

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ALGORITMO PARA CODIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDE DE DRENAGEM, SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO DE OTTO PFAFSTETTER, INTEGRADO EM AMBIENTE SIG

Cláudio Jr, BIELENKI¹; Fernanda Abreu Oliveira, de SOUZA² & Frederico Fábio, MAUAD³

¹ Dr, Universidade Federal São Carlos, bielenki@ufscar.br

² Msc, Agência Nacional de Águas, fernanda.abreu@ana.gov.br

³ Dr, Escola Engenharia São Carlos - USP, mauadffm@sc.usp.br

RESUMO – A codificação e classificação das bacias hidrográficas é imprescindível para realizar quaisquer estudos que envolvam cálculo e delimitação de áreas de drenagem. Em 2002, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos estabeleceu que o método de Otto Pfafstetter seria a codificação oficial das bacias hidrográficas no Brasil, medida importante para a padronização e reprodução de estudos. No entanto, percebe-se que hoje, ainda, existe uma limitação quanto à disponibilidade e utilização de ferramentas que realizem a classificação e codificação de uma bacia segundo o método de Pfafstetter. Diante disso, foi proposta, neste trabalho, uma ferramenta simples de codificação de sub-bacias, que roda como um script em ambiente SIG e utiliza o traçado vetorial da rede de drenagem e de informações extraídas de suas áreas de contribuição. A metodologia apresentada produziu o resultado esperado, em tempo de execução adequado. Ela permitiu a automatização do processo de codificação, tornando o procedimento mais ágil e eliminando erros comuns quando executado manualmente.

ABSTRACT– The codification and classification of river basins is essential to carry out any studies involving calculation and delineation of drainage areas. In 2002, the National Water Resources Council established that Otto Pfafstetter's method would be the official codification of river basins in Brazil. This was an important measure to standard and reproduce water studies. However, there is still a gap on tools that perform the classification and codification of a basin according to the Pfafstetter's method. In this work, a simple tool was proposed to code sub-basin, which runs as a script in a GIS environment and uses the vector tracing of the drainage network and information extracted from its contribution areas. The presented methodology produced the expected result, at the appropriate execution time. It enabled the automation of the coding process, making the procedure more agile and eliminating common errors when executed manually.

Palavras-Chave – Sistema Pfafstetter, Codificação, Automatização.

Introdução

A Política Nacional de Recursos Hídricos - Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997 - definiu que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a sua operacionalização e para a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Dessa forma, os planos de recursos hídricos devem ser elaborados por bacia hidrográfica, o que torna imprescindível a definição de um sistema único e apropriado de classificação e codificação das

bacias hidrográficas brasileiras. Um adequado sistema classificação e codificação torna mais eficientes quaisquer estudos que dependem do cálculo e delimitação de áreas de drenagem. A unicidade é importante por questões de padronização e reprodução de estudos (Porto e Porto, 2008)

No ano de 2002, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) estabeleceu, por meio de sua Resolução nº 30/2002, que o método de Otto Pfafstetter passaria a ser a codificação oficial de bacias hidrográficas no Brasil. Nessa resolução foi estabelecida uma divisão de bacias para a América do Sul, a qual serviu de ponto de partida para a construção da Base Hidrográfica Ottocodificada da Agência Nacional de Águas (ANA), cuja primeira versão foi publicada em dezembro de 2006.

No trabalho desenvolvido por Galvão e Meneses (2005), foram discutidos e apresentados, minuciosamente, os diferentes métodos de codificação de bacias hidrográficas utilizados pelos órgãos de gestão de recursos hídricos no Brasil, anteriormente à supramencionada resolução do CNRH. Naquela oportunidade os autores destacaram a importância do sistema de codificação proposto pelo engenheiro brasileiro Otto Pfafstetter (Pfafstetter, 1989; Verdin e Verdin, 1999) por ser um método natural, hierárquico e baseado na topografia da área drenada e na topologia da rede de drenagem. Além disso, apresentaram como vantagens do método: a economia de dígitos na codificação de bacias, a informação topológica embutida nos dígitos, a fácil implementação por técnicas de programação, sua aplicabilidade global, e a fácil integração com os Sistemas de Informação Geográfica-SIG.

A metodologia de Pfafstetter:

O método de Otto Pfafstetter, para codificação de bacias hidrográficas, possui extensa citação bibliográfica nas quais está pormenorizada a sua aplicação, como em Verdin e Verdin (1999), Furnans e Oliveira (2001) e Britton (2002), os quais tem sido regularmente citados em trabalhos recentes. Além disso, ele está descrito, detalhadamente, em documentos do Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS), e parte dele está em material divulgado e distribuído pela ANA no curso “Codificação de Bacias Hidrográficas pelo Otto Método Pfafstetter”.

De maneira simplificada, segue explicação sobre o método:

A codificação de Otto utiliza os dez dígitos do sistema de numeração em base 10. Primeiramente, determina-se o chamado “curso d’água principal da bacia” agregando de jusante para montante, a cada confluência, o trecho com maior área de drenagem a montante. Seguidamente, os quatro tributários do curso principal, com maior área de drenagem, são identificados, os quais recebem como código, de jusante para montante, os dígitos pares (2, 4, 6 e 8). Os dígitos ímpares (1, 3, 5, 7 e 9) são atribuídos às quatro maiores áreas de drenagem que drenam diretamente para o curso d’água principal. Essas áreas são divididas conforme as confluências que entram no curso d’água principal e recebem o nome de interbacias. O zero é utilizado para o caso de haver bacias fechadas, denominadas intrabacias.

Para aplicar o método de Otto Pfafstetter é necessário, inicialmente, verificar se existe uma codificação de referência na região, como é o caso do Brasil, Estados Unidos, Peru, Austrália, União Europeia, entre outros. Nesse caso, deve-se tomar o código da bacia a ser codificada como ponto de partida. No exemplo a seguir (Figura 1), esse código de partida é chamado de R. No Brasil, a referência é a Base de domínios da ANA, denominada Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO), disponível no portal de metadados da Agência.

