

Uma Ferramenta baseada em Grafos para Gestão de Recursos Hídricos no Brasil

Sergio Rosim Doutorando em Computação Aplicada (INPE-São José dos Campos)
Antônio Miguel Vieira Monteiro Doutorado em Engenharia Eletrônica e Controle/Ciência da
Computação (University of Sussex-Brighton, Inglaterra)
Camilo Daleles Rennó Doutorado em Sensoriamento Remoto (INPE-São José dos Campos)
João Ricardo de Freitas Oliveira Doutorado em Computação Aplicada (INPE-São José dos
Campos)

PALAVRAS-CHAVE

Recursos Hídricos – Fluxos Locais – Grafos – Modelos de Relevo

RESUMO

Os Comitês de Bacias são os órgãos gestores e executores dos recursos hídricos no âmbito das suas bacias hidrográficas. Cada comitê é composto pelo poder público, especialistas e representantes da sociedade. Os fluxos locais numa bacia hidrográfica formam o elemento mais importante para o desenvolvimento de modelos orientados para a gestão de recursos hídricos. O fluxo é determinado pelas características topográficas da superfície da bacia. A premissa fundamental é que a topografia do terreno é o principal fator para a determinação dos fluxos locais. As representações matemáticas e as estruturas computacionais, que armazenam a topografia do terreno, e o conjunto de funções, que extraem o fluxo da superfície de uma bacia, têm sido explorados pelos usuários dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). As estruturas de grades regulares (DEM), redes triangulares irregulares (TIN), curvas de nível e polígonos irregulares (Diagramas de Voronoi) são diferentes estruturas computacionais empregadas na partição da topografia do relevo de bacias hidrográficas. Esta situação implica em dizer que os fluxos locais são inteiramente dependentes da estrutura de dados usada na representação da topografia do terreno. Apresenta-se uma nova abordagem para representar e manipular estruturar os fluxos locais. Esta proposta, que supera a limitação imposta pelo acoplamento entre fluxo local e as estruturas de representação do terreno, é utilizada como base para a representação unificada de fluxos locais obtidos a partir de diferentes estruturas de representação do terreno, desacoplando a representação dos fluxos locais e as funções necessárias à sua manipulação.

KEYWORDS

Hydrological Resources – Local Flows – Graphs – Terrain Models

ABSTRACT

The local flow distribution in a water basin is the most important element to develop distributed hydrology modeling oriented to hydrological resources management. The underlying premise is that terrain topography is the primary factor in determining these local flows. Mathematical representations and computer data structures for terrain topography and a set of functions for extracting the surface water flow have long been explored by GIS practitioners. The basis for terrain topography representation in GIS is the partitioning of total the region extent in a set of elements. Different computer data structures based on regular grids (DEM), triangular irregular networks (TIN), contour lines and irregular polygons

tessellations have long been used to represent terrain topography. This situation establishes that the local flow representation is entirely dependent upon the data structure used to represent the terrain topography. To overcome this drawback we present a new framework. Its fundamental concept is to provide a formal representation as a basis for a unified computer local water flow data structure independent of the data structures used for representing terrain topography. The main advantage of our proposed approach is to decouple the local flow representation from the set of operations needed for its manipulation. A set of operations for water basin modeling and management applications can then be formally defined and a computational framework for spatially explicit distributed hydrology modeling can be designed. New data structures for surface representation can be incorporated into this framework with no impact on existing running models. In order to proof the concepts proposal a simple, but much used, distributed hydrology model have been implemented using an hydrology modeling prototyping environment based in Haskell and the TerraLib GIS library (Terra-HS) The same model was implemented in the PCRaster system.

1 INTRODUÇÃO

A Lei 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, que definiu a Política Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, estabeleceu um marco na gestão dos recursos hídricos no Brasil. A água tornou-se um bem público dotado de valor econômico. Os mecanismos de gestão passaram a ser vinculados à bacia hidrográfica, que passou a ser a unidade de manejo dos recursos hídricos. Cada bacia constituiu um Comitê de Bacia que é o órgão responsável pela elaboração e execução dos projetos na bacia hidrográfica, seguindo o que estabelece o Plano Nacional de Recursos Hídricos (Ana, 2006). O Comitê de Bacia é formado pelo poder público (município, estado e governo federal), sociedade civil organizada e usuários. Portanto, o conceito de gestão dos recursos hídricos foi compartilhado entre poder público e a sociedade organizada.

O município passa a ter um papel fundamental na gestão dos recursos hídricos. As cidades concentram grande parte dos agentes poluidores das águas, com seus esgotos e suas indústrias. A preservação dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica depende em grande parte da participação efetiva dos representantes das cidades no Comitê de suas Bacias. O poder municipal, ao mesmo tempo, que não se pode furtar à sua obrigação em relação aos recursos hídricos, não pode decidir tudo sozinho.

A política de gestão dos recursos hídricos é um fato no Brasil. O comportamento dinâmico da água no interior da bacia é base para os estudos relativos ao manejo dos recursos hídricos. Esse comportamento é determinado pelos rios existentes na bacia, pelo escoamento superficial e subterrâneo em toda área da bacia, pelo relacionamento entre esses dois fatores e pela relação entre esses dois fatores e os outros componentes da bacia como uso e cobertura do solo, tipo de solo, precipitação, etc.

