

Desenvolvimento de um algoritmo para a determinação do fluxo e da hierarquia de canais de drenagem

José Augusto Sapienza Ramos¹

Carla Semiramis Silveira²

Henrique Llacer Roig²

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ / Faculdade de Geologia
Rua São Francisco Xavier, 524 Bloco A Sala 2025 Labgis - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
Universidade Federal Fluminense do Rio de Janeiro – UFF / Instituto de Computação
Rua Passos da Pátria, 156 Bloco E 3º andar – Niterói - RJ, Brasil
ja_sapienza@yahoo.com.br

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ / Faculdade de Geologia
Rua São Francisco Xavier, 524 Bloco A Sala 2019 Labgis - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
carlasemiramis@uerj.br
roig@uerj.br

Abstract. This paper presents a new algorithm to determinate the drainage network direction and channel orders through two methods: drainage altimetry and drainage network logic. It was developed to make easier the use of digitalized hydrological maps helping analyses and researches. Tests showed a very good performance. This algorithm does not depend of the programming language, although we recommend open source languages for its implementation.

Palavras-chave: hydrology, drainage net, GIS, hidrologia; rede de drenagem; SIG.

1. Introdução

De acordo com Christofolletti (1980) a hierarquização fluvial estabelece a classificação de determinado curso d'água e\ou da área drenada que lhe pertence, no conjunto total de sua bacia hidrográfica. É realizado com a finalidade de facilitar e tornar mais objetivo os estudos morfométricos (análise hipsométrica e de área) das bacias hidrográficas. De forma geral, a incorporação da hierarquia de drenagem dos canais hidrográficos em um ambiente de banco de dados associados a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é fundamental para a realização de análises com vários objetivos, tais como mapeamentos geomorfológicos (Cardoso *et al.*, 2006) e estudos de Zoneamento Ecológico-Econômico (IBGE, 2006).

Várias são as metodologias de hierarquização dos canais fluviais sendo a definida por Strahler (1952, apud Selby, 1985 e Christofolletti, 1980) a mais utilizada na área da geologia e da geografia física. De acordo com esta classificação os primeiros canais mais a montante, sem tributários são ordenados como primeira ordem, desde a nascente até a confluência. O encontro de dois canais de primeira ordem produz um canal de segunda ordem que só recebe afluentes de primeira ordem. A confluência de dois canais de segunda ordem produz um de terceira ordem que recebe afluentes de primeira e segunda ordem. E assim sucessivamente. A ordem dos canais não muda pela chegada de um tributário de menor ordem. Na análise morfométrica a confluência é o local onde dois canais se encontram e não é permitida a junção tríplice. No método de Strahler o rio principal não mantém sempre a mesma ordem ao longo de toda a sua extensão e a rede de canais pode ser decomposta em segmentos discretos cujas áreas de contribuição formam a própria bacia de drenagem. O ordenamento de canais fluviais é utilizado então para delimitar bacias de drenagem e sub-bacias definindo relações hierárquicas entre elas com aplicação em diversas áreas do conhecimento (Christofolletti, 1980; Rosim *et al.*, 2003).

Junto com o avanço da computação, a geotecnologia vem proporcionando diversas ferramentas voltadas para a gerência de recursos naturais, meio-ambiente, infra-estrutura, urbanização, entre outros, capazes de responder aos questionamentos impostos num espaço de tempo muito inferior do que aqueles necessários antes de seu advento. Entre as geotecnologias, os SIGs destacam-se por permitir a interação de um grande volume de dados espaciais e alfanuméricos correlacionados, amplificando, assim, ainda mais as possibilidades de análise e otimizando o tempo de recuperação e manipulação desses dados correlacionados. A grande expansão do uso de Sistemas de Informação Geográfica nos últimos anos em diversas áreas tem gerado uma demanda por cartas topográficas no formato digital, de modo a servir de base para a construção ou incorporações de novos planos de informações temáticos, com destaque para as aplicações na área de recursos hídricos. Como em muitas regiões estas cartas só estão disponíveis no formato analógico (papel), torna-se necessário a digitalização das mesmas, não só para servir de base para os outros temas, mais também para a identificação do sentido do fluxo da drenagem para cada canal, como também para a determinação da hierarquia dos mesmos.