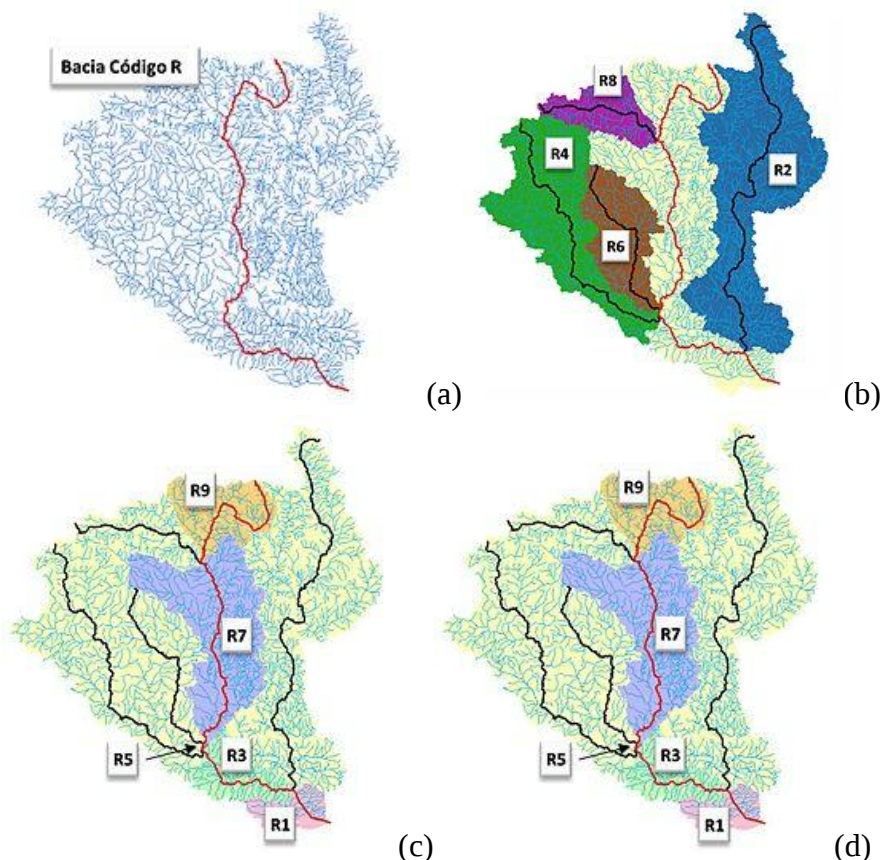


Figura 1 – (a) Curso d'água principal da bacia do rio Trombetas; (b) As quatro maiores áreas de contribuição recebem os dígitos pares 2, 4, 6 e 8; (c) Interbacias recebem códigos ímpares: 1, 3, 5, 7, e 9; (d) Codificação em nível 4 da bacia do Rio Trombeta Fonte: ANA

Partindo dos fundamentos estabelecidos por Pfafstetter, a ANA elaborou uma codificação para a sua base hidrográfica da América do Sul (Figura 2). A primeira etapa de estratificação das bacias da América do Sul é chamada Nível 1 de Otto. A bacia em vermelho não drena para áreas externas, constituindo uma intrabacia, chamada Intrabacia dos Andes, que recebe o código zero.



Figura 2 – Divisão de Bacias para a América do Sul em Nível 1 de Otto Pfafstetter. Fonte: ANA

Apesar das vantagens até aqui descritas, a principal limitação da ottocodificação está relacionada à representação do sistema fluvial unifilar por meio de um grafo binário do tipo antiarborescência (NETTO, 2006). Esse tipo de representação é caracterizada pela direção do arco, a partir das folhas para a raiz, ou seja, de montante para jusante, com a convergência de 2 (dois) arcos em um só nó, com exceção do nó que representa a foz ou a antirraiz da arborescência, em que um arco converge em um único nó.

Christofolletti (1981) afirma que a representação da rede de drenagem por meio de antiarborescência não é possível em regiões onde existem canais múltiplos dos tipos reticulados, ramificados, anastomosado, deltaico ou labiríntico, sendo adequado, exclusivamente, para canais do tipo reto, sinuoso, meandrante e tortuoso.

Tanto a representação espacial do sistema de drenagem de Pfafstetter, quanto todos os outros sistemas de codificação propostos, apresentam uma limitação em áreas onde o sistema de drenagem tem múltiplas junções ou canais ramificados com ciclos em foz em delta, anastomosado, ramificado e canais entrelaçados. Além disso, embora incomum, na natureza existem situações em que três ou mais canais de drenagem convergem para um único ponto. Esse fenômeno é conhecido como multiconfluências. No sistema da ottocodificação, quando ocorre esse tipo de situação não é possível fazer a correta codificação e classificação, uma vez que quando se enumera os quatro principais tributários de jusante para montante, as confluências duplas devem estar, teoricamente, no mesmo nível após os números ímpares serem atribuídos, e, nesse caso, não é possível.

Softwares para codificação de bacias:

Com as facilidades que surgiram a partir do rápido avanço das tecnologias de geoprocessamento nos últimos anos, uma gama variada de sistemas de informações geográficas foi desenvolvida, sendo alguns, inclusive, de código livre.

Muitos desses sistemas apresentam diferentes ferramentas para tratamento de dados relativos à modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes (MDEHC) que permitem ao usuário desde a correção de imperfeições dos modelos, bem como a extração de parâmetros fisiográficos das bacias, como o traçado sintético da rede de drenagem e as respectivas áreas de contribuição oriundas do modelo altimétrico.

A despeito da codificação e hierarquização das bacias hidrográficas estarem plenamente consolidadas nesses sistemas, os algoritmos propostos, segundo as classificações de Horton e Strahler, costumam ser muito mais voltados à hierarquização da rede de drenagem do que à sua codificação propriamente dita.

Danner et al (2007) apresentaram a ferramenta TerraStream, baseada em computação paralela, que possui várias possibilidades de tratamento de dados para a extração de parâmetros das bacias hidrográficas. Infelizmente essa ferramenta não está disponível para o público.

Baseado no sistema proposto por Otto Pfafstetter, Buarque e Collischonn (2008) apresentaram uma rotina - em linguagem FORTRAN90 - para delimitação e subdivisão automática de bacias hidrográficas, bem como para a obtenção de características físicas da bacia. Para tanto, utilizaram um modelo digital de elevação e o estabelecimento de um determinado nível para a codificação as quais as bacias são delimitadas.

Silva et al (2008) apresentaram o aplicativo Otto-Sys, utilizando a linguagem de programação AML, nativa do sistema de informações geográficas Arc/INFO workstation. Trata-se de uma adaptação do sistema de codificação original já que a metodologia utiliza tão somente as redes de drenagem no formato vetorial e considera, em vez da área das bacias, o comprimento dos seus cursos d'água para codificá-los. Esse sistema também não foi encontrado disponível.

Gomes e Barros (2011) relataram a dificuldade e o insucesso de codificar uma bacia hidrográfica utilizando o sistema Ottosis, desenvolvido por Rubert (2000), e que parece ser o sistema precursor ao aplicativo apresentado por Silva et al (2008). Esse aplicativo também não foi encontrado acessível.

Teixeira (2012) representa um grande esforço, e talvez único no Brasil, ao tratar da questão da codificação de bacias hidrográficas em conformidade com a legislação brasileira e de acordo com padrões de interoperabilidade prescritos pelo Open Geospatial Consortium (OGC). Trata-se de um conjunto de objetos hidrográficos que compõe a inteligência hidrográfica de um sistema e faz parte do projeto pgHydro de código aberto, e de autoria desse mesmo autor, sendo um complemento para

um sistema gerenciador de banco de dados geográficos. Teixeira et al (2013) apresentaram a aplicação dessa metodologia no âmbito da ANA. Atualmente o projeto pgHydro possui um plugin para rodar no QGIS (Quantum Sistema de Informações Geográficas). É uma ferramenta de alto nível, pois além da codificação, possui ferramentas para processar e realizar a consistência topológica da rede, trabalhando com o melhor do conceito de SIG e com boa operacionalidade em banco de dados geográficos.

Wang et al (2014) descrevem uma ferramenta para codificação modificada de Pfafstetter, baseada em computação paralela para tratamento de grandes massas de dados e incorporada a um modelo hidrológico. De acordo com o artigo apresentado, a ferramenta parece ser interessante embora também não se tenha encontrado disponível.

A tool box Horton Machine (FORMETTA et al., 2014), implementada para o JGrass e utilizada como ferramenta para os SIG livres UDig e gvSig, apresenta uma função de codificação segundo Pfafstetter, porém ao testá-la, verificou-se tratar de uma adaptação da metodologia original já que a codificação implementada por essa ferramenta não limita o número de interbacias a 5. Todas as interbacias do canal principal são codificadas com dígitos ímpares, não apresentando uma subdivisão de classificação. O mesmo ocorre com as bacias tributárias, que não se limitam aos caracteres 2, 4, 6 e 8. Um exemplo é apresentado na Figura 3.

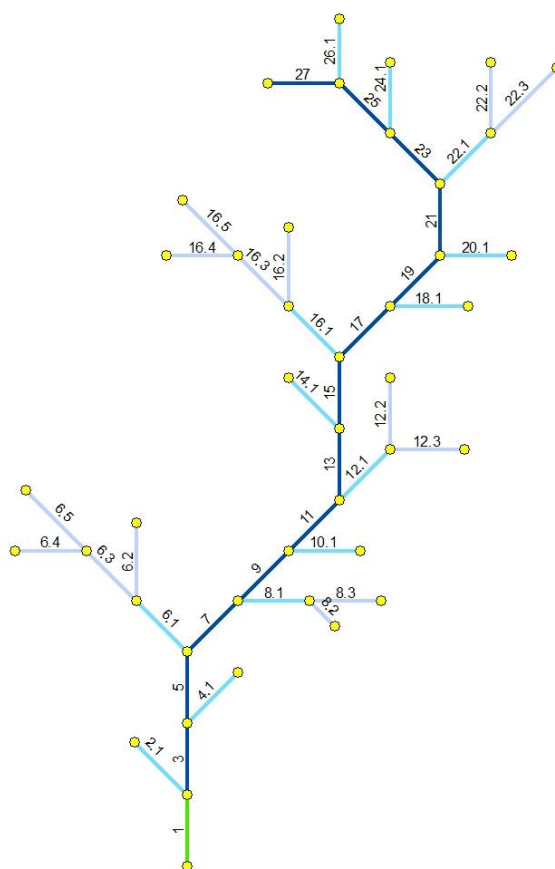


Figura 3 – Otto Codificação modificada em rede de drenagem esquemática gerada pela TollBox Horton Machine no gvSig

Outros trabalhos também relatam ou fazem menção ao uso de ferramentas para codificação de bacia, mas não apresentam as ferramentas em si e tampouco estão disponíveis.

Verificou-se que existe uma limitação para o usuário quanto à disponibilidade e utilização de ferramentas que realizem a classificação e codificação de uma bacia segundo o método de Pfafstetter. As duas opções encontradas, passíveis de testes, apresentam alguma restrição: a de Horton Machine no gvSig realiza uma codificação modificada e a pgHydro no QGIS requer um conhecimento mais avançado, mais tempo de trabalho e está focada em aplicações mais robustas.

Diante dessa lacuna, procurou-se apresentar, neste estudo, uma ferramenta mais simples, rodando como um script em ambiente SIG, que pudesse codificar, rapidamente, as sub-bacias a partir do traçado vetorial da rede de drenagem e de informações extraídas de suas áreas de contribuição. Questões relativas às bacias costeiras, considerando a linha de costa, não foram abordadas.

Lógica do algoritmo proposto:

O algoritmo desenvolvido neste trabalho foi escrito em linguagem interpretada Python para rodar integrado ao software de geoprocessamento ArcGis ou QGIS. A codificação automática está baseada nas áreas de contribuição acumuladas a montante de cada trecho da rede de drenagem, armazenada na tabela de atributos do shapefile, e nas distâncias de cada trecho até a foz, também armazenadas na tabela de atributos do shapefile.

Além dessas informações, o algoritmo utiliza a relação topológica existente entre os nós de montante e jusante de cada trecho, que é estabelecida em função das coordenadas dos vértices iniciais e finais que definem a linha de cada trecho de drenagem. Quanto a esse aspecto, salienta-se a necessidade do uso de um sistema de projeção cartográfica a fim de que se trabalhe com as coordenadas métricas dos vértices. Outra obrigatoriedade diz respeito à questão topológica em que os vértices definidores das linhas devem estar orientados (vértice inicial e final) no sentido de montante para jusante.

O código em si, ainda que se tratem dos algarismos de 1 a 9, refere-se a uma cadeia de caracteres do tipo texto.

Para a codificação, o algoritmo possui uma função principal que classifica uma seleção de trechos para as 4 bacias tributárias principais e 5 interbacias de acordo com o método de Otto Pfafstetter.

A partir de uma seleção de trechos - uma bacia, por exemplo – devemos, inicialmente, entender que existem 4 tipos possíveis trechos, os quais serão codificados em uma determinada ordem. Esses tipos estão exemplificados na Figura 4.

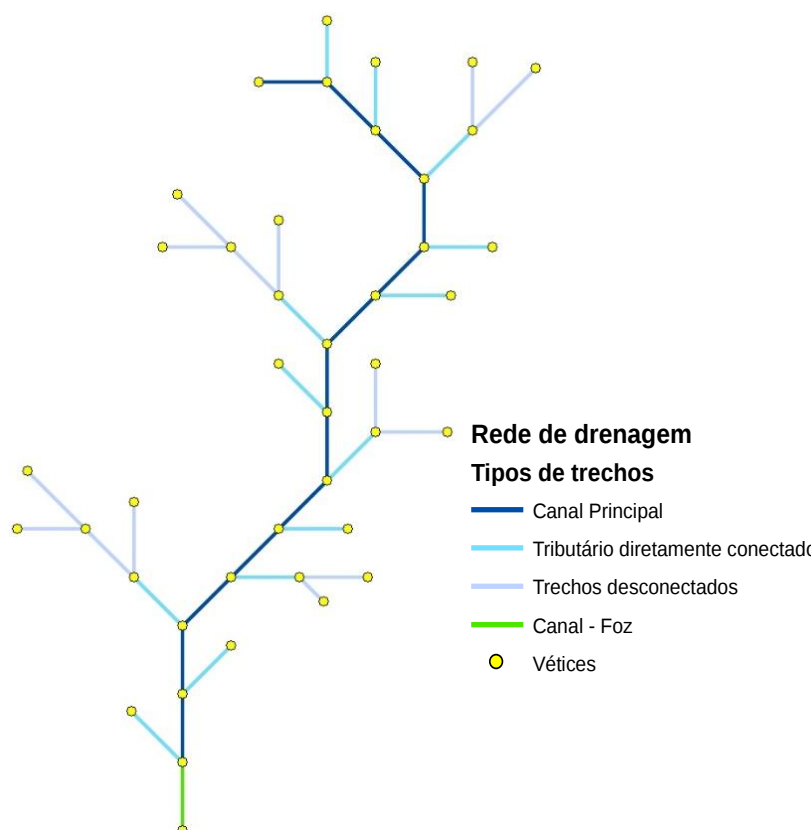


Figura 4 – Tipos de trechos em rede de drenagem esquemática

O algoritmo inicia identificando os trechos que pertencem ao canal principal, dentre uma seleção de trechos apresentada, e utilizando o critério da maior área de contribuição a montante, conforme o estabelecido pela ANA (2004). Posteriormente, realiza a identificação dos tributários diretamente ligados a esse canal. Isto é realizado de jusante para montante, analisando os nós dos vértices.

Para realizar essa tarefa o trecho com a maior área de drenagem a montante é selecionado, sendo identificado como o trecho de foz da bacia/sub-bacia. Esse trecho já é classificado como parte do canal principal e recebe o código 1. A partir do valor do campo [fromnode] (vértice inicial) do trecho de foz são selecionados os dois trechos de montante verificando-se os valores do campo [tonode] (vértices finais) desses trechos. Dentre os dois trechos que satisfazem a igualdade “[fromnode]==[tonode]” aquele trecho que possui a maior área de drenagem a montante é classificado como canal principal, o outro trecho é classificado como tributário diretamente conectado. A busca prossegue agora com o valor do campo [fromnode] do trecho selecionado na etapa anterior e assim por diante até que a busca não retorne trechos a montante, ou seja, a igualdade “[fromnode]==[tonode]” não selecione trechos.

Os trechos identificados como tributários, na etapa anterior, são ordenados em função das áreas de contribuição a montante, sendo os 4 maiores separados e ordenados de jusante para montante em função das suas distâncias até a foz, e então codificados como 2, 4, 6 e 8. Os demais tributários (intermediários) são então codificados entre as interbacias 1, 3, 5, 7 e 9, em função das respectivas

distâncias a foz; se a distância for menor que a distância do tributário 2 recebe o valor 1, se a distância estiver entre a distância dos tributários 2 e 4 recebe o valor 3 e assim por diante.

De forma análoga, começando de jusante para montante os trechos do canal principal são codificados em função das distâncias entre as interbacias 1 a 9.

Por fim, todos os trechos não conectados ao canal principal irão herdar o código do trecho de jusante. Isso é garantido uma vez que a codificação se realiza de jusante para montante, e o trecho conectado ao canal já foi codificado anteriormente.

Estando todos os trechos codificados para o primeiro nível, os demais níveis são preenchidos utilizando-se a função principal iterativamente, selecionando os códigos repetidos para realizar uma nova rodada de codificação na qual será acrescentado um novo caractere ao código da etapa anterior. Uma seleção para cada código repetido é realizada até que todos os códigos na rede sejam únicos.

Adicionalmente, foi incluída uma função no algoritmo para identificar os trechos de nascentes. Isso é realizado com uma consulta que identifica os trechos cujo campo [fromnode] não possui algum trecho correspondente no campo [tonode].

Para realizar as consultas necessárias, os dados da tabela de atributos da shapefile são lidos e armazenados em uma estrutura de dados do tipo tabela chamado de data frame, implementada pelo módulo Pandas do Python. Todas as operações no algoritmo são, então, realizadas por meio de consultas a valores indexados por essa estrutura.

Por fim um novo campo com os códigos é acrescentado ao arquivo dbf vinculado ao shapefile.

Metodologia para aplicação do algoritmo:

A fim de facilitar a aplicação do algoritmo apresentado para a codificação de bacias, um exemplo de aplicação a uma rede de drenagem esquemática será demonstrado para orientar a metodologia que se deve seguir para a correta codificação. A rede que servirá de modelo nesta etapa será a rede já apresentada nas Figuras 1 e 2.

Partindo-se do shapefile da rede de drenagem é necessário a realização de uma série de pré-processamentos e verificações a fim de que a tabela de atributos contenha as informações necessárias para que a ferramenta execute o algoritmo de forma adequada.

Como descrito anteriormente, a primeira verificação diz respeito ao sistema de coordenadas da rede de drenagem. Este deve ser do tipo projetado, com coordenadas plano retangulares. Caso o dado original esteja num sistema com coordenadas do tipo latitude e longitude (CGS), este deve ser reprojetoado para uma projeção adequada. Essa tarefa é facilitada nos SIG já que esses sistemas possuem ferramentas apropriadas de conversão de coordenadas e por se tratar de uma tarefa trivial de geoprocessamento não será abordada.

A verificação seguinte diz respeito à topologia da rede, na qual os vértices devem ter a orientação de montante para jusante. Quando a rede de drenagem advém de um processo de extração automática, a partir de MDEHC, por ferramentas como a ArcHydro Tools ou similares, essa relação topológica é garantida. Quando ela é vetorizada pelo usuário, deve-se ter atenção para que a vetorização tenha o sentido correto, com os vértices finais de uma feição coincidindo com os vértices iniciais da feição de jusante.

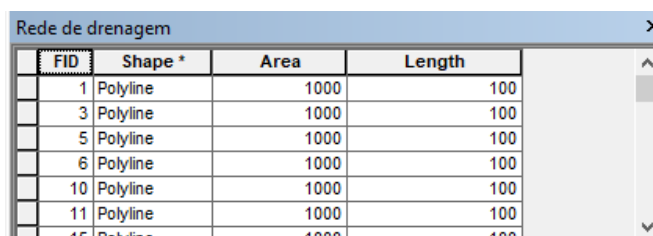
O grande desafio é quando trabalhamos com uma base de fonte desconhecida na qual não podemos ter garantia que esses cuidados foram adotados. Nesses casos, os SIG possuem ferramentas capazes de identificar feições que estejam com orientação no contrafluxo, e de permitir inverter o sentido das feições. Um exemplo de ferramenta com essa capacidade é a Water Utility Network Tool que pode ser incorporada ao ArcGIS e possui o comando Flip Selected Lines que inverte o sentido de linhas selecionadas.

No exemplo de aplicação a topologia foi consistida quando de sua vetorização.

Seguindo, a tabela de atributos deverá conter um campo onde estão armazenados os valores das áreas que contribuem diretamente para cada trecho da rede. Esses valores geralmente advêm dos próprios polígonos definidores dessas áreas de drenagem e que podem ser transferidos para a tabela de atributos da rede por meio da operação de relacionamento entre as tabelas. Esses polígonos podem ser extraídos de forma automatizada do MDEHC, por exemplo.

Outro valor que deve estar armazenado na tabela de atributos da rede de drenagem é o valor do comprimento de cada trecho. Essa informação é relativamente fácil de ser obtida pois é intrínseca de cada feição, sendo calculada pelo próprio SIG em função das coordenadas dos vértices definidores de cada feição. Uma vez adotado o sistema de projeção plano retangular esses comprimentos já são calculados em metros ou quilômetros.

Na Figura 5 apresenta-se a tabela de atributos inicial para a rede de drenagem esquemática que estamos utilizando. As operações descritas nesse exemplo de aplicação foram realizadas com o software de SIG ArcGIS / ArcMap 10.6.



FID	Shape *	Area	Length
1	Polyline	1000	100
3	Polyline	1000	100
5	Polyline	1000	100
6	Polyline	1000	100
10	Polyline	1000	100
11	Polyline	1000	100
15	Polyline	1000	100

Figura 5 – Tabela de atributos com valores de área e comprimentos

A partir desses dados iniciais deve-se acrescentar por meio de operações de geoprocessamento - que serão apresentadas a seguir -, 6 novos campos na tabela de atributos assim nomeados (os nomes devem estar em conformidade com o aqui descrito pois o algoritmo faz referência a eles desta forma): [Perimetro], [acc_down], [upDist], [fromnode], [tonode] e [rid]. Este último funciona como um

identificador único que faz o papel de chave primária para os relacionamentos entre as tabelas. Os novos campos são adicionados por meio da operação “Add Field”, na própria tabela de atributos.

[Perímetro]: será um campo de valor double e receberá os valores de comprimento e serão utilizados para calcular os valores de distância até a foz.

Primeiro adiciona-se o novo campo por meio da operação de Add Field na tabela de atributos.

Acessando diretamente na própria tabela de atributos no ArcMap, clicando-se com o botão direito sobre o campo adicionado e selecionando-se Calculate Geometry..., e escolhendo -se Length para a opção Property.

Para o cálculo dos demais campos, foi utilizado nesse exemplo de aplicação uma Tool Box desenvolvida para o ArcGIS no órgão americano de Administração Oceânica e Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA). Trata-se da Toolbox Spatial Tools for the Analysis of River Systems (STARS), na versão 2.0.6, apresentada por Peterson e Ver Hoef (2014).

Na Figura 6 apresentam-se as ferramentas disponibilizadas pela TollBox STARS 2.0.6.

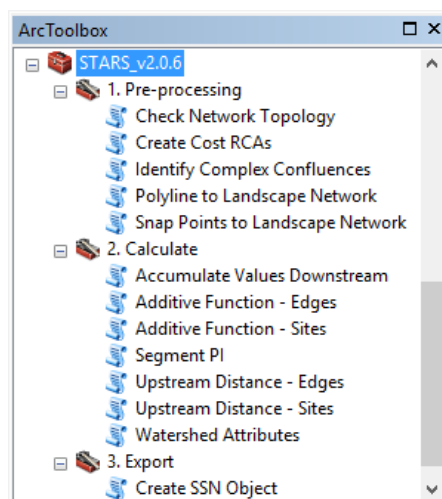


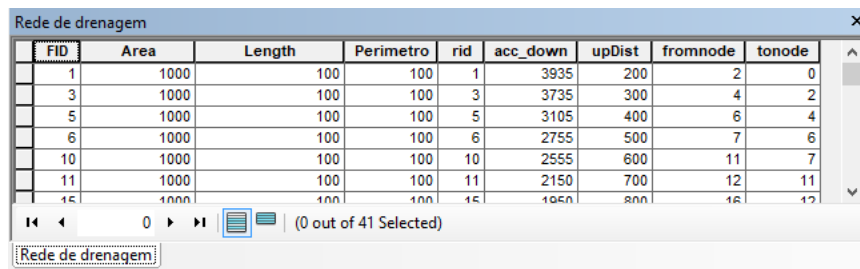
Figura 6 - TollBox STARS 2.0.6

Para adicionar os campos [fromnode] e [tonode] foi utilizado o algoritmo Polyline to Landscape Network. Essa ferramenta cria um file geodatabase com 5 datasets, sendo 2 feature classes (“Edges”, representando os trechos, e “Nodes”, representando os nós da rede) e 3 tabelas (“nodexy”, “noderelationships” e “relationships”). Na tabela “noderelationships” estão os campos [fromnode] e [tonode] que podem ser transferidos para a feature class “Edges” por meio de um Join Table usando o campo chave [rid].