O escoamento de uma bacia hidrográfica, o conjunto dos fluxos formados pela água, é determinado pelos processos geomorfológicos ocorridos na bacia. O fluxo superficial, tratado neste trabalho, é formado pela água que cai no solo e não infiltra no subsolo. O relevo do terreno é a componente determinante na definição desses fluxos no interior da bacia (Kiss, 2004; Soille e Gratin, 1994). A representação computacional do relevo é definida por estruturas de dados que “discretizam”, geradas a partir das amostras do relevo da bacia.

Para que essas amostras possam ser usadas na prática, algumas estruturas de dados foram elaboradas para representar o relevo. Embora essas estruturas sejam diferentes entre si, elas possuem em comum o fato de particionarem o espaço geográfico da bacia em elementos poligonais denominados de células. Os fluxos são definidos usando cada uma dessas estruturas de dados que representam computacionalmente o relevo da bacia.

Define-se, portanto, cada particular fluxo, chamado de fluxo local, para cada célula da estrutura de dados em relação às suas células vizinhas. O fluxo local tem sua origem em uma célula e seu término em uma ou mais células vizinhas. Para cada estrutura de dados existe uma maneira própria de extração e armazenamento os fluxos locais.

Na prática, o uso de uma ou outra estrutura depende de três fatores: a forma como a informação está disponível na origem; o requisito de projeto, que pode precisar de um tipo específico de estrutura; o sistema para tratamento de recursos hídricos disponível para o desenvolvimento do projeto. Este último determina qual estrutura ou estruturas de dados poderão ser utilizadas.

Os sistemas existentes empregam normalmente uma única estrutura de dados, limitando a possibilidade de representação computacional do relevo da bacia hidrográfica. O motivo principal é que cada estrutura particiona o relevo da bacia de forma diferente. O fluxo local é extraído de maneira diferente para cada estrutura de dados do relevo. Dessa forma, cada aplicação precisa ter uma implementação condizente com a particular estrutura de dados de onde foram extraídos os fluxos locais. A Figura 1 mostra os modelos de dados de relevo com os respectivos fluxos locais.

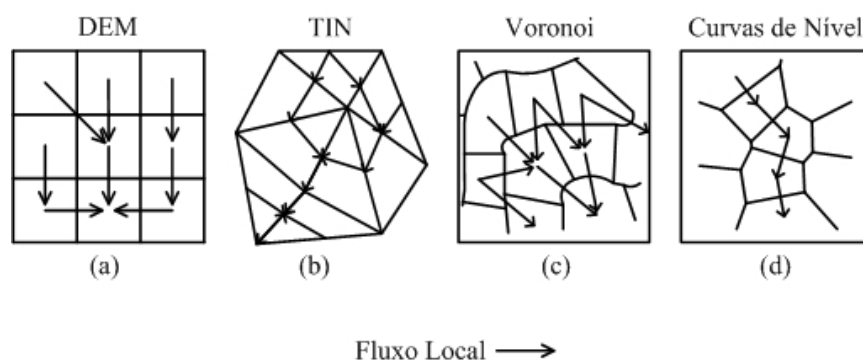


Figura 1 – Fluxos locais extraídos de diferentes estruturas de representação do relevo da bacia.

Este trabalho apresenta uma ferramenta para auxiliar na gestão dos recursos hídricos em aplicações envolvendo o uso dos fluxos locais de uma bacia hidrográfica. A vantagem dessa ferramenta é o uso de diversas estruturas de dados que representam o relevo e sobre elas executar os mesmos modelos e extrair os mesmos parâmetros, sem necessidade de ter um sistema específico para cada conjunto de dados de representação das bacias. Para tanto, emprega-se uma única estrutura de dados para representar os fluxos locais que podem ser extraídos de qualquer estrutura de representação do relevo. Dessa forma, a implementação se torna independente das estruturas usadas na obtenção dos fluxos locais. O uso desta ferramenta possibilita a integração de dados gerados e armazenados em diferentes estruturas de representação do relevo em uma mesma bacia ou em bacias diferentes.

1.1 SITUAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

A quantidade de água doce no mundo equivale a 3% do total da água existente. O restante, 97%, é constituído de mares e água não potável. Desses 3%, 2,5% estão congeladas nos pólos, em geleiras. Os 0,5% restante constitui o total de água potável utilizável.

A água potável está assim distribuída no mundo: 9,7% na África, 39,6% nas Américas, 31,8% na Ásia, 19% na Europa e 3,9% na Oceania. O Brasil possui 13,8% da água doce existente no mundo, 34,9% do total das Américas e 56,9% do total da América do Sul. Os usos mais significativos da água no Brasil são: irrigação com 69%, urbano com 11%, animal com 11%, rural 2% e industrial 7%.

Em relação a agricultura e irrigação no Brasil os números são os seguintes: estima-se que o Brasil possui 3,7 milhões de hectares irrigados, correspondendo a 6% da área plantada, contra 18% no restante do mundo. Por regiões a irrigação está assim distribuída: 38% na região Sul, 3% na região Norte, 9% na região Centro-Oeste, 21% na região Nordeste e 29% na região Sudeste.