Atualmente, este trabalho de identificação da direção de fluxo e hierarquização de canais fluviais é feito principalmente de forma manual ou indiretamente através do Modelo Digital de Elevação.

A plataforma TerraHidro (Rosim *et al.*, 2003) está sendo desenvolvida com o objetivo de facilitar a implantação de aplicativos específicos, como por exemplo para a área de recursos hídricos. O TerraHidro tem como proposta ter um gerenciador de banco de dados geográfico em conjunto com os algoritmos desenvolvidos que permita a análise dos mesmos. Como exemplo, temos o algoritmo desenvolvido em C++ para delimitação de bacias. Este aplicativo utiliza o Modelo Digital de Elevação para a extração de linhas de drenagem e implementação da ordenação hierárquica desta rede. No entanto, nas áreas planas apresentam problemas para definir o sentido do fluxo d'água (Rosim *et al.*, 2003).

Então por sua importância e pela facilidade que a geotecnologia e a computação oferecem, esse trabalho se propõe a elaboração de um algoritmo, independente da linguagem de programação, capaz de determinar os fluxos dos canais de drenagem de um dado vetorial e suas respectivas ordens segundo o critério definido por Strahler.

2. Métodos

Segundo Cardoso (2006), necessitamos de uma rede hidrológica conectada e orientada para definirmos os fluxos e ordens. Camara (2004) estabelece o modelo vetorial topologicamente consistida como o melhor formato para esse fim.

“No modelo vetorial, a localização e a aparência gráfica de cada objeto são representadas por um ou mais pares de coordenadas. (...) No caso de sua representação, consideram-se três elementos gráficos: ponto, linha poligonal e área (polígono)” (Câmara, 2004). Sendo assim, um algoritmo para definir a orientação e a hierarquização da rede de drenagem tem que trabalhar com a hidrografia no formato vetorial, com as drenagens e corpos d'água representados por polígonos, linhas ou pontos. O que define se uma ocorrência hidrológica será representada numa base cartográfica por linha, polígono ou ponto é a sua escala de representação (Exército Brasileiro, 1998).

Normalmente, o levantamento dessa hidrografia no formato vetorial é feita a partir da folha topográfica, imagens de sensores ou subprodutos de outros dados vetoriais ou matriciais utilizando softwares de CAD ou de SIG.

Um fator importante, é que, no caso da hidrografia, é necessário que o dado esteja com sua relação topológica assegurada, ou seja, todos os segmentos de drenagem “se tocando”

(com um nó em comum) em seus afluentes ou efluentes. “A topologia arco-nó é a representação vetorial associada a uma rede linear conectada. Um *nó* pode ser definido como o ponto de intersecção entre duas ou mais linhas, correspondente ao ponto inicial ou final de cada arco”. (Camara, 2004). Deste modo, caso haja partes da rede de drenagem que tenha a sua representação na forma de polígono, este deve ser “substituído” por uma representação na forma de arco e passando, de preferência de modo equidistante, entre as margens do lago, represa ou um rio representado com margens duplas.

Para as análises das estruturas dos algoritmos determinísticos da direção do fluxo dos canais e de hierarquização da rede de drenagem foram utilizados conceitos de gravidade e lógicos. Entretanto, por se tratar de problemas diferentes, a análise da estrutura determinística de fluxos foi feita separadamente da estrutura determinística de hierarquização (**Figura 1**). Mas ressalva-se que apesar dos problemas serem independentes, os resultados dos fluxos são necessários para determinar as ordens dos canais de drenagem.

Na estruturação do algoritmo partiu-se do problema na escala macro e foi se desenvolvendo módulos menores até alcançar o menor nível possível que é uma linha de comando. Mas primeiramente dividiu-se o sistema em dois módulos básicos (**Figura 1**):

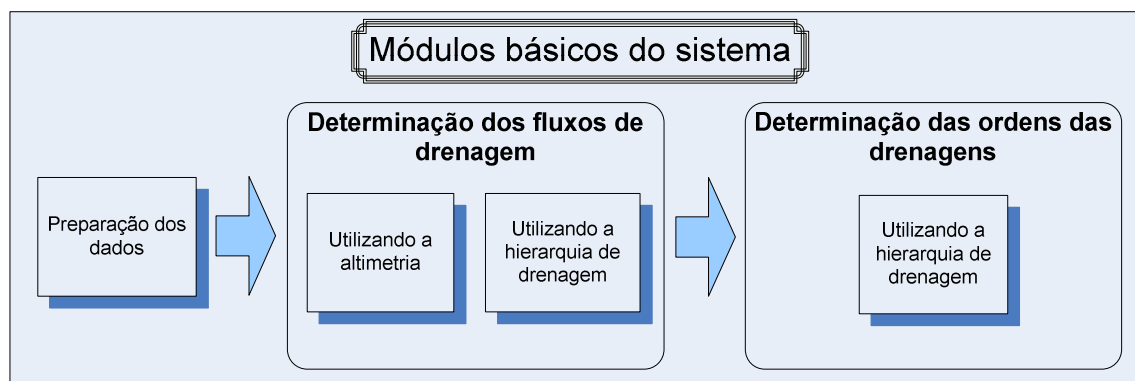


Figura 1: Módulos básicos do sistema.

O sistema que determina a direção de fluxo é composto, por dois processos, os quais são:

i) Determinação de fluxo pela altimetria. Infere-se a altura dos nó (vértices extremos) de um determinado segmento vetorial (canal) de drenagem e baseado no conceito da gravidade, o fluxo de água vai da extremidade mais alta do arco até o nó mais baixo; e

ii) Determinação de fluxo pela hierarquia de drenagem (**Figura 2**). Baseia-se na análise da rede topológica das drenagens, verificam-se os fluxos já determinados dos outros segmentos vetoriais que tocam o segmento em questão nas suas extremidades, podem acontecer três situações:

1º caso: um dos extremos do segmento não toca em nenhum outro segmento, então o fluxo vai desse nó “livre” até o outro extremo, pois é uma nascente;

2º caso: em um dos extremos todos os outros rios que o tocam têm seu fluxo determinado e todos convergem, isto é, deságuam no segmento em questão, logo o fluxo vai do ponto analisado para o outro extremo;

3º caso: é o oposto do 2º caso, se em um dos extremos todos os rios que o tocam já têm seu fluxo determinado e todos divergem, logo o fluxo vai do extremo oposto do segmento para o ponto em questão. Este caso é análogo ao 2º e bem mais raro de acontecer na natureza.

Nos quadros B e C da **Figura 2**, o fluxo do segmento foi determinado porque em um dos extremos (sempre o mais inferior nos dois casos) todos os rios que o tocam convergem o fluxo nele. Pela **Figura 2** pode-se vislumbrar que apenas através da hierarquia de drenagem

determinam-se todos os fluxos e ordens de uma bacia hidrográfica e que a análise através dos dados altimétricos não é necessário. Mesmo assim o processo determinístico pela altimetria não foi descartado por quatro motivos:

- Nem sempre o recorte do mapa vetorial será de uma bacia hidrográfica e a rede topológica pode estar incompleta, como, por exemplo, pela falta da representação correta das feições de corpos d'água.

- Em geral é computacionalmente mais simples, logo otimiza o sistema como um todo, já que ele é executado primeiramente e não faz sentido determinar o fluxo de um segmento pela hierarquia de drenagem que teve seu fluxo já determinado pela altimetria.

- O processo pela altimetria independe da topologia da rede de drenagem, assim minimizam-se problemas nas determinações de fluxo devido a erros topológicos que são comuns nos dados vetoriais devido às falhas humanas durante a edição cartográfica.

- E minimiza as indeterminações oriundas das proteções da lógica do processo determinístico de hierarquia da drenagem (falaremos delas mais à frente).

