



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências – IG
Pós-Graduação em Geociências Aplicadas

Welber Ferreira Alves

**Estudo Comparativo de Métodos de Regionalização Hidrológica e
Desenvolvimento de um Aplicativo para o Gerenciamento de Outorga de
Águas Superficiais**

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Seixas Brites

Brasília – DF
2016



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências – IG
Pós-Graduação em Geociências Aplicadas

Welber Ferreira Alves

**Estudo Comparativo de Métodos de Regionalização Hidrológica e
Desenvolvimento de um Aplicativo para o Gerenciamento de Outorga de
Águas Superficiais**

Dissertação de Mestrado nº 092

Orientador

Prof. Dr. Ricardo Seixas Brites

Examinadores

Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos – Examinador Interno

Prof. Dr. Alexandre de Amorim Teixeira – Examinador Externo

Brasília – DF
2016

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito debaixo do céu”.
(Eclesiastes 3:1)

Dedico este trabalho a minha família, aos
meus amigos da ADASA e da UNB.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente este trabalho ao Deus Todo Poderoso, que me permitiu chegar até aqui, capacitando-me, iluminando e clareando meu caminho e colocando tantas pessoas boas e capazes na minha jornada.

A minha mãe que sempre me ensinou a lutar.

Ao meu pai em memória.

A minha esposa e aos meus filhos pelo apoio e compreensão.

À ADASA e aos meus colegas de trabalho pelo apoio e suporte.

Ao programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da UNB. Ao meu orientador, o professor Ricardo Seixas Brites, por ter confiado em meu trabalho e me orientado.

Ao meu amigo Rafael, pelos aconselhamentos.

Ao meu amigo Michael, pela paciência e dedicação em me ajudar na parte de TI.

Ao meu amigo Diego e Wallas, por me mostrarem a simplicidade do Python.

Ao Prof. Alexandre por me apresentar o pgHydro e mostrar suas diversas vantagens.

Aos Professores Roig, Elói e Kóide por me tirarem diversas dúvidas.

Aos meus amigos Camila, Saulo, Érica, Silena e Danielle pelas revisões, sugestões e aconselhamentos.

Aos meus tutores e amigos Celso e Eduardo por me apresentarem a Hidrologia e sempre estarem prontos para me ajudar.

Aos professores do Instituto de Geociências pela disponibilidade, aprendizado e apoio.

Sumário

Agradecimentos	4
Índice de Figuras	7
Índice de Tabelas	9
Resumo	10
Abstract.....	11
1. Capítulo I – Apresentação	12
1. Introdução	12
1.2 Localização da Área de Estudos	13
1.3 Objetivos	14
1.4 Estrutura da Dissertação	15
2. Capítulo II - Caracterização da área de estudos	15
3. Capítulo III - Gestão dos recursos hídricos	23
3.1 Uma reflexão sobre a gestão dos recursos hídricos	23
3.2 A compreensão da Hidrologia para a gestão dos recursos hídricos.....	27
3.3 Estações de monitoramento	29
3.4 Critérios para a outorga.....	31
3.5 Regionalização hidrológica.....	33
4. Capítulo IV - Geoprocessamento como ferramenta de suporte a gestão dos recursos hídricos	35
4.1 O Geoprocessamento e o meio ambiente.....	35
4.2 A linguagem de programação <i>Python</i> e o Geoprocessamento.....	37
4.3 QGis, Saga, Grass	38
4.4 GDAL/OGR e Proj4.....	39
4.5 <i>OMT-G</i> e INDE.....	40
4.6 Geoprocessamento e Análises hidrológicas	41
4.7 Banco de dados espaciais	43
4.8 Modelo digital de elevação hidrologicamente consistido	45

4.8 <i>Open Sources</i> e o <i>Raspberry Pi</i>	46
4.9 PgHydro	47
5. Capítulo V - Análise comparativa entre métodos de regionalização hidrológica para fins de concessão de uso da água.....	48
5.1 Descrição da proposta metodológica	48
5.2 Resultados e Discussão	52
5.3 Considerações sobre os resultados.....	60
6. Capítulo VI – Geração de modelo digital de elevação hidrológicamente consistido e adequação ao PGhydro	60
6.1 Procedimentos.....	60
6.2 Processo	61
6.2.1 Tratamento dos dados vetoriais dos rios e curvas de nível.....	61
6.2.2 Geração do modelo digital de elevação	64
6.2.3 Geração das áreas de contribuição.....	65
6.2.4 Compilação do banco de dados	69
6.2.5 Tratamento dos dados no banco de dados	70
7. Capítulo VII – Desenvolvimento de um sistema web	74
7.1 Estrutura teórica do sistema.....	74
7.2 Detalhamento das telas do sistema	76
8. Capítulo VII – Considerações Finais	85
9. Literatura Citada.....	87

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa das Unidades da Federação do Brasil	13
Figura 2: Estradas e hidrografia do Distrito Federal	14
Figura 3: Bacias e Unidades Hidrográficas do Distrito Federal	17
Figura 4: Geologia da UH Ribeirão Extrema	19
Figura 5: Distribuição Hidrogeológica do Domínio Poroso na UH Ribeirão Extrema.....	19
Figura 6: Distribuição Hidrogeológica do Domínio Fraturado na UH Ribeirão Extrema ..	20
Figura 7: Distribuição Pedológica na UH Ribeirão Extrema	21
Figura 8: Ciclo da Água - Adaptado de John M. Evans/USGS-USA Gov - http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html	28
Figura 9: Fluxograma de geração da base para composição dos dados da área de contribuição e trechos de drenagem	46
Figura 10: Unidade Hidrográfica Ribeirão do Extrema	49
Figura 11: Vazões obtidas da Estação Lagoinha	56
Figura 12: Vazões Obtidas da Estação Barro Preto.....	56
Figura 13: Vazões Obtidas da Estação Extrema VC 173	57
Figura 14: Conexão dos trechos de drenagem. Adaptado de DSG, 2008.	61
Figura 15: Trechos quebrados na confluência.....	62
Figura 16: Mais de três córregos de confluência.....	62
Figura 17: Trechos contíguos sem confluência	63
Figura 18: Curvas de nível.....	63
Figura 19: Extração de nós de curva de nível.....	64
Figura 20: MDE.....	65
Figura 21: Hidrografia Rasterizada	66
Figura 22: Direcionamento de fluxo.....	67
Figura 23: Áreas de contribuição.....	68
Figura 24: Áreas de contribuição em vetores	69
Figura 25: Modelagem Conceitual do Banco - ênfase nos dois novos elementos - Outorgas e UH.....	70
Figura 26: fluxograma pgHydro, adaptado de Teixeira, 2013.	71
Figura 27: fluxo da consistência da rede hidrográfica adaptado de Teixeira, 2013.	72
Figura 28: fluxo de consistência das áreas de contribuição hidrográfica, adaptado de Teixeira, 2013.....	73

Figura 29: Consistência da rede drenagem com as áreas de contribuição e geração da codificação de bacias de Pfasftetter, adaptado de Teixeira, 2013.	74
Figura 30: Fluxograma de etapas do Sistema de Gerenciamento de Outorgas	77
Figura 31: Tela inicial do Sistema de Gerenciamento.....	78
Figura 32: Tela 2	78
Figura 33: Tela 3	79
Figura 34: Tela 4 do Sistema.....	81
Figura 35: Tela 5 do Sistema.....	81
Figura 36: Tela 6 para renovação ou alteração de dados cadastrais	82
Figura 37: Tela 7 do Sistema.....	82
Figura 38: Tela 8 do Sistema.....	83
Figura 39: Tela 9 do Sistema.....	83
Figura 40: tela 10 do sistema.....	84
Figura 41: tela 11 do sistema.....	84

Índice de Tabelas

Tabela 1. Estações da ADASA utilizadas	49
Tabela 2. Vazões médias mínimas mensais das estações em estudo.....	52
Tabela 3. Matriz de correlação entre as variáveis	53
Tabela 4. Coeficientes de regressão, valores de f e p-value	53
Tabela 5. Vazões em l/s obtidas pelo método da regressão linear	54
Tabela 6. Vazões obtidas em l/s pelo método de Chaves et al. (2002)	55
Tabela 7. Valores do teste F para os dados de cada estação.....	55
Tabela 8. Valores do teste t-de- <i>Student</i> para os dados de cada estação	56
Tabela 9. Erros (%) referentes à reta de regressão e ao método de Chaves et al. (2002)....	57
Tabela 10. Erros relativos percentuais e Coeficiente de Nash & Sutcliffe (NS) (1970) para a regressão e para Chaves et al. (2002).	58

Resumo

O Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal – PGIRH (ADASA, 2012) estabeleceu vazões de referência para cada unidade hidrográfica no Distrito Federal de modo que a gestão hídrica fosse feita com maior eficiência. No entanto, apesar de ser conhecida a quantidade de água que escoar em cada ponto de controle, localizado no exutório de cada unidade, também é importante o conhecimento da disponibilidade de água em um ponto que vier a ser outorgado o uso da água. Para tal, o órgão responsável pela gestão de recursos hídricos passou a utilizar o método indicado por Chaves et al. (2002) para o cálculo de vazão no ponto desejado, devido à simplicidade do método e não exigência de estações de longa série histórica. O presente trabalho visa comparar este método com o método clássico proposto por Tucci (2004), de ajuste de uma função utilizando-se de outras variáveis, e considerando dados de estações de monitoramento localizadas na Bacia do Ribeirão do Extrema, com a finalidade de verificar a aceitabilidade do método proposto por Chaves et al. (2002) para a região estudada e a possível replicação do método para outras áreas do Distrito Federal. Para a verificação do modelo foi desenvolvido um algoritmo em Python que calcula a correlação das variáveis, bem como a regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, além de serem executados os testes estatísticos utilizando bibliotecas desta linguagem. A análise dos dados permitiu a aceitabilidade do método Chaves et al. (2002), tanto para a área em estudo, bem como sugestão para outras áreas. As bibliotecas do Python demonstraram ser adequadas à realização dos testes estatísticos.

Tendo sido feita esta análise, criou-se uma aplicação utilizando a linguagem de programação *Python*, o sistema de gerenciamento de banco de dados *Postgresql*, com a extensão espacial *PostGis* e tendo o *Linux* como sistema operacional que pudesse permitir na região de estudo uma gestão dos recursos hídricos de forma mais eficaz para os gestores governamentais. Essa aplicação vai permitir a gestão dos recursos utilizando como base a regionalização hidrológica de vazões nos moldes de Chaves et al. (2002), buscando um entendimento mais próximo da real disponibilidade hídrica em qualquer ponto da bacia. O uso da codificação de bacias proposta por Pfafstetter (1989) e da validação topológica foram importantes para a composição deste trabalho.

Palavras-chave: Hidrologia, Regionalização Hidrológica, Python, Geotecnologias

Abstract

The Integrated Management Plan for Water Resources of the Federal District (PGIRH, 2012) established the reference flow for each hydrographical unit in the Federal District, allowing the water management to be done more efficiently. However, although known the quantity of water flowing at each control point, located in the outlet of each unit, it is also important to know the availability of water at a point where will be granted the use of water. To this end, the agency responsible for water resource management has been using the method indicated by Chaves et al. (2002) for the flow calculation at the desired point, due to the simplicity of the method and no requirement of long time series stations.

This study aims to compare this method with the classic method proposed by Tucci (2004), setting a function using other variables and considering data from monitoring stations located in the Ribeirão do Extrema watershed in order to verify the acceptability of the method proposed by Chaves et al. (2002) for the region studied and the possible replication of the method to other areas of the Federal District. For the verification of the model has been developed, in Python, an algorithm that calculates the correlation between variables and linear regression by least squares method and statistical tests were run using this language libraries. Data analysis allowed the acceptance of the Chaves et al. (2002) method for both the study area and as a suggestion for other areas. The Python libraries have proved suitable for the implementation of statistical tests.

Having done the analysis, an application was developed using the Python programming language, the database management system PostgreSQL, the spatial extension PostGis and with Linux as an operating system that could allow, in the study region, the management of the water resources more effectively by the government managers. This application will enable the management of resources using, as a basis, the hydrological regionalization along the lines proposed by Chaves et al. (2002), seeking a closer understanding of the actual water availability at any point of the watershed. The use of the Pfafstetter coding scheme and topological validation were important for the accomplishment of this work.

Keywords: Hydrology, Hydrological Regionalization, Python, Geotechnologies

1. Capítulo I – Apresentação

1.1 Introdução

O crescimento populacional e o aumento de áreas cultivadas tanto ao redor do mundo, como dentro do Distrito Federal (DF), nas últimas décadas, têm ampliado a demanda por recursos hídricos. Nesse contexto, torna-se relevante, para os órgãos competentes, o aprimoramento do monitoramento dos usos dos recursos hídricos, principalmente para a concessão da outorga de águas superficiais que, no Brasil, é função exercida pelo Estado. Este monitoramento passa pela operação e manutenção de estações hidrometeorológicas, como também pelo controle da oferta e da demanda hídrica.

O Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal – PGIRH (ADASA, 2012), a partir de análises das séries históricas de diversas estações de monitoramento localizadas no Distrito Federal e em áreas adjacentes, estabeleceu vazões de referência para cada unidade hidrográfica (sub-bacia) do Distrito Federal, tendo como referência um ponto de controle localizado no exutório de cada unidade, de modo que a gestão hídrica fosse feita com maior eficiência. No entanto, apesar de ser conhecida a disponibilidade hídrica de cada ponto de controle, também é importante o conhecimento da disponibilidade de água em qualquer ponto que vier a ser outorgado. Para tal, o órgão responsável pela gestão de recursos hídricos passou a utilizar o método indicado por Chaves et al. (2002) para o cálculo de vazão no ponto desejado, devido à simplicidade do método e a não exigência de estações de longa série histórica.

Para a utilização deste método é de fundamental importância o uso de geotecnologias que, dentre as principais ferramentas de monitoramento disponíveis, destacam-se como importante subsídio para as decisões dos gestores públicos, tanto pelos recursos inerentes, como pela praticidade. Além disso, a precisão dessas informações pode servir como base para o aprimoramento das políticas públicas e das normas de gerenciamento do uso dos recursos hídricos.

O desenvolvimento de uma aplicação que possa ajudar no gerenciamento desses recursos é de suma importância para a gestão dos recursos hídricos. O sistema proposto por este trabalho será desenvolvido em *Python* (Python Org, 2016), uma linguagem de programação bem versátil e poderosa, exibido em meio *web*, e para tal será usado o HTML5 (W3Schools, 2016). Todo o trabalho será desenvolvido em *softwares livres*, sendo utilizado o *Linux* (Viva o Linux, 2016) como sistema operacional, com a distribuição *Raspbian* (Raspberry Pi Org, 2016), uma versão adaptada do *Debian* (Debian, 2016), o

QGis como sistema de informações geográficas (SIG) para tratamento dos dados geográficos (QGis, 2016) e o *Postgresql* (Postgresql, 2016) para repositório dos dados. Como servidor da aplicação, foi escolhido o *Raspberry Pi* (Raspberry Pi Org, 2016).

1.2 Localização da Área de Estudos

A área de estudo escolhida para a aplicação do modelo proposto se encontra no Distrito Federal, Brasil, como mostra a figura 1.

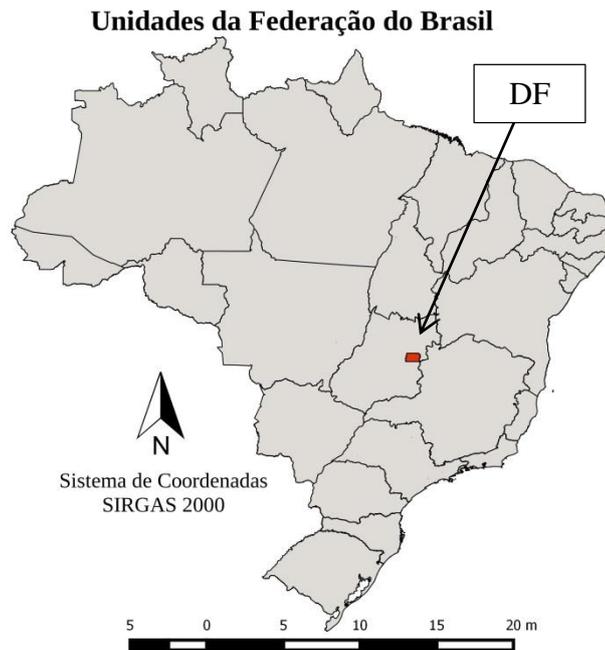


Figura 1: Mapa das Unidades da Federação do Brasil

O Distrito Federal se encontra na parte central do País, na região Centro-Oeste, onde se localiza a capital do Brasil, Brasília. Na figura 2 é possível observar a distribuição dos rios e estradas na unidade da federação.

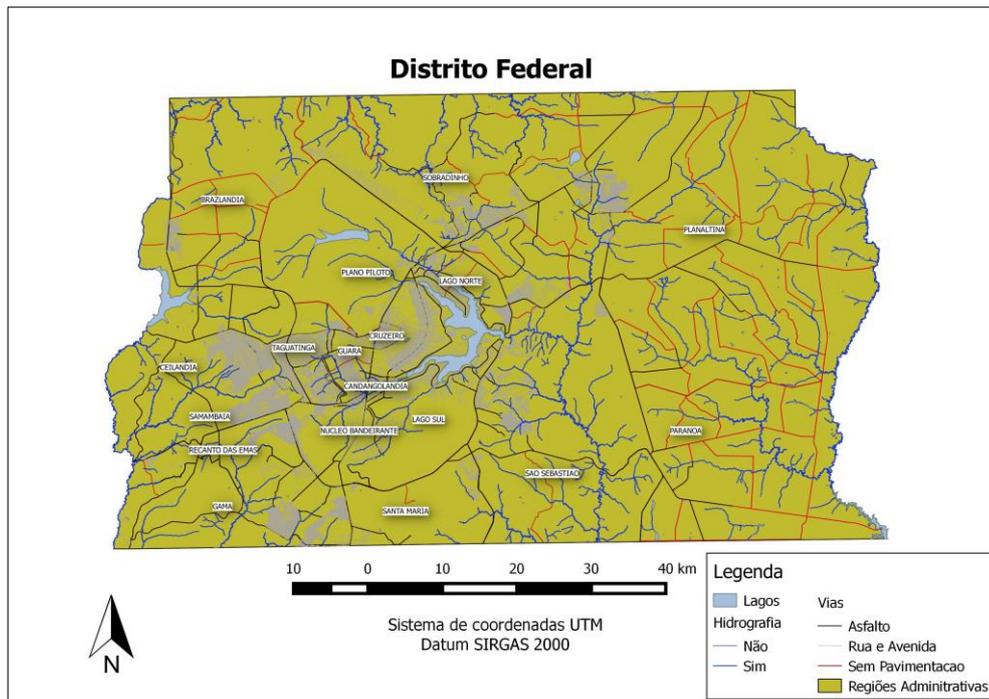


Figura 2: Estradas e hidrografia do Distrito Federal

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é Melhorar a gestão da concessão de outorgas por meio do uso da regionalização hidrológica de vazões como método e de um aplicativo web, visando um gerenciamento mais efetivo na distribuição dos recursos hídricos. Este aplicativo será pautado em ferramentas de geoprocessamento, que executarão análises hidrológicas para subsidiar as concessões de outorgas de usos da água superficial, de acordo com a legislação distrital e federal vigentes (Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997, Lei 9.984 de 17 de julho 2000, Lei 2.725 de 13 de junho de 2001, Lei 4.285 de 2008, Decreto 22.359, 31 de agosto de 2001, Resolução ADASA nº 350, de 23 de junho de 2006 e Instrução Normativa ADASA nº 2, de 11 de outubro de 2006).

Como objetivos específicos, tem-se:

- Comparar o método Chaves et al. (2002), utilizado pelo órgão responsável pela gestão, com o método clássico proposto por Tucci (2004), de ajuste de uma função, utilizando-se de outras variáveis, considerando dados de estações de monitoramento localizadas na Bacia do Ribeirão do Extrema, a fim de se verificar a aceitabilidade do método proposto por Chaves et al. (2002) para a região estudada e a possível replicação do método para outras áreas do Distrito Federal. Com isto, visa-se criar também um modelo que esteja em conformidade com o método proposto por Chaves et al. (2002).

- Verificar a adequabilidade dos recursos da linguagem de programação *Python* para a utilização nas geociências. Para a verificação do modelo foi desenvolvido um algoritmo em *Python* que calcula a correlação das variáveis, bem como a regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, além de serem executados os testes estatísticos utilizando bibliotecas desta linguagem.

-Verificar a adequabilidade do uso de *softwares livres* para o tratamento de arquivos espaciais relacionados aos recursos hídricos, de maneira que estes possam ser inseridos, em um segundo momento, em um sistema de banco de dados geográfico.

1.4 Estrutura da Dissertação

O Capítulo II tratará da caracterização da área de estudo, retratando os aspectos climáticos e hidrológicos da região.

O Capítulo III buscará fazer uma análise da gestão dos recursos hídricos no Brasil e no Distrito Federal, por meio da análise dos trabalhos publicados, bem como da evolução temporal da preocupação com o tema.

O Capítulo IV tratará dos recursos das geotecnologias e suas potencialidades na área de recursos hídricos, além do uso de ferramentas da área de tecnologia da informação, como a linguagem *Python* e suas bibliotecas.

Em seguida, no capítulo V, de posse de algoritmos em *Python* e dos dados hidrológicos, será feita uma análise hidrológica estatística da metodologia utilizada para este trabalho (Chaves et al., 2002 e Eletrobrás, 1985), comparando-a com a metodologia trabalhada por Tucci (2004), desenvolvida por NERC (1975) e trabalhada aqui no Brasil por Eletrobrás (1985).

O Capítulo VI tratará da geração de um modelo hidrológicamente consistido, pautando as fases necessárias para a elaboração deste e detalhando os processos utilizados. Demonstrará também a adequação ao pgHydro, aplicativo que tem como foco as análises hidrológicas em um ambiente *Postgresql*.

O Capítulo VII abordará o sistema desenvolvido, descrevendo os procedimentos realizados e cada uma de suas rotinas.

2. Capítulo II - Caracterização da área de estudos

O DF é delimitado pelos paralelos 15° 30' S e 16° 03' S, tendo, a leste, o Rio Preto e, a oeste, o Rio Descoberto. Seu clima é caracterizado por duas estações bem definidas: um período chuvoso e quente que vai de outubro a abril e outro período, seco e frio, que se

estende de maio a setembro (Baptista, 1998; Campos, 2004). A região está situada em altitudes que variam de 750 a 1344 metros (Gonçalves et al., 2009), apresentando rios de baixa vazão, rasos e estreitos, o que reduz em muito a capacidade hidrológica de abastecimento, principalmente em função da enorme demanda.

O polígono do Distrito Federal possui características muito peculiares por estar localizado no Planalto Central, onde se encontram nascentes de três grandes bacias hidrográficas brasileiras: Tocantins-Araguaia (ao norte), São Francisco (a leste) e Paraná (oeste, centro e sul) (figura 3). O órgão regulador, o qual atualmente é a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal – ADASA, é responsável por garantir a necessária disponibilidade hídrica, em padrões de qualidade e quantidade adequados aos respectivos usos para a atual e às futuras gerações, conforme preconiza a Lei Distrital nº 4.285 de 26 de Dezembro de 2008 (Distrito Federal, 2008).

Considerando-se o controle e a eficiência, o Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal (ADASA, 2012) determinou a divisão do território em sete Bacias hidrográficas: Bacia do Rio Maranhão, Bacia do Rio São Bartolomeu, Bacia do Rio Descoberto, Bacia do Rio Paranoá, Bacia do Rio Corumbá, Bacia do Rio Preto e Bacia do Rio São Marcos. Esta classificação tenta respeitar as características de cada região buscando, desta forma, tratar cada bacia como uma unidade hidrológica com características particulares. O relevo de cada região evidencia bastante a forma pela qual a bacia, como um todo, direciona os afluentes para convergirem para os rios principais (Consórcio GOLDER/ FAHMA, 2005). Assim, cada bacia pode ser vislumbrada como uma unidade independente em nível regional, isto é, dentro da realidade do Distrito Federal. O PGIRH também dividiu essas sete bacias em 40 (quarenta) Unidades Hidrográficas (Figura 3), onde foi estabelecida uma vazão de referência para cada Ponto de Controle, localizado no exutório ou no ponto de entrega do corpo hídrico para outro Estado. A vazão de referência adotada foi a média das mínimas mensais (Q_{mmm}). A Unidade hidrográfica escolhida como área de estudo é a UH Ribeirão do Extrema, destacada na figura 3.