No setor industrial tem-se verificado uma melhora no uso eficiente da água. A redução em algumas indústrias do setor têxtil de São Paulo atingiu 30%. Nas cervejarias o consumo de água por litro de cerveja teve uma redução de até 40%. Na indústria sucroalcooleira passou-se de 5m³ por tonelada de cana em 1997 para 1,8m³ em 2004, com expectativa de se chegar a 1m³/tonelada.

O abastecimento doméstico de água no Brasil atinge 89% da população de acordo com o Censo de 2000. Este número varia entre as regiões. Na região Norte a rede de água atinge menos de 70% da população, enquanto que nas outras regiões este índice fica acima de 80% da população.

Em relação à coleta de esgoto a cobertura no Brasil é de 54%. O tratamento de esgoto é de aproximadamente 20%. Quanto à qualidade de água no Brasil, dado por 859 pontos de coleta, tem-se que 5% dos pontos apresentam condição ótima, 71% boa, 14% aceitável, 8% de ruim e 2% péssima.

1.2 OS RECURSOS HÍDRICOS E A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

No Brasil, ocorreu a atualização da legislação sobre recursos hídricos, com a promulgação da Lei n. 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, que definiu a Política Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e da Lei n. 9.984, de 17 de Julho de 2000, que criou a Agência Nacional de Águas – ANA.

A Lei n. 9.433, conhecida como Lei das Águas, instituiu a Política Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamentando o inciso XIX do artigo 21 da última Constituição Federal (Senado Federal, 2005). Os objetivos desta Lei são os de assegurar à atual e às futuras gerações a necessária quantidade e qualidade de água bem como a utilização integrada dos recursos hídricos e a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos. As águas passaram a ser um bem de domínio público, vistas como recurso limitado e dotadas de valor econômico, fixando o uso múltiplo das águas, mas com a prioridade de seu uso para os seres humanos e a dessedentação de animais. A bacia hidrográfica foi instituída como unidade territorial para implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos, sendo a sua gestão realizada de forma descentralizada e contando com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades. O Conselho Nacional de Recursos Hídricos, os Comitês de Bacias e as Agências de Água foram criados neste processo.

As diretrizes gerais de ação para o estabelecimento de uma política nacional de recursos hídricos bem como seus instrumentos, como os Planos de Recursos Hídricos a outorga dos direitos de uso e a cobrança desses recursos, foram estabelecidos. A Lei das Águas disciplina também a questão dos dados sobre recursos hídricos por meio da criação do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos que incorpora o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Este Sistema tem por objetivos coordenar a gestão integrada das águas na escala da bacia hidrográfica, arbitrar conflitos, planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos e promover a cobrança pelo uso desses recursos.

A Lei n. 9.984, de 17 de Julho de 2000 cria a Agência Nacional de Águas – ANA que passa a ser a entidade federal de implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. A ANA tem por objetivos supervisionar, controlar e avaliar ações referentes à legislação sobre recursos hídricos, disciplinar a operacionalização, o controle e a avaliação dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, outorgar o direito de uso dos recursos hídricos, bem como

fiscalizar a sua utilização nos corpos de água de domínio da União, elaborar estudos técnicos, implantar junto com os Comitês de Bacia a cobrança pelo uso dos recursos hídricos e elaborar estudos para subsidiar a aplicação de recursos financeiros.

A ANA é dirigida por uma Diretoria Colegiada formada por 5 membros nomeados pelo Presidente da República, com mandatos de 4 anos não coincidentes, não podendo ser escolhidos entre pessoas que mantenham vínculos com empresas interessadas nos recursos hídricos, direta ou indiretamente. Além de ser responsável pela Política Nacional de Recursos Hídricos, a ANA é responsável pela implantação da Lei das Águas de 1977. Estas duas Leis definem a estrutura do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos que atualmente vigora no Brasil (SINGREH) que tem por objetivos “coordenar a gestão integrada das águas; arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos; implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos; planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos; e promover a cobrança pelo uso de recursos hídricos” (Ana, 2006b). A estrutura do SINGRH é composta pelos seguintes órgãos:

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Os Comitês de Bacias são órgãos autônomos entre si. Cada um pode gerir a sua bacia de acordo com suas decisões, respeitando a legislação vigente. Esta afirmação se aplica também aos sistemas informatizados usados em cada bacia e, em particular, na forma de representar o seu relevo. No âmbito de uma bacia pode-se representar computacionalmente o relevo por diferentes modelos de dados. Pode acontecer de um modelo ser mais adequado para a representação do relevo e não poder ser usado porque o sistema de informação empregado na bacia não suporta esse modelo de dados.

A solução mais comum para a representação do relevo da bacia é a adoção de um modelo de dados, extraíndo dele os fluxos locais e realizando sobre ele todas as aplicações. Quando o relevo é representado por mais de um modelo de dados converte-se o relevo representado nestes modelos para o modelo usado pelo sistema de informação selecionado. A escolha de um único modelo significa fazer uma opção por uma única semântica na representação do relevo determinando que os fluxos locais sejam extraídos segundo essa visão estrutural do relevo. Os modelos de dados que representam o relevo são: a grade regular retangular (DEM - *Digital Elevation Model*), rede triangular irregular (TIN – *Triangular Irregular Network*) também conhecida como triangulação, Diagrama de Voronoi e Curvas de Nível. Cada modelo possui uma semântica diferente.

O modelo DEM (Burrough e McDonnell, 1998] tem uma estrutura de dados em forma de matriz, sendo que cada ponto da matriz possui tamanho retangular padrão. Como as amostras do relevo não coincidem com as posições da grade o valor de cada posição da grade é obtido por interpolação. Este tipo de estrutura facilita a implementação, sendo esta sua principal vantagem. Como desvantagens, destacam-se o armazenamento de grande quantidade de informações redundantes e a perda dos valores originais das amostras do relevo pelo emprego da interpolação.

O modelo TIN (Chew, 1989) é constituído por triângulos, sendo que cada triângulo é formado por três amostras segundo a regra de Delaunay. O conceito desta regra é criar triângulos com arestas com pouca variação de tamanho entre elas. Como usa as amostras do relevo não altera os seus valores originais. Permite também que linhas de restrição sejam inseridas como amostras especiais preservando feições geográficas importantes como rios, por exemplo. A desvantagem deste modelo é a complexidade da sua estrutura de dados, exigindo algoritmos mais elaborados.

O modelo Diagrama de Voronoi (Tucker et al., 2001) é formado por polígonos irregulares, sendo que existe um polígono para cada amostra do relevo. O polígono delimita a região mais próxima de uma amostra em relação a todas as outras amostras. A vantagem deste modelo é justamente essa determinação da área de influencia de cada amostra pela distância.

Este modelo é dual em relação ao modelo TIN. Assim, a desvantagem também é a elaboração de algoritmos complexos.

O modelo Curvas de Nível (Dawes e Short, 1988) é usado na definição de elementos de fluxos locais. Cada elemento é determinado por uma porção de terreno entre duas curvas de nível vizinhas. O polígono irregular que delimita essa porção do terreno determina uma área de fluxo uniforme. A vantagem deste modelo é a definição de elementos naturais de escoamento. A desvantagem é a dificuldade de tratamento das curvas de nível para extração dos elementos de fluxo.

Cada modelo possui uma semântica própria e uma estrutura de dados usada no armazenamento de seus valores. Os fluxos locais podem ser extraídos de qualquer um desses modelos, sendo que para cada modelo uma implementação diferente é usada. Os fluxos locais são armazenados na mesma estrutura do modelo empregado.

2. UMA FERRAMENTA *OPENSOURCE* PARA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Este trabalho apresenta uma ferramenta de código aberto que coloca à disposição dos gestores em recursos hídricos a possibilidade de usar diferentes modelos de relevo para a extração dos fluxos locais. Além disso, elimina a dependência entre a geração dos fluxos locais e o armazenamento e a manipulação desses fluxos. A aplicação não precisa tomar conhecimento do modelo de terreno usado na geração dos fluxos locais. Os fluxos locais podem também ser criados ou compostos a partir de diferentes modelos. Dessa forma, novos modelos podem ser inseridos ao longo do tempo no sistema sem afetar o que já foi implementado.

Para tanto, propõe-se a unificação do armazenamento dos fluxos locais, extraídos de qualquer modelo de terreno, em uma única estrutura de dados. A manipulação dos fluxos locais passaria a ser feita a partir dessa estrutura, não mais da estrutura de dados de cada modelo, contendo os fluxos locais. Portanto, o armazenamento e a manipulação dos fluxos locais dependem exclusivamente dessa nova estrutura.

A estrutura de grafos foi escolhida para o armazenamento e manipulação dos fluxos locais. Pode-se dizer que a vantagem principal de um grafo é que ele pode armazenar dados de uma maneira estruturada. O grafo possui propriedades vantajosas que não estão presentes nas outras estruturas usadas para armazenar o fluxo local. As rotinas que acessam dados do grafo são geralmente mais eficientes do que as que acessam estruturas de dados dos fluxos locais.

A Figura 2(a) mostra um modelo onde os fluxos locais são armazenados nas estruturas de dados de onde foram extraídos. A implementação de uma determinada aplicação com este modelo deve ser feita para cada estrutura de representação do relevo utilizada, ou seja, código deve ser duplicado para cada estrutura. A Figura 2(b) mostra um modelo que armazena os fluxos locais em uma única estrutura, em um grafo. Todas as aplicações envolvendo esses fluxos usarão somente esta estrutura de dados.

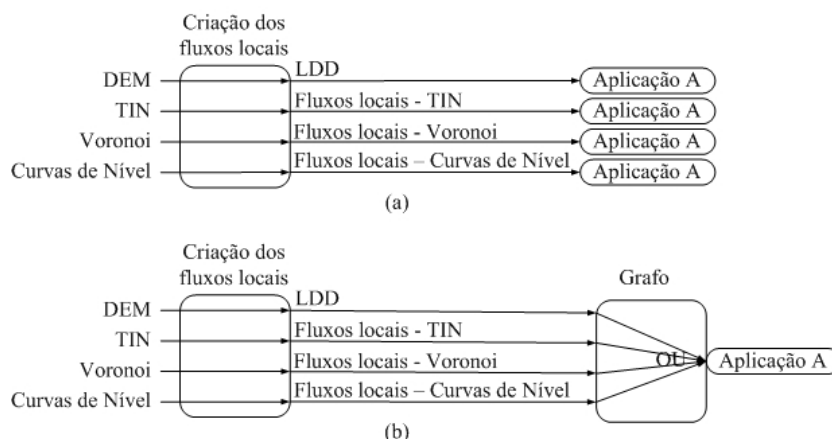


Figura 2 – Esquemas de dois modelos para representação e manipulação dos fluxos locais. (a) para cada estrutura de dados deve-se implementar a aplicação; (b) A aplicação deve ser implementada somente uma vez, para a estrutura de grafo.

Adaptado de: (Danner et al., 2007)

2.1 MAPEAMENTO DO FLUXO LOCAL DO MODELO DEM PARA O GRAFO

Cada célula da grade LDD representa um nó no grafo e cada fluxo local passa a ser um arco do grafo. A posição central da célula da grade LDD define o início ou o fim do fluxo local. A Figura 8 mostra um exemplo de fluxo local. O identificador do nó do grafo é a posição da célula da grade onde se origina o fluxo local. A Figura 3 apresenta um esquema com o mapeamento de uma grade LDD para o grafo.

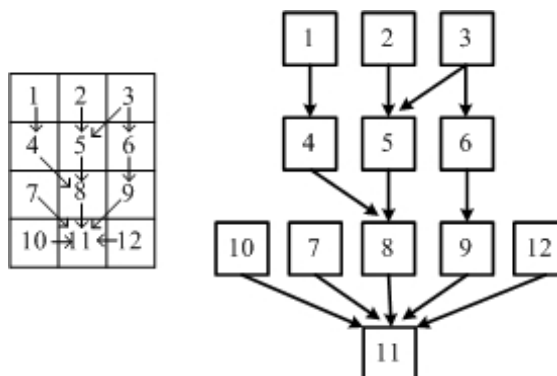


Figura 3 – Uma grade LDD mapeada para grafo.

O identificador do nó do grafo é fundamental para retornar o resultado à posição correta do modelo de terreno. Neste caso, para encontrar a posição correta do DEM no mapeamento inverso, de grafo para grade.

2.2 Mapeamento do Fluxo Local do Modelo TIN para o Grafo

O fluxo local na triangulação pode cruzar um triângulo, indo de uma aresta a outra, ou pode fluir pela aresta. O mapeamento de fluxo local indo de uma aresta a outra do triângulo acontece quando a entrada de fluxo no triângulo vem de outro triângulo ou quando uma aresta do próprio triângulo pertence a um divisor de águas. A saída do fluxo será por outra aresta do triângulo, passando ao triângulo vizinho. O ponto central da aresta foi escolhido para o traçado do fluxo local. Cada triângulo é uma célula do modelo de terreno e, portanto, qualquer ponto no interior da célula pode ser escolhido.

As arestas da triangulação formam o conjunto inicial dos nós do grafo. Os identificadores das arestas são mapeados para nós do grafo. Dessa forma, é possível realizar o mapeamento inverso, do resultado de um processamento do grafo para a triangulação. A Figura 4 mostra um exemplo deste tipo de fluxo local.

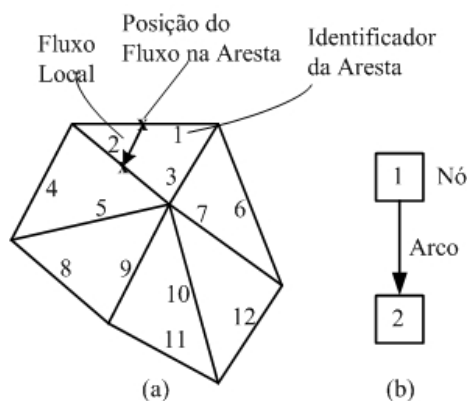


Figura 4 – Fluxo local de uma aresta a outra de um triângulo. (a) Triangulação com representação de um fluxo local; (b) Grafo deste fluxo local.

O mapeamento de fluxo local indo pela aresta do triângulo acontece quando uma aresta recebe fluxo dos dois triângulos que a partilham. A partir deste ponto, a continuidade desse fluxo local se dá por arestas, formando uma “calha” de escoamento. Para cada aresta deste tipo definem-se dois nós no grafo, um para cada vértice da aresta, do início para o fim do fluxo. Para garantir que a cada nó do grafo corresponda um único identificador, o valor do número de arestas existentes na triangulação é somado ao identificador de cada vértice. A Figura 5 mostra um exemplo deste tipo de fluxo. Observa-se, por exemplo, que o vértice de número 20 é igual à soma $5 + 15$, onde 5 é o número do vértice e 15 é o número de arestas da triangulação.

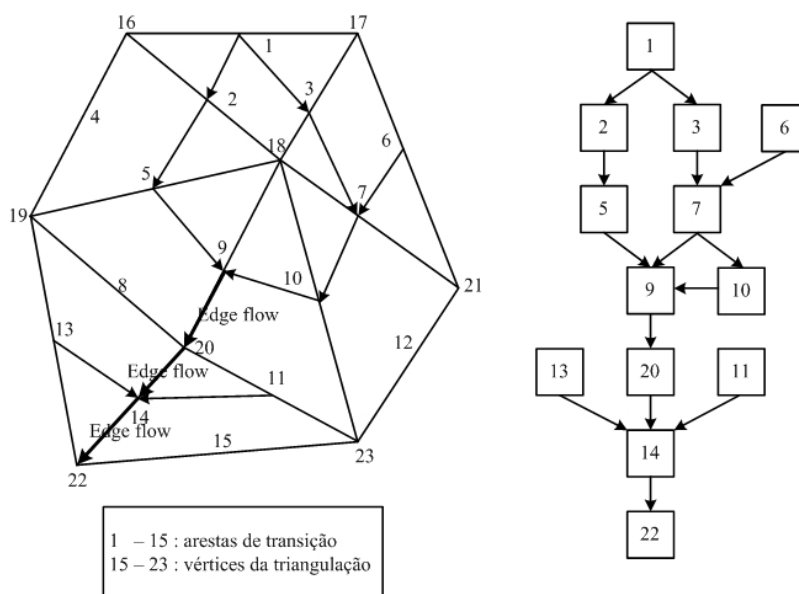


Figura 5 – Grafo criado (lado direito do desenho) a partir de arestas de transição e arestas de fluxo local.

2.3 Mapeamento do Fluxo Local do Modelo Diagrama de Voronoi para o Grafo

O fluxo local vai do centro de um polígono de Voronoi ao centro de um polígono vizinho. Os pontos centrais dos polígonos de Voronoi são as amostras do relevo. Assim, um fluxo local vai de uma amostra do relevo à outra amostra. Como o Diagrama de Voronoi é dual em relação à triangulação de Delaunay, o fluxo local percorre as arestas da triangulação.

Cada polígono de Voronoi com fluxo local é mapeado para um nó do grafo e cada fluxo local determina um arco no grafo. A Figura 6 apresenta um exemplo de mapeamento de fluxo local do diagrama de Voronoi para o grafo.

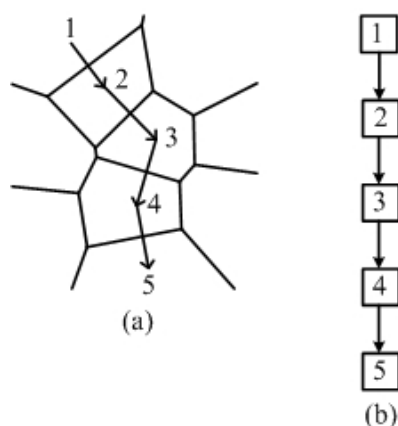


Figura 6 – Mapeamento do fluxo local do diagrama de Voronoi (a) para o grafo (b).

2.4 Mapeamento do Fluxo Local do Modelo Curvas de Nível para o Grafo

Cada célula contribui com fluxo para uma ou mais células vizinhas. Este modelo é naturalmente multidimensional. Cada célula é mapeada para um nó do grafo sendo que ponto central de cada célula é a localização do início ou do fim do fluxo local. O identificador do nó é o mesmo da célula, considerando a sua posição de armazenamento no arquivo contendo o conjunto células. Com isto, pode-se realizar o mapeamento inverso. A Figura 7 mostra um exemplo deste tipo de mapeamento.

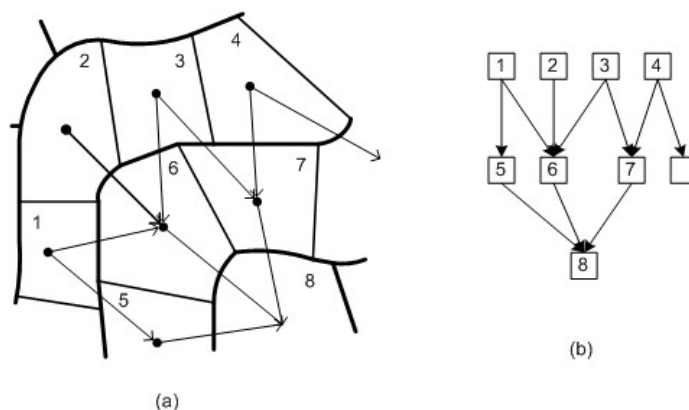


Figura 7 – Mapeamento do fluxo local de curvas de nível (a) para o grafo (b).

A unificação dos fluxos locais em uma única estrutura viabiliza, na prática, o uso de diferentes modelos de terreno. Reduz o esforço computacional no desenvolvimento de funções de manipulação dos fluxos locais e dos aplicativos que empregam esses fluxos.

3 APLICAÇÃO UTILIZANDO A NOVA PROPOSTA

A comparação da proposta deste trabalho tem por objetivo mostrar a sua viabilidade, usando mais de um modelo de representação de fluxos locais e executando um aplicativo com um conjunto único de operadores. Para tanto, duas decisões foram tomadas. A primeira foi sobre os modelos a serem utilizados. Foram escolhidos os modelos DEM e TIN que são os modelos mais usados em aplicações envolvendo modelos numéricos de terrenos. Com dois modelos pôde-se mostrar a criação do grafo a partir de cada modelo e a execução da aplicação usando cada grafo com o mesmo conjunto de operadores.

A segunda decisão dizia respeito à escolha do conjunto de dados utilizados no exemplo de aplicação. Os dados foram extraídos do site do sistema PCRaster que possui uma demonstração desta aplicação chamada “*Simplified Hydrological Runoff Model*” (Karszenberg et al., 1997). Os dados necessários para a implementação desta aplicação formam um conjunto de quatro grades regulares. Uma grade contendo as altitudes, outra contendo os fluxos locais, a LDD. Uma terceira com as informações de precipitação e a quarta contendo a capacidade de infiltração de célula da grade.

Esta aplicação determina o fluxo acumulado que chega a cada célula da grade. O cálculo é feito da seguinte maneira: somam-se os fluxos que chegam em uma célula com o valor de precipitação que cai na própria célula. Se o valor for menor ou igual à capacidade de infiltração da célula, nenhum fluxo sai desta célula. Caso contrário, o valor excedente flui para fora de célula. Este cálculo segue o que consta da equação do balanço hídrico (Rennó, 2003) mostrado na seguinte equação.

$$P - E_{\text{int}} - E_s - E_p - Q_{\text{out}} + Q_{\text{in}} - I = 0$$

P é a precipitação, E_{int} é a parte da precipitação interceptada pelo dossel e evaporada em seguida. E_s é a água evaporada do solo, E_p é a transpiração pelas plantas, Q_{out} é o escoamento superficial, Q_{in} é a água que entra no sistema e I é a quantidade de água infiltrada. Como essa aplicação não considera a evaporação e o potencial de infiltração de cada célula é infinito, esta equação passa a seguinte formulação:

$$P - Q_{\text{out}} + Q_{\text{in}} - I = 0$$

A Figura 8 mostra os componentes desta equação.

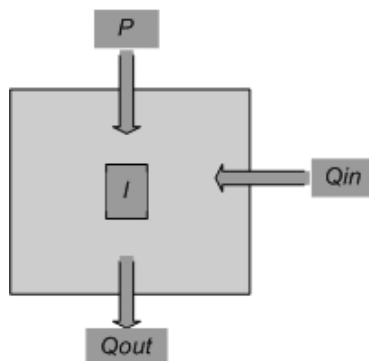


Figura 8 – Diagrama da equação de balanço hídrico simplificada.

4.1 IMPLEMENTAÇÃO DA APLICAÇÃO

A implementação desta aplicação foi realizada em cinco etapas. Na primeira etapa, realizou-se uma redução de pontos para a geração da triangulação pelo SPRING. Dessa

triangulação foram extraídos os fluxos locais para a criação do grafo. Na segunda etapa foram criados dois grafos, um para os fluxos locais extraídos do modelo DEM e outro para os fluxos locais gerados a partir do modelo TIN.

Na terceira etapa, dois outros grafos foram criados, um para cada modelo de dados, contendo as informações de infiltração e precipitação para cada nó do grafo. No caso do modelo DEM, havia um valor de infiltração e de precipitação para cada célula da grade, que foi mapeada para um nó no grafo. No modelo TIN, foram coletados valores de infiltração e de precipitação somente para as células da grade que foram selecionadas no processo de redução de dados. Na quarta etapa, o processo de cálculo acumulado do escoamento superficial foi executado. Finalmente, na quinta etapa, os dados foram mapeados do grafo para os modelos DEM e TIN para serem visualizados no SPRING.

3.2 CÁLCULO DE VALOR ACUMULADO DA APLICAÇÃO

O cálculo do valor de fluxo acumulado considera a capacidade de infiltração de cada célula em relação à quantidade de chuva que cai nela e que flui até ela vindo de suas células vizinhas. Cada célula é mapeada para um nó no grafo, portanto, o valor de fluxo acumulado será calculado para cada nó e nele armazenado. Os valores de infiltração são retirados de cada célula no modelo DEM. No modelo TIN cada aresta é mapeada para um nó no grafo. Os valores de precipitação e infiltração estão nos vértices dos triângulos. Para cada aresta, tomam-se os valores médios dos dois vértices que formam a aresta.

Esta função foi aplicada para gerar o grafo a partir dos fluxos locais extraídos do modelo DEM e do modelo TIN. Os valores do fluxo acumulado de cada nó do grafo, juntamente com a sua posição geográfica, foram armazenados em arquivos no formato apropriado para serem inseridos no SPRING. Neste sistema, os resultados foram visualizados.

As ilustrações da Figura 9 mostram o resultado da execução da aplicação para diferentes valores de fluxo acumulado, extraídos dos modelos DEM e TIN para um valor de corte igual a 25. Dessa forma, todos os fluxos locais acumulados com valor maior ou igual a 25 são considerados. Os outros são descartados.

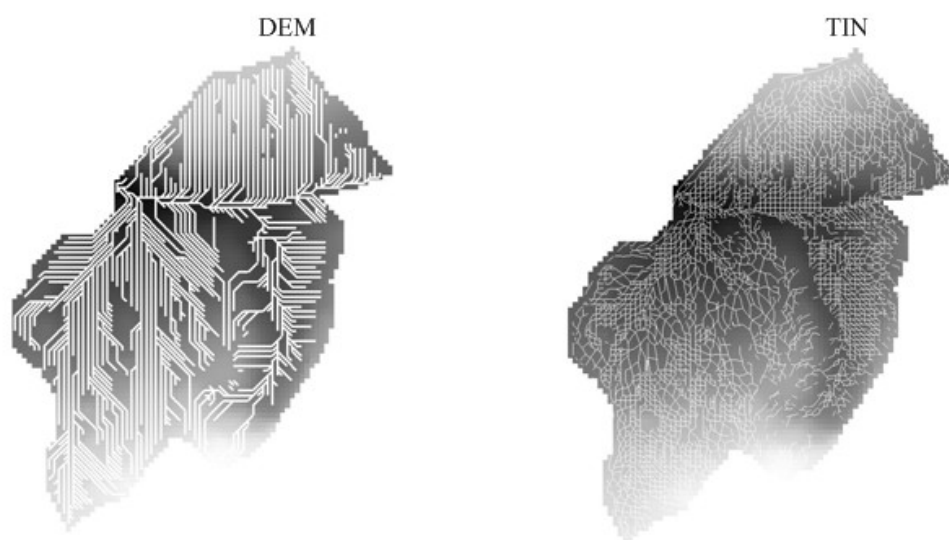


Figura 9 – Fluxos acumulados extraídos do grafo de fluxos locais extraídos dos modelos DEM e TIN tomando 25 como sendo o valor de corte.

O resultado dos fluxos acumulados extraídos a partir do modelo TIN pode ser visto na Figura 10. Os desenhos apresentados nesta Figura mostram o avanço dos fluxos locais, de acordo com o aumento do valor de fluxo acumulado de corte.

Pode-se observar que os resultados obtidos a partir do modelo TIN não apresentam a qualidade esperada em uma aplicação. Isto se deve, principalmente, ao programa de redução de pontos utilizado. Este programa foi escolhido pela facilidade de implementação do seu algoritmo. Além disso, não era objetivo deste trabalho escolher o melhor algoritmo, mas sim mostrar a presente proposta. Pode-se, porém, observar que o padrão de expansão dos fluxos locais acumulados e as localizações desta expansão coincidem nos dois conjuntos.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho mostra uma mudança na forma de armazenamento e manipulação dos fluxos locais empregados no processamento distribuído dos recursos hídricos. Os sistemas existentes acoplam os fluxos locais aos modelos de representação do terreno, de onde esses fluxos foram extraídos. Vinculam, portanto, o armazenamento e manipulação dos fluxos locais ao modelo de dados de relevo usada.

Este trabalho apresenta uma proposta alternativa baseada na unificação da representação dos fluxos locais, acabando com o vínculo entre a representação dos fluxos locais e o respectivo modelo de dados de relevo, que passam a ser armazenados em uma única estrutura de dados. Neste trabalho, usou-se a estrutura de grafos para armazenamento e manipulação dos fluxos locais.

O grafo, criado a partir dos fluxos locais, pode armazenar outras informações para que aplicações tais como, declividade, tipos de solos, tipos de rochas, precipitação, uso e cobertura do solo, etc. Estas informações são importantes para o desenvolvimento de aplicações complexas. Esta ligação entre comportamento da água na bacia hidrográfica e essas outras informações da bacia significa que deve haver acoplamento entre as funções desta proposta e um Sistema de Informações Geográficas. Neste trabalho optou-se por usar a TerraLib como repositório desses dados.

O propósito da presente proposta é facilitar o uso de mais de um modelo de dados de relevo para que se possa aproveitar das vantagens de cada um desses modelos na representação dos fluxos locais de uma bacia hidrográfica.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. Água: fatos e tendências. Agência Nacional de Águas. Brasília, 2006. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/%C1gua,%20fatos%20e%20tend%EAncias.pdf>. Acesso em: 03 Março 2008.
- BURROUGH, Peter A.; MCDONNELL, Rachael A. Principles of geographical information systems. 1.ed. New York: Oxford University Press, 1998. 333p.
- CHEW, L. Paul. Constrained Delaunay triangulations. *Algorithmica*, v.4, n.1, p.98-108, 1989.
- DANNER, Andrew; YI, Ke; MØLHAVE, Thomas; AGARWAL, Pankaj K.; ARGE, Lars; MITASOVA, Helena. TerraStream: From Elevation Data to Watershed Hierarchies. *Proc. ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM-GIS)*, 2007, p. 212-219.
- DAWES, W. R.; SHORT, D. L. TOPOG series topographic analysis and catchment drainage modelling package: user manual. Canberra, CSICO, 1988.
- KARSSSENBERG, Derek; WESSELING, C. G.; BURROUGH, Peter A.; VAN DEURSEN, W. P. A. A simplified hydrological runoff model. Department of Physical Geography, Utrecht University. 1997. Disponível em: <http://pcraster.geo.uu.nl/demos.html>. Acesso em: 15 jun. 2004.
- KISS, R. Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations. *Journal of Hungarian Geomathematics*, vol 2, 2004.

RATTNER, H. Sobre exclusão social e políticas de inclusão. Revista Espaço Acadêmico, ano II, n. 18, Nov. 2002. ISSN 1519.6186. Disponível em: <http://www.espacoacademico.com.br/018/18rattner.htm>. Acesso em: 03 Março 2008.

RENNÓ Camilo Daleles. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 2003. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

TUCKER, Gregory E.; LANCASTER, Stephen Thomas; GASPARINI, Nicole M.; BRAS, Rafael L.; RYBARCZYK, Scott M. An object-oriented framework for distributed hydrologic and geomorphic modelling using triangulated irregular networks. Computers & Geosciences, v.27, p.959–973, 2001.