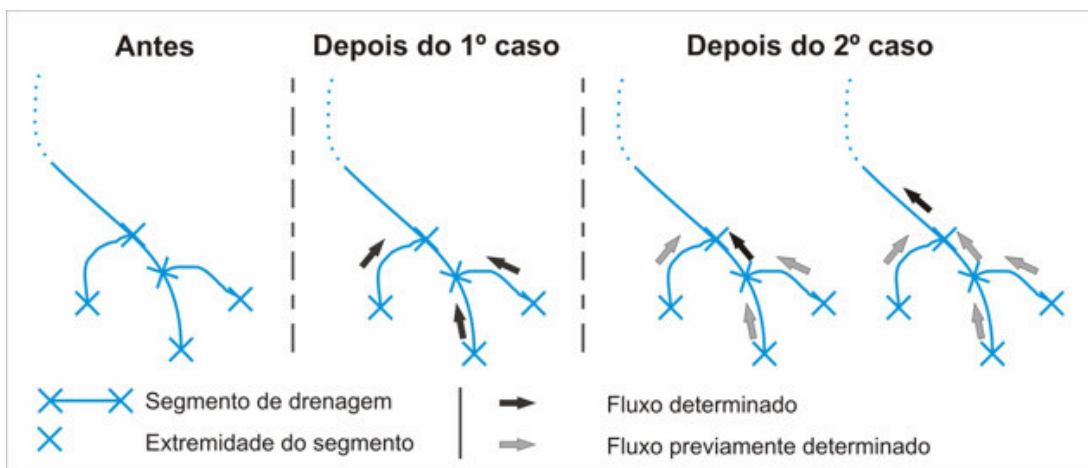


Figura 2: Exemplo do sistema determinístico de fluxos.

O segundo sistema determinístico, o de ordem, só é composto pelo processo de hierarquia da drenagem, nele ocorrem duas situações:

- O ponto inicial do segmento (observe que podemos dizer ponto inicial e não apenas extremo, pois o fluxo já foi estabelecido) não toca em outro segmento, então ele é uma nascente, ou seja, um canal de 1º ordem;

- Se o ponto inicial do segmento toca em um ou mais segmentos com as ordens previamente determinadas, então se utiliza a maior ordem entre esses segmentos que tocam-no e a quantidade que essa maior ordem ocorre entre esses segmentos. Se a maior ordem só ocorre uma vez, então a ordem do canal em questão é igual a maior ordem, senão é igual a maior ordem +1.

Ressalta-se que a ordem só pode ser determinada com o fluxo determinado.

Além destes processos determinísticos já descritos, é necessária a preparação dos dados (vide **Figura 1**) desenvolvida em duas etapas:

- Interface de coleta de dados. Consiste na criação de uma interface entre aplicativo e usuário de forma amigável e clara;

- Preparação dos dados. Nessa etapa os dados são preparados para a manipulação pelo algoritmo. Esta fase é importante principalmente quando o volume de dados é muito grande. Uma preparação correta dos dados em boas estruturas de dados que a linguagem de programação escolhida oferece possibilita uma grande otimização.

E por último, em muitos casos o usuário ainda não tem a bacia de drenagem já definida e frequentemente trabalha com uma ou várias folha topográfica na íntegra. Este fato levou a criação de uma espécie de “proteção” do processo de hierarquia de drenagem para que a lógica não inferisse fluxos e ordens equivocadas quando o recorte do mapa fosse diferente de uma bacia ou sub-bacia hidrográfica ou os corpos d’água não tivessem sua representação adequada na rede topológica de drenagem. A **Figura 3** apresenta os problemas decorrentes desse recorte.

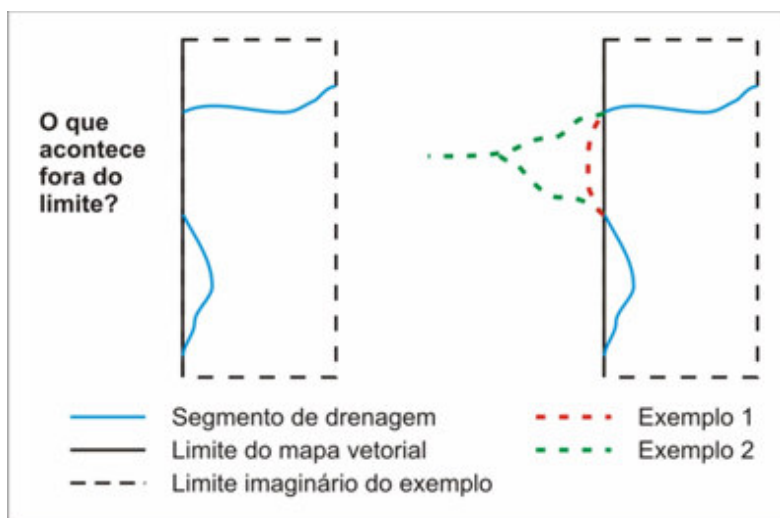


Figura 3: Exemplos da problemática dos segmentos que não são inteiramente representados no mapa vetorial devido ao limite do mapa.

No caso da figura 3, existem pelo menos duas possibilidades para o problema, um em deles está destacado em vermelho e o outro em verde. Para os dois casos verifica-se a hierarquia não são iguais logo, impossível de serem determinados sem informações adicionais. O mesmo vale para os corpos d’água, se eles não forem representados corretamente na rede de drenagem, as extremidades dos segmentos que tocam os corpos d’água não poderão ser usados na lógica determinística da hierarquia de drenagem (Fread, 1993).

Assim sendo, o usuário deverá informar ao sistema, além da hidrografia e da informação altimétrica, o limite do mapa vetorial para que o sistema não considere as extremidades que tocam no limite do mapa, mesmo quando o recorte for de uma bacia hidrográfica. O usuário também terá que garantir que a relação topológica entre a rede de drenagem e o limite esteja consistente.

Mas não é pelo fato do segmento tocar em um limite ou em um corpo d’água que não será possível inferir o seu fluxo e ordem, pois além de termos o processo de determinação pela altimetria, apenas o extremo do segmento de drenagem que toca em algum elemento de uma dessas duas categorias de informação (limites ou corpos d’águas) não poderá ser utilizado pelo algoritmo determinístico de hierarquia da drenagem, mas o outro extremo poderá.

Um modelo experimental já foi implementado utilizando Delphi 6 e a biblioteca MapObjects 2.3 da empresa *ESRI* para manipular *shapefiles* (um formato aberto e o mais difundido de mapas no formato vetorial). Os resultados desse modelo experimental podem ser observados na parte de *Resultados*. Apesar do modelo experimental ter sido um sucesso, resolvemos adotar para o sistema final linguagens e bibliotecas livres, que não acarretassem custos na aquisição de softwares de computador e nem necessidade de suas respectivas

licenças computacionais para os futuros interessados e, acima de tudo, permitisse seu uso e modificação sem restrições para fins acadêmicos.

Houve uma pesquisa das linguagens disponíveis no mercado e bibliotecas para manipulação de dados vetoriais. O foco foi principalmente na robustez e o suporte a multi-plataforma, para que o sistema fosse compatível tanto para Linux como para o Windows. Depois desse estudo foi escolhida a versão com licença GNU do compilador QT da empresa Trolltech para a implementação da versão final do sistema, a biblioteca de programação para dados vetoriais livre ainda está sendo estudada.

3. Resultados

Para testar o algoritmo foram utilizadas cartas topográficas digitalizadas na íntegra derivadas de dois projetos de pesquisa e extensão, o Projeto Teresópolis e o Projeto RIDE. A opção pelo recorte da carta topográfica em vez da bacia hidrográfica deu-se como objetivo de verificar o comportamento do sistema com relação a problemas extremos. Foi examinada a percentagem de determinação do sistema como um todo (usando os dois processos determinísticos) e utilizando apenas cada um dos processos para o mapa inteiro.

i) O Projeto Teresópolis (UERJ/IBGE, 1999) foi executado pelo grupo de pesquisa GESTO/LABGIS (Grupo de Pesquisa em Gestão Territorial e Análise Ambiental e o Laboratório de Geoprocessamento) da Faculdade de Geologia da UERJ e fomentado pelo PADCT. O objetivo principal deste projeto foi o estudo ambiental para um planejamento sustentável municipal. A área de estudo é de aproximadamente 771 Km² com o perímetro de 148 Km num terreno predominantemente montanhoso com a variação altimétrica de 1900 m. A base cartográfica é composta por 5 folhas topográficas na escala 1:50.000. Foram mapeados nessa base 3034 segmentos de drenagens e 17 corpos d'água. Os resultados são apresentados na **Tabela 1**.

Processos	Fluxos determinados		Ordens determinadas	
	Qnt. de seg.	% do total	Qnt. de seg.	% do total
<i>Ambos</i>	2964	97,67	2798	92,22
<i>Altimetria</i>	2028	66,84	1676	55,24
<i>Drenagem</i>	2771	91,33	2771	91,33

Tabela 1: Resultados do sistema no Projeto Teresópolis

ii) O Projeto RIDE – Zoneamento Ecológico Econômico da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal (IBGE, 2006) foi executado pelo IBGE e teve como principal objetivo o zoneamento ecológico-econômico da área do Distrito Federal e entorno, a região é predominantemente formada por planaltos. A área de estudo é de aproximadamente 94.821 Km² com o perímetro de 1.414 Km e variação altimétrica de 1160 m, sendo composta por 37 folhas topográficas na escala 1:100.000 do IBGE e/ou do Exército abrangendo os estados de Goiás, Minas Gerais e o Distrito Federal. Na base cartográfica existem 43.655 segmentos de drenagem e 1.221 corpos d'água mapeados. Os resultados são apresentados na **Tabela 2**.

Processos	Fluxos determinados		Ordens determinadas	
	Qnt. de seg.	% do total	Qnt. de seg.	% do total
<i>Ambos</i>	43.303	96,90	38.607	88,40
<i>Altimetria</i>	26.897	61,61	19.341	44,30
<i>Drenagem</i>	38.480	88,15	38.480	88,15

Tabela 2: Resultados do sistema no Projeto RIDE.

4. Conclusões

O algoritmo apresentou um ótimo resultado em situações não favoráveis, determinando em média mais de 97% dos fluxos e mais de 90% das ordens quando aplicados os dois métodos determinísticos em mapas com recortes diferentes de bacias ou sub-bacias hidrográficas. O fator limitante do resultado são os segmentos que tocam o limite das folhas topográficas e os corpos d'água em áreas “planas” do mapa. Como discutido anteriormente, essas áreas dificultam inferir os fluxos e, por conseguinte, a ordem da drenagem quando o processo determinístico pela altimetria não obtém uma resposta válida, pois, no processo da hierarquia da drenagem, uma vez que um segmento toca em alguma feição que impossibilite a determinação de seu fluxo, principalmente as nascentes, cria um efeito “cascata” de indeterminação nos outros segmentos, como exemplificado na **Figura 4**:

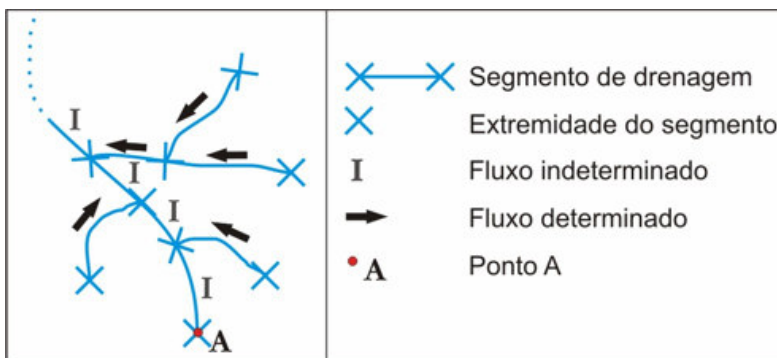


Figura 4: Exemplo do efeito em “cascata” da indeterminação.

Se o segmento toca o limite ou um corpo d'água no ponto A, então ele ficará indeterminado, gerando assim um efeito “cascata” para os outros segmentos seguintes até o final da bacia, esse efeito só será interrompido se o processo determinístico pela altimetria tiver determinado algum dos fluxos do caminho que a indeterminação seguiria.

O município de teresópolis tem o seu limite coincidente com limites de bacias hidrográficas, por isso o resultado esperado era muito próximo de 100%, que só não foi atingido porque os corpos d'água não estavam devidamente representados por linhas na rede topológica de drenagem. Foi verificado que se os corpos estivessem devidamente representados, então o resultado seria de 100% de determinação através dos dois métodos determinísticos ou apenas pelo método da hierarquia de drenagem, como era o esperado.

Os dados do Projeto RIDE nos mostrou uma tendência de quanto mais elementos existem no dado vetorial que impossibilitam a indeterminação (limites diferentes de bacias ou sub-bacias hidrográficas ou corpos d'água não devidamente representados) maior é o percentual de segmentos indeterminados.

O processo de hierarquia de drenagem somado ao de altimetria para determinar os fluxos possibilitou uma melhora nos resultados em relação a outros trabalhos desenvolvidos anteriormente.

Basicamente o algoritmo do processo determinístico de hierarquia de drenagem só infere o fluxo equivocado nos casos onde o fluxo dos rios sofre infiltração no solo, seja por ambiente cárstico e/ou por drenagem difusa em terrenos alagadiços. Nesses casos a representação do rio é interrompida na base, logo gera interpretações equivocadas de nascentes pelo método determinístico do algoritmo de hierarquia de drenagem.

Este trabalho apenas considerou o algoritmo e sua análise para apresentar uma solução determinística, não considerando o ambiente computacional da implementação e o desempenho do sistema. Entretanto a versão preliminar e a versão final em linguagem livre demonstraram como a estrutura de dados e a otimização da lógica são importantes para um bom desempenho do sistema. Utilizar artifícios lógicos para reduzir, principalmente, a quantidade de buscas espaciais é importante no desempenho, já que a busca espacial é o processo mais custoso do sistema, exponencialmente acrescido em dados vetoriais com grande número de elementos.

Ressalta-se que como qualquer outra ferramenta de análise espacial e SIG, o resultado do sistema precisa de um crivo, isto é, o usuário deverá inferir os fluxos e ordens que o sistema não conseguiu determinar e checar erros de resultados devido às falhas topológicas oriundas da edição cartográfica ou de outra etapa anterior de edição que o mapa vetorial tenha sido submetido.

Com a nova versão pronta, utilizando linguagem livre sob a licença GNU, a comunidade acadêmica poderá somar esforços para otimizar e complementar esse sistema, utilizar para fins de ensino e/ou pesquisa e/ou aplicativos de forma gratuita. Verifique em breve no site <http://www.fgel.uerj.br/labgis> para maiores informações e download do sistema.

Referências

- Câmara, G., Davis C., Monteiro, M.A. 2004 **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, INPE, 154p.
- Cardoso, C.A.; Dias, H.C.T.; Soares, C.P.B.; Martins, S.V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006
- Christofoletti, A. **Geomorfologia** São Paulo, Edgar Blücher, 1980 188p.
- Exército Brasileiro **Manual Técnico T 34-700 Convenções Cartográficas** 1998. 178p.
- Fread, D.L. 1993. Flow routing. In: Handbok of hydrology. Ed. Maidment, D.R. Mc-Graw-Hill, NY. Pp 10.5 – 10.13.
- IBGE Projeto de Zoneamento Ecológico Econômico do RIDE (Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno) 2006
- Guerra, A.T. **Dicionário geológico geomorfológico** Rio de Janeiro: IBGE, 1987. 446p.
- Rosim, S.; Monteiro, A.M.V.; Rennó, C.D.; Souza, R.C.M.; Soares, J.V. TerraHidro – Uma plataforma computacional para o desenvolvimento de aplicativos para a análise integrada de recursos hídricos In: 2003 Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11, Belo Horizonte, Anais ... São José dos Campos, INPE, 2003. Artigos, p. 2589-2596.
- Selby, M.J. **Earth's Changing Surface: An Introduction to Geomorphology** Oxford: University Press, 1985. 606p.
- UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO / IBGE – Projeto PADCT- **Estudo Ambiental como Subsídio ao Ordenamento Territorial Através de Análise de Caso: Município de Teresópolis** - (Relatório Final), 3 volumes, Rio de Janeiro, 1999.