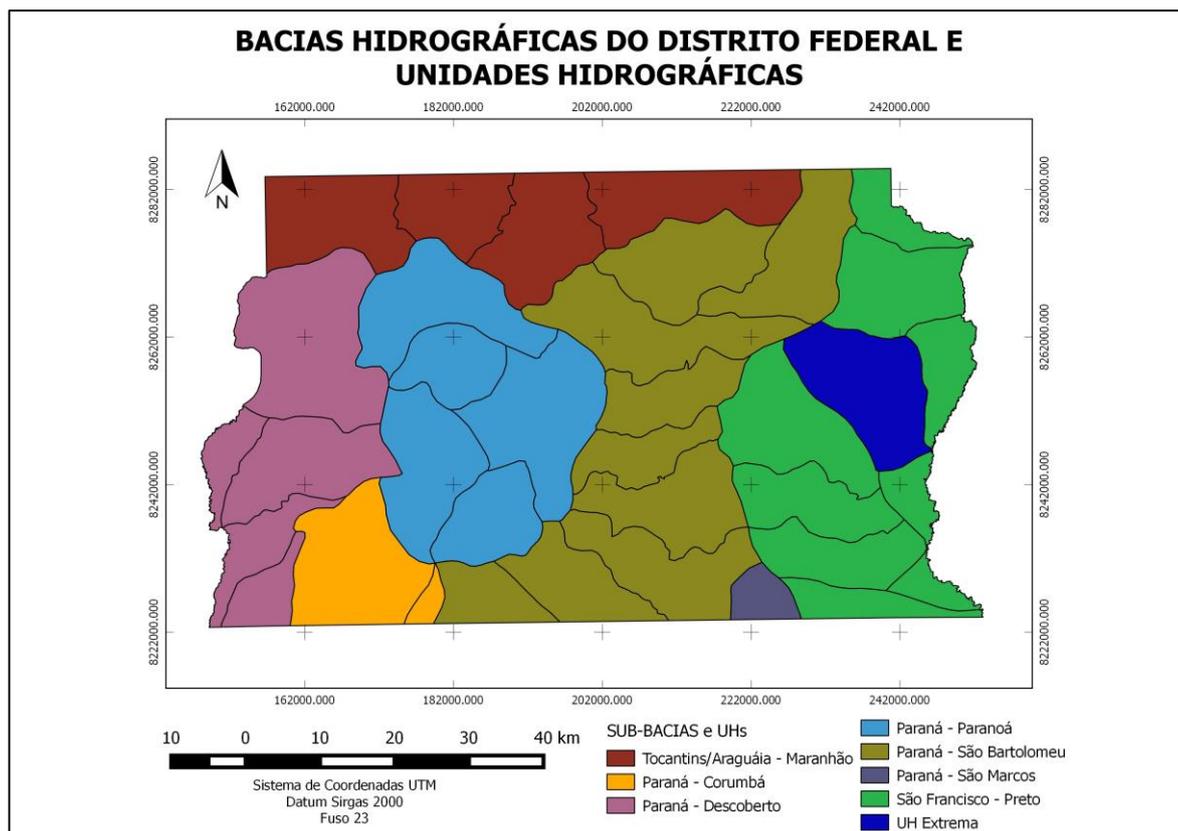


Figura 3: Bacias e Unidades Hidrográficas do Distrito Federal

Há no Distrito Federal uma acelerada onda de crescimento urbano, ligada principalmente à especulação imobiliária. Este crescimento opera tanto em nível vertical, em seu centro, resultante dos empreendimentos das mega construtoras, quanto de forma horizontal na periferia, onde ocorre a expansão das áreas mais carentes e o crescente processo de loteamento irregular. Apesar deste “boom” urbano, o DF tem se tornado um grande polo agrário, gerado principalmente por esta demanda urbana, além de ser dotado de boas áreas para o plantio.

Dentro desta perspectiva, observa-se uma crescente demanda por recursos hídricos, tornando-se de suma importância a compreensão do perfil hidrográfico do DF, de modo que se possa deprender tanto o comportamento quanto o consumo hídrico de cada região, de forma a atuar no sentido de evitar, ou pelo menos amenizar, a escassez da água.

O DF possui duas estações climáticas bem definidas. Um período que vai de setembro a abril, dominado por constantes chuvas, e outro período, de abril a agosto, com ausência de precipitações (Baptista, 1998; Campos, 2004), registrando, em certas ocasiões, mais de 120 dias de estiagem. Este fato climático acaba por interferir diretamente nos contextos econômico, social e político da região, dado que a escassez de água provoca perdas em lavouras e falhas no abastecimento humano, gerando agitações sociais e

culminando, por fim, em pressões políticas, além da eclosão de conflitos isolados por água envolvendo usuários descontentes com seus vizinhos.

A fim de se constituir uma fonte de alimentos próxima à capital, a agricultura foi estimulada na região, inclusive com empréstimos de terras a longo prazo e financiamentos diferenciados (Carneiro et al., 2007). Alguns trabalhos que analisaram o crescimento da agricultura ao longo das décadas de 1990 a 2000, constataram um grande incremento das áreas irrigadas, principalmente pelo uso da tecnologia de pivô central (Sano et al., 2005). Em 1992, a soma das áreas utilizadas para agricultura irrigada por pivôs era de 38,94 km² e em 2002 passou a ser de 70,21 km² (Sano et al., 2005) e em 2013 chegou a 132,12 km² (ANA & Embrapa, 2014).

Para a realização da análise comparativa de metodologias e aplicação do sistema, foi selecionada a unidade hidrográfica do Ribeirão do Extrema, situada na parte leste do DF e inserida na Bacia do Rio Preto, uma área basicamente voltada para agricultura e, portanto, com alta demanda de água (ADASA, 2012). De acordo com o Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (Distrito Federal, 2012), 73% da área da bacia (186,79 km², de um total de 255,26 km²) são compostos por lotes voltados à agricultura. No entanto, a unidade possui baixas vazões em seu rio principal, o Ribeirão Extrema. O rio, no ponto mais próximo de sua foz, apresenta uma vazão média de até 3100 l/s no mês de abril. Já no mês de outubro a vazão média chega a 800 l/s (dados da Estação Extrema DF-100 - 42450510) (Adasa, 2015).

O Distrito Federal é constituído por três domínios de aquíferos, o intergranular, o fraturado e o físsuro-cárstico (Gonçalves, 2012), sendo estes divididos em sistemas de acordo com a geologia e com os comportamentos hidrogeológicos. Campos e Freitas (1998) classificaram o domínio intergranular em P1, P2, P3 e P4, e o domínio fraturado em quatro sistemas, o Sistema Paranoá, sendo este dividido em cinco subsistemas S/A, A, R₃/Q₃, R₄ e o PPC, o Sistema Canastra, dividido em dois subsistemas, o F e o F/Q/M, o Sistema Bambuí e o Sistema Araxá.. Cada um desses sistemas e subsistemas apresentam um comportamento diferente em relação às medidas das vazões disponíveis e à condutividade hidráulica.

A geologia da Unidade Hidrográfica Ribeirão do Extrema é dividida em Neoproterozoico, representada pelo Grupo Bambuí e Meoproterozoico representada pelo grupo Paranoá (figura 4).

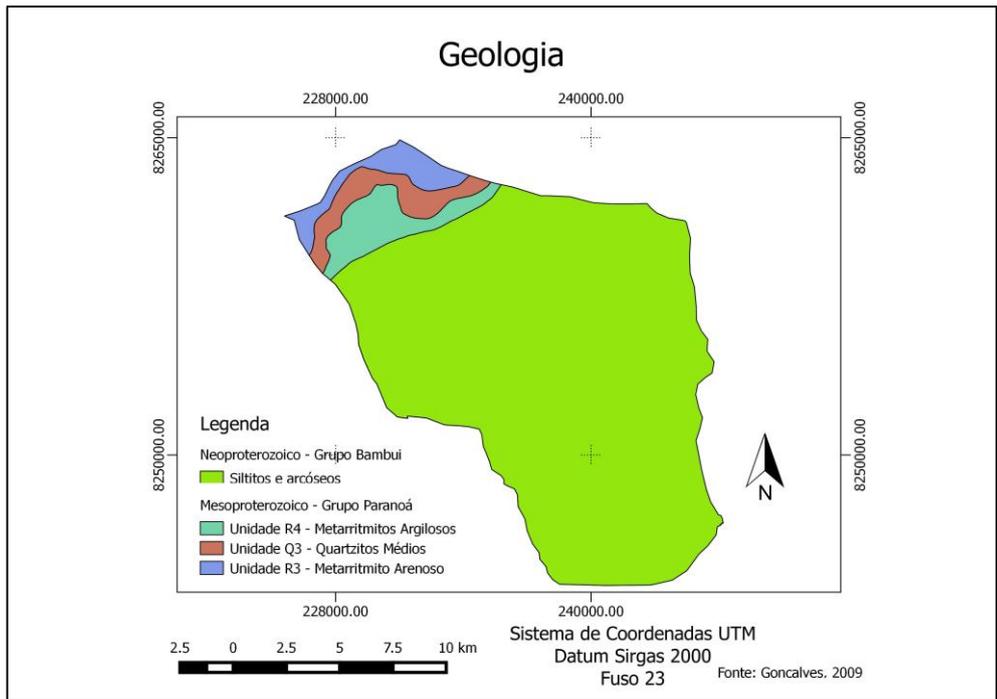


Figura 4: Geologia da UH Ribeirão Extrema

Com respeito ao domínio intergranular (poroso), na unidade em estudo é possível identificar os sistemas P1, P3 e P4 (figura 5), onde eles representam respectivamente 81,16%, 4,55% e 14,29% (Gonçalves, 2009) da área da Unidade Hidrográfica, respectivamente.

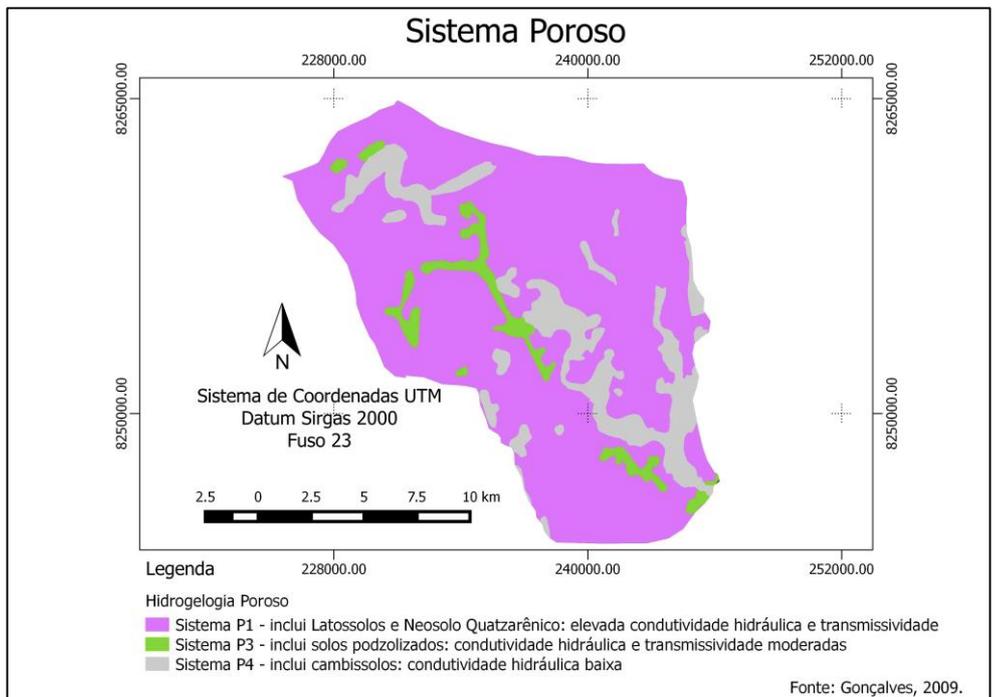


Figura 5: Distribuição Hidrogeológica do Domínio Poroso na UH Ribeirão Extrema

Para o domínio fraturado é possível identificar os sistemas Paranoá, com os subsistemas R3/Q3 e R4, e o sistema Bambuí (figura 6), possuindo, respectivamente, 7,32%, 4,94% e 87,74% da área da unidade hidrográfica.

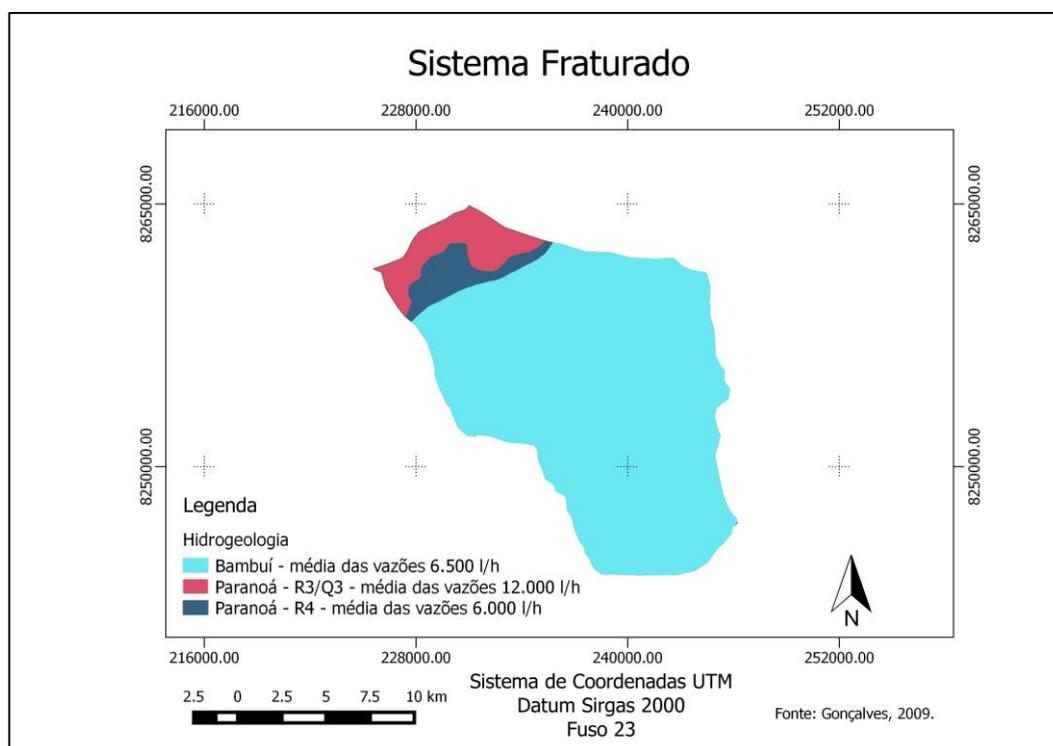


Figura 6: Distribuição Hidrogeológica do Domínio Fraturado na UH Ribeirão Extrema

Apesar do presente estudo estar direcionado ao uso da água superficial, entende-se que os sistemas superficial e subterrâneo estão interligados. Desta forma é importante que sejam verificadas as características climáticas e hidrogeológicas, por estarem elas relacionadas. É interessante observar que a região estudada possui características hidrogeológicas, de certa forma, bem homogêneas, visto que não há tantas variações de subsistemas e sistemas existindo, também, a predominância de alguns, como o P1 para o domínio intergranular e o Bambuí para o fraturado. Desta forma, pode-se supor que a velocidade do fluxo de base tende a ser próxima da homogeneidade em toda a bacia.

A classificação pedológica proposta pela Embrapa (1978, atualizado), divide o Distrito Federal em 9 tipos de solos, são eles: Gleissolo Háptico, Latossolo Vermelho Amarelo, Neossolo Flúvico, Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho, Argissolo Vermelho Eutrofico + Chernossolo Háptico, Cambissolo Háptico e Plintossolo Pétrico. Para a Unidade estudada é possível identificar os tipos de solo Cambissolo Háptico, Gleissolo Háptico, Latossolo Vermelho Amarelo, Neossolo Quartzarênico e Latossolo

Vermelho (figura 7), onde cada um representa respectivamente 14,29%, 4,55%, 4,28%, 0,89% e 75,98% da área da Bacia (Distrito Federal, 2012).

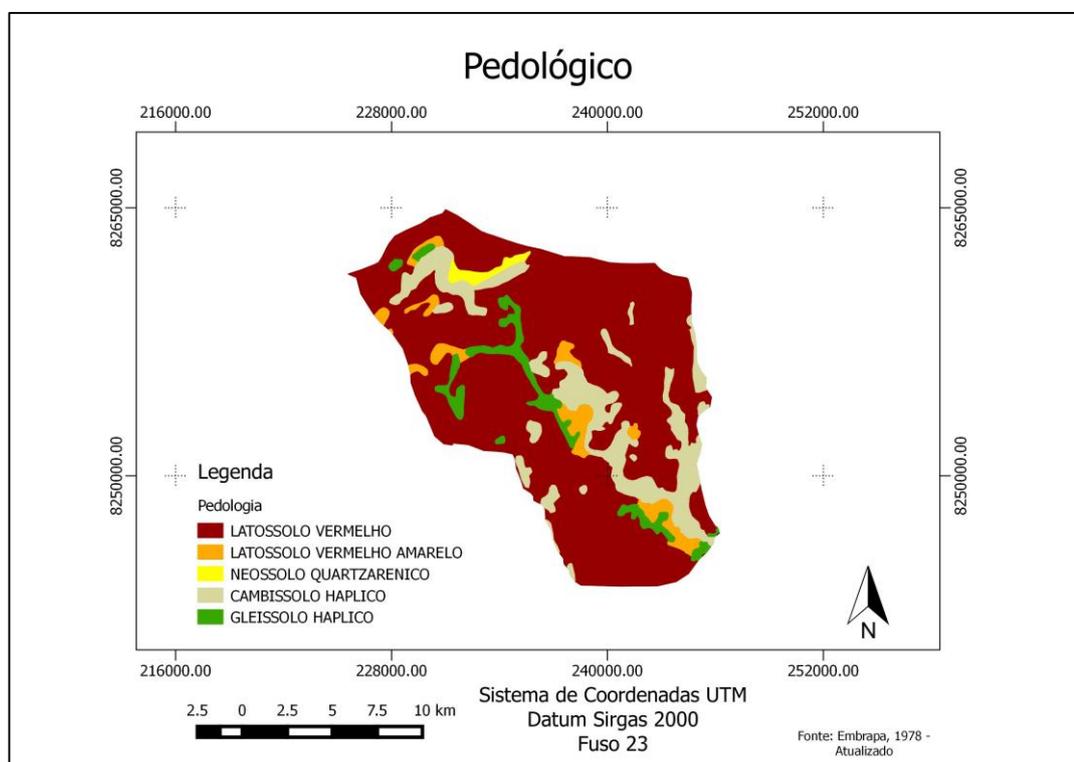


Figura 7: Distribuição Pedológica na UH Ribeirão Extrema

Como foi verificado na análise hidrogeológica, também é possível perceber certa homogeneidade pedológica nesta Unidade Hidrográfica, onde 75,98% da região é compreendida por um mesmo tipo de solo, Latossolo Vermelho. Vale destacar também, que o Gleissolo Háplico (4,55%) e o Cambissolo Háplico (14,29%) se concentram, predominantemente, nas regiões de mata ciliar.

As características hidrogeológicas, pedológicas e de uso e ocupação do solo permitem que se perceba um comportamento hidrológico homogêneo na região, isto é, as taxas de infiltração, escoamento superficial e sub-superficial tenderão a ser as mesmas.

Do ponto de vista do comportamento pluviométrico do DF, Sampaio & Costa (2012), que analisaram dados de chuva de 1978 até 2008, encontraram variações entre 1500 e 1800 mm na região sul do Distrito e variações entre 1200 e 1500 mm no restante desta unidade da federação. Já Batista (1998) aponta que a média pluviométrica na região é da ordem de 1500 mm. Em estudo recente, Alves et al. (2015) analisaram dados dos últimos cinco anos e identificaram que o Distrito Federal se comporta de maneira bem heterogênea, tanto espacialmente, como temporalmente, registrando variações em estações

próximas, alternâncias anuais significativas de valores da ordem de 200 mm por exemplo. No entanto, para a unidade hidrográfica estudada e utilizando-se das mesmas estações que Alves et al. (2015), não foram encontradas diferenças significativas espacialmente.

3. Capítulo III - Gestão dos recursos hídricos

3.1 Uma reflexão sobre a gestão dos recursos hídricos

Na conjuntura do século XXI algumas constatações, embora parecendo óbvias, devem ser levadas em consideração. Afinal, tendo-se em vista o processo de crescimento populacional, algumas assertivas podem ser identificadas, como a expansão das áreas urbanas, a necessidade de geração de maior quantidade de energia e o aumento da produção, tanto industrial como de alimentos. Para essas assertivas, duas conclusões podem ser apontadas: é necessário mais água para atender essas demandas e o necessário controle dos resíduos produzidos nestes processos.

Assim, evidencia-se uma particularidade, que não é recente, e cuja atenção a ela se mostra cada vez mais indispensável: a gestão dos recursos hídricos, tanto no gerenciamento das múltiplas demandas, como no gerenciamento das ofertas (MMA, 1997). Este pensamento sobre a necessidade de gestão dos recursos hídricos pode ser encontrado desde as civilizações mais antigas. Cruz (2001, p.36) aponta que em 3750 a. C. já existiam sistemas coletores de esgoto em Nipur (Babilônia) e que na Assíria foi construído o primeiro sistema de abastecimento público de água de que se têm notícias.

É possível encontrar na bibliografia recente diversos trabalhos que tratam dessa necessidade, bem como sugestões metodológicas para essa gestão. No Brasil, a Lei nº 9.433/1997, em seu artigo 11º, determina que a gestão dar-se-á, dentre outros instrumentos que elenca, por meio do regime de outorga de direito de uso, que busca a implementação do controle quantitativo e qualitativo dos usos da água, de forma a permitir o pleno acesso a este bem. Tal ferramenta abre para o Estado a possibilidade de articular a oferta e a demanda, de acordo com os critérios que julgar mais adequados.

Para tanto, primeiramente, é importante destacar que o uso da água pode ser identificado como consuntivo ou não consuntivo, isto é, o consuntivo se dá quando, após o uso, a quantidade de água retornada é inferior àquela retirada, já o uso não consuntivo ocorre quando a quantidade retornada é praticamente a mesma que a retirada.

Com relação a esses tipos de usos, Lanna (1993) coloca que podem ser identificados três tipos de conflitos:

a) Conflitos por destinação de uso: quando os usos são definidos de forma divergente em relação às políticas de governo;

b) Conflitos de disponibilidade qualitativa: quando há necessidade de água e os mananciais encontram-se poluídos. Este fato acaba se acentuando quando ocorrem as

estiagens, em virtude do aumento da demanda e da diminuição da capacidade de depuração dos rios;

c) Conflitos de disponibilidade quantitativa: quando os diversos usos consuntivos entram em conflito, em relação ao manancial utilizado para o abastecimento.

Tendo em vista estas considerações, ao longo de século XX alguns momentos identificados a seguir podem ser pontuados por sua relevância, já que foram fundamentais para a construção das atuais concepções.

A Organização das Nações Unidas (ONU), em 1972, organizou a 1ª Conferência Mundial sobre o Homem e o Meio Ambiente, em Estocolmo, Suécia. Nesta Ocasão foi publicado um documento intitulado “A Declaração da Conferência das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente Humano – 1972”, que pode ser entendido como um dos primeiros textos de caráter mundial em que o meio ambiente é colocado em questão, tentando-se traçar diversos princípios gerais internacionais. Este texto, em seu cabeçalho, afirma que esta conferência “atenta à necessidade de um critério e de princípios comuns que ofereçam aos povos do mundo inspiração e possam guiá-los para preservar e melhorar o meio ambiente humano (ONU, 1972)”.

No quinto princípio, enunciado naquele documento, encontra-se a determinação de que recursos como a água devam ser empregados de modo a se evitar o seu esgotamento, a fim de que toda a humanidade compartilhe dos benefícios de sua utilização.

Conforme o movimento internacional foi tomando corpo, a ONU convidou a médica Gro Harlem Brundtland, ex-Primeira Ministra da Noruega, para presidir a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento. Em abril de 1987 (ONU, 2016) essa Comissão elaborou um documento intitulado “Nosso Futuro Comum”, conhecido como Relatório Brundtland, que direciona os olhares para a compreensão da “aceleração da deterioração dos recursos naturais e ambientais e as suas consequências para desenvolvimento econômico e social”. O texto trabalha no sentido de que se deva acreditar no desenvolvimento sustentável, o que implicaria em suprir as necessidades atuais sem “comprometer a habilidade das futuras gerações suprirem suas próprias necessidades (ONU, 1987)”. Assim, o desenvolvimento sustentável passaria a fazer parte das agendas internacionais, ou seja, o uso equitativo dos recursos naturais e o comprometimento com o amanhã começariam a ser pensados de forma mais abrangente.

Em 1992 foi realizada a Conferência Sobre a Água, em Dublin que, em seus princípios, entendeu que “a água tem um valor econômico em todos os seus usos e deve ser entendido como um bem econômico”, e “dentro deste princípio, é vital reconhecer o direito

básico de todo ser humano a ter acesso à água potável e ao saneamento básico, a preços justos” (ONU, 1992 a).

No mesmo ano, foi realizado no Rio de Janeiro o evento que ficou conhecido como Eco-92, buscando ser um encontro onde os diversos países presentes assumiriam compromissos importantes no que se referisse ao meio ambiente. Um dos produtos desse encontro foi o documento que ficou conhecido como Agenda 21, o qual em seu Capítulo 18, que trata do tema recursos hídricos, é esboçado que o principal objetivo seria assegurar que se mantivesse “oferta adequada de água de boa qualidade para toda a população do planeta”, buscando também a preservação das “funções hidrológicas, biológicas e químicas dos ecossistemas, adaptando as atividades humanas aos limites da capacidade da natureza (ONU, 1992 b)”.

No Brasil, pode-se encontrar um primeiro aparato legal de proteção aos recursos hídricos em 1934, por meio do Código das Águas que trata, dentre outros temas, da definição da dominialidade das águas e ressalta, em seu texto introdutório, que a legislação da época estaria obsoleta. A questão da dominialidade seria alterada posteriormente por meio da Constituição Federal de 1988. O mesmo texto introdutório informa que se torna necessário modificar esse estado de coisas, dotando o país de uma legislação adequada que, de acordo com a tendência da época, permitisse ao Poder Público controlar e incentivar o aproveitamento industrial das águas. Ou seja, o foco do uso da água estava voltado predominantemente para a economia, sendo que o Ministério que exercia a gestão desses recursos era o Ministério da Agricultura. A Lei em comento também trata das concessões para a geração de energia a partir dos recursos hídricos.

Assim, ao longo do século XX, o pensamento econômico vai ganhando contornos ambientais e, embora já houvesse no Brasil uma preocupação com os recursos hídricos na década de oitenta, tal pensamento foi encorpado por congressos, principalmente os organizados pela ABRH, como pode ser percebido na Carta de Salvador (ABRH, 2014 a) que trata, entre outros temas, dos usos múltiplos dos recursos hídricos, a descentralização e a participação no processo decisório quanto à gestão, bem como a criação de um sistema nacional de recursos hídricos e de um sistema de informações destes recursos. A Carta de Foz do Iguaçu 1989 (ABRH, 2014 b) define os princípios básicos da Política Nacional de Recursos Hídricos e as recomendações para a sua implementação.

Partindo deste preâmbulo, é importante destacar que já há muito tempo havia uma reflexão sobre a importância da água, mas foi paulatina a evolução da junção do pensamento à prática. No Brasil, conforme colocado, a outorga de uso da água é uma das

ferramentas mais importantes para a gestão dos recursos hídricos, e esta, atualmente, é concedida por meio de órgãos governamentais, isto é, o Estado que tem a função de gerenciar tanto a oferta quanto à demanda de água, atuando no sentido de conhecer os usuários e permitir a distribuição dos recursos.

Em 1997, com a edição da Lei nº 9.433/1997, o Brasil avançou muito na preocupação com os recursos hídricos. Esta Lei representou um grande avanço para o período, pois instituiu diversas ferramentas que visavam o gerenciamento dos recursos hídricos.

O primeiro ponto a ser destacado no texto legal é o artigo 1º, inciso III, que considera o consumo humano como o uso prioritário da água, embora no mesmo artigo, no inciso IV, haja a estipulação de que a gestão deve sempre proporcionar os usos múltiplos. Isto é, os recursos hídricos devem ser garantidos a todos os usos e para toda a sociedade, mas, na eminência de um conflito de usos, o uso prioritário é para consumo humano e a dessedentação animal.

Outro ponto importante, no inciso V, é o fato de se tratar a bacia hidrográfica como unidade para a implementação da política nacional, ou seja, os limites políticos não devem servir como limitantes para as políticas de gestão. Quando se tem esta preocupação, leva-se em conta toda a formação morfohidrogeológica e não delimitações institucionais.

Ainda no mesmo artigo, no inciso VI, outra questão é a busca por uma gestão descentralizada, em que os usuários e a população passam a ter voto na discussão das políticas ambientais. Soma-se que é possível, também, verificar uma preocupação com a relação entre o uso do solo e o dos recursos hídricos, já que aquele pode prejudicar a qualidade e a disponibilidade da água.

A outorga dos recursos hídricos, pontuada no artigo 5º, inciso 3º da Lei torna-se um dos principais instrumentos da política nacional de recursos hídricos, pois é a partir dela que se concede o direito ao uso da água e os órgãos gestores podem entender tanto a demanda como a disponibilidade desses recursos, uma vez que visa conhecer os usuários de água e fazer a justa distribuição deste recurso.

Esta Lei que foi e ainda é muito importante, já enfrenta alguns questionamentos. Pode-se citar, por exemplo, que a gestão das águas pura e estritamente em função da delimitação de uma bacia pode encontrar alguns entraves. Na hidrologia, a bacia hidrográfica define uma área onde toda água da chuva, bem como todas as contribuições superficiais e subterrâneas tendem a convergir para um mesmo ponto. No entanto, esta informação é imprecisa, haja vista que as conformações subterrâneas podem ter outro

desmembramento não visível e as contribuições superficiais podem ser afetadas por ações antrópicas. A urbanização de bacias, por exemplo, altera as características geométricas de uma bacia hidrográfica, principalmente em função da impermeabilização do solo, mas também pode-se citar a construção de drenagens pluviais, transporte de efluentes e abastecimento humano, onde a distribuição da água oriunda desses pontos acontece em função de um sistema hídrico que visa a melhor gestão do serviço, embora não priorize o retorno da água para os corpos hídricos, onde naturalmente estariam relacionados. Com isso, a água medida no ponto de convergência da bacia, levando em conta a formação topográfica e as vazões dos rios da região, pode não ser a esperada. Esse exemplo ressalta a necessidade da compreensão hidrológica da região analisada.

3.2 A compreensão da Hidrologia para a gestão dos recursos hídricos

Como visto, um olhar detalhado sobre a gestão dos recursos hídricos é de suma importância para o crescimento da sociedade e a compreensão do ciclo da água, em uma determinada região, é fator preponderante para a criação de normas e procedimentos para os seus diversos usos.

Silveira (2001) define o ciclo hidrológico como o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre.

Assim, tomando-se a chuva como um primeiro passo, esta vai lançar na superfície terrestre uma quantidade de água que pode ser grande ou pequena em função da região estudada, em função do que evaporou e também em função do vapor de água trazido pelo vento. Esta quantidade de água apresenta três possibilidades de destinação: ficar retida na cobertura vegetal, escorrer pela superfície na direção de calhas d'água, tendo como limite a bacia hidrográfica na qual está inserida a região, ou ficar parada, o que depende principalmente da formação topográfica da região e da cobertura do solo e seu funcionamento como obstáculo.

Quando as águas ficam paradas devido ao fato de o solo ser um meio, em sua grande parte, poroso, acabam por infiltrar-se a depender, principalmente, da composição do solo. Deste momento surgem três possibilidades principais: serem capturadas pelo sistema radicular das plantas, alimentarem um fluxo base na direção dos cursos d'água topograficamente mais próximos, ou infiltrarem-se, ainda mais, em partes profundas do solo, alimentando o domínio fraturado de águas (quantidade de água que fica localizada

abaixo do solo poroso, contida em fraturas de áreas rochosas). As águas que ficam paradas e aquelas que ficam retidas na camada vegetal também podem ser evaporadas e entrar novamente no ciclo (figura 8).



Figura 8: Ciclo da Água - Adaptado de John M. Evans/USGS-USA Gov - <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>

Os rios são alimentados pelas chuvas, mas nos períodos de seca, são abastecidos pelos fluxos de base das águas que infiltraram no solo nos períodos chuvosos, isto é, dependendo de quanto choveu pode-se ter uma estimativa do quanto de água estará disponível nos rios nos períodos de seca, embora se deva considerar para este cálculo a recarga dos aquíferos fraturados também provocada pela infiltração da chuva.

Este entendimento destaca a necessidade de se conhecer bem a área em estudo, tanto no que se refere ao ciclo hidrológico como também às relações topográficas, pois a chuva tende a se depositar na bacia hidrográfica, confluindo para o principal corpo hídrico da região.

O conhecimento da geometria de uma bacia também é de grande importância, pelo fato de tal característica definir o tempo de resposta para determinado evento de chuva. Bacias largas e planas tendem a ter um tempo de resposta maior e, por outro lado, bacias pequenas e declivosas têm um tempo de resposta menor. Esse fator ajuda a entender que em bacias mais planas a vazão dos rios não é tão afetada e tendem a permitir uma maior infiltração, gerando uma alimentação mais constante do fluxo base. Em bacias muito acidentadas, as vazões dos rios são muito afetadas, mas permitem uma menor infiltração o que representa uma menor alimentação pelo fluxo base. Este tipo de bacia tende a sofrer

mais com a erosão do solo e, dependendo de ações antrópicas de retirada de cobertura vegetal, esse fenômeno pode ser agravado gerando assoreamento, inundações e carreamento de casas nas encostas. Este tipo de bacia também sofre muito com a impermeabilização do solo, principalmente em áreas urbanas, em virtude do impedimento à infiltração das águas, aumentando a velocidade de escoamento.

3.3 Estações de monitoramento

Para o entendimento do comportamento das águas são utilizadas estações hidrometeorológicas, que têm a função de coletar dados de chuva e de nível de rios, entre outros dados, que servem para montar um perfil estatístico de cada região.

Desde o início do século passado, a Comissão de Estudos de Forças Hidráulicas, no âmbito do Serviço Geológico e Mineralógico do Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio começou a fomentar de maneira gradativa a utilização das estações de monitoramento, evoluindo a metodologia e ampliando os locais monitorados, surgindo embriões de órgãos como Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e o extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE).

A partir de 1970, o DNAEE empreendeu esforços para criar um sistema nacional de informações hidrológicas, culminando com o Projeto Hidrologia, em 1972, que dividiu o território nacional em oito grandes bacias hidrográficas, a fim de facilitar o monitoramento e codificar as respectivas estações de monitoramento, além de executarem ações no sentido de fixação de normas e procedimentos de operação, coleta, análise e processamento dos dados hidrológicos, resultando na publicação de um catálogo de informações hidrológicas com o inventário das estações localizadas nos cursos d'água e fora deles (INDE, 2016). Durante muitos anos a rede de monitoramento havia ficado adstrita à Região Sudeste, sendo ferramenta de apoio fundamental à geração de energia elétrica e, também na região nordeste, a fim de dar suporte às decisões relativas às grandes secas desta região.

Gradativamente, esta rede foi ampliada para outras regiões do país de forma a abranger o monitoramento da maior parte do território nacional. Após diversas mudanças administrativas na estrutura federal, a rede de monitoramento foi transferida para os cuidados da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Companhia de Pesquisa de Recursos Mineirais (CPRM) que, além de ampliar a rede existente, a dividiu em duas redes. A primeira, a rede básica, é composta de estações permanentes cuja finalidade é o

levantamento de informações básicas para o desenvolvimento de projetos de gestão de recursos hídricos que demandam séries históricas de longo período. A segunda, redes de interesse de setores específicos, como o energético, o de navegação e o de irrigação, é composta por estações permanentes ou temporárias com o intuito de avaliar o potencial hidro-energético de uma determinada região, bem como a variação dos níveis e a velocidade dos rios em trechos navegáveis, além de fornecer informações relativas ao volume e níveis com a finalidade de atender a projetos de irrigação (Vieira, 2011).

Desta forma, órgãos como a ADASA (Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal), a ANA (Agência Nacional de Águas), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE - São Paulo), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), além de muitos outros órgãos estaduais e federais, têm unido esforços localizados e gerais para ampliar esta rede de monitoramento de forma a atender cada vez mais a uma extensão maior do território e prover informações confiáveis e constantes que possam auxiliar o planejamento de ações governamentais. A rede composta pela união das estações de todos os órgãos é um dos módulos do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, que é gerenciado pela ANA, responsável pela recepção dos dados dos diversos órgãos, além da manutenção e operação de sua própria rede e da disponibilização destes dados para a população. Estes dados podem ser acessados por meio do sítio eletrônico <http://www.ana.gov.br/portalsnirh/Esta%C3%A7%C3%B5esdaANA/tabid/359/Default.aspx>, onde constam os dados de todas as estações pertencentes aos órgãos de colaboração. Assim, para uma correta gestão dos recursos hídricos, é necessária uma rede hidrometeorológica bem distribuída e confiável que possa gerar uma série histórica onde seja possível o conhecimento da região analisada, identificando os períodos de estiagem e cheia, as vazões críticas de seca ou inundação e os trechos mais delicados nos quais devem ser implementadas políticas públicas para prevenção de eventos críticos.

A partir desta compreensão, alguns critérios para a concessão de outorga começaram a ser desenhados, pautados principalmente nas questões hidrológicas e topográficas da região, buscando uma gestão dos recursos hídricos mais eficaz e próxima da realidade.

3.4 Critérios para a outorga

Entendendo a outorga como importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos, é necessário um olhar atento sobre os seus critérios e métodos de operação. Pereira & Lanna (1996) propõem uma definição de critérios para a outorga dos direitos de uso da água, onde deve ser adotado um valor de referência, que será usado para determinar o limite de uso do curso d'água. Tal limite visa garantir o atendimento tanto de demandas prioritárias, como o abastecimento público e a manutenção da vazão mínima do rio, como de outras demandas, a exemplo da agricultura. Os mesmos autores também colocam que a vazão de referência $Q^{7,10}$ tem sido uma das referências mais utilizadas no Brasil. Esta vazão é muito rígida, pois se verifica, durante toda a série histórica, uma vazão mínima que possa ocorrer durante 7 (sete) dias consecutivos e que tenha como tempo de retorno 10 (dez) anos. O seu cálculo se dá da seguinte forma: toma-se a média de um ciclo de sete dias consecutivos a partir do primeiro dia do ano, isto é, a média do 1º ao 7º dia, depois do 2º ao 8º dia e assim por diante, obtendo para aquele ano a menor média durante sete dias, feito isso, reúnem-se todas essas médias, ordenando-as crescentemente, determinando uma probabilidade de não excedência, tida como $F(X)$, e ajustando-se a uma curva de distribuição de probabilidade, sendo a mais utilizada a de Gumbel e a Log-Normal (Naghetini & Pinto, 2007). Em seguida, determina-se o tempo de retorno $T(x) = 1/F(x)$ (Sarmiento, 2007; Bezerra, N.L, 2001; Cassie, D. & El-Jabi, N., 1995). Deve-se destacar que apesar do rigor desta média, há um risco de 10% de ocorrerem vazões iguais ou menores que a $Q^{7,10}$ em qualquer ano (Tucci, 2009).

Cruz (2001) faz uso de algumas dessas vazões de referência, criando diversas seções de análise hidrológica em uma determinada bacia, e decrementando destas vazões as outorgas já emitidas para cada seção, obtendo, portanto, um melhor acompanhamento dos cursos d'água. Em seu trabalho também é feita uma análise de diversos tipos de vazões de referência, como a $Q^{7,10}$ (m^3/s), e as curvas de permanência Q_{95} e a Q_{90} .

A Q_{95} e a Q_{90} retornam a probabilidade de que em 95% ou 90% do tempo, respectivamente, seja encontrada uma vazão igual ou superior à determinada. Para o cálculo, coloca-se em ordem decrescente todas as vazões (v) do rio em análise, atribuindo um número de ordem (m) para cada vazão que vai de 1 até n medidas. A probabilidade “ P ” será dada em função de $P = 100 \times m/(v+1)$ e dessa forma a vazão que obtiver o valor de “ P ” superior a 95% ou 90% do tempo será a vazão de referência (Tomaz, 2010).

Maia (2003) sugere posicionamento semelhante a Cruz (2001), dividindo em seções de análise, mas propondo também, a correção mensal para a vazão de outorga, baseando-se na média das vazões mínimas de cada mês em toda a sua série histórica, visando, assim, o aumento da vazão outorgável.

Mendes (2007) já pondera o uso da vazão de referência $Q^{7,10}$ ou das vazões de permanência afirmando que estas são muito restritivas, longe da realidade e muito influenciadas pelas curvas probabilísticas utilizadas, implicando assim, no fato de que muitos rios são tratados como críticos, equivocadamente. Ele sugere a ampliação das redes de monitoramento, buscando-se o melhor conhecimento hidrológico dos cursos d'água, bem como a ampliação do papel dos comitês de bacia, afinal a distribuição equitativa dos recursos hídricos depende de diversos aspectos, tais como hidrológicos, econômicos, ambientais e legais.

Tendo em vista estes aspectos, amplia-se a necessidade do gerenciamento da disponibilidade hídrica e, para tal, torna-se necessária a manutenção de uma base de dados hidrológica confiável e consistente. Esta base é decorrente da obtenção e armazenamento de diversas variáveis, que podem ser usadas em diversos modelos.

No Distrito Federal, o Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos - PGIRH (ADASA, 2012) implantou um modelo no qual a região é dividida em 40 unidades de análise (Unidades Hidrográficas), usando como vazão de referência a Q_{mmm} (média das mínimas mensais). A Q_{mmm} reflete as médias mais críticas historicamente, pois se toma o menor nível médio diário de cada mês para cada ano observado, e é calculada a média para cada mês separadamente. Assim, o órgão gestor se utiliza do mesmo procedimento proposto por Cruz (2001), decrementando da vazão de referência, as outorgas emitidas.

De forma a automatizar e facilitar o processo de gerenciamento, Collischonn & Lopes (2008, 2009) desenvolveram um sistema de controle de balanço hídrico para a bacia do Rio Grande e do Paraná, no qual podem ser realizadas análises tanto do impacto de captações de água, como o lançamento de efluentes, havendo também a possibilidade de serem visualizados os cursos de água críticos. O modelo proposto utiliza como valores de referência a Q^{95} , e para a regionalização hidrográfica são observados os valores da rede fluviométrica sendo, em seguida, interpolados a partir do método de proporção de áreas. A técnica de regionalização hidrográfica consiste em estimar dados hidrológicos de um ponto a partir de dados de outros pontos que sejam hidrológicamente homogêneos. O método da proporção de áreas é um dos seus métodos onde o dado de um trecho é transportado para

outro em função da proporção da área de drenagem do ponto de dado conhecido e da área do ponto desejado.

Trabalho semelhante foi proposto por Euclides et. al. (2012), que vem desenvolvendo e aperfeiçoando um sistema de gestão de recursos hídricos denominado Atlas Digital das Águas de Minas (<http://www.atlasdasaguas.ufv.br>), este pode ser acessado via *web* de forma gratuita e permite a obtenção de informações hidrológicas como a relação entre a demanda e a disponibilidade hídrica em Q_{mlp} (vazão média de longo período, correspondente à média das vazões de todo o período de observação), bem como a situação hídrica de cada região hidrográfica de Minas Gerais. A aplicação tem como alicerce um Sistema de Informações Geográficas (SIG) associado a um conjunto de ferramentas para cálculos hidrológicos.

Nesse sentido, a fim de se buscar uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, a ADASA foi incumbida de instalar, operar e manter uma rede hidrometeorológica de monitoramento superficial (Distrito Federal, 2008), que tem a função principal de implantar, através das coletas de diversos dados hidrológicos, uma política atual e dinâmica de gerenciamento dos recursos hídricos do DF.

Observando mais atentamente a área de estudo deste trabalho, pode-se constatar que o crescimento populacional e o aumento de áreas cultivadas dentro do Distrito Federal, nas últimas décadas, têm ampliado em muito a demanda por recursos hídricos. Considerando-se as séries históricas das estações já instaladas na região, podem ser constatadas variações no perfil hidrológico em função das diversas necessidades hídricas. Estas variações vão desde a alteração do perfil transversal propriamente dito, como também alterações na vazão dos cursos d'água (ADASA, 2012).

Nesse contexto, torna-se relevante, para os órgãos competentes, aprimorar o monitoramento dos usos dos recursos hídricos, principalmente para a concessão da outorga de águas superficiais que, no Brasil, é função exercida pelo Estado. Este monitoramento passa pela operação e manutenção de estações hidrometeorológicas, como também pelo controle da oferta e da demanda hídrica.

3.5 Regionalização hidrológica

Apesar das estações hidrometeorológicas fazerem o monitoramento dos corpos hídricos, este acompanhamento se dá de forma pontual, ou seja, ele se dá apenas onde está localizada a estação. Desta forma, se o pedido de outorga for de um local distante da

estação, não será conhecida a disponibilidade hídrica neste ponto. Assim, para se lidar com questões relativas a esta situação, foi criada uma técnica chamada regionalização hidrológica de vazões que tem como meta, a transferência de valores obtidos em uma estação, para um ponto onde não há monitoramento. Além disso, como Tucci (2001) coloca, é muito difícil a manutenção de muitos pontos de monitoramento, existindo assim locais com poucos pontos de monitoramento ou com estações muito recentes que não representam uma amostra significativa, dependendo de dados de outras estações mais antigas.

Tucci (2001) ainda menciona que a regionalização pode ser usada para explorar melhor amostras pontuais, melhorando estimativas e facilitando a verificação da consistência de séries hidrológicas.

Nerc (1975), Eletrobrás (1985), Tucci (2001) e Naghettini & Pinto (2007) destacam diversas técnicas de regionalização hidrológicas, onde todas elas se utilizam de técnicas estatísticas para a transferência do dado. Em linhas gerais, essas técnicas consistem em se obter características fisiográficas, pedológicas, geológicas, climáticas e outras, para buscar uma relação de proporcionalidade entre a vazão observada no ponto de monitoramento e a desejada em um ponto específico.

Uma das mais utilizadas técnicas de regionalização (Tucci, 2001; Naghettini & Pinto, 2007) consiste em buscar uma função que relacione a vazão, com as características da região. Assim, os dados são inseridos em um modelo de regressão linear, onde se busca encontrar as características que mais se relacionem com a vazão, para isso, elementos como coeficiente de correlação entre variáveis e o coeficiente de determinação, obtidos no processo, são muito importantes na ajuda da composição de um modelo.

Essas características podem ser consultadas em trabalhos específicos ou pesquisadas em campo. Em regra, a característica que mais se relaciona com a vazão é a área de contribuição (Cawley & Cunnane, 1993; Caissie, D. & El-Jabi, N., 1995; Naghettini & Pinto, 2007), haja vista que quanto maior a área, maior será a superfície de captação da chuva. A obtenção de algumas dessas características, como a área de contribuição hidrográfica, comprimento do rio, tipo de solo e outras, podem ser facilmente obtidas por meio de geotecnologias quando se já dispõe de dados geoespaciais.

Assim, dentre as principais ferramentas de monitoramento disponíveis, as geotecnologias destacam-se como importante subsídio para as decisões dos gestores públicos, tanto pelos recursos inerentes, como pela praticidade. Além disso, a precisão

dessas informações pode servir como embasamento para o aprimoramento das políticas públicas e das normas de uso dos recursos hídricos.

4. Capítulo IV - Geoprocessamento como ferramenta de suporte a gestão dos recursos hídricos

4.1 O Geoprocessamento e o meio ambiente

Segundo Câmara e Davis (2001), o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. Este campo do conhecimento, de certa forma, herda os conhecimentos técnicos da cartografia, ciência esta que é responsável pela construção de mapas e cartas topográficas

Segundo Kitchin et al. (2009), a arte de criar mapas data dos primeiros esforços humanos para a criação de representações pictóricas do mundo que os cercava, desenhando em paredes ou cavernas. De acordo com Ormeling (1984) e IBGE (2016) o conceito de Cartografia mais aceito é o da Associação Internacional de Cartografia (AIC) no qual ela se apresenta “como o conjunto de estudos e operações científicas, técnicas e artísticas que, tendo por base os resultados de observações diretas ou da análise de documentação, se voltam para a elaboração de mapas, cartas e outras formas de expressão ou representação de objetos, elementos, fenômenos e ambientes físicos e socioeconômicos, bem como a sua utilização”.

Com o advento da tecnologia digital na década de 60, a cartografia começou a passar por muitas transições, culminando com o Sistema de Informações Geográficas (SIG), um conjunto de aplicações computacionais relacionadas à manipulação da informação geográfica (Kitchin Thrift & Goodchild, 2009). Ainda segundo Kitchin (2009). As definições tanto do SIG quanto da cartografia se sobrepõem, embora fossem mais claras na década de sessenta, onde podia se distinguir que a cartografia era focada no papel e o SIG nos sistemas digitais. De acordo com Medeiros & Pires (1994) e Maguire (1991) há incontáveis definições com relação ao SIG, sendo que, para o segundo autor, a definição mais genérica se traduz em um “sistema de informação digital cujos registros são entendidos como geograficamente referenciados”.

De maneira geral, o Geoprocessamento foi fruto da atualização da Cartografia para o meio digital, agregando assim os recursos dos SIGs e seus aplicativos, tendo este

processo passado por alguns estágios. Primeiramente esses aplicativos eram somente responsáveis pela elaboração de mapas, onde o foco era a geração de um produto em papel. Com a união das técnicas de banco de dados à Cartografia, principalmente com a possibilidade da inserção dos dados de posicionamento geográfico e a inserção de ferramentas matemáticas e topológicas, o geoprocessamento começou a nascer como uma ferramenta de análise. Câmara e Davis (2001) mencionam que “Se onde é importante para seu negócio, então Geoprocessamento é sua ferramenta de trabalho”.

Assim, no que se refere à Cartografia, os mapas foram utilizados durante muito tempo como ferramenta de apoio em análises de meio ambiente, mas os mesmos serviam mais como apoio de localização e compreensão da área analisada. Nos últimos anos, com o advento das novas tecnologias, o geoprocessamento tem permitido diversos tipos de análises espaciais e tem sido fundamental para questões associadas ao meio ambiente.

Diversos trabalhos voltados para o uso do Geoprocessamento em análises ambientais têm sido desenvolvidos, bem como quanto ao uso desta técnica para análises relacionadas aos recursos hídricos (Moore, Grayson & Ladson, 1991). Assim, aponta-se esta ferramenta como uma importante aliada na gestão dos recursos hídricos.

Moore, Grayson, & Ladson (1991), apresentam uma revisão de diversos trabalhos que já apontavam o uso do geoprocessamento na área de recursos hídricos, sendo os de maior destaque aqueles de Tarboton (1991), O’Callaghan & Mark (1984) e Jenson & Domingue (1988), responsáveis por alguns dos algoritmos que serão usados nesse trabalho e que são referências internacionais. Estes trabalhos buscam principalmente entender como tratar a hidrologia no geoprocessamento e criar técnicas que otimizem as análises hidrológicas.

Em tempos recentes, essas técnicas passaram a ser usadas também na gestão dos recursos hídricos. Como exemplo pode-se citar Alves et al. (2013), que fizeram um estudo sobre o consumo de água na agricultura do DF, em áreas que se utilizam da técnica de irrigação por pivô central. O estudo conseguiu identificar um alto consumo de água, utilizando-se de imagens de satélites para identificar os locais onde se utilizava a técnica em questão, verificando depois a extensão das áreas ocupadas por tal método e relacionando com o quantitativo de água necessário para as culturas normalmente cultivadas na região. Tal estudo se apoiou totalmente em análises de Geoprocessamento, desde a utilização de imagens de satélite, ferramentas geoespaciais e cálculos matemáticos. O trabalho pontua que o uso dessas técnicas permite a identificação de áreas de cultivo que podem estar ilegais, isto é, sem outorga, ou que necessitariam de muito mais água do que

declararam necessitar, tendo em vista a área e o tipo de alimento cultivado. Este conhecimento pode ser muito útil para auxiliar no planejamento das ações de fiscalização, o que é muito importante para a gestão dos recursos hídricos.

4.2 A linguagem de programação *Python* e o Geoprocessamento

Dentro do campo da Tecnologia das Informações, existe uma importante base para qualquer ferramenta desta área: as linguagens de programação. Estas podem ter funções muito simples como a criação de um processo automático para preenchimento de células de planilhas eletrônicas, como mais complexas como a criação de um sistema operacional, o programa mais importante em um computador. Também existem diversos tipos de linguagem, simples como Visual Basic, utilizada principalmente para criação de rotinas automáticas para programas do pacote *Office* e complexas, como o C, utilizada para criação de Programas inteiros como o próprio Windows.

No presente trabalho far-se-á uso da linguagem de programação *Python*, escolhida, principalmente, pela integração com softwares de Geoprocessamento, como o *QGIS* e o *ArcGIS*, dois dos principais nesta área. Uma das vantagens dessa linguagem se deve à sua versatilidade, permitindo que o código produzido possa ser utilizado em aplicativos de Geoprocessamento que utilizam o *Python* como linguagem de extensão.

Além disso, como Lutz (2009) afirma, o foco desta linguagem reside na legibilidade, clareza e coerência. Trata-se de uma linguagem orientada a objetos onde os códigos são feitos para serem facilmente identificados, reutilizados e que permitam uma fácil manutenção, até mesmo para quem não participou da construção deles. O mesmo autor ainda aponta uma grande vantagem relacionada ao tamanho do código, o qual ajuda em muito na produtividade pois, tipicamente, possui de um terço a um quinto do tamanho de equivalentes em C++ ou Java, resultando em menos linhas para se escrever, corrigir e realizar a manutenção.

A linguagem *Python* também conta com uma ampla portabilidade entre plataformas, sendo extremamente fácil transportar os códigos de Linux para Windows, e vice-versa, por exemplo, bastando apenas copiar o código.

Há também uma vasta relação de bibliotecas de suporte portáteis e já compiladas, além de muitas bibliotecas de extensão como a *NumPy*, para cálculos numéricos que é tida como tendo um poder equivalente ao sistema de programação numérica Matlab (Lutz, 2009).

A opção por utilizar esta linguagem também se deve ao fato de possuir uma gama de ferramentas de alto nível para o desenvolvimento do geoprocessamento (Westra, 2013). Como exemplo de ferramentas de extensão, pode-se ainda citar a GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*) / OGR e o Proj4, ambas contendo diversas aplicações voltadas diretamente ao tratamento dos dados de Geoprocessamento e que serão melhor detalhadas posteriormente.

A linguagem possui um princípio filosófico ilustrado no texto **O Zen do Python**, escrito por Tim Peters (Alchin, 2010), que tenta sintetizar as ideias que devem orientar o programador, buscando-se sempre na simplicidade e objetividade no código. O texto é transcrito a seguir:

Bonito é melhor que feio.
Explícito é melhor que implícito.
Simples é melhor que complexo.
Complexo é melhor que complicado.
Plano é melhor que aninhado.
Esparsos é melhor que denso.
Legibilidade conta.
Casos especiais não são especiais o suficiente para quebrar as regras.
Embora praticidade vença pureza.
Erros nunca deveriam passar em silêncio.
A menos que explicitamente silenciados.
Diante da ambiguidade, recuse a tentação de adivinhar.
Deve haver um -- e preferencialmente só um -- modo óbvio para fazer isso.
Apesar de que daquela maneira possa não ser óbvia à primeira vista, a menos que você seja holandês.
Agora é melhor que nunca.
Embora nunca frequentemente seja melhor que *agora*.
Se a implementação é difícil de explicar, é uma má ideia.
Se a implementação é fácil de explicar, pode ser uma boa ideia.
Espaços são uma grande ideia -- vamos fazer mais desses! (Alchin, 2010)

Esta linguagem também tem sido utilizada em trabalhos nas áreas da ciência (Chudoba et al., 2013; Borchers, 2007) e modelagens hidrológicas (Lampert & Wu, 2015), obtendo muitos resultados positivos.

4.3 QGis, Saga, Grass

O Qgis, o Saga (SAGA Org, 2016) e o Grass (GRASS OSGeo Project Org, 2016) são alguns SIGs *open sources* que permitem a realização de diversas funções. O Qgis, por sua vez, permite a integração das ferramentas dos outros dois programas permitindo, assim, usá-las na mesma interface, sendo necessário apenas acessar a caixa de ferramentas. Também é possível acessar a partir do QGis os algoritmos provenientes da Gdal (Westra,

2013) e do Tudem (QGis Brasil Org, 2016 e Tarboton, 2016), ambos a serem tratados mais a frente.

4.4 GDAL/OGR e Proj4

Para este trabalho, prioritariamente, serão utilizadas bibliotecas de geoprocessamento *open source*, já consagradas, como a *GDAL/OGR* e a *proj4*. A *GDAL* foi inicialmente concebida para se trabalhar com dados *raster* e a *OGR* para dados vetoriais, estando hoje as duas parcialmente juntas (Westra, 2013). *Raster* denota um arquivo de dados matriciais, onde cada célula tem um valor como atributo, e a rigor é numérico. De acordo com Esri (2000), este arquivo é decorrente de câmeras e satélites imageadores, que gravam dados como valores de *pixel* (*picture element* – elemento de imagem), em um grid de duas dimensões. Um *pixel* é um elemento de célula de um *raster* e seus valores podem representar uma variedade de dados, podendo armazenar a reflectância da luz como parte de um espectro, valores de cor para uma fotografia, atributo temático como tipo de vegetação, valores de superfície ou elevação do terreno. Segundo Câmara et. al (1997), o termo *raster* designa células retangulares, mas na maioria das vezes é usado como termo genérico para representação matricial.

Segundo Goodchild (2012) os dados vetoriais, por sua vez, capturam os conteúdos de um mapa como uma coleção de pontos linhas e áreas, sendo que os pontos são representados por coordenadas, as linhas por *polylines* e as áreas por polígonos.

A Esri (2000) menciona que muitas das feições do mundo possuem a forma bem definida e os dados de vetores representam as formas das feições de maneira precisa e compacta, como um conjunto ordenado de coordenadas com atributos associados. Este tipo de representação suporta operações geométricas tais como cálculos de comprimento e área, identificação de sobreposição e interseções, e a procura por outras feições que são adjacentes ou próximas. De acordo com Câmara et. al (1997), um objeto geográfico é tipicamente representado no formato vetorial, ou seja, sua geometria é descrita utilizando pontos, linhas e polígonos. Linhas são formadas por sequencias de pontos e polígonos por sequencias de linhas.

Sendo feitas essas considerações, a *GDAL / OGR* permite a realização de tarefas básicas como a criação de um arquivo geoespacial, a inserção de um ponto, a construção de uma linha ou polígono, bem como tarefas mais complexas como a conversão de um arquivo em formatos diferentes, criação de ferramentas de análise espacial, fusão de

imagens etc. Basicamente, qualquer tarefa desempenhada por um aplicativo proprietário pode ser desenvolvida na *GDAL / OGR*, o que não significa que vai ser fácil a implementação, ou que não vá depender de outras bibliotecas de apoio. A *GDAL*, por exemplo, utiliza-se muito da *NumPy*, para se trabalhar com imagens orbitais, por se tratar de uma biblioteca que possui ferramentas avançadas para tratar de matrizes, permitindo assim a elaboração de cálculos matemáticos tanto na fórmula célula por célula, ou como um conjunto de células (Lutz, 2009).

A Proj4, por seu turno, viabiliza operações ligadas à Cartografia, propriamente ditas, tais como o estabelecimento da projeção cartográfica e do sistema de coordenadas, servindo mais como um suporte para a *GDAL / OGR* (Westra, 2013).

4.5 OMT-G e INDE

Quando se está tratando do espaço como meio físico ou, prioritariamente, do meio ambiente, é importante se buscar uma forma mais tangível de representá-lo, esta forma subsiste na criação de modelos. Christofletti (1999) menciona que a construção de modelos a respeito dos sistemas ambientais representa a expressão de uma hipótese científica, que necessita ser avaliada como sendo um enunciado teórico sobre o sistema focalizado. Esta avaliação configura-se como testes de hipóteses. Assim, a construção de modelos é um procedimento inerente à pesquisa científica.

Um modelo amplamente utilizado para a representação de dados geográficos é a *OMT-G (Object Modeling Technique – for Geographic Applications)*, baseado na *OMT (Object Modeling Technique)* (Borges et al., 2005). A premissa fundamental do modelo *OMT* é a de que o pensamento orientado a objetos representa um modo mais natural e intuitivo para as pessoas pensarem sobre a realidade (Rumbaugh et al., 1991). Tal modelo foi inicialmente aplicado em bancos de dados ligados apenas ao campo da TI (Tecnologia da Informação), buscando facilitar a forma de representar os objetos inseridos em um banco de dados. A *OMT-G* buscou adaptar tal modelo ao uso de dados geográficos, provendo primitivas para modelar a geometria e a topologia dos dados geográficos, oferecendo suporte a estruturas topológicas "todo-parte", estruturas de rede, múltiplas representações de objetos e relacionamentos espaciais. Além disso, o modelo permite a especificação de atributos alfanuméricos e métodos associados para cada classe (Borges et al., 2005).

São três conceitos principais: Classes, relacionamentos e restrições de integridade espaciais. Classes e relacionamentos definem as primitivas básicas usadas para criar esquemas estáticos de aplicação. Já a identificação de restrições de integridade espacial é uma atividade importante no projeto de uma aplicação e consiste na identificação de condições que precisam ser garantidas para que o banco de dados esteja sempre íntegro (Borges et. al, 2005).

A CONCAR (Comissão Nacional de Cartografia), pautada no modelo OMT-G, estabeleceu uma série de normas nacionais para a organização e estruturação de dados espaciais, desenvolvendo a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais, detalhada na ET-EDGV (Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais) (CONCAR, 2012). Foi também lançado um documento para a orientação da aquisição de dados geoespaciais ET-ADGV (Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais) (DSG, 2008).

Tendo este entendimento, houve uma preocupação em seguir os padrões adotados, visando garantir tanto um melhor tratamento dos dados, como uma interoperabilidade dos produtos oriundos deste trabalho, de forma a garantir o efetivo uso das ferramentas desenvolvidas.

4.6 Geoprocessamento e Análises hidrológicas

O Geoprocessamento possui uma gama de recursos que podem ser utilizados na hidrologia. Diversos tipos de operações hidrológicas podem ser facilmente feitas por meio desta tecnologia como a delimitação de polígonos de bacias, criação de trechos de rios, canais ou outros elementos representativos, geração de modelos digitais de terreno hidrológicamente consistidos, e outras construções topográficas. Além disso, é possível realizar análises hidrológicas por meio de pesquisas espaciais que envolvam a geometria dos elementos, bem como os atributos, permitindo fazer uma série de inferências que dependam dos dados disponíveis e dos tipos de perguntas (*queries*) formulados.

Para a realização destas funções e análises, alguns pressupostos têm que ser seguidos:

- a) Um banco de dados reunindo as informações hidrológicas que seja bem consistido e organizado.
- b) Dados vetoriais dentro dos parâmetros requeridos de exatidão locacional e de atributos, referenciados a um sistema espacial e que já tenham sido validados topologicamente.

Assim, na hidrologia, muitas análises dependem dos fatores topográficos da região, como declividade do terreno, uso e ocupação do solo, áreas de contribuição hidrográficas, formações geológicas e hidrogeológicas e outras. Além disso, outras informações espaciais também são importantes, como a distribuição de pontos de monitoramento e pontos de controle, verificação da distribuição das vazões e das chuvas, influência de drenagens pluviais em áreas de contribuição, cálculo de área para regionalização hidrológica, entre outros. Todas estas funcionalidades são acessíveis mediante a utilização de técnicas de geoprocessamento.

Um exemplo bem claro das possibilidades é o TauDEM (*Terrain analysis using digital elevation models* – análise de terreno usando modelos digitais de elevação), modelo proposto por Tarboton (2003), consistindo num conjunto de ferramentas de Modelo Digital de Elevação (DEM) para a extração e análise de informações hidrográficas de topografia. Trata-se de um modelo consistente que reúne diversas ferramentas para análises hidrológicas, como a geração de áreas de contribuição e o direcionamento de rios. Atualmente as ferramentas deste modelo possuem integração com o ArcGis e o QGIS, e podem ser utilizadas por linha de comando, sem interface gráfica.

A construção de modelos, a exemplo do TauDEM, tem proporcionado novas percepções do uso do geoprocessamento. Mas existem também outros modelos, que utilizam informações geográficas e hidrológicas já consistidas como o MGB-IPH de Collischonn et al. (2007) e também trabalhado por Fan & Collischonn (2014).

Também é possível elencar diversos trabalhos que fazem uso do geoprocessamento para efetuarem análises hidrológicas, a seguir serão citados alguns a título de exemplo.

Menezes et. al. (2012) fez um estudo avaliando a evolução do padrão de uso e ocupação do solo na bacia de contribuição do lago Paranoá, no Distrito Federal. O estudo analisou as diferentes formas de ocupação da área estudada ao longo de sessenta anos, e o que essas mudanças de padrão representaram para o processo de assoreamento do lago.

Gonçalves, et al. (2009) propuseram um método de integração de dados sobre o meio físico e o tipo de uso e cobertura vegetal da terra que fosse capaz de subsidiar os processos de gestão e outorga de direito de uso de água subterrânea no Distrito Federal. Fazendo a integração de mapas temáticos digitais, conseguiu-se estimar as condições de infiltração e recarga da área, a capacidade máxima de retenção de água dos solos, o índice de disponibilidade hídrica da região e o grau de favorabilidade à exploração de água

subterrânea. Com base na análise foram propostos critérios de outorga, norteadores da gestão de recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal.

Pessoa (2010) elabora um sistema apoiado no modelo MGB-IPH (Collischonn et. al., 2007), onde se utiliza do geoprocessamento para pré-processamento de dados, visando à aplicação de um modelo chuva-vazão, que pretende gerar estimativas da vazão de referência adotada para cada trecho em que a bacia do rio dos Sinos, Rio Grande do Sul, foi dividida. As vazões são regionalizadas para cada bacia e em função das outorgas concedidas é feita a atualização da vazão disponível. O sistema transporta o modelo hidrológico para um SIG, gerando uma aplicação de suporte a tomada de decisão. Neste sistema, todos os dados são trabalhados em ambiente de geoprocessamento, utilizando-se de algoritmos próprios do sistema ArcGis e também outros algoritmos criados pela autora, com vistas ao funcionamento do sistema.

4.7 Banco de dados espaciais

Atualmente é difícil imaginar uma aplicação que não se utilize de um banco de dados como item essencial para o seu correto funcionamento. Afinal, a maioria das aplicações têm como base a coleta e o armazenamento de dados, desde uma aplicação de compras simples que vise a armazenar dados de produtos como valores e quantidades em estoque, até uma que sirva para a realização de cálculos avançados de matemática.

Segundo Elmasri & Navathe (2010), um banco de dados é uma coleção de dados relacionados que abrangem desde fatos conhecidos que podem ser registrados e que tem significado implícito como nomes, números de telefone e endereços, onde tais dados podem estar armazenados em um disco rígido, por meio de aplicativos como o Microsoft Access ou Excel. No entanto, ainda segundo os mesmos autores, esta definição é muito genérica, haja vista, que se pode considerar a coleção de palavras que compõem uma página de texto relacionando dados como também constituindo um banco de dados. No entanto, a utilização comum do termo banco de dados é geralmente mais restrita. Um banco de dados possui algumas propriedades implícitas, como representação do mundo real, de uma coleção logicamente coerente de dados com algum significado inerente e projetado, e preenchido para uma finalidade específica.

Partindo desse pressuposto, um banco de dados pode armazenar diversos tipos de dados, inclusive os espaciais. No entanto, caso tais dados sejam armazenados em um banco

de dados comum, eles servirão apenas como dados de consulta, não permitindo a realização de consultas espaciais avançadas como as que envolvem relações topológicas.

De acordo com Yeung & Hall (2007) um banco de dados espacial é diferente do convencional banco de dados em dois importantes aspectos: O primeiro é a possibilidade de armazenar tipos de dados complexos como pontos, linhas e polígonos, garantindo suas referências geográficas e, o segundo, é a funcionalidade necessária para processar tais dados, usando operadores espaciais que são considerados mais sofisticados que os operadores tradicionais.

Assim, enquanto para um banco de dados convencional um conjunto de coordenadas em um determinado campo nada mais é do que um conjunto de dados por registro (linha), para um banco de dados geográfico essas coordenadas podem ser interpretadas tanto como ponto, linha ou polígono, dependendo de seu formato de origem. Desta forma, um banco de dados espacial é a estrutura adequada para receber e armazenar dados geográficos.

Um banco de dados pode ser mantido manualmente ou de forma computadorizada, e para esta última ele pode ser gerido por um sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) que é uma coleção de programas que permite aos usuários criarem e manterem um banco de dados de forma mais fácil. Um SGBD possibilita a realização de consultas (*queries*) para a obtenção de informações, atualização de dados, compartilhamento para determinados usuários e tornar o banco de dados acessível a outros aplicativos (Elmasri & Navathe, 2010). Além disso, é possível a criação de regras de validação e manutenção dos dados, criando padrões de entrada e restrições para cada tipo de dado, ou realizando atualizações automáticas de um determinado conjunto de dados para se adequarem aos padrões exigidos pelo usuário do banco de dados.

Os principais SGBD do mercado são *Oracle Database* (Oracle, 2016), *SQLServer* (Microsoft, 2016) e *PostgreSQL* (PostgreSQL, 2016), sendo que os dois primeiros são proprietário e o último é *open source* (código aberto). Neste trabalho, foi feita a opção em se trabalhar como o *PostgreSQL* por ser *open source*. O *PostgreSQL* começou com um projeto da Universidade da Califórnia, o *Berkeley Project* e se desenvolveu ao ponto de ter muitos recursos que raramente são encontrados em outros SGBD. Além disso, ressalta-se a facilidade em se estendê-lo, sem provocar mudanças na base e em muitos casos até mesmo sem necessitar de linhas de código, possuindo avançados recursos e performances muito otimizadas (Hsu & Obe, 2012).

O *PostgreSQL* inicialmente se tratava de um banco de dados convencional, no entanto, foi desenvolvida uma extensão (*engine*) que permitisse a manipulação de dados espaciais, o *PostGis* (PostGis, 2016). Esta é tida como a extensão espacial, de código aberto, mais poderosa, adicionando ao *PostgreSQL* a capacidade de trabalhar com diversos tipos de dados espaciais e mais de trezentas funções espaciais (Hsu & Obe, 2011).

4.8 Modelo digital de elevação hidrologicamente consistido

O modelo digital de elevação é um modelo numérico que possui uma representação matemática da distribuição de um fenômeno espacial que se dá em uma parte da superfície terrestre (Felgueiras, C. A. & Câmara, 2001). Ou seja, pode ser entendido como uma forma de descrever matricialmente o relevo de uma superfície, onde cada *pixel* terá sua respectiva cota altimétrica permitindo, assim, análises do relevo. Estes modelos podem ser obtidos de *rasters*, como os provenientes do programa *SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)* ou obtidos de vetores de curvas de nível e pontos cotados.

O uso de modelos digitais de elevação têm se tornado mais acessível desde os primeiros algoritmos (O'Callaghan & Mark, 1984; Jenson & Domingue, 1988) e vêm sendo utilizado em muitos trabalhos de hidrologia, na forma de modelos hidrologicamente consistidos, como aponta Baena et al. (2004), Pelletier, J. D. (2013) e Jones (2002). O processo pode ser visto em detalhes nos trabalhos de Anselmo (2008), Ramos (2003), Bazílio et al. (2013) e Tarboton (2003). Para a elaboração de um modelo consistido deverão ser seguidos uma série de passos e, para cada um deles, já existe um algoritmo específico. Devido à grande complexidade do processo, há diferentes algoritmos com diferentes princípios, para uma mesma fase (Bieniek, 2000; Wang & Liu, 2006; Barnes, Lehman & Mulla, 2014; Senevirathne & Willgoose, 2013; Callow, 2007).

Para este trabalho, foi seguido o processo como explicitado por Tarboton (2003) e Anselmo (2008), que pode ser sumarizado na figura 9, onde também é mostrado o aplicativo utilizado para cada fase:



Figura 9: Fluxograma de geração da base para composição dos dados da área de contribuição e trechos de drenagem

4.8 Open Sources e o Raspberry Pi

Este trabalho foi pensado no intuito de gerar uma solução gratuita, prática e facilmente operável. Desta forma, buscou-se criar uma aplicação que pudesse ser operada por pessoas com pouca ambientação em hidrologia e geoprocessamento e que também oferecesse um baixo custo de implantação. Assim, todo o trabalho foi desenvolvido utilizando aplicativos de código aberto, de forma que a manutenção da aplicação não se tornasse dispendiosa.

O termo **código aberto** (*open source*) foi formalmente criado em 1998 por Perens (1998), que definiu como princípios, entre outros pontos, a livre distribuição do programa e do seu código fonte, permitindo a modificação do programa; que não houvesse discriminação de quem viesse a utilizá-lo ou em que área seria utilizado, entre outros requisitos. Desta forma, este trabalho se preocupou em utilizar apenas softwares livres para elaboração da modelagem e construção do sistema, tendo todos os seus códigos disponibilizados em uma plataforma de domínio público, permitindo o amplo acesso a eles.

A fim de se verificar a capacidade do aplicativo em computadores de baixa capacidade, a plataforma escolhida para hospedar os dados e a elaboração do modelo foi o *Raspberry Pi*, um computador portátil que, embora se assemelhe a um telefone celular, permite que sejam executadas tarefas que demandem um maior poder de processamento, como a geração de um modelo digital de elevação por meio do *Qgis*, além da instalação de diversos programas como o *PostgreSQL*.

O *Raspberry Pi 2*, na versão B, utilizada neste trabalho, conta com um processador

de 900 MHz de 32 bits, o mesmo presente no iPhone 3G e no Kindle 2, construído sobre a arquitetura ARM11, 1 Gb de memória RAM, saída *HDMI Full HD* e alimentação de 5 volts e 1000mA. O mesmo não possui *disco rígido* interno, mas aceita diversos tipos de cartão Micro SD. O principal diferencial deste equipamento é seu preço, US\$ 35, valor garantido pela fundação *Raspberry Pi*, por meio de acordos com fabricantes, haja vista que a finalidade do equipamento é a pesquisa (Richardson & Wallace, 2013).

A escolha do *equipamento Raspberry Pi* e do Sistema Operacional *Linux* se deu principalmente pela praticidade e, também, por ser uma tentativa de se verificar a capacidade do aplicativo em computadores de baixa *performance*. No entanto, qualquer plataforma Desktop ou sistema operacional poderá hospedar o sistema proposto neste trabalho. O que deve ser levado em consideração é o tamanho da base. A título de exemplo, a geração de um modelo digital de terreno no aplicativo QGis, utilizando o processo IDW (*Inverse Distance Weighting* – Inverso do peso da distância) por meio da técnica do vizinho mais próximo, em um *hardware* possuindo um processador I5-2410 com 2,3 Ghz e 4 Gigas de memória RAM, demorou cerca duas horas e trinta minutos, ao passo que no *Raspberry Pi*, demorou cerca de cinco horas. Para as pesquisas relacionais e espaciais, os tempos foram similares. Assim, passa a ser uma decisão de projeto a escolha da plataforma e para o presente estudo a escolha foi satisfatória.

4.9 PgHydro

O PgHydro (PgHydro, 2016) é uma extensão ao PostgreSQL/PostGis, possibilitando a construção de um banco de dados hidrográfico diretamente no banco, composto por uma série de objetos hidrográficos como tabelas, consultas, funções e visões. Todos eles são considerados em conjunto para permitir a geração de um acervo de informações hidrográficas como a quantidade de trechos a montante, as áreas de contribuição hidrográfica de cada trecho etc. O projeto foi desenvolvido por Teixeira (2012) e Teixeira et al. (2013) e possui uma interface executável chamada AppBHO que se apresenta como um aplicativo que pode ser executado pelo Windows. No entanto, como a proposta deste trabalho seria desenvolver um aplicativo para o Linux, foi feita a importação das *tabelas (scheme)* e das ferramentas (*tools*) e executadas diretamente no banco PostgreSQL.

Os códigos do pgHydro estão todos em SQL (*Structured Query Language*, ou Linguagem de Consulta Estruturada), podendo ser executados diretamente no banco de dados ou por meio de uma implementação, de código específico.

5. Capítulo V - Análise comparativa entre métodos de regionalização hidrológica para fins de concessão de uso da água

5.1 Descrição da proposta metodológica

A escolha de uma metodologia adequada para a obtenção de disponibilidade hídrica é de fundamental importância para o aprimoramento da gestão dos recursos hídricos. Atualmente, o órgão gestor, responsável pela outorga de recursos hídricos no Distrito Federal, utiliza a técnica de regionalização hidrológica, para a aferição da vazão disponível em um ponto de uma bacia hidrográfica. O método utilizado atualmente é o proposto por Chaves et al. (2002), do tipo caso 1, que é um procedimento mais resumido do que aquele proposto por Tucci (2004), mais aceito na literatura especializada.

O propósito deste capítulo é verificar na unidade hidrográfica do Ribeirão do Extrema, Distrito Federal, se os resultados atingidos com a metodologia proposta por Chaves et al. (2002) são estatisticamente aceitáveis quando comparados com o método proposto por Tucci (2004). Além disso, verificar se esta análise comparativa poderia ser replicada para as outras sub-bacias do DF. Para isso, foram regionalizadas as vazões de referência utilizando-se os dois métodos, e verificados os erros relativos percentuais e o coeficiente de Nash & Sutcliffe (1970) para ambos os métodos. Para o método proposto por Tucci (2004), também foram realizados os testes F e t de *Student*, com a finalidade de se verificar a aceitabilidade da hipótese de homogeneidade entre os seus dados, isto é, se os dados obtidos pela metodologia, por exemplo, eram entre si estatisticamente homogêneos. Os testes t de *Student* e o F, bem como a regressão linear para o método de Tucci (2004) foram executados utilizando-se de rotinas presentes nas bibliotecas do *Python*.

Para o estudo foram utilizados dados de quatro estações fluviométricas e quatro pluviométricas localizadas na unidade hidrográfica, do período de 2009 até 2014 (Tabela 1 e Figura 10). As estações possuem dados obtidos por meio de medições de vazões mensais, além de contarem com registradores digitais de nível do rio e quantidade de chuva. Os pontos já possuíam curvas-chaves definidas, as quais foram utilizadas, juntamente com os dados de nível, na obtenção das vazões médias diárias. Utilizando-se do programa *LibreOffice*, foi obtida a média das mínimas mensais para cada estação.

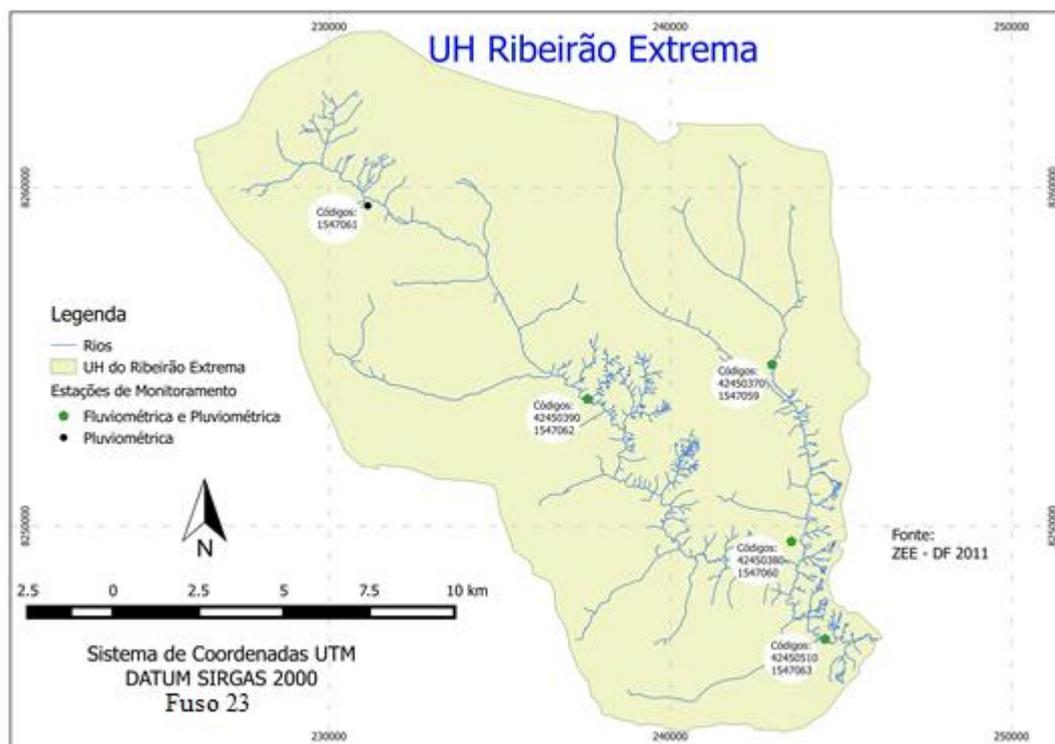


Figura 10: Unidade Hidrográfica Ribeirão do Extrema

Tabela 1. Estações da ADASA utilizadas

Estação	Tipo	Código	Latitude	Longitude
Lagoinha	Flu*	42450370	-15° 46' 21"	-47° 23' 56"
Barro Preto	Flu*	42450380	-15° 49' 11"	-47° 23' 39"
Extrema – VC 173	Flu*	42450390	-15° 46' 52"	-47° 26' 58"
Extrema DF 100	Flu*	42450510	-15° 50' 45"	-47° 23' 07"
Extrema – VC 173	Plu**	1547022	-15° 46' 52"	-47° 26' 58"
Lagoinha	Plu**	1547059	-15° 49' 11"	-47° 23' 39"
Extrema – DF 100	Plu**	1547063	-15° 50' 45"	-47° 23' 07"
Extrema	Plu**	1547061	-15° 43' 44"	-47° 30' 32"

* Flu: Fluviométria

** Plu: Pluviométrica

Para a análise dos dados foram desenvolvidos algoritmos em Python que pudessem verificar a correlação entre as variáveis, além de executarem os testes estatísticos e ajustar uma função, por regressão linear, para a unidade hidrográfica estudada. Tendo como base o método proposto por Tucci (2004), o qual teve como base o da Eletrobrás (1985) e Nerc (1975), foram verificadas quais variáveis atendiam ao modelo expresso pela equação 1.

$$Q_m = f(A, P, D, DD, L) \quad (1)$$

Em que:

A = área de drenagem;

P = precipitação média anual;

D = declividade do rio;

DD = densidade de drenagem;

L = comprimento do rio.

Este método consiste em se determinar uma função que relacione a vazão de referência a cada uma das variáveis morfológicas ou climáticas, buscando encontrar aquelas que apresentem a maior correlação com a vazão, em questão.

Como se trata de quatro pontos de monitoramento, apenas uma variável poderia ser escolhida para o modelo proposto, considerando-se que a quantidade de amostras deve ser maior que três ou quatro vezes a quantidade de variáveis utilizadas no modelo (Naghetini & Pinto, 2007). Desta forma, foi verificado pelo algoritmo a variável que detinha a maior correlação com a vazão de referência. Depois de escolhida a variável foi ajustada uma reta de regressão para a bacia.

Chaves et al. (2002) faz uso do que ele chama de casos (caso 1, 2, 3 e 4), os quais se utilizavam de dados de outras estações ou a jusante ou a montante para se calibrar o modelo de regionalização hidrográfica. Mas como o objetivo deste estudo é transferir a vazão de um ponto da foz da unidade hidrográfica para um ponto desejado a montante, o teste verificou o “caso 1”, que é o mais específico, tratando exatamente deste relacionamento, expresso pela equação 2:

$$Q_y = (A_y / A_x) \cdot Q_x \quad (2)$$

Em que:

Q_y = Vazão desejada em um ponto y;

A_y = Área de contribuição do ponto y;

A_x = Área de contribuição da bacia;

Q_x = Vazão de referência da bacia.

Assim, foi feita a regionalização hidrológica da vazão observada na foz da bacia, para cada ponto de monitoramento desta, utilizando-se de uma relação linear em função da área de contribuição hidrográfica.

Foi feita, então, a regionalização, por meio dos dois métodos, da vazão de referência da bacia estudada para os pontos onde estão localizadas as estações de

monitoramento e para cada mês do ano, a fim de se utilizarem os valores observados nestes pontos para a verificação dos modelos. De posse dos valores calculados, foi feita então a comparação com os valores obtidos pelas duas metodologias em função das vazões observadas nas estações.

Primeiramente, foram realizadas as comparações de variância e médias para verificar se as amostras pertenciam à mesma população, para tal foram executados os testes F e t de *Student*.

A execução dos testes F (`numpy.nanvar`¹), t de *Student* (`scipy.stats.t`²) e a regressão linear (`statsmodels.formula.api`³), como propostas por Davis (2002) e DeGroot & Schervish (2002), foram feitas a partir das bibliotecas Numpy, Scipy e Statsmodels, que podem ser importadas no Python e possuem uma série de funções matemáticas e estatísticas.

Para a verificação do erro das duas modelagens, primeiramente foi realizado o cálculo do erro relativo percentual descrito na equação 3, conforme realizado no próprio trabalho de Chaves et al. (2002), onde é verificado o desvio percentual da vazão calculada em relação a observada. Também foi verificado o coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970) (4,5 e 6) amplamente aceito (Baltokoski et al., 2010, Silva et al., 2008, Collischonn & Tucci, 2003, Gottschalk et al., 2009) e tido como um importante critério estatístico para se avaliar o modelo, onde é feita uma relação entre os valores observados e os simulados (Baltokoski et al., 2010). Para o cálculo, toma-se, em um primeiro momento, F^2 (4) que é o índice de discordância (*disagreement*), o qual representa a soma dos quadrados, como sugere a análise da regressão linear, isto é, uma forma análoga à variância residual de uma análise de regressão. Em seguida obtém-se F_0^2 (5) que, por sua vez, é a variância inicial. De posse desses dois valores, sucede-se o cálculo de R^2 (6), tido como a proporção da variância inicial obtida pelo modelo, sendo este análogo ao coeficiente de determinação (Nash e Sutcliffe, 1970).

$$\text{Erro relativo percentual} = 100 * Abs\left(\frac{Q_{obs.} - Q_{calc.}}{Q_{obs.}}\right) \quad (3)$$

Qobs. = Vazão observada

Qcalc. = Vazão calculada

(Chaves et al., 2002)

¹ <http://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/generated/numpy.nanvar.html#numpy.nanvar>

² <http://docs.scipy.org/doc/scipy-0.15.1/reference/generated/scipy.stats.t.html>

³ http://statsmodels.sourceforge.net/devel/example_formulas.html

$$F^2 = \sum_{i=1}^n (q'_i - q_i)^2 \quad (4)$$

q = Vazão observada

q' = Vazão estimada

F² = Índice de disparidade entre q' e q

$$F_0^2 = \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 \quad (5)$$

\bar{q} = Média das vazões observadas

F₀² = Variância inicial

$$R^2 = \frac{(F_0^2 - F^2)}{F_0^2} \quad (6)$$

R² = Eficiência do modelo (Análogo ao coeficiente de determinação)

(Nash e Sutcliffe, 1970)

Para a execução destes testes, foram agrupados os dados de cada estação, por mês, em uma planilha do *LibreOffice*, onde o erro representou a diferença ponderada dos valores obtidos pela reta de regressão, daquele mês, para a estação específica em relação ao observado na estação para o mês escolhido. O mesmo foi feito para os dados obtidos pelo método de Chaves et al. (2002).

As variáveis “área de contribuição”, “declividade média” e “densidade de drenagem” foram obtidas usando-se o aplicativo Qgis, baseando-se em dados vetoriais da base construída para o PGIRH (Distrito Federal, 2012).

5.2 Resultados e Discussão

A Tabela 2 exhibe os dados das médias das vazões mínimas mensais (Qmmm l/s) para cada estação, bem como as variáveis morfológicas e climáticas calculadas para cada ponto. Já a Tabela 3 demonstra as correlações obtidas em função de cada variável. Como se pode observar, a melhor correlação das vazões se deu em relação à área de contribuição hidrográfica e ao comprimento do trecho do rio de cada estação. Para fins de modelagem, optou-se em usar a área de contribuição, dado o seu amplo uso na bibliografia (Cawley & Cunnane, 1993 e Caissie, D. & El-Jabi, N., 1995).

Tabela 2. Vazões médias mínimas mensais das estações em estudo

Variáveis	Lagoinha	Barro Preto	Extrema – VC 173	Extrema – DF 100
Área de Contribuição (km ²)	29,09	70,76	110,09	253,78

Comprimento do rio (km)	7,30	15,80	15,86	36,02
Declividade média (m/km)	19,85	10,76	18,60	9,30
Densidade de drenagem (km/km ²)	0,25	0,22	0,14	0,14
Pluviometria (mm/Ano)	1370,6	1232,95	1291,32	1232,95
Qmmm Janeiro (l/s)	423,39	694,82	1093,55	2536,92
Qmmm fevereiro (l/s)	393,01	775,37	861,79	2142,21
Qmmm março (l/s)	395,00	849,98	815,56	2396,27
Qmmm abril (l/s)	525,36	1011,48	1048,80	2543,03
Qmmm maio (l/s)	365,76	622,70	812,08	2123,62
Qmmm junho (l/s)	292,21	516,27	666,57	1626,79
Qmmm julho (l/s)	214,47	309,33	427,66	1052,10
Qmmm agosto (l/s)	197,32	381,92	370,38	999,36
Qmmm setembro (l/s)	185,89	221,20	298,92	781,39
Qmmm outubro (l/s)	150,61	230,32	442,51	710,18
Qmmm novembro (l/s)	190,31	275,86	677,86	990,77
Qmmm dezembro (l/s)	254,38	363,78	766,64	2144,01

Tabela 3. Matriz de correlação entre as variáveis

	Área de Contribuição (km ²)	Comprimento do rio (km)	Declividade média (m/km)	Densidade de drenagem (km/km ²)	Pluviometria (mm/Ano)
Área de Contribuição (km ²)	1				
Comprimento do rio (km)	0,986	1			
Declividade média (m/km)	-0,659	-0,773	1		
Densidade de drenagem (km/km ²)	-0,809	-0,736	0,296	1	
Pluviometria (mm/Ano)	-0,644	-0,731	0,906	0,526	1
Qmmm Janeiro (l/s)	0,998	0,981	-0,637	-0,788	-0,601
Qmmm fevereiro (l/s)	0,992	0,997	-0,730	-0,735	-0,673
Qmmm março (l/s)	0,981	0,995	-0,759	-0,687	-0,677
Qmmm abril (l/s)	0,989	0,998	-0,750	-0,722	-0,689
Qmmm maio (l/s)	0,994	0,988	-0,681	-0,741	-0,617
Qmmm junho (l/s)	0,996	0,991	-0,686	-0,756	-0,634
Qmmm julho (l/s)	0,993	0,982	-0,655	-0,747	-0,592
Qmmm agosto (l/s)	0,982	0,995	-0,759	-0,690	-0,679
Qmmm setembro (l/s)	0,983	0,972	-0,641	-0,708	-0,551
Qmmm outubro (l/s)	0,980	0,938	-0,529	-0,905	-0,584
Qmmm novembro (l/s)	0,952	0,895	-0,445	-0,939	-0,535
Qmmm dezembro (l/s)	0,991	0,969	-0,604	-0,766	-0,548

Usando a área de contribuição como variável independente, foi calculada a regressão linear para cada mês do ano, obtendo assim os coeficientes, o r quadrático, bem como o valor de F para cada mês (Tabela 4).

Tabela 4. Coeficientes de regressão, valores de f e p-value

	Janeiro	Maio	Setembro
a =	9.615	a = 7.970	a = 2.789
b =	72.45	b = 56.993	b = 48.446

r2 =	0.996	r2 =	0.987	r2 =	0.966
r =	0.998	r =	0.993	r =	0.983
f-statistic =	507.249	f-statistic =	159.346	f-statistic =	58.541
p-value =	0.001	p-value =	0.006	p-value =	0.016
Fevereiro		Junho		Outubro	
a =	7.726	a =	5.998	a =	2.600
b =	147.363	b =	80.063	b =	92.419
r2 =	0.984	r2 =	0.992	r2 =	0.960
r =	0.992	r =	0.996	r =	0.980
f-statistic =	127.760	f-statistic =	270.650	f-statistic =	47.399
p-value =	0.007	p-value =	0.004	p-value =	0.021
Março		Julho		Novembro	
a =	8.836	a =	3.842	a =	3.621
b =	89.855	b =	55.540	b =	113.897
r2 =	0.963	r2 =	0.987	r2 =	0.906
r =	0.981	r =	0.993	r =	0.951
f-statistic =	52.178	f-statistic =	150.812	f-statistic =	19.332
p-value =	0.019	p-value =	0.006	p-value =	0.048
Abril		Agosto		Dezembro	
a =	8.845	a =	3.537	a =	8.825
b =	256.799	b =	77.239	b =	-140.862
r2 =	0.978	r2 =	0.965	r2 =	0.983
r =	0.989	r =	0.982	r =	0.991
f-statistic =	86.982	f-statistic =	54.567	f-statistic =	112.296
p-value =	0.011	p-value =	0.0178	p-value =	0.009

Conforme é mostrado na Tabela 4, os valores de r e r² ficaram adequados para a modelagem, bem como os valores de p-value que ficaram abaixo de 5%. Assim, entende-se que os valores da equação de regressão atendem de forma satisfatória ao modelo.

Desta forma, foram calculadas as vazões médias mínimas mensais teóricas para cada estação e para cada mês (Tabela 5).

Tabela 5. Vazões em l/s obtidas pelo método da regressão linear

	Lagoinha	Barro Preto	Extrema VC-173	Extrema DF 100
Janeiro	352,16	752,84	1131,01	2512,65
Fevereiro	372,10	694,05	997,92	2108,06
Março	347,01	715,37	1063,05	2333,27
Abril	514,10	882,67	1230,55	2501,48
Maiο	288,84	620,95	934,41	2079,62
Junho	254,54	504,48	740,38	1602,23
Julho	167,25	327,26	478,29	1030,06
Agosto	180,10	327,45	466,52	974,61
Setembro	129,66	245,92	355,65	756,55
Outubro	165,41	269,96	368,64	729,15
Novembro	219,21	370,05	512,43	1032,58

Dezembro	115,86	483,60	830,68	2098,75
----------	--------	--------	--------	---------

A Tabela 6 exibe os valores de vazões obtidos por mês, pelo método Chaves, para cada estação.

Tabela 6. Vazões obtidas em l/s pelo método de Chaves et al. (2002)

	Lagoinha	Barro Preto	Extrema VC-173
Janeiro	288,02	700,59	1089,99
Fevereiro	241,64	587,78	914,48
Março	267,45	650,57	1012,17
Abril	286,74	697,47	1085,15
Mai	238,38	579,85	902,14
Junho	183,66	446,74	695,05
Julho	118,07	287,20	446,84
Agosto	111,72	271,74	422,79
Setembro	86,72	210,94	328,19
Outubro	83,58	203,31	316,31
Novembro	118,36	287,91	447,94
Dezembro	240,57	585,18	910,44

A Tabela 7 demonstra os valores do teste F por estação para ambas as metodologias, Tucci (2004) e Chaves et al. (2002).

Tabela 7. Valores do teste F para os dados de cada estação

Lagoinha	2,218
Barro Preto	1,191
Extrema VC 173	1,069
F-Crítico para 11 graus de	2,818

liberdade

Como os valores dos testes F estão abaixo do F-Crítico, aceita-se a igualdade entre as variâncias, e prossegue-se para o teste t de Student (Tabela 8) para a verificação da igualdade entre as médias.

Tabela 8. Valores do teste t-de-Student para os dados de cada estação

Lagoinha	1,686
Barro Preto	0,684
Extrema VC 173	0,352
t-Crítico para 22 graus de liberdade	2,074

Os resultados do teste t de *Student* apontam para a não rejeição da hipótese de igualdade entre as médias, isto é, estatisticamente pode-se aceitar a igualdade entre a média dos valores observados e a média dos valores estimados por ambos os métodos para cada mês. Nas figuras 11, 12 e 13 são exibidas as três vazões obtidas e calculadas (Qmmm histórica, Regressão Linear e Chaves).

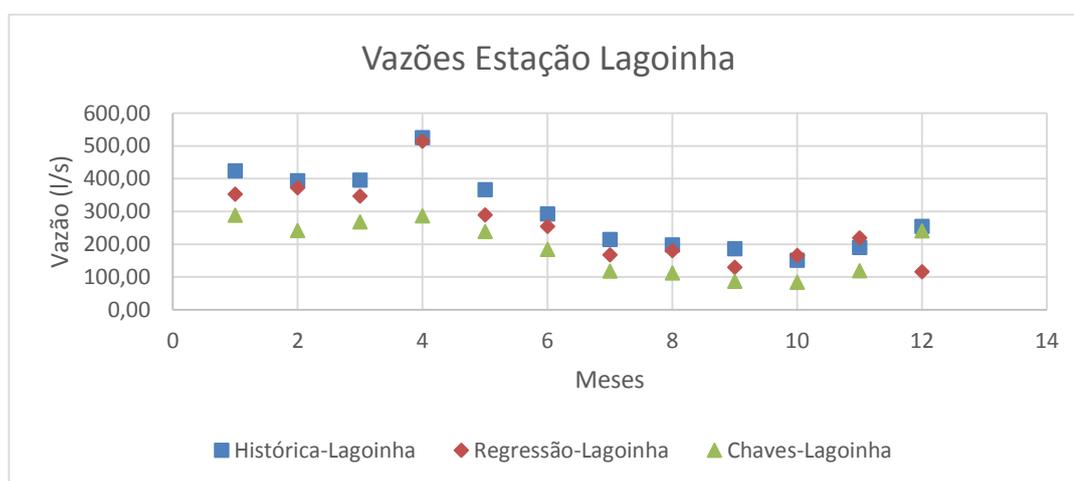


Figura 11: Vazões obtidas da Estação Lagoinha

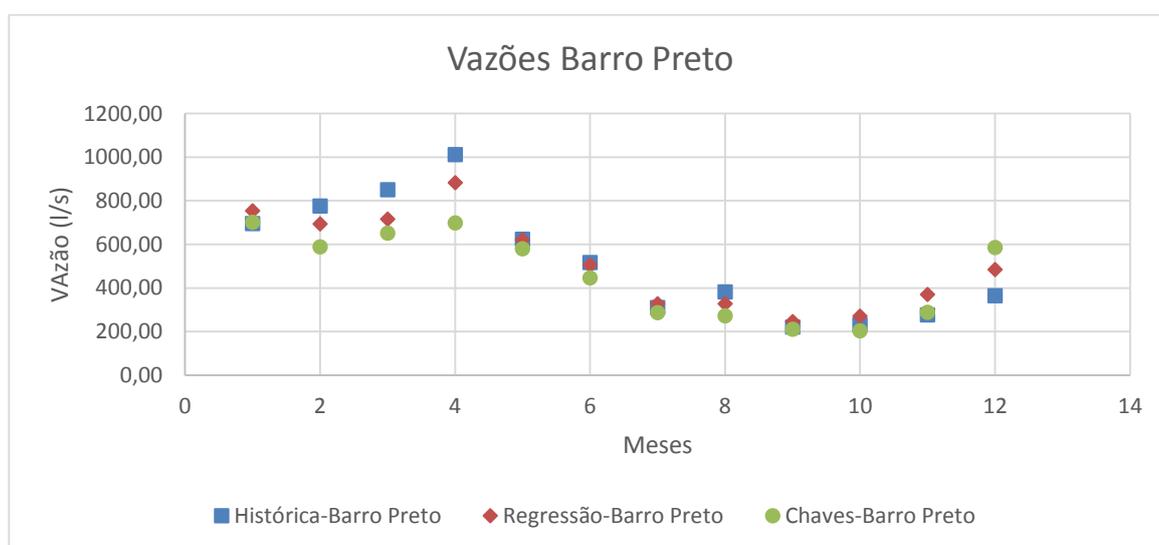


Figura 12: Vazões Obtidas da Estação Barro Preto

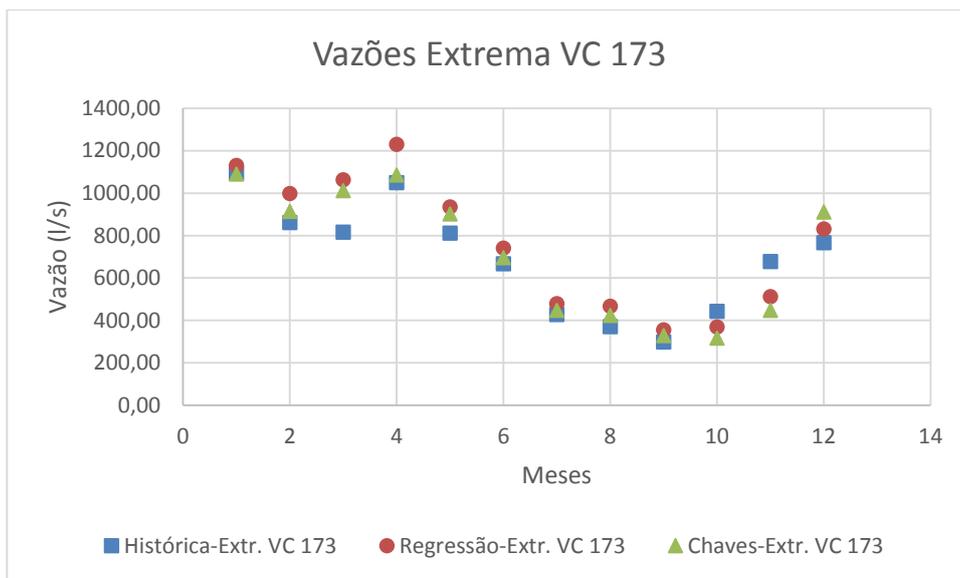


Figura 13: Vazões Obtidas da Estação Extrema VC 173

Com a observação da distribuição dos pontos nos gráficos (1,2 e 3) percebe-se que, com exceção da estação Extrema VC 173, as vazões obtidas pelo método de Chaves et al. (2002) são mais conservadoras, obtendo valores abaixo tanto em relação às observadas na estação, como também em relação àquelas obtidas pela regressão. Na estação Extrema VC 173, os valores tenderam a ficar mais próximos, provavelmente em função da presença dos cambissolos na porção baixa da bacia.

Considerando cada mês como uma amostra e reunindo os valores de cada uma das três estações, foram calculados os erros relativos percentuais e os coeficientes de Nash & Sutcliffe (1970) (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9. Erros (%) referentes à reta de regressão e ao método de Chaves et al. (2002).

Regressão	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Lagoinha	6,8	,3	2,1	,1	1,0	2,9	2,0	,7	0,2	,8	5,2	4,5
Barro Preto	,4	0,5	5,8	2,7	,3	,3	,8	4,3	1,2	7,2	4,1	2,9
Ext. VC 173	,4	5,8	0,3	7,3	5,1	1,1	1,8	6,0	9,0	6,7	4,4	,4
Chaves	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Lagoinha	2,0	8,5	2,3	5,4	4,8	7,1	4,9	3,4	3,3	4,5	7,8	,4
Barro Preto	,8	4,2	3,5	1,0	,9	3,5	,2	8,8	,6	1,7	,4	0,9
Ext. VC 173	,3	,1	4,1	,5	1,1	,3	,5	4,2	,8	8,5	3,9	8,8

Tabela 10. Erros relativos percentuais e Coeficiente de Nash & Sutcliffe (NS) (1970) para a regressão e para Chaves et al. (2002).

	jan	fev	mar	abr.	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Erro relativo perc. Regressão	9,53	10,53	19,44	10,74	12,13	8,75	13,22	16,32	20,13	14,58	24,58	31,91
Erro relativo perc. Chaves	11,04	22,94	26,62	26,64	17,60	18,30	18,86	28,79	22,59	28,25	25,36	28,35
NS Regressão	0,96	0,79	0,36	0,71	0,79	0,90	0,78	0,42	-0,05	0,84	0,73	0,74
NS Chaves	0,92	0,51	0,26	0,08	0,74	0,75	0,56	-0,04	-0,61	0,54	0,57	0,52

Os erros relativos percentuais na metodologia de Chaves et al. (2002) foram maiores em quase todos os meses, com exceção de dezembro. As diferenças entre os dois métodos variaram pouco, entretanto houve grandes diferenças em abril e outubro, da ordem de 15,9 % e 13,67 % respectivamente.

Com relação ao coeficiente de Nash & Sutcliffe (1970), os resultados também foram melhores para o método da regressão, embora até mesmo este método teria sido rejeitado para os dados de setembro, quando ocorreram dados negativos. Com relação ao método de Chaves et al. (2002), ele teria sido rejeitado em março e abril com valores abaixo de 0,36 e agosto e setembro com valores negativos.

Segundo Engeland et al. (2001) o coeficiente de Nash & Sutcliffe (1970) é aceito como “bom” com valores superiores a 0,75 e “aceitável” com valores entre 0,36 e 0,75, Collischonn & Tucci (2003) consideram acima de 0,88 muito bom. No entanto, Silva et al. (2008) coloca que a ocorrência de valores negativos decorre do fato de o modelo estimado ter produzido maior translação do hidrograma em relação ao observado, resultando assim em um elevado valor no coeficiente. É importante destacar que os meses que tiveram coeficiente de Nash & Sutcliffe (1970) com valores baixos ou negativos foram meses onde os dados regionalizados para a Estação Lagoinha tiveram mais de 40% de erro (abril, agosto e setembro) ou onde os dados de todas as estações tiveram mais de 20% de erro (março), demonstrando que o coeficiente é sensível para altos valores de erros isolados e/ou muitos valores altos.

No trabalho de Chaves et al. (2002), a diferença entre essas duas metodologias também foi testada, embora nele a metodologia de Tucci (2004), citada como tradicional, tenha sido do tipo potência, $y = ax^b$, diferente de uma equação linear simples tida como $y = a + bx$. A escolha entre qual equação utilizar é feita em função da resposta dos coeficientes de correlação r e determinação r^2 (Naghetini e Pinto, 2007). A bacia analisada em seu trabalho (bacia do Itapicuru) também possuía características diferentes, registrando

uma área de 36.440 km², além de contar com variações geomorfológicas, pedológicas e de uso do solo, e possuir variações de pluviosidade ao longo da bacia (1400 mm na foz e 500 mm na cabeceira). Em seu trabalho, os valores obtidos por sua metodologia foram melhores, sendo o erro relativo percentual da ordem de 45,1% e o coeficiente de Nash & Sutcliffe (1970) de 0,879, comparados com a metodologia da regressão, onde o erro médio foi de 289% e o coeficiente de Nash & Sutcliffe (1970) foi de 0,725.

Há de se ressaltar que em seu trabalho, Chaves et al. (2002) utilizaram várias estações ao longo da bacia para ponderar o erro, fazendo uso dos diversos casos (caso 1, 2, 3 e 4), para calibrar o modelo. Desta forma, em sua análise de erros, não foi utilizado somente o caso 1, diferentemente do que foi realizado neste trabalho.

Comparativo semelhante foi feito por Molina et al. (2014) na bacia hidrográfica do Rio Amambai (10.125 km²), Mato Grosso do Sul, utilizando 24 estações de monitoramento, onde o método de Chaves et al. (2002) também obteve os piores desempenhos, embora as vazões regionalizadas tenham sido as Q_{7,10}, a Q₉₀ e a Q₉₅. Mollina et al. (2014) encontrou como maior erro médio 21,33% e o pior coeficiente de Nash e Sutcliffe de 0,76, ambos para o segundo trimestre em comparação com o método de proporção de massas (Novaes et al., 2009 e Moreira et al., 2010) que obteve 8% no erro relativo percentual e 0,94 de coeficiente de Nash e Sutcliffe (2014).

Novaes et al (2007), em estudo comparativo com as metodologias tradicionais e o método de Chaves et al. (2002) na bacia do Rio Paracatu (45.600km²), situada no médio São Francisco, não encontrou diferenças significativas entre as metodologias testadas, utilizando 21 estações de monitoramento, onde as maiores diferenças foram da ordem de 3%, e os erros apresentaram desvios semelhantes, ordem de 10%, na média de longo termo e, 20 a 30%, para a Q₉₅ e Q_{7,10}.

Em função destas análises, pode-se inferir que, dependendo da área em estudo, uma metodologia se adequa melhor do que outra. Outro ponto importante é o fato de os erros percentuais, nesses estudos, oscilarem nas mesmas ordens de grandeza, evidenciando a dificuldade em se baixar esses percentuais, mesmo aplicando diversas metodologias.

Assim, conhecendo os erros relativos percentuais, o método Chaves et al. (2002) pode ser utilizado, pois os maiores erros foram da ordem de no máximo 28%, (setembro, 28,25% e dezembro, 28,35%), onde os erros médios do método de regressão também foram altos (16,32% e 31,91% respectivamente).

Há que se destacar que, para a maior parte dos meses, além de os erros estarem abaixo dos 20%, o coeficiente Nash & Sutcliffe (1970) obteve excelentes valores.

Na unidade hidrográfica em questão, pôde-se considerar o tipo de solo como homogêneo, no entanto para outras regiões seria interessante se considerar uma melhor análise das respostas para cada tipo de solo, como pôde se observar nos dados obtidos na Estação Extrema VC – 173. O uso de uma ponderação em função do tipo de solo pode atenuar esses desvios.

5.3 Considerações sobre os resultados

Os testes realizados demonstraram que a metodologia de Chaves et al. (2002) é aplicável na bacia em questão. No entanto, para os meses de março, abril, agosto e setembro pode ser estudado um método mais adequado, pois o coeficiente de Nash & Sutcliffe (1970) ficou abaixo do ideal, chegando a valores negativos. Porém, isso aconteceu para os dois métodos comparados e os erros relativos médios de ambos os métodos ficaram próximos, permitindo uma aceitabilidade dos métodos. Levando-se em consideração que ambas as metodologias possuem erros, não se perde tanto estatisticamente se utilizando da metodologia mais sintética.

De acordo com os resultados dos testes, o método de Chaves et al. (2002) pode ou não ser também compatível para uso em outras unidades hidrográficas do Distrito Federal, sendo interessante a realização de futuros testes.

O uso da linguagem de programação Python, bem como sua série de bibliotecas atende muito bem as demandas estatísticas, não necessitando de softwares mais sofisticados ou pagos.

6. Capítulo VI – Geração de modelo digital de elevação hidrologicamente consistido e adequação ao PGhydro

6.1 Procedimentos

A sistemática seguida neste trabalho consistiu em criar, primeiramente, um modelo hidrologicamente consistido e, em seguida, estruturar um banco de dados hidrográfico, pautado na utilização das ferramentas constantes do módulo pgHydro (Teixeira, 2012; Teixeira et al. 2013). Durante a execução das funções do PgHydro são gerados vetores de erros, caso sejam encontradas inconsistências nos vetores. Estes erros foram resolvidos por

meio do *Qgis*, usando uma conexão direta com o banco de dados por meio da ferramenta Gerenciador de DB.

As seguintes fases foram desenvolvidas no processo de criação do sistema

- 1) Tratamento dos dados vetoriais dos rios e curvas de nível para a geração do modelo digital de elevação e das áreas de contribuição, por meio do programa *Qgis*.
- 2) Criação de um banco de dados em PostgreSQL / PostGis e Estruturação do banco utilizando os recursos do pgHydro e do *Qgis*.

6.2 Processo

6.2.1 Tratamento dos dados vetoriais dos rios e curvas de nível

Alguns procedimentos, além daqueles relacionados à consistência dos dados, devem ser adotados para a construção do modelo, todos estes estão descritos na ET-ADVG (DSG, 2008):

- 1) Os trechos de drenagem devem estar todos conectados, não havendo pontas soltas, com exceção dos pontos de nascente, como mostra a figura 14.

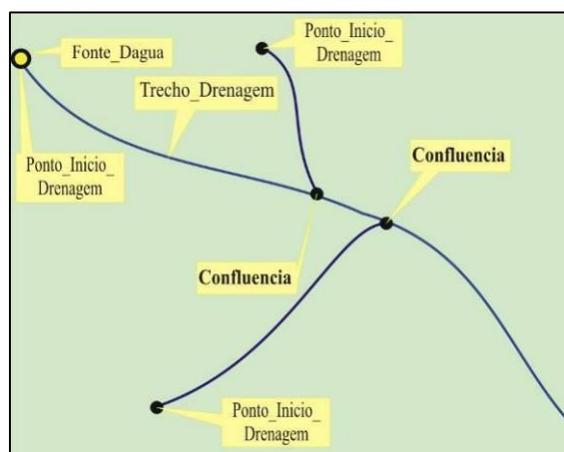


Figura 14: Conexão dos trechos de drenagem. Adaptado de DSG, 2008.

- 2) Os trechos de conexão de afluentes nos trechos de drenagem devem estar quebrados, ou seja, deverão existir três trechos, independentes, nos pontos de conexão (figura 15).

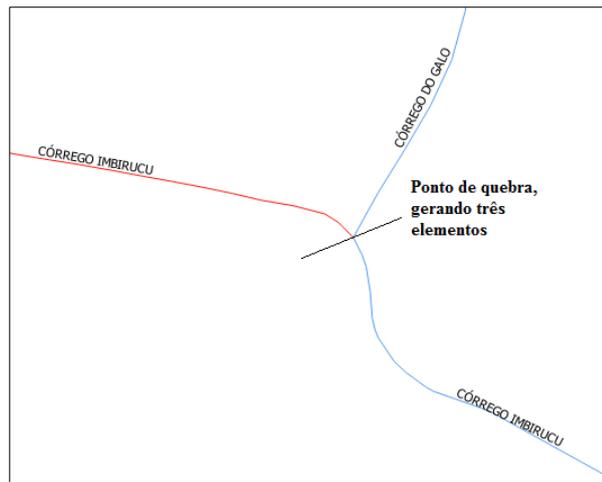


Figura 15: Trechos quebrados na confluência

3) Não deverá haver mais de três trechos de drenagem nos pontos de confluência (figura 16). Um dos trechos deve ser remanejado para jusante ou montante, isso é feito para se seguir o princípio da codificação de Pfastetter (1989).

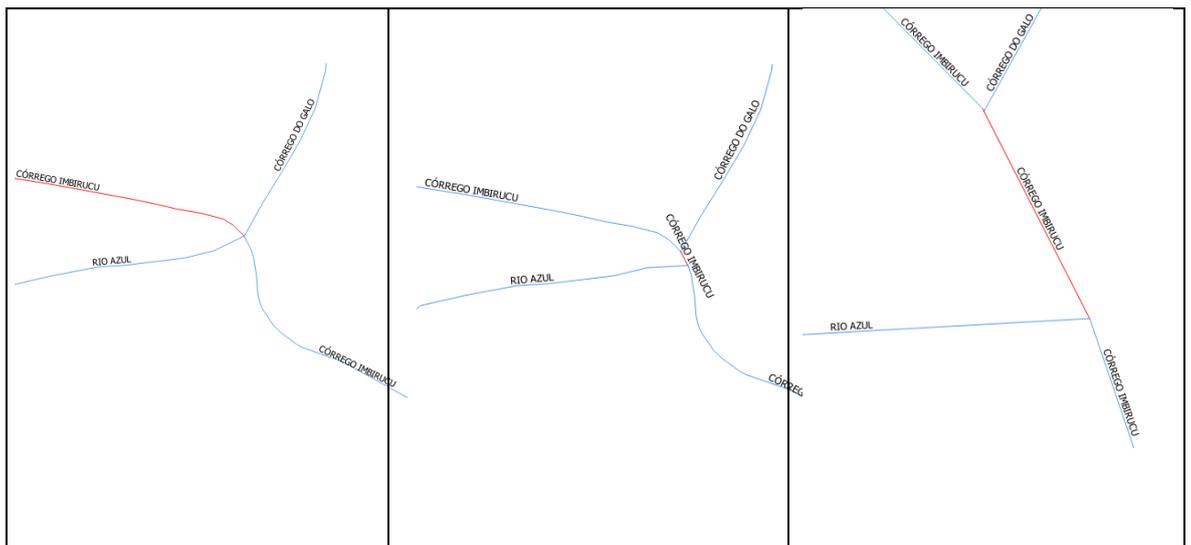


Figura 16: Mais de três córregos de confluência

4) Não deverá haver trechos de drenagem contíguos quebrados (pseudo-nós), com exceção dos trechos onde exista um afluente (figura 17).

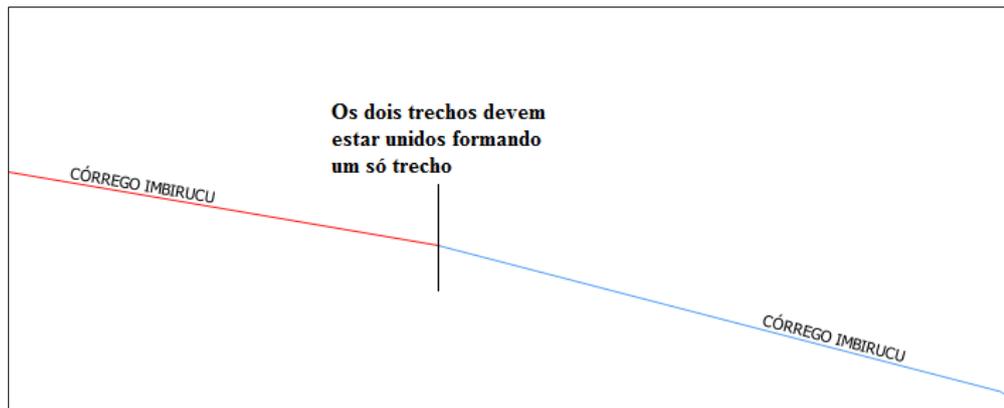


Figura 17: Trechos contíguos sem confluência

5) As curvas de nível devem estar todas conectadas, isto é, para cada elemento das curvas o ponto inicial de uma linha deve coincidir exatamente com o ponto final da mesma (figura 18).

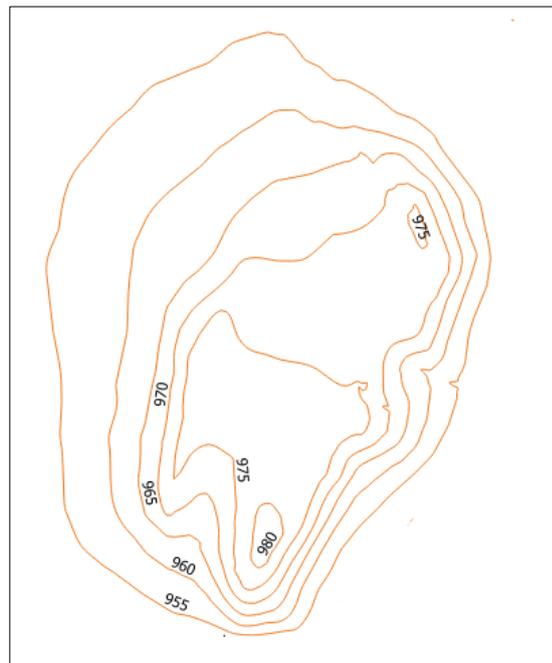


Figura 18: Curvas de nível

Para automatizar o processo de verificação, foi utilizado o algoritmo *v.clean* para a correção automática de problemas vetoriais, em três etapas. Este algoritmo integra as ferramentas do aplicativo *Grass*, que pode ser acessado do *QGis*, e dispõe de três funcionalidades: *Break*, *RMDupl* e *RMLine*⁴.

- i. *Break*: quebra linhas em cada interseção, isto é, quando uma linha toca em um ponto no interior de outra linha;

⁴ <https://grass.osgeo.org/grass64/manuals/v.clean.html>

- ii. *RMDupl*: remove elementos geométricos duplicados;
- iii. *RMLine*: remove linhas de comprimento igual a zero.

6.2.2 Geração do modelo digital de elevação

- a. Simplificação dos vértices das curvas de nível: *QGIS* > Vetor > Geometrias > Simplificar geometrias⁵ (figura 19).
- b. Extração de nós das curvas de nível, procedimento que extrai todos os vértices das linhas que compõem o vetor. Ferramenta que pode ser acessada em: *QGIS* > Vetor > Geometrias > Extrair Nós⁶.

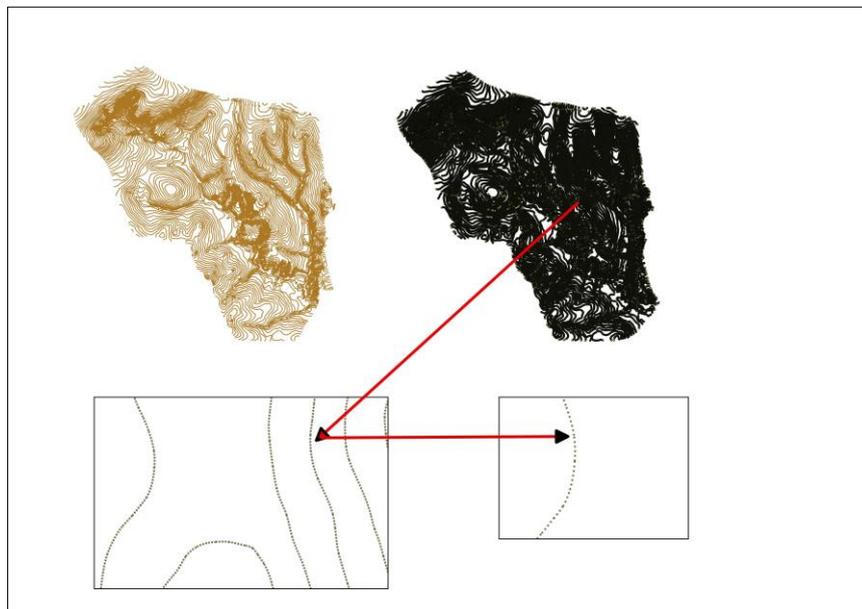


Figura 19: Extração de nós de curva de nível

- c. De posse dos nós foi realizada a geração do *raster* do modelo digital de elevação por meio do algoritmo *Nearest neighbour*, da plataforma Saga (figura 20).

5

http://docs.qgis.org/2.6/pt_BR/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vector_geometry_tools/simplifygeometries.html

⁶ http://docs.qgis.org/1.8/pt_BR/docs/user_manual/plugins/plugins_ftools.html

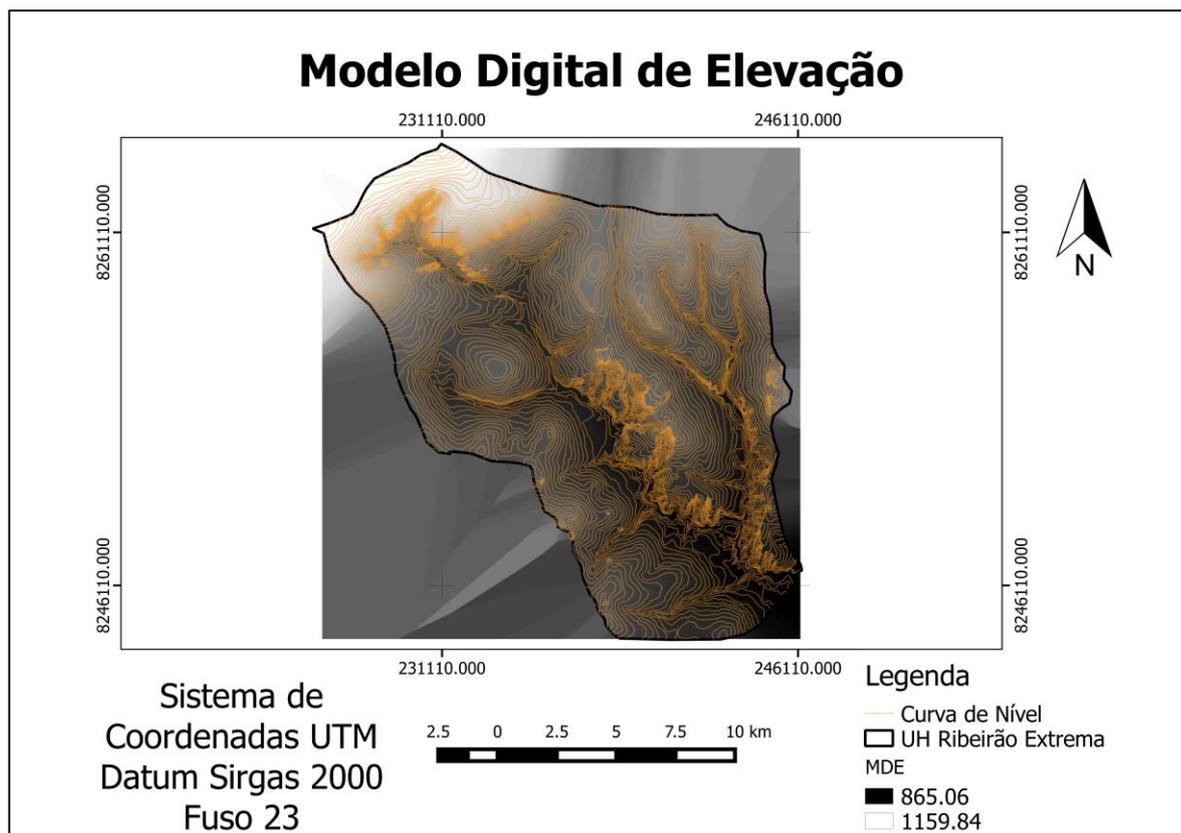


Figura 20: MDE

6.2.3 Geração das áreas de contribuição

- a. O arquivo vetorial referente à hidrografia foi convertido em *raster*, por meio do algoritmo *Rasterize*⁷, presente em *QGis* > *Raster* > *Conversão* > *Rasterizar* (figura 21).

⁷ https://docs.qgis.org/2.6/en/docs/user_manual/processing_algs/gdalogr/gdal_conversion/rasterize.html

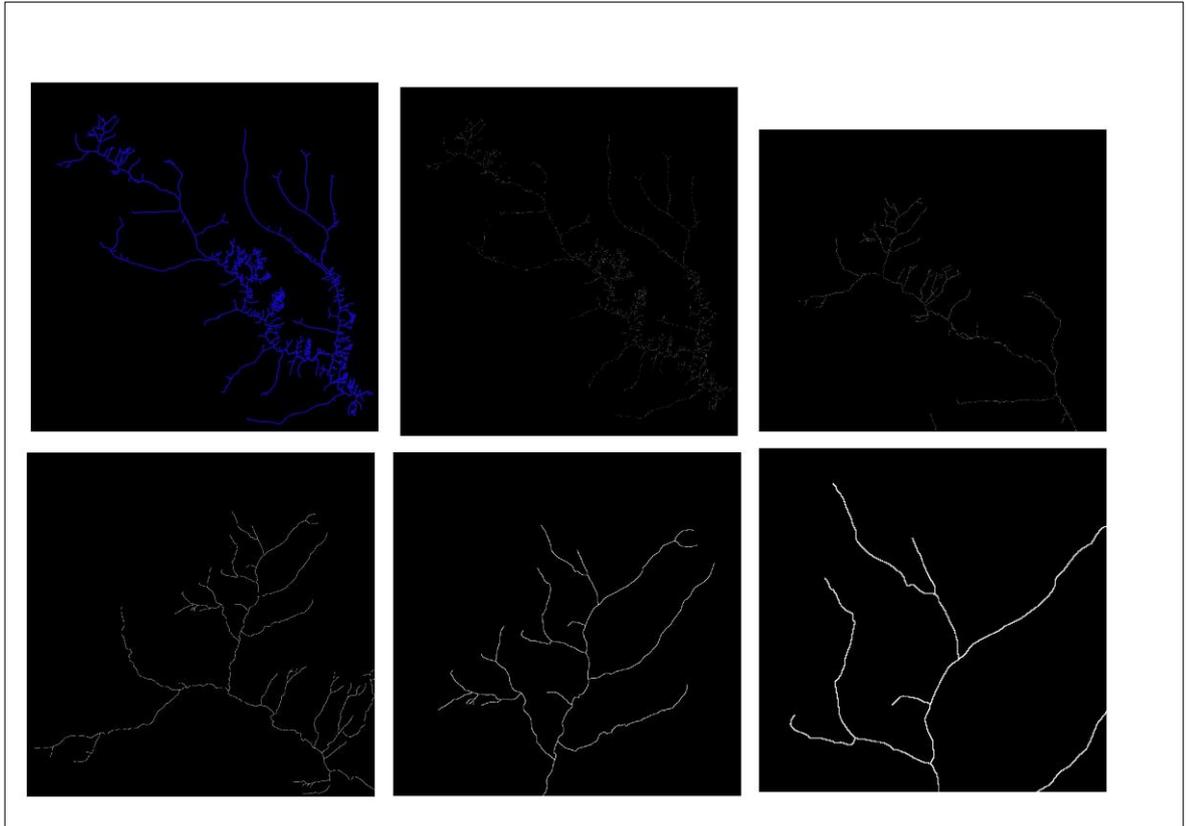


Figura 21: Hidrografia Rasterizada

- b. Reprojeção: em seguida o raster de hidrografia e o *raster* do MDE foram reprojutados para Sirgas 2000, utilizando o algoritmo *Gdal Translate*⁸.
- c. *Burning*: Deu-se a realização do *Burning*, processo em que há o aprofundamento do MDE nas áreas onde passam os corpos hídricos, por meio do algoritmo *AgreeDem.py*, desenvolvido em *Python* por Gustavo S. F. Moller, especialista em geoprocessamento da Agência Nacional de Águas, baseado no algoritmo de Ferdi Hellweger (Hellweger, 1997)⁹,
- d. Remoção de *Pits*: *Pits* são buracos que ocorrem em áreas adjacentes a regiões de mesma altitude¹⁰, geralmente originários do processo de interpolação dos dados altimétricos. Foi utilizado o algoritmo *Pit Remove* presente no *TauDEM*. Tal algoritmo se baseia no trabalho feito por Planchon e Darboux, (2001) e implementado por Tarboton (2003).
- e. Direcionamento de fluxo (figura 22):

⁹ <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>

¹⁰ <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/TauDEM5DelineatingASingleWatershed.pdf>

Processo em que se dá o mapeamento das direções de fluxo. Foi utilizado D8 *Flow Directions* (Jenson & Domingue, 1988), presente no TauDEM¹¹.

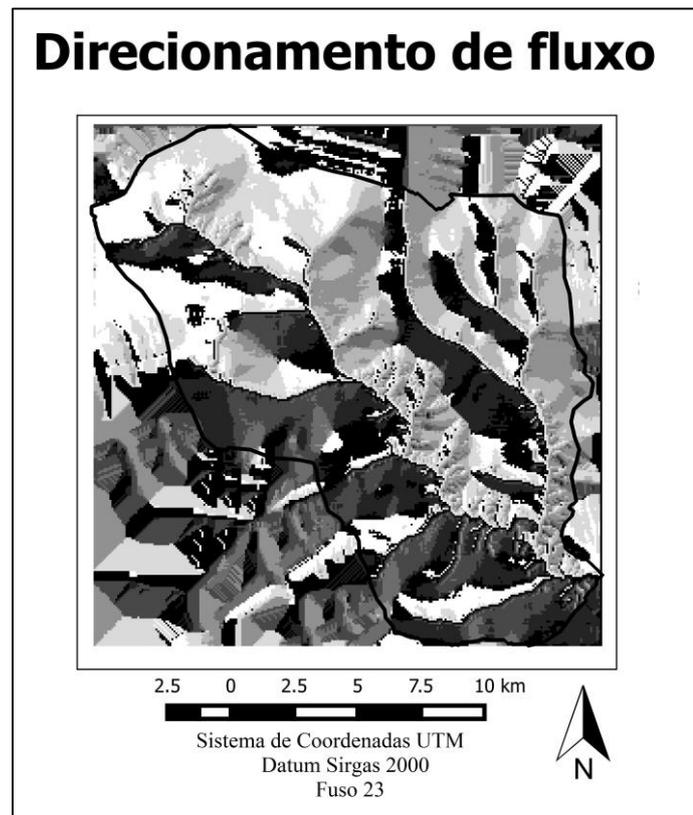


Figura 22: Direcionamento de fluxo

- f. Geração da área de contribuição e acumulação de fluxo (*Flow Accumulation*):

Foi utilizado o algoritmo D8 *Contributing Area*, idealizado por Jenson & Domingue (1988), onde são definidas as áreas de contribuição de cada pixel que compõe o modelo digital de elevação, isto é, é obtida a quantidade de pixels a montante e que direcionam a água para o *pixel* vizinho, a jusante. Também é identificada a acumulação de fluxo hídrico para os pontos a jusante.

¹¹ <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/TauDEM5DelineatingASingleWatershed.pdf>.

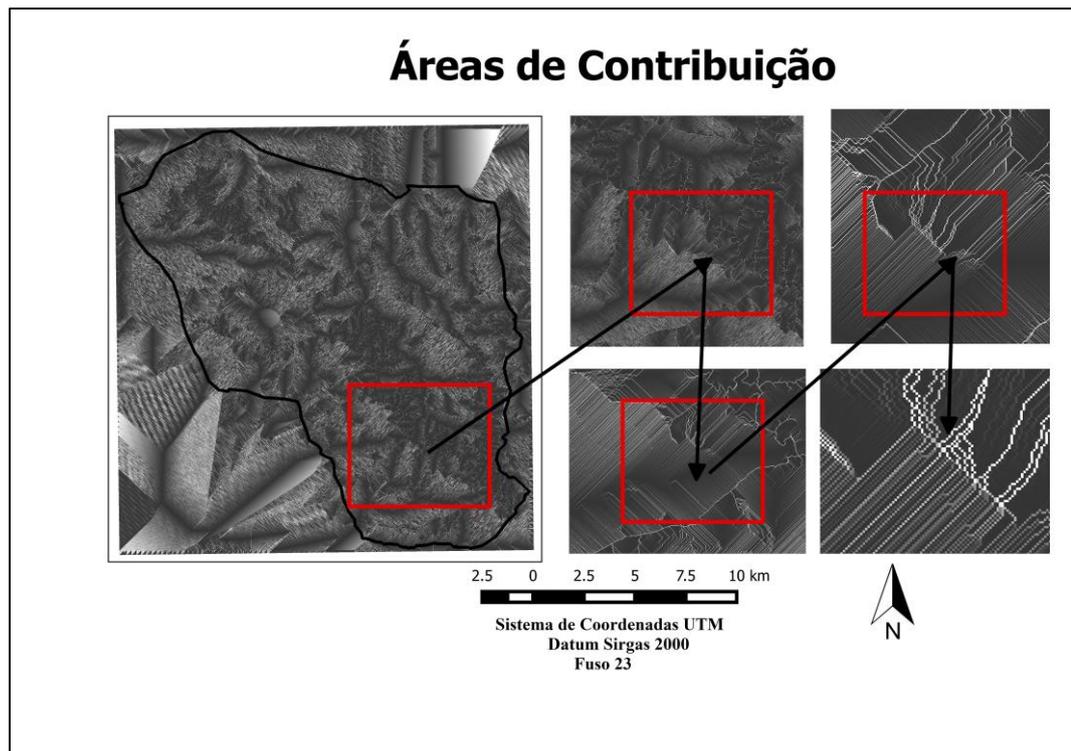


Figura 23: Áreas de contribuição

- g. Caminho do fluxo: Para se obter o caminho do fluxo (*Flowpath*), foi utilizado um algoritmo desenvolvido por Gustavo S. F. Moller, especialista em geoprocessamento da Agência Nacional de Águas. O algoritmo traça a partir de cada ponto de início da drenagem ou cabeceira, o menor caminho para a foz, assegurando que exista pelo menos um trecho de drenagem para cada área de contribuição hidrográfica.
- h. Conversão de *raster* para vetor e *clip*:
Foi realizada por meio do algoritmo poligonizar¹², presente em *QGis* > *Raster* > *Conversão* > *Poligonizar* e em seguida foi recortada as áreas das áreas de contribuição que excederam a bacia original por meio da ferramenta de recorte (*clip*).

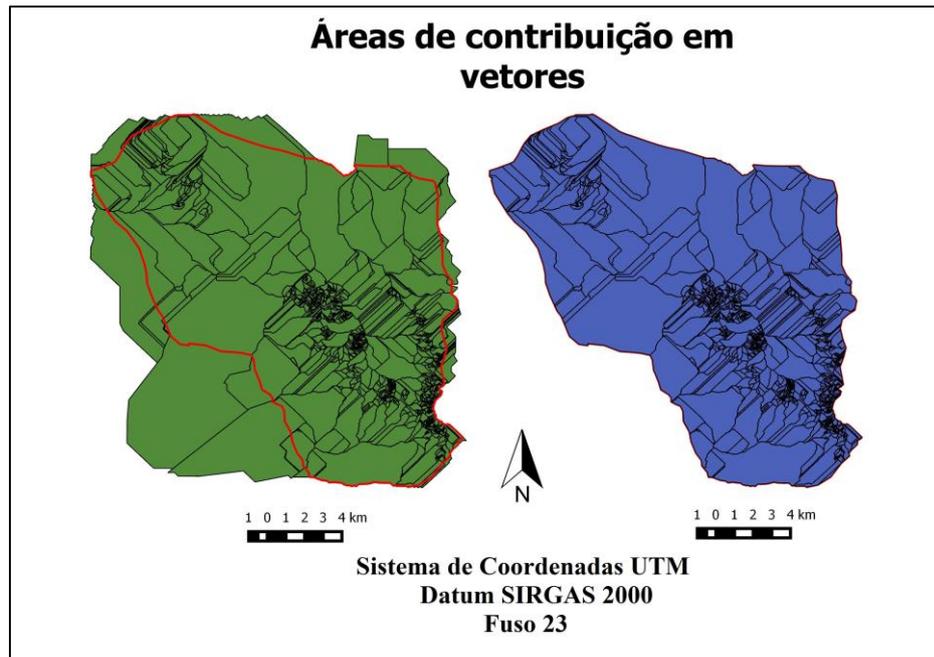


Figura 24: Áreas de contribuição em vetores

6.2.4 Compilação do banco de dados

a. Criação do banco de dados:

Foi criado no *Postgresql* um banco vazio e, em seguida, criada a extensão *PostGis*.

b. Estruturação do banco de dados:

Foi utilizado o *SQL* *pghydro_schema_04_07_v02_04*, desenvolvido por Teixeira (2012), onde são construídas todas as tabelas e funções necessárias para a construção do modelo.

c. Carga no banco de dados:

Foram inseridos os dados de hidrografia e as áreas de contribuição, por meio do aplicativo Gerenciador de BD, presente em *QGis* > Base de dados. A modelagem ficou de acordo com a figura 25.

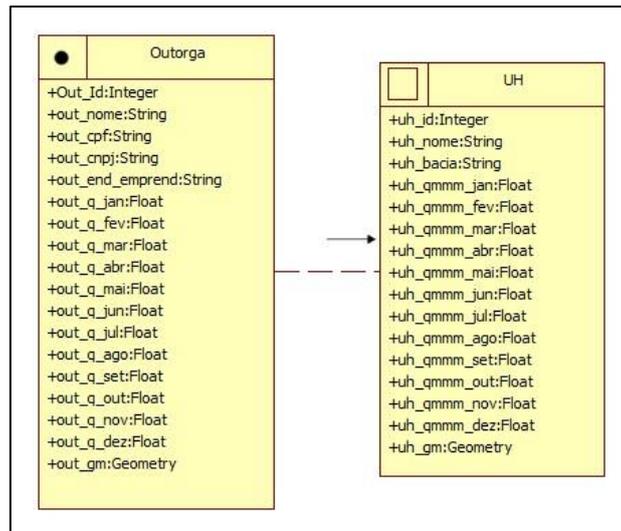


Figura 25: Modelagem Conceitual do Banco - ênfase nos dois novos elementos - Outorgas e UH

6.2.5 Tratamento dos dados no banco de dados

Foi utilizado sequencialmente o *SQL* pgHydro_Tools_04_07_v02_03, que contém uma série de consultas em banco de dados que verificam a situação do dado, gerando vetores no próprio banco, indicativos de inconsistências na topologia da drenagem como a necessidade de uma drenagem contínua, unifilar, sem confluências múltiplas, sem enlaces e etc. a serem sanados, caso existam. As fases e os processos executados são discriminados e explicados em Teixeira (2012) e Teixeira et al. (2013), e são exibidos nas Figuras 26, 27, 28 e 29..

Este processo (figura 26) basicamente compreende a inserção dos dados em banco de dados geográficos, verificando a consistência da rede hidrográfica (figura 27), das áreas de contribuição hidrográfica (figura 28) e da consistência da rede de drenagem com as áreas de contribuição hidrográfica.

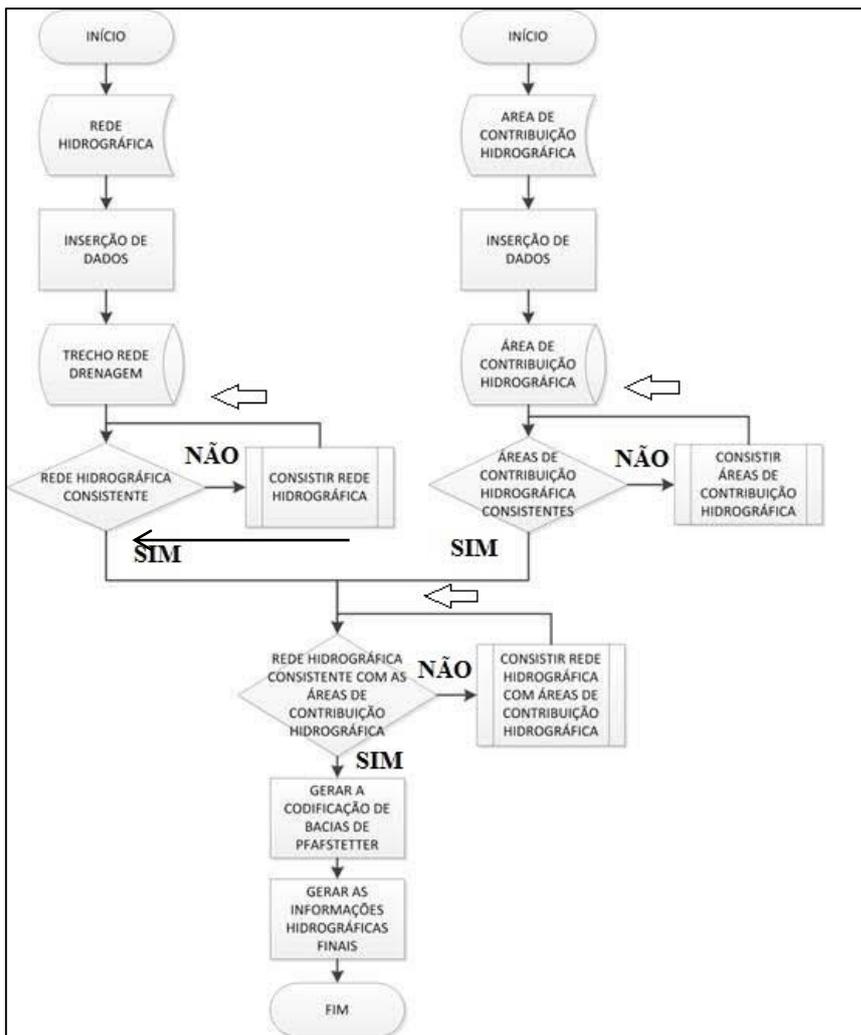


Figura 26: fluxograma pgHydro, adaptado de Teixeira, 2013.

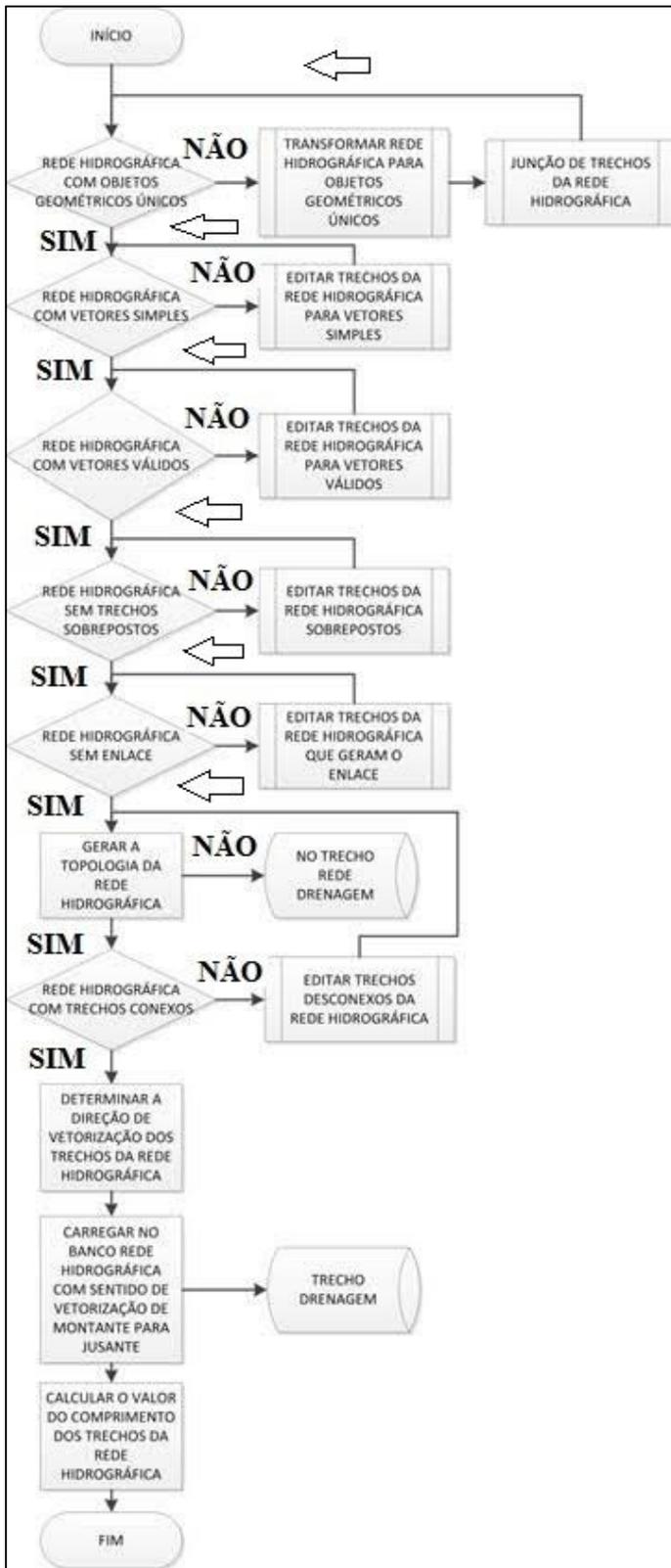


Figura 27: fluxo da consistência da rede hidrográfica adaptado de Teixeira, 2013.

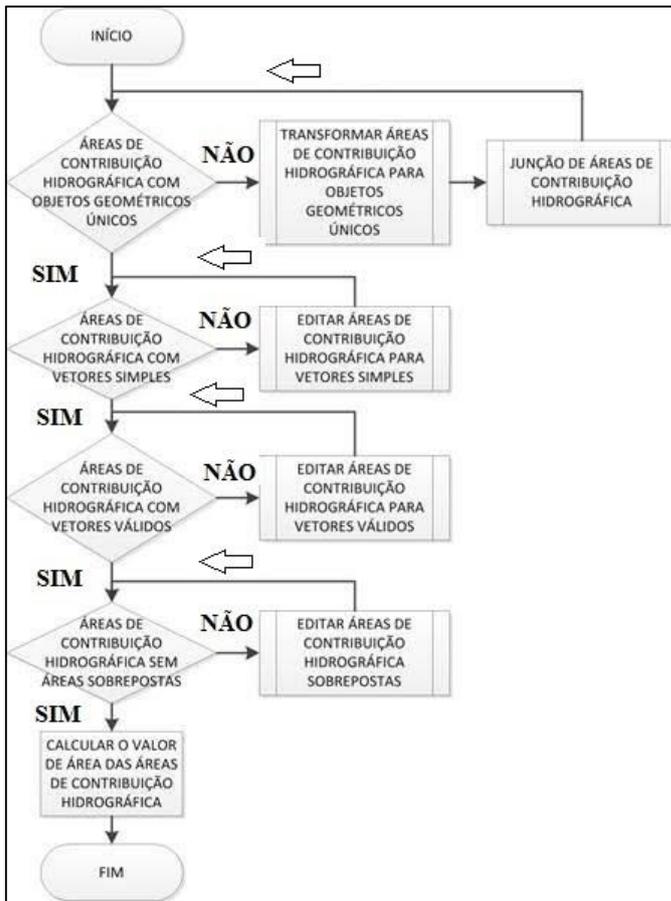


Figura 28: fluxo de consistência das áreas de contribuição hidrográfica, adaptado de Teixeira, 2013.

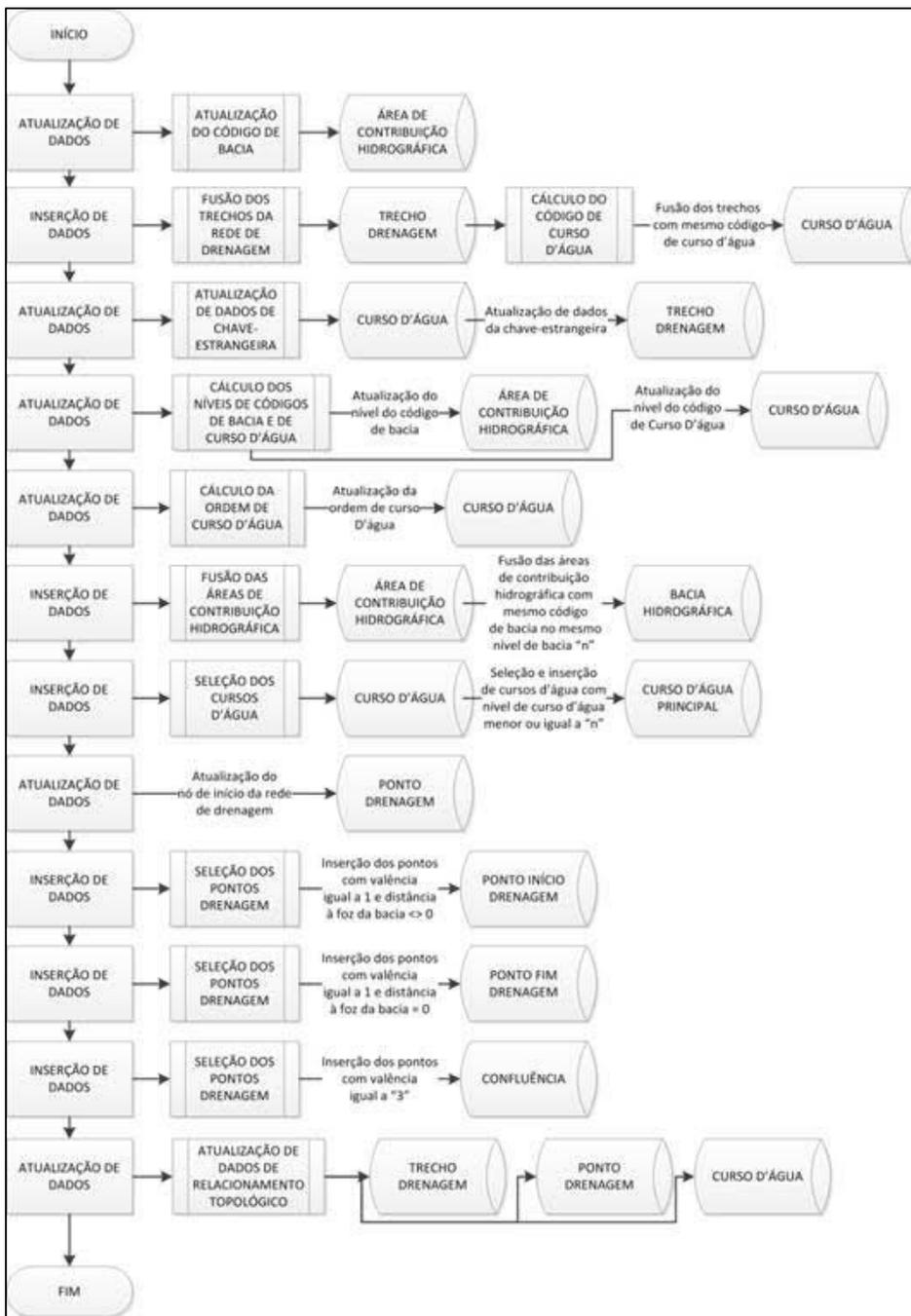


Figura 29: Consistência da rede drenagem com as áreas de contribuição e geração da codificação de bacias de Pfafstetter, adaptado de Teixeira, 2013.

7. Capítulo VII – Desenvolvimento de um sistema web

7.1 Estrutura teórica do sistema

Entendendo que a maneira mais objetiva de se obter a vazão de um rio em um ponto qualquer seria por meio da regionalização hidrológica de vazões, e tendo o uso do método proposto por chaves et al. (2002) como estatisticamente aceitável, este trabalho

criou um sistema que pudesse fazer isso de forma automática, para que um usuário não precisasse deter conhecimentos complexos acerca de hidrologia e geoprocessamento.

Sendo assim, somente será requisitada do usuário as coordenadas geográficas do ponto onde se deseja captar água, e o código EPSG (*European Petroleum Survey Group*) do *datum* de referência do qual a coordenada foi extraída, haja vista que esse código é único para cada *datum* (EPSG, 2015). O código EPSG é um SRID (*Spatial Reference Identifier* – identificador de referência espacial) composto por valores inteiros e amplamente recomendado (Westra, 2013). Para facilitar ao usuário, uma lista será exibida contendo os principais códigos EPSGs da região. De posse das coordenadas, será verificada a situação hídrica do curso d'água no trecho em que está inserido o ponto de captação que se deseja instalar.

Para essa verificação, primeiramente é procurado saber em qual área de contribuição hidrográfica está contido o ponto, sendo realizada uma consulta espacial (do tipo contém e está contido). Como resposta da consulta, é obtida a chave primária da área de contribuição, por sua vez a tabela *pghgt_hidro_Intel*, da base do *pgHydro*, possui todo o mapeamento das relações hídricas espaciais, ou seja, é possível obter qual trecho de drenagem pertence a qual área de contribuição. Essa busca relacional é mais otimizada do que a busca espacial (Westra, 2013), consumindo menos de tempo de pesquisa.

De posse da chave primária deste trecho, pode-se iniciar uma série de consultas junto ao banco. A primeira delas faz uso da função do *pgHydro* *pghgf_streamstretches*, que busca no banco de dados quais trechos de drenagem a montante estão conectados ao trecho de drenagem informado, ressaltando daí a importância dos trechos de drenagem estarem todos conectados dentro de uma relação arco-nó (Borges et al., 2005). Com as chaves primárias desses trechos de drenagem pode-se realizar a pesquisa relacional inversa na tabela *pghgt_hidro_Intel* e verificar em quais áreas de contribuição estão contidos esses trechos. Com o resultado dessa consulta, pode-se buscar espacialmente quais outorgas já liberadas estão contidas nessas áreas. Dessa forma, fica a critério desta última consulta escolher quais dados vão ser solicitados. Em um primeiro momento este sistema solicita ao banco de dados **a soma das vazões de todas as outorgas**, ou seja, é realizada uma consulta, onde se pede o retorno das colunas da tabela *pghgt_outorga* contendo as vazões para cada mês, sendo estas grupadas pela soma de todas as outorgas.

Em um segundo momento é obtida toda a área de contribuição para o trecho de drenagem em que está contido o ponto, este valor é acessado por meio de consulta simples

a tabela *pghgt_drainage_stretch*, que já contém a área de contribuição calculada para cada trecho da base, armazenada no campo *drs_nu_upstreamarea*.

A partir deste momento é possível fazer a regionalização hidrológica da vazão, por já ser possível saber em qual unidade hidrográfica está contido o ponto, e quais as vazões de referência para cada mês do ano para esta unidade, isto é, com a aplicação do método Chaves et al. (2002), tendo o valor da área de contribuição e o valor da área da unidade hidrográfica, associando com as vazões de referência mensais, é possível fazer a regionalização hidrológica da vazão para o ponto desejado.

Para facilitar ao usuário do sistema, é feita a **subtração das vazões regionalizadas mensais pelo somatório das vazões outorgadas**, destacando assim a real disponibilidade hídrica para o trecho de drenagem onde será emitida a outorga, sendo exibido este valor em tela.

O sistema também calcula o **limite máximo a ser concedido por outorga**, o qual é definido como 20% (vinte por cento), dos 80% (oitenta por cento) da média das vazões mínimas mensais. De posse dessas informações, o usuário decide se vai inserir esta nova outorga no banco de dados. A seguir o usuário pode inserir todas as informações relativas à outorga que vai ser autorizada.

Outra funcionalidade do sistema é a possibilidade de se alterar dados de outorgas já existentes no banco de dados, como nome do usuário, CPF, ou alterações das vazões concedidas, para casos de alteração ou renovação de outorga. Para tal, basta inserir o CPF do requerente da renovação ou alteração.

7.2 Detalhamento das telas do sistema

A seguir será detalhada cada tela do sistema informando os elementos de cada passo que será executado em sua respectiva tela, conforme é ilustrado na figura 30:

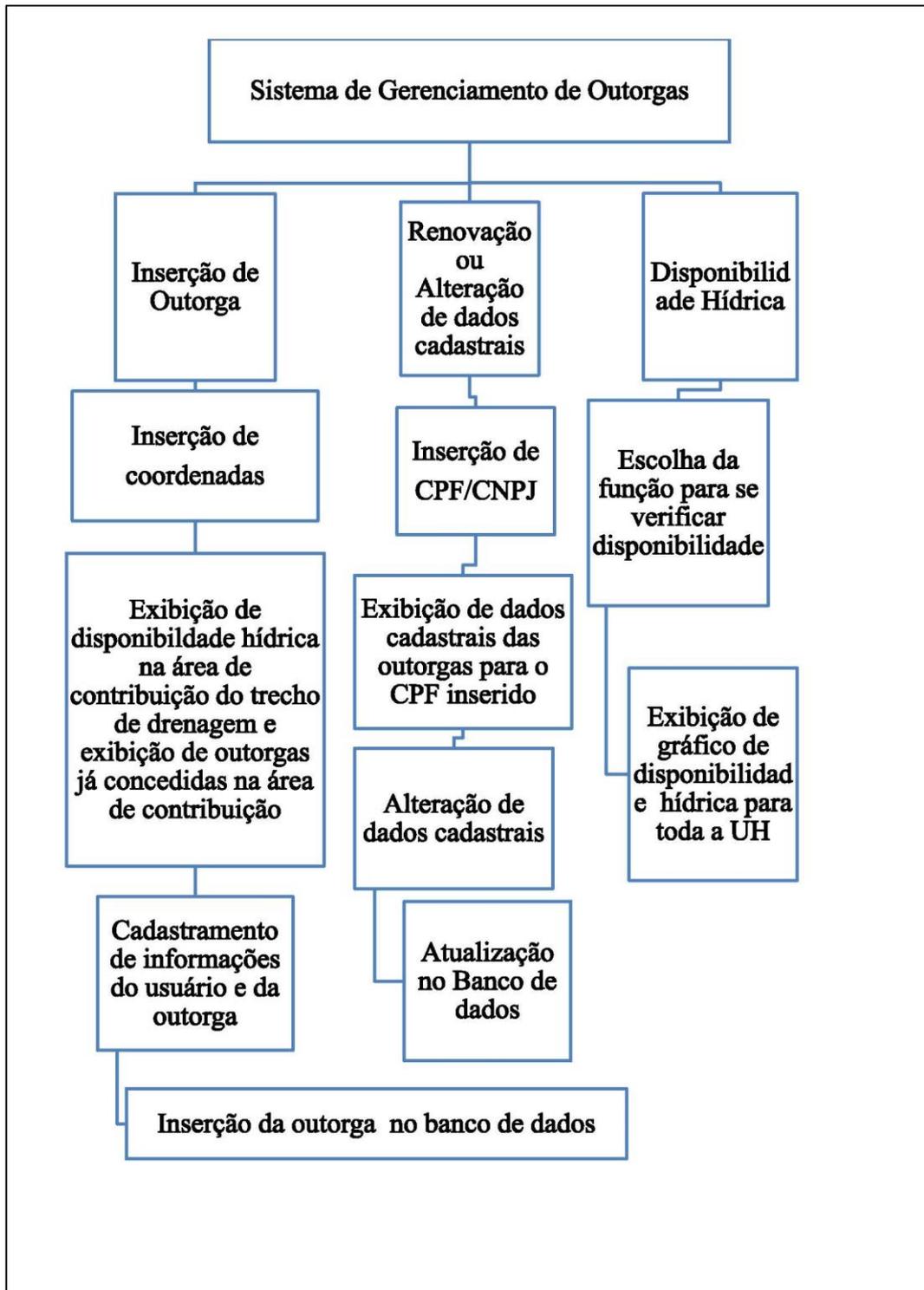


Figura 30: Fluxograma de etapas do Sistema de Gerenciamento de Outorgas

Tela 1 – a tela inicial que descreve o projeto e contém um menu suspenso contendo as funções do sistema (figura 31):

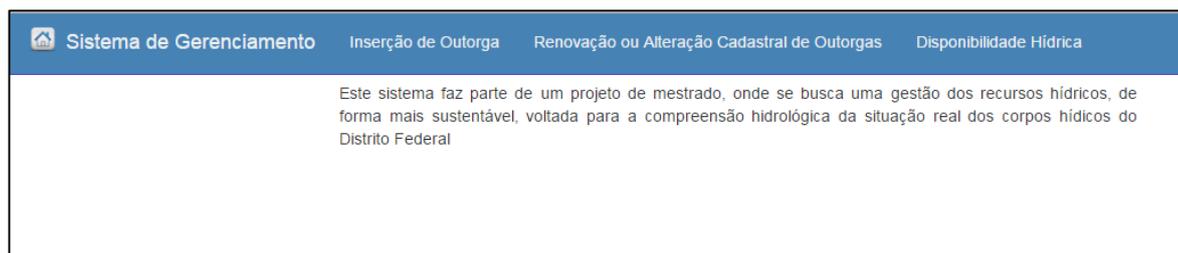


Figura 31: Tela inicial do Sistema de Gerenciamento

A tela inicial do sistema, para fins de teste está hospedada no seguinte endereço eletrônico: <http://sisgerh.ddns.net:8080>, em HTML.

Tela 2 – onde é possível verificar a disponibilidade hídrica para um ponto desejado e inserir uma nova outorga (figura 32):

Figura 32: Tela 2

A tela 2 contém um *form*¹³ para recepção dos dados pelo usuário, não há invocação de nenhuma função neste momento. No entanto, ao ser submetido (clicando-se no botão enviar), o *form* invoca o código `consultaOutorga.py`, o qual chama a tela 3 (figura 33).

¹³ *Form* é uma estrutura HTML utilizada para colecionar dados inseridos pelo usuário. Um *form* pode ter diversos elementos de inserção tais como *checkbox*, *radio button* e *text input*. O *checkbox* permite a seleção de opções com caixas selecionáveis, podendo haver mais de uma seleção; o *radio button* possui as mesmas características que o *checkbox*, mas fica limitado a apenas uma opção; já o *text input* permite a inserção livre de dados por parte do usuário. O *form* possui um elemento do tipo *submit* que é responsável

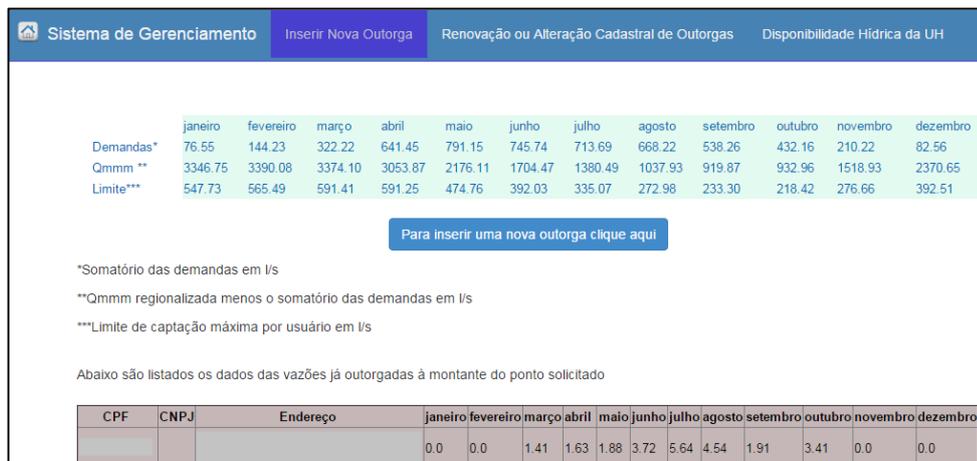


Figura 33: Tela 3

Tela 3 – detalhamento de informações do banco (figura 33):

- Retorna o somatório de todas as vazões outorgadas a montante do ponto e que fazem parte da mesma área de contribuição do ponto que se deseja a outorga.
- Retorna média das vazões mínimas para cada mês do ano, regionalizadas para o trecho hidrográfico que se quer a outorga.
- Retorna o valor máximo de vazão permitido para cada outorga no ponto desejado, em função da média das vazões mínimas regionalizadas.
- Exibe o CPF, o nome do interessado e as vazões mensais autorizadas referente as outorgas já emitidas a montante do ponto e que fazem parte da mesma área de contribuição do ponto que se deseja a outorga.

A tela 3 é a resposta ao código consultaOutorga.py, este executa uma série de buscas no banco de dados, trazendo-as por meio de tabelas e utilizando as coordenadas informadas pelo usuário como variáveis de entrada.

O código funcoesAcessