **As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes**. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) *Matas ciliares: conservação e recuperação*. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

BORSATO, F.H; MARTONI, A.M. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no município de Maringá, estado do Paraná. **Rev. Acta Scientiarum**. Maringá - PR. v.26, n.2, p 273 – 285, 2004.

BUARQUE, D. C.; ROLIM DA PAZ, A.; COLLISCHONN, W. **Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, RS, 2008.

CARDOSO, C. A. et. al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan. Nova Friburgo, RJ. **R. Árvore**, Viçosa – MG, n.2, p. 241-248, 2006.

FRANCISCO, P. R. M. et. al. Classificação Climática de Koppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia e Física**. V. 08 N. 04, p. 1006-1016, 2015.

GALVÃO, C. O., et al. **Sustentabilidade da oferta de água para abastecimento urbano no Semi-Árido Brasileiro: o caso Campina Grande**. Disponível em:<

http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/4serea/serea2002/trabalhos/A29_40.pdf>. Acessado em: 03 mar. 2017.

GALVÍNCIO, J. D., SOUSA, F. A. S., SHIRINIVASAN, V. S. **Análise do relevo da bacia hidrográfica do açude Epitácio Pessoa.**

GOVERNO DO ESTADO DA PARAÍBA. **Bacias hidrográficas do estado da Paraíba.**

Disponível em:http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2016/11/PE_02.pdf.2006>. Acesso em: 7 mar. 2017.

LISBOA FILHO, Jugurta. **Introdução a SIG - Sistemas de Informações Geográficas.** Porto Alegre: CPGCC da UFRGS, 1995.

PEREIRA, A. C., et al. Metodologia para uma falsa composição colorida de imagens do satélite Landsat como ferramenta para avaliação visual da redução na área superficial de corpos hídricos: estudo de caso entre os anos de 2010 à 2015 no açude Epitácio Pessoa, Boqueirão – PB. VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Campina Grande, Paraíba, 21-24 de novembro de 2016. **Anais...** Campina Grande: IBEAS, 2016. p. 1-6.

PINHEIRO, M. R. de C., et al. Geoprocessamento aplicado à gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Macaé – RJ. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, **Anais...** Natal: INPE, p. 4247-4254.

PRICE, Maribeth Hughett. **Mastering ArcGIS.** South Dakota School of Mines and Technology. 1963. Sixth edition. ISBN 978-0-07-802142-8.

RENNÓ, C.D.; et. al. A new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.112, n.9, p.3469-3481, 2008.

RIBEIRO, R. R. **Geopolítica da água: Açude de Boqueirão/PB e as disputas territoriais por água.** 2011. Guarabira – PB.

SOUSA, L., NERY, F., MATOS, J. Metodologias de processamento de dados SRTM para a produção de modelos digitais de direções de escoamento. Actas do 8º Congresso de Água. 14-17 de março de 2006. **Anais...** Figueira da Foz: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos.

VALERIANO, M. M.; ABDON, M. M. Aplicação de dados SRTM a estudos do Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.59, n.1, p.63-71, 2007.

YASSUDA, E. R. **Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais.** Disponível em :<<http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rap/article/viewFile/8663/7394>>. Biblioteca virtual da Fundação Getúlio Vargas. Acesso em: 17 nov. 2017.