Processamento de modelo digital de elevação para estimativa do tempo de percurso do escoamento superficial

Victoria Lina Silva de Castro[1]
Dario Macedo Lima[1]
Antônio Henrique Araújo Costa[1]
Adriano Rolim da Paz[1]

[1] Universidade Federal da Paraíba – UFPB/CT
Caixa Postal 58051-900 – João Pessoa - PB, Brasil
victorialcastro@gmail.com, dario_jpmacedo@hotmail.com,
ahenriqueac@gmail.com, adrianorpaz@yahoo.com.br

Abstract. This paper describes an approach for using geoprocessing tools in order to spatially distributed calculate the routing time of surface runoff from headwaters until reaching the river drainage network. This calculation is one major step to calculate concentration time, a parameter used to define critical rainfall events for several engineer projects. Considering an urban basin located in João Pessoa (Cuiá river basin, drainage area of about 40 km²) as study case, and the SRTM-DEM, flow directions, basin delineation and flow accumulation area were calculated. This data was used as input for obtaining distances from every pixel representing a headwater downstream up to the closest river drainage, as well for determining its slope. Along tracing this flow path, the corresponding land uses were identified and lookup table of Manning roughness coefficients was used to associate this coefficient with each reach along this flow path. The SCS (Soil Conservation Service) method for calculation routing time was used. Results indicate that 80% of the distances from headwater pixels up to the closest drainage network ranged between 92 m up to 600 m. The corresponding routing times of surface runoff reached up to 452 min, but for 71% of the flow paths this routing time was less than 50 min. For further using these results for obtaining concentration time, it is necessary to deal with flow paths with null slopes (indetermination) or very small slopes, which may lead to too large times, which may not be representative of the hydrology of the basin.

Palavras-chave: geoprocessing, digital elevation model, time of concentration, geoprocessamento, modelo digital de elevação, tempo de concentração.

1. Introdução

Modelos Digitais de Elevação (MDE) representam a topografia, sendo que cada célula ou pixel tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado referencial. São usados em aplicações dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e estão inteiramente relacionados com a caracterização física de bacias hidrográficas e do sistema de drenagem.

A obtenção da rede de drenagem é um dos principais objetivos do processamento do MDE. A partir da rede de drenagem é possível definir várias informações, como as direções de fluxo, calcular as áreas de contribuição, a delimitação da bacia hidrográfica, a determinação da área de drenagem, as distâncias ao longo de caminhos de fluxo e redes de drenagem e a declividade do rio (Paz e Collischonn, 2007).

A obtenção desses planos de informação a partir do MDE tem sido utilizada como dado forma de gerar dado de entrada para determinação de vários estudos hidrológicos. Um desses usos pode ser a determinação do tempo de deslocamento da água na superfície, posteriormente usado para estimar o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica. O tempo de concentração (tc) é um parâmetro hidrológico definido como o tempo necessário para uma gota d'água caminhar superficialmente do ponto mais distante da bacia até o seu exutório (Silveira, 2005), ou pode ser visto também como o tempo necessário para que toda a bacia esteja contribuindo na seção do exutório. É um parâmetro muito importante no estudo do comportamento hidrológico de uma bacia, podendo ser utilizado em estudos de modelagem hidrológica e de engenharia para estimar transformação chuva-vazão e estudar cenários de mudança de uso e ocupação do solo, desmatamento, projetos de drenagem de águas pluviais, entre outros.

Diferentes formulações existem na literatura para estimar o tc de uma bacia hidrográfica, levando-se em conta características como topografia, percentual de impermeabilização da bacia, uso do solo,

coeficientes de rugosidade da superfície e dos rios, distâncias e declividades de caminhos de fluxo ao longo da superfície e ao longo dos rios etc (Silveira, 2005).

Independente do método de cálculo do tempo de concentração, tradicionalmente, ele é determinado de forma manual ou semi-automática, selecionando visualmente quais pontos candidatos a serem os mais distantes ou que proporcionem os maiores tempos de deslocamento ao longo da bacia. Essa abordagem pode demandar bastante tempo e esforço para encontrar o tc, além da possibilidade de existir a incerteza de que o ponto mais distante talvez não tenha sido considerado. Por isso, estudos têm sido feitos para utilizar geoprocessamento como ferramenta para determinar o tc (Merkel et al., 2008; Silva e Araújo, 2013).

A determinação do tc de forma automatizada traz potencialmente vários benefícios: diminuição do tempo necessário para sua determinação; redução dos erros e dos fatores subjetivos; facilidade de incorporação de dados obtidos por sensoriamento remoto, cuja disponibilização é cada vez maior e com mais qualidade (por exemplo, resolução espacial e precisão vertical de MDE).

Dentro desse contexto, este artigo visa apresentar uma abordagem de estimar o tempo de deslocamento do escoamento pelas superfícies de uma bacia hidrográfica a partir do processamento do MDE, usando o método SCS, de forma automatizada. Como estudo de caso toma-se a bacia hidrográfica do rio Cuiá, localizada em João Pessoa. Tal bacia tem problemas de inundação e estudos anteriores indicam urbanização crescente e potencial para agravar a problemática. Costa (2013) fez a simulação dos impactos da urbanização sobre as inundações urbanas nessa bacia, enquanto Silva (2007) identificou as áreas com risco de inundações e erosão na bacia do rio Cuiá. Para esses e outros tipos de estudo que contribuam para diagnosticar e propor soluções para as inundações, a estimativa do tc da bacia e das sub-bacias torna-se necessário.

2. Metodologia de trabalho

2.1 Área de estudo e dados disponíveis

A bacia hidrográfica do rio Cuiá está localizada na mesorregião do litoral paraibano e na microrregião de João Pessoa (Figura 1 - a). Limita-se ao norte com a bacia hidrográfica do rio Jacarapé, ao sul com a bacia hidrográfica do rio Gramame, a oeste pelo conjunto habitacional Ernany Sátiro e a leste pelo Oceano Atlântico. A bacia do rio Cuiá compreende uma área de aproximadamente 40 km², com altitude média de 5 metros (Reis, 2010). Para este trabalho, foi utilizado o MDE proveniente dos dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 90 m, originalmente no sistema de coordenadas geográficas projetado para UTM-25S.

Tal bacia caracterizada como uma bacia urbana e que sofre grande pressão antrópica. Silva (2007) caracterizou a bacia do rio Cuiá quanto ao uso do solo e estimou que a bacia apresenta 3,49 km² da área coberta de culturas, como culturas irrigadas e de ciclo curto; 6,47 km² de área destinada à expansão de loteamentos ou solos expostos; 15,73 km² de áreas ocupadas por conjuntos habitacionais e loteamentos; 7,98 km² coberto por gramíneas ou áreas de pastagem, predominantemente vegetação natural de porte médio a baixo, árvores dispersas e áreas preparadas para plantações; 4,84 km² ocupados por resquícios de Mata Atlântica, matas e capoeiras; 1,36 km² de vegetação de mangue, que é caracterizado pela presença de área úmida com influência da maré (Figura 1 - b).

2.2 Processamento inicial do MDE

No processamento inicial do MDE para estimativa do tempo de percurso do escoamento é feita a definição das direções de fluxo, determinada a partir do MDE com as depressões do terreno removidas. As direções de fluxo são obtidas através da direção preferencial de escoamento da água de cada pixel com base na topografia, considerando que cada pixel escoa para um de seus 8 vizinhos (algoritmo conhecido como D8) (Buarque et al., 2009). A partir das direções de fluxo é possível obter as áreas acumuladas de drenagem para cada célula, que corresponde ao somatório da área superficial de cada pixel ou da quantidade de pixels que fluem para o pixel analisado. A delimitação da bacia hidrográfica é determinada a partir das direções de fluxo e da indicação da localização do seu exutório (Sorribas et al., 2011; Fan et al., 2013).

Uma etapa fundamental é a identificação da rede de drenagem, para isso é arbitrado um valor mínimo de área de drenagem (Amin) a partir do qual um pixel do plano de informações área acumulada é considerado como parte da rede de drenagem caso tenha atributo superior a esse patamar.

O valor deste limite, no entanto, pode variar dependendo das características físicas locais e dos objetivos do mapeamento. O resultado depende fortemente dessa escolha. Um dos métodos citado por Fan et al. (2013) é a comparação visual com a rede de drenagem real para encontrar o valor adequado de Amin, que foi o método aplicado a este trabalho, valendo-se da rede de drenagem delimitada por Silva (2007) a partir de visitas de campo e interpretação de imagens LANDSAT.

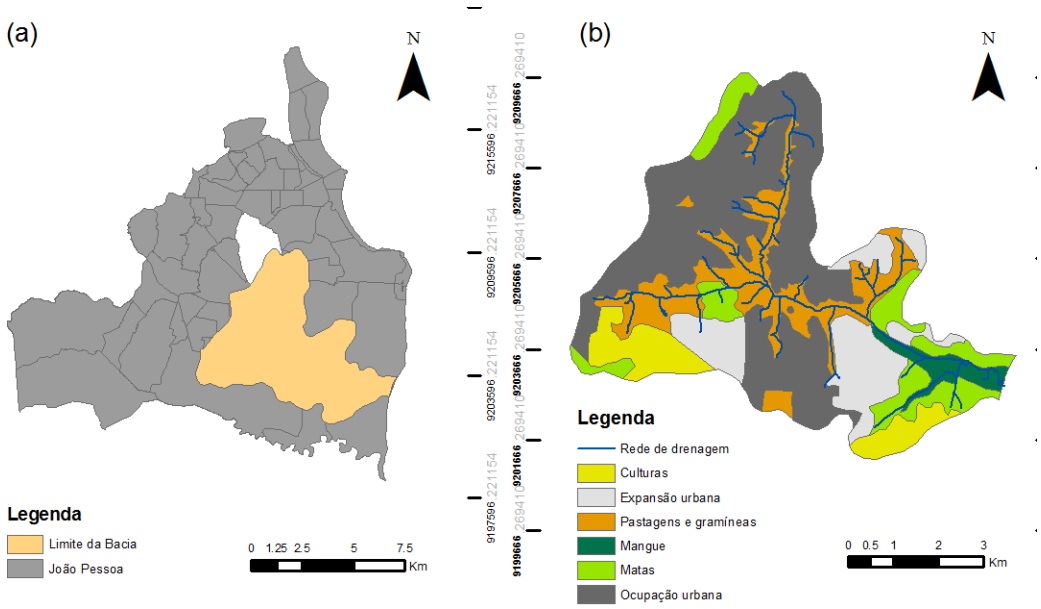

Figura 1. (a) Localização da bacia hidrográfica do rio Cuia; (b) Caracterização do uso do solo (Fonte: adaptado de Silva (2007)).

2.3 Método SCS para tempo de deslocamento do escoamento

2.3.1 Visão geral

O método SCS foi desenvolvido pelo *Soil Conservation Service,* do Departamento de Agricultura dos EUA, em 1957. O tempo de deslocamento do escoamento pode ser determinado através dessa metodologia. A metodologia utiliza dois tipos de equação, uma para escoamento superficial e outra para escoamento em canal, de acordo com a característica do local onde está sendo feito o cálculo. Quando se tratarem de vários trechos de drenagem deve ser calculado um tc para cada trecho, e o tc total será dado pela soma dos tc individuais (Porto Alegre, 2005). Para o cálculo do tempo de deslocamento do tipo escoamento superficial é utilizada a Equação 1:

$$Tc = \frac{5{,}474.(n.L)^{0,8}}{P_{24}^{0,5}.S^{0,4}} \quad (1)$$

onde o tempo de concentração é dado em minutos; S corresponde à declividade (m/m); n é o coeficiente de rugosidade de Manning (valor tabelado para diferentes superfícies); L é o comprimento ao longo do escoamento (m); P24 representa uma lâmina de precipitação com 24 horas de duração (mm), segundo a IDF (curva de intensidade-duração-frequência) da área de estudo e para o tempo de retorno de projeto.

Para o escoamento concentrado de pequena lâmina, canais e redes de drenagem, o procedimento consiste na aplicação da equação de Manning para estimativa da velocidade de escoamento e posteriormente determina-se o tempo de concentração. Neste trabalho, foi utilizada apenas a equação (1) que rege o tempo de deslocamento da água nos trechos em superfície.

2.3.2 Identificação das cabeceiras

Para determinar os tempos de deslocamentos pela superfície, foram identificados inicialmente os pixels que constituem trechos fontes de geração de escoamento, isto é, pixels que, segundo o mapa de direções de fluxo, não tem nenhum dos 8 vizinhos drenando para ele. Tais pixels são aqui referidos como pixels de cabeceira (mas não significam cabeceiras dos rios, e sim cabeceiras dos caminhos de

fluxo pela superfície). Esse procedimento de seleção dos pixels de cabeceira foi adotado visando reduzir o tempo computacional, já que por definição qualquer pixel que não é de cabeceira terá ao menos um pixel de cabeceira a montante dele, isto é, com maior distância de percurso e tempo de deslocamento que ele. Esta etapa e as etapas 2.3.3, 2.3.4 e 2.3.5 foram realizadas com o uso de uma rotina computacional desenvolvida em linguagem FORTRAN.

2.3.3 Traçado dos caminhos de fluxo e divisão em trechos

A partir de cada pixel cabeceira, foi traçado o caminho de fluxo a jusante dele até encontrar um pixel pertencente à rede de drenagem mais próxima. Ao longo desse traçado, foi identificado a qual uso do solo cada pixel percorrido pertence, pois a formulação do cálculo do tempo de deslocamento pela superfície leva em conta o coeficiente de rugosidade da superfície. Para cada pixel cabeceira, portanto, o caminho de fluxo até a rede de drenagem foi subdividido em trechos de uso do solo homogêneo.

2.3.4 Extração de características dos trechos

Os trechos que compõem o caminho de fluxo de cada pixel cabeceira até a rede de drenagem foram caracterizados quanto à extensão, declividade e tipo de uso do solo. Para o cálculo da extensão do trecho, foi utilizado o plano de informações direções de fluxo como entrada e as distâncias foram contabilizadas considerando que cada passo ortogonal ao longo do caminho de fluxo equivale ao tamanho do pixel e cada passo diagonal equivale ao tamanho do pixel multiplicado por $\sqrt{2}$. A declividade foi determinada pela divisão entre a diferença de cotas dos pixels final e inicial do trecho pela distância do trecho, considerando o MDE com depressões do terreno removidas. O tipo de uso do solo foi identificado a partir do mapa correspondente.

2.3.5 Determinação dos tempos de deslocamento

A Equação 1 foi aplicada para calcular o tempo de deslocamento do escoamento em cada trecho que compõe o caminho de fluxo a jusante de cada pixel cabeceira. O tempo de deslocamento total desde cada pixel cabeceira é dado pela soma dos tempos de cada trecho.

Foi adotado um tempo de retorno (Tr) de 10 anos e considerada a curva IDF da região de João Pessoa proposta por Pfafstetter (1957 apud Fragoso Jr., 2004) (Equação 2) para determina a lâmina de precipitação P24.

$$i = \frac{886{,}013 \cdot Tr^{0{,}164}}{(t+20)^{0{,}727}} \qquad (2)$$

onde a intensidade (i) da chuva é dada em mm/h; Tr corresponde ao tempo de retorno (anos); t é a duração da chuva (min).

Para Tr = 10 anos, tal curva IDF indica que P24 é de 155,3 mm. Os valores do coeficiente de rugosidade de Manning para os diferentes tipos de uso do solo foram adotados baseados na literatura (Welle e Woodward, 1986; Wolanski et al., 1992) (Tabela 1).

Tabela 1. Tipos de uso do solo da bacia hidrográfica do rio Cuiá e os respectivos coeficientes de Manning para suas superfícies.

Uso do solo	Coeficiente de Manning
Mangue	0,40
Matas	0,30
Culturas	0,17
Pastagens e gramíneas	0,13
Expansão urbana	0,08
Ocupação urbana	0,05

3 Resultados e discussão

Foram identificadas 2412 cabeceiras (pixels fontes de geração de escoamento) na bacia do rio Cuiá. Para 1215 cabeceiras foi estabelecido apenas um trecho homogêneo de uso do solo, 899 cabeceiras tiveram dois trechos, foram identificadas 194 cabeceiras com três trechos, 52 com quatro trechos e 52 com cinco trechos distintos (Tabela 2).

Percebe-se grande variação nas características obtidas para os trechos de escoamento superficial. A Figura 2 apresenta a análise das características desses trechos quanto a comprimento, declividade e tempo de deslocamento do escoamento na superfície. Entre os trechos identificados, a maior parte possui comprimento entre 0 e 400 metros, declividade entre 0 e 50 metros, e tempo de deslocamento do escoamento entre 0 e 50 minutos. O comprimento mínimo foi de 92,6 m (ou seja, um pixel), o médio de 395,6 m e o máximo de 1880,4 m. A predominância foi de trechos de até 600 m (cerca de 80% do total; Figura 2-a). A declividade mínima dos trechos foi zero, a média 39,9 m/km e a máxima 224,2 m/km. A predominância com mais de 80% dos trechos foi de declividade de até 75 m/km (Figura 2-b). Como foi utilizado o MDE com depressões do terreno removidas, isso garantiu não existir declividades negativas, porém não evitou ter declividades nulas. Para esses trechos de declividade nula, o tempo de escoamento não foi possível de ser calculado – isso correspondeu a 1,8% dos trechos (Figura 2-c). O tempo mínimo de deslocamento do escoamento foi 2,95 minutos, o tempo médio foi 42,33 minutos e o máximo 452,37 minutos. A grande predominância foi de tempos de deslocamento de até 50 minutos (71%), com apenas 7% dos trechos com tempo superior a 100 minutos.

Tabela 2. Quantificação de cabeceiras por número de trechos.

Número de trechos	Número de cabeceiras
1	1215
2	899
3	194
4	52
5	52

A Figura 3-a apresenta o mapa de distâncias até a rede de drenagem, onde os pixels com tons mais fortes de azul estão mais próximos à rede de drenagem e os com tons alaranjados e vermelhos encontram-se mais distantes. Os pixels em branco nessa figura representam a rede de drenagem, os quais estão em azul nas Figuras 3-b e 3-c.

Na Figura 3-b, são diferenciados os pixels cabeceiras dos demais pixels. Os tempos finais de deslocamento pela superfície desde cada cabeceira até a rede de drenagem mais próxima são dados para cada pixel cabeceira e apresentados na Figura 3-c. Os pixels com tempo de deslocamento maior estão concentrados em dois pontos principais da bacia hidrográfica, nos extremos sudoeste e sudeste, pela combinação de terem distâncias elevadas até a rede de drenagem, apresentarem declividade reduzida e ainda estarem total ou parcialmente ao longo de áreas de matas e culturas agrícolas, cujo coeficiente de Manning é elevado (maior atrito para o escoamento). Pixels cabeceiras localizados na porção oeste da bacia apresentaram distâncias das mais altas porém não tiveram os maiores tempos de deslocamento por ser uma região de terreno mais acentuado e principalmente por ser de ocupação urbana, cujo coeficiente de Manning é reduzido (ou seja, menor atrito para o escoamento).

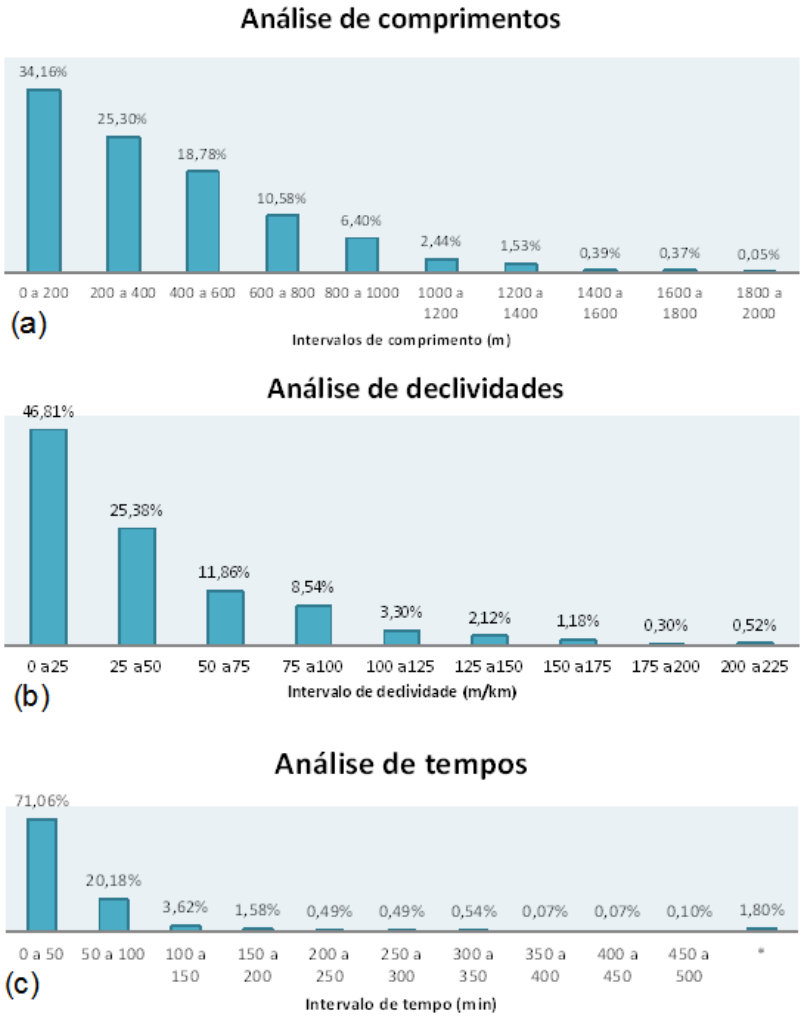

Figura 2. (a) Análise dos comprimentos dos trechos; (b) Análise de declividades dos trechos; (c) Análise de tempos de deslocamento do escoamento.

4 Conclusões

A abordagem proposta se mostrou com grande potencial para aplicação de forma sistematizada em bacias hidrográficas visando a determinação do tempo de deslocamento na superfície. O processamento e extração dos atributos derivados do MDE podem ser replicados para praticamente qualquer situação, bem como a confecção de mapa de uso do solo e a atribuição de rugosidades necessários para o método são facilmente obtidos. O MDE utilizado foi baseado nos dados do SRTM-90m, que pode ser considerado não tão detalhado para uma bacia urbana de apenas 40 km², porém serviu para ilustrar a aplicabilidade da abordagem proposta e proporcionou resultados coerentes.

Uma dificuldade da aplicação do método diz respeito à ocorrência de declividades nulas, que impossibilitam o cálculo do tempo de deslocamento do escoamento na superfície pelo método SCS. Uma alternativa poderia ser o cálculo via outra formulação diferente do método SCS. Mas, além das declividades nulas, existem declividades muito pequenas que podem ocorrer em trechos específicos e gerar tempos de deslocamento muito altos, que na verdade possam não retratar que seja o tempo a ser usado para determinação do tempo de concentração da bacia. Ou seja, há a tendência de superestimar o tempo de concentração se for considerado estritamente o tempo máximo de deslocamento para obtenção do tempo de concentração, ao somar posteriormente o tempo de percurso ao longo das calhas dos rios. Uma idéia para superar essa questão seria desconsiderar os maiores tempos de deslocamentos (por exemplo, os 5% maiores), ignorando casos isolados. Esse percentual a ser ignorado poderia ser

estabelecido confrontando-se os resultados com os valores determinados pela abordagem tradicional para algumas bacias hidrográficas.

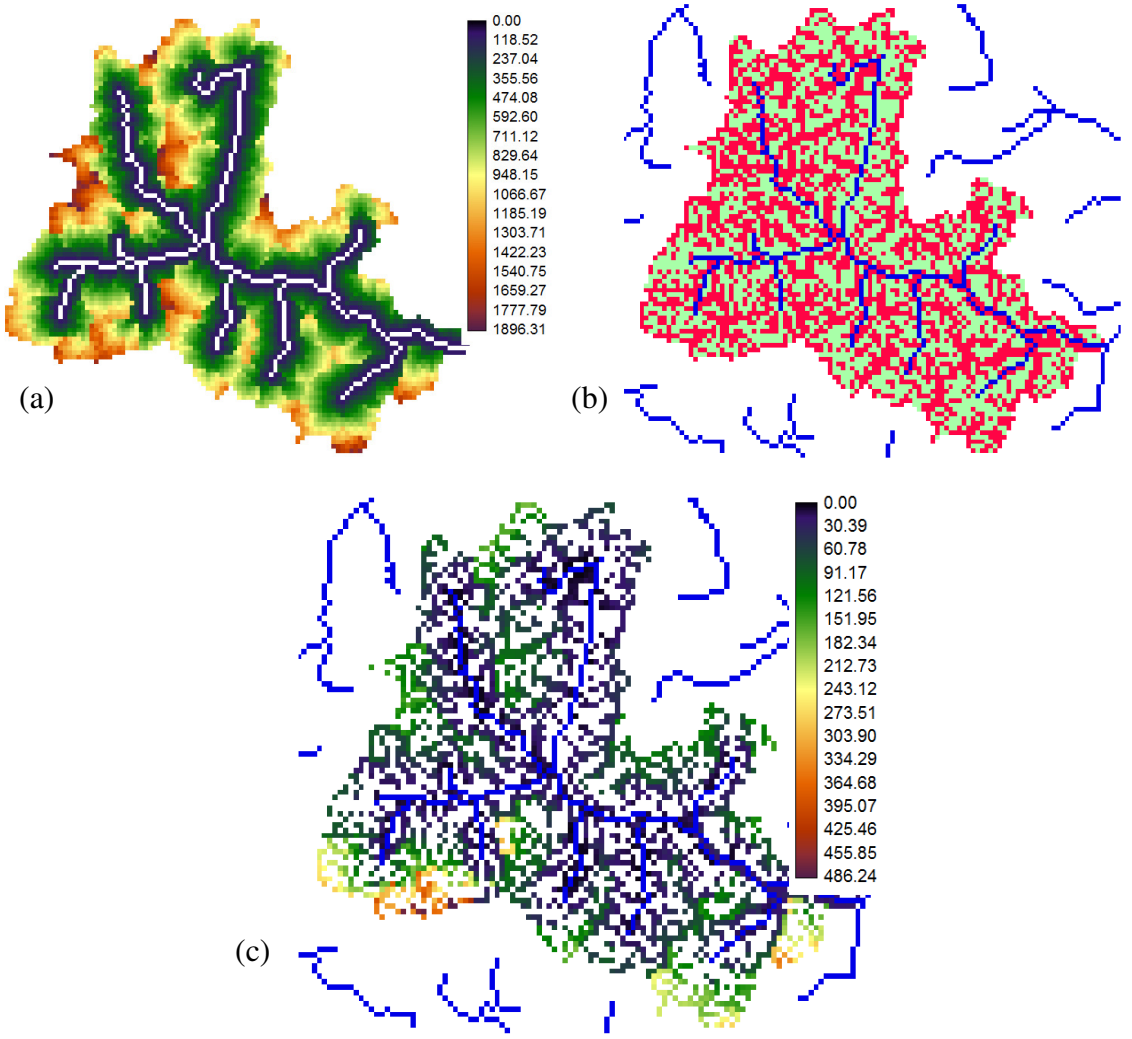

Figura 3. (a) Distância de cada pixel até a rede de drenagem mais próxima (em metros); (b) Identificação dos pixels cabeceira (em vermelho) dentro da bacia (demais pixels em verde); (c) Tempo de deslocamento pela superfície até a rede de drenagem pelo método SCS para os pixels cabeceira (em minutos).

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de iniciação à pesquisa para o primeiro e segundo autores, pela bolsa de produtividade ao quarto autor e pelo financiamento do projeto de pesquisa ao qual o trabalho está vinculado; à Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado para o terceiro autor.

Referências Bibliográficas

Buarque, D.C. et al. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 91-103, 2009.

Costa, A.H.A. **Simulação dos Impactos da Urbanização sobre as Inundações Urbanas na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiá (PB)**. 2013. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2013.

Fan, F. M. et al. Sobre o início da rede de drenagem definida a partir dos modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 241-257, 2013.

Fragoso Jr., C.R. Regionalização da vazão máxima instantânea com base na precipitação de projeto. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 1, p. 5-13, 2004.

Merkel, W.H. et al. NRCS GeoHydro – A GIS interface for hydrologic modeling. **Computers & Geosciences**, v.34, p. 918-930, 2008.

Paz, A.R.; Collischonn, W. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 343, n. 3-4, p. 127-139, 2007.

Porto Alegre. Departamento de Esgotos Pluviais. **Plano diretor de drenagem urbana de Porto Alegre**: Manual de drenagem urbana. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

Reis, A.L. Q. **Índice de sustentabilidade aplicado à bacia do rio Cuiá – João Pessoa (PB)**. 2010. 137 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, João Pessoa. 2010.

Silva, G.N.F.; Araújo, J.V.G. Uso do geoprocessamento no cálculo do tempo de concentração da água da chuva em ambientes urbanos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais**... Foz do Iguaçu: INPE. Artigos, p. 4390-4395.

Silva, L. P. **Modelagem e Geoprocessamento na identificação de áreas de risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá**. 2007. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2007.

Silveira, A.L.L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n.1, p. 5-23, 2005.

Sorribas, M.V. et al. Buscando áreas de drenagem mínima para definição da rede de drenagem a partir da litologia. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., 2011, Maceió. **Anais**... Maceió: ABRH. Artigos, p. 1-14.

Welle, P.J.; Woodward, D. **Time of concentration**. Pennsylvania: U.S. Dept. Agriculture, 1986. 13 p. (Soil Conservation Service - Hydrology Technical Note nº 4).

Wolanski, E.; Mazda, Y.; Ridd, P. Mangrove Hydrodynamics, In: Robertson, A.I.; Alongi, D.M. (Org.), **Tropical Mangrove Ecosystems. Coastal and Estuarine Studies.** Washington: American Geophysical Union, 1992. p. 42-62.