O campo [acc_dow] deve armazenar o valor acumulado das áreas de drenagem a montante, para isso utilizamos o algoritmo Accumulate Values Downstream da Toolbox STARS, tendo como parâmetro o campo com os valores das áreas da feature class “Edges” (ou seja, a operação é realizada com a feature class do geodatabase). Esse campo foi herdado da nossa tabela de atributos da rede inicial.

Para o campo [upDist], que irá armazenar os valores de distância até a foz, usamos, de forma análoga, a função Upstream Distance – Edges, tendo como parâmetro o campo [Perimetro].

Com todos os campos necessários preenchidos na tabela de atributos da feature class “Edges” basta exportá-la como shapefile, já que o algoritmo irá ler os valores da tabela de atributos (DBF) e armazená-los em um Panda Data Frame. Na Figura 7 apresenta-se a tabela de atributos da shapefile exportada após a série de pré-processamentos com a TollBox STARS.



FID	Area	Length	Perimetro	rid	acc_down	upDist	fromnode	tonode
1	1000	100	100	1	3935	200	2	0
3	1000	100	100	3	3735	300	4	2
5	1000	100	100	5	3105	400	6	4
6	1000	100	100	6	2755	500	7	6
10	1000	100	100	10	2555	600	11	7
11	1000	100	100	11	2150	700	12	11
15	1000	100	100	15	1950	800	16	12

Figura 7 – Tabela de atributos após o pré-processamento

O algoritmo para a codificação faz uso de funções dos módulos Python Pysal e Pandas que são bibliotecas externas que podem ser incorporadas ao Python instalado junto com o ArcGis ou o QGIS. Esses módulos são requisitos importantes e a sua prévia instalação se faz necessária.

Foi criada, para facilitar a utilização do algoritmo, uma ToolBox para o ArcMap com o script de codificação automática. Ao acessá-la uma janela para entrada dos parâmetros é ativada. Na Figura 8 apresenta-se a ToolBox criada para a Ottocodificação. Ela deve ser adicionada ao projeto no ArcMap.

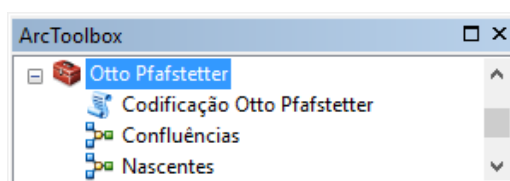


Figura 8 – ToolBox para Ottocodificação

Os parâmetros que são informados para que se execute o script são o diretório de trabalho (workspace), o código inicial R e a Feature Layer correspondente à rede de drenagem. Na Figura 9 é apresentada a janela de execução do script de Ottocodificação.

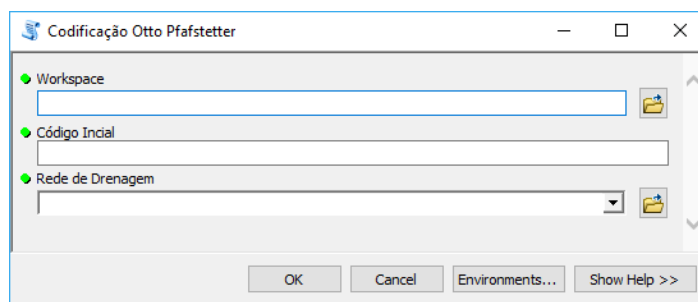


Figura 9 – Janela do script de Ottocodificação

Como resultado da execução do script 3 campos na tabela de atributos da shapefile são adicionados. O campo [Pfaf] armazena os códigos gerados pela Ottocodificação; o campo [Canal] armazena o valor “1” quando o trecho em questão pertence ao canal principal da rede de drenagem

apresentada e o campo [Nascentes] armazena o valor “1” quando o trecho em questão não possui nenhum trecho a montante. Na Figura 10 apresenta-se a tabela de atributos da rede de drenagem codificada após a execução da ferramenta.

Rede de drenagem												
	FID	Area	Length	Perimetro	rid	acc_down	upDist	fromnode	tonode	Pfaf	Canal	Nasce
▶	1	1000	100	100	1	3935	200	2	0	13	1	0
	3	1000	100	100	3	3735	300	4	2	15	1	0
	5	1000	100	100	5	3105	400	6	4	31	1	0
	6	1000	100	100	6	2755	500	7	6	33	1	0
	10	1000	100	100	10	2555	600	11	7	35	1	0
	11	1000	100	100	11	2150	700	12	11	51	1	0
	15	1000	100	100	15	1050	800	16	17	63	1	0

Figura 10 – Tabela de atributos da rede de drenagem codificada

Uma observação importante é que se faz necessário remover o layer da rede de drenagem codificada e reinseri-lo novamente para que os campos adicionados pelo script fiquem visíveis.

Na Figura 11 apresenta-se a rede de drenagem com a codificação segundo o método de Otto Pfafstetter.

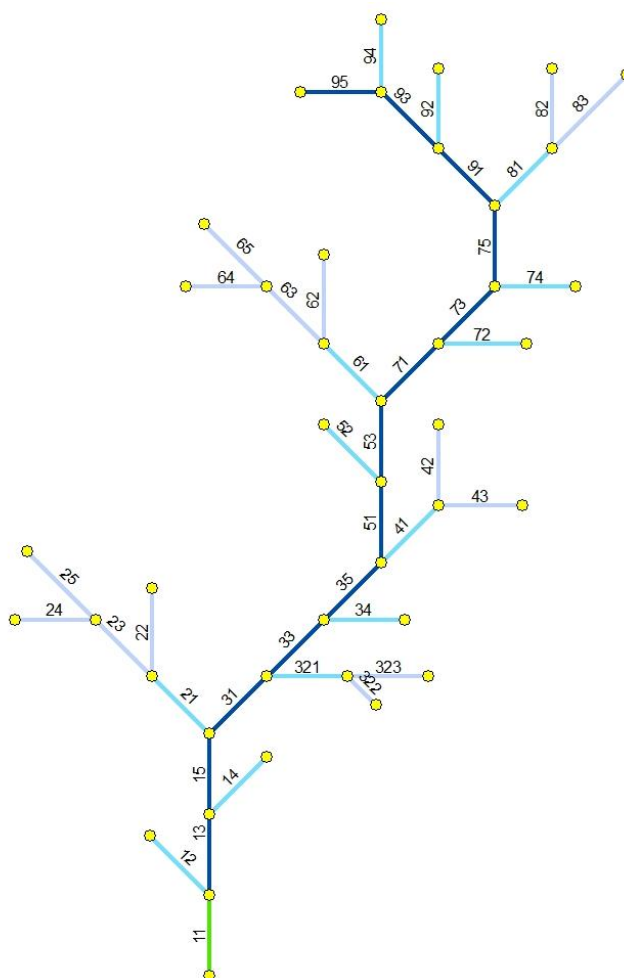


Figura 11 – Rede de drenagem codificada

Adicionalmente foram incluídos na ToolBox dois modelos Model Builder para criar os shapefiles de pontos das confluências e das nascentes com base no campo [Nascentes]. Na Figura 12 apresentam-se os pontos de nascentes e confluências.

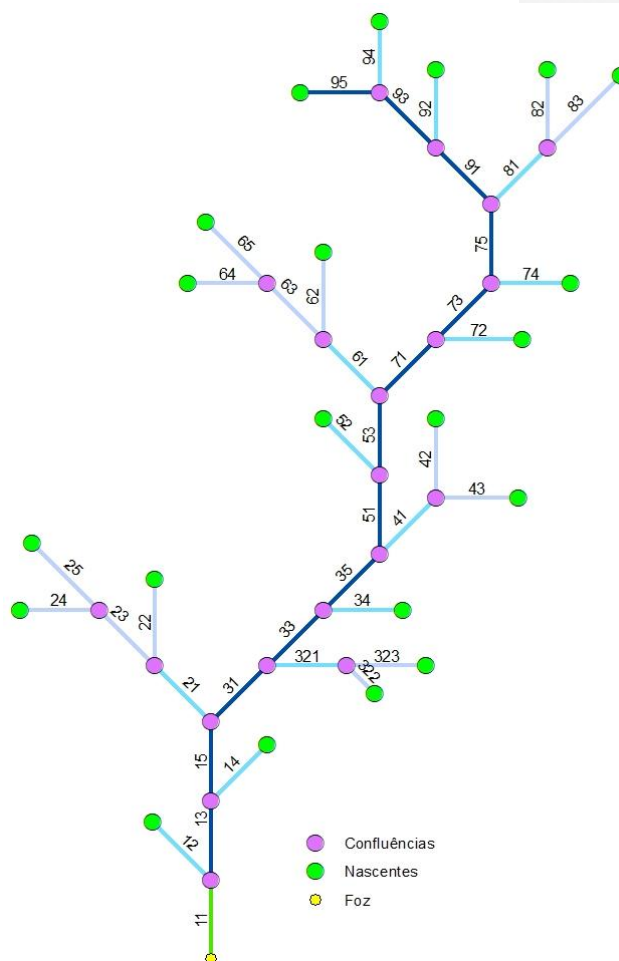


Figura 12 - Pontos de nascentes e confluências

Validação da metodologia:

Com a finalidade de validação, foram aplicados a metodologia apresentada e o algoritmo de codificação proposto em 3 bacias hidrográficas distintas, previamente codificadas pela ANA.

A primeira bacia hidrográfica é a bacia do Rio Itaúnas, cujo código inicial R é o 75978. Essa bacia foi escolhida uma vez que é a bacia teste para as implementações do plugin pgHydro, sendo utilizada nos treinamentos sobre otocodificação e implementação da base hidrográfica da ANA.

Os vetores da rede de drenagem utilizados para o teste foram aqueles já consistidos topologicamente disponibilizados pela ANA. O sistema de coordenadas foi reprojetoado para UTM fuso 24. Para o campo [acc_down] foram utilizados os valores de área a montante fornecida pela BHO ANA pelo campo [NUAREAMONT]. O campo [Perimetro] foi preenchido a partir do campo [Shape_Length] da tabela de atributos da feature class “Edges”, gerada no processo de criação da Landscape Network. Os demais procedimentos foram os da metodologia apresentada no tópico anterior. Por fim pôde-se comparar os códigos pré-existentes da BHO ANA, pelo campo [COBACIA], com os códigos gerados pelo script.

A segunda bacia hidrográfica é a bacia do Ribeirão da Onça cujo código inicial R é o 864958. Essa bacia foi escolhida uma vez que é uma bacia teste que estes autores já vêm trabalhando, utilizando-a em outros testes e publicações.

Os vetores da rede de drenagem utilizados nesse caso foram digitalizados da base cartográfica do IBGE para a escala de 1:50000, com a orientação consistida topologicamente. O sistema de coordenadas foi utilizado foi o UTM fuso 23. Para o campo [acc_down] foram utilizados os valores acumulados de área, a partir das áreas dos polígonos definidores das sub-bacias geradas do MDEHC, com dados do SRTM 30. O campo [Perimetro] foi preenchido a partir do campo [Shape_Length] da tabela de atributos da feature class “Edges”. Os demais procedimentos foram os já descritos. Da mesma forma pôde-se comparar os códigos pré-existentes da BHO ANA, pelo campo [COBACIA], com os códigos gerados pelo script.

Por fim, a fim de testar o tempo de execução, optou-se por uma bacia com uma área de drenagem maior, a bacia hidrografia do Rio Tietê. O procedimento adotado foi o mesmo para o caso da bacia do Rio Itaúnas, com a exceção do sistema de projeção em que foi adotado a projeção equidistante de Albers para a América do Sul.

Resultados

Nos testes realizados para as três bacias selecionadas, além da rede de drenagem esquemática, os códigos gerados pelo algoritmo foram totalmente coincidentes com os apresentados pela ANA ou com os códigos esperados no caso da rede esquemática.

Os tempos de execução foram da ordem de segundos, ainda que as bacias testadas fossem pequenas, isso demonstra que o tempo de execução do algoritmo não parece ser um problema em pequenas bacias hidrográficas. Na Figura 13 apresentam-se os tempos de execução da ferramenta para as bacias 75978 e 864958, respectivamente.

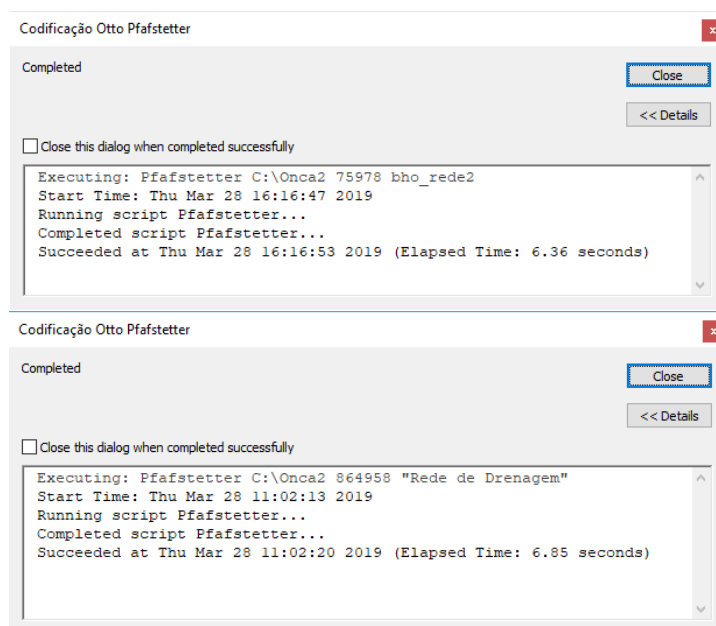


Figura 13 – Tempo de execução da ferramenta

Para a codificação da bacia do Rio Tietê, com 132.615 trechos, tanto as operações de pré-processamento (geração dos campos [fromnode] e [tonode], acumulação das áreas à montante e o cálculo das distâncias até a foz) quanto a codificação em si exigiu um maior tempo de execução, da ordem de 6 horas cada, em um PC com processador Intel Core I7 4500 1.7 GHz com 16 GB de memória RAM.

Conclusões

Dos testes realizados pode-se constatar que tanto a metodologia apresentada, com a utilização da ToolBox STARS para o pré-processamento da rede de drenagem, quanto o algoritmo para a sua codificação, segundo o proposto por Otto Pfafstetter, produziram o resultado esperado em tempo de execução adequado.

O processo de codificação de forma automatizada e iterativa agiliza esse tipo de tarefa eliminando erros comuns em procedimentos manuais.

Essa ferramenta preenche uma lacuna existente na disponibilidade de uma ferramenta automatizada para a codificação de pequenas bacias, com a existência de dados previamente consistidos, diretamente em software SIG, a partir de um shapefile da rede de drenagem.

Uma vez que as limitações da metodologia de Pfafstetter continuam presentes, bem como a premente necessidade de incorporar outros elementos à rede hidrográfica, tais como estações de monitoramento, pontos de captação ou lançamentos, e até mesmo restrições de fluxo, estes autores entendem a necessidade de estruturação da rede de drenagem para gestão de recursos hídricos na forma grafos.

Referências:

- Agência Nacional de Águas – ANA. (2004) *Resolução Nº 399*; 22 julho 2004
- Agência Nacional de Águas – ANA. *Apostila sem autoria. Codificação de Bacias Hidrográficas pelo Método de Otto Pfafstetter: Aplicação na Ana*. Disponível em: <http://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/104/1/apostila.pdf>
- BRITTON, P. (2002) *Review of existing river coding systems for river basin management and reporting*. In: WFD GIS working group: European coding systems task group.
- BUARQUE, D.C.; Paz, A.R.; COLLISCHONN, W. (2008) *Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos*. In: Simpósio Sul-Sudeste de Recursos Hídricos, 2008, Rio de Janeiro: ABRH.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1981) *Geomorfologia fluvial*. São Paulo: Edgard Bluncher.
- DANNER A, Yi K, MOELHAVE T, Agarwal PK, ARGE L and MITASOVA H, (2007), *TerraStream: From Elevation Data to Watershed Hierarchies*. Proc. ACM GIS.
- FORMETTA, G.; ANTONELLO, A.; FRANCESCHI, S.; David, O.; RIGON, R. (2014) *Digital watershed representation within the NewAge-JGrass system*. Boletín Geológico y Minero, 125 (3): 369-379.
- GALVÃO, W. S.; MENESES, P. R. (2005) *Avaliação dos sistemas de classificação e codificação das bacias hidrográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas*. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, Goiânia, Brasil, 16-21.
- NETTO, P. O. B. (2006) *Grafos: Teoria, Modelos e Algoritmos*. 4. ed. São Paulo, SP: Editora Edgard Blücher Ltda.
- PETERSON E. E.; VER HOEF J. M. (2014) *STARS: An ArcGIS toolset used to calculate the spatial information needed to fit spatial statistical models to stream network data*. Journal of Statistical Software, 56(2).
- PFAFSTETTER, O. (1989) *Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodologia de Codificação*. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOCS), 1989, p. 19. Manuscrito não publicado.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. (2008) *Gestão de bacias hidrográficas*. Estudos Avançados, 22(63), 43-60. <https://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200004>

RUBERT, O. A. V. (2000), *Codificação automática de regiões hidrográficas utilizando sistemas de informação geográfica*. Viçosa: UFV.

SILVA, N. S.; RIBEIRO, C. A. A. S.; BARROSO, W. R.; RIBEIRO, P. E. A.; SOARES, V. P.; SILVA, E. (2008) *Sistema de Otto-Codificação modificado para endereçamento de redes hidrográficas*. Rev. Árvore, vol.32, nº.5, p.891-897.

TEIXEIRA, A. A. (2012), *Ottocodificação estendida e inteligência hidrográfica em banco de dados geográficos*. xi, 425 f., il. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) — Universidade de Brasília, Brasília.

TEIXEIRA, A. A.; SILVA, A. M.; MOLLERI, G. S. F.; FERREIRA, F. V., BORELLI, A. J. (2013) *PGHYDRO – Objetos Hidrográficos em Banco de Dados Geográficos*. XX Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos.

VERDIN, K. L.; VERDIN, J. P. A. (1999), *Topological System for Delineation and Codification of the Earth's River Basins*. Journal of Hydrology, vol. 218, nº 1-2.

WANG, C.; CHEN, T.; YANG, C. (2015) *Parallel Watershed Codification Algorithm Based on Pfafstetter Coding System*. J-Global, V17(5): 556-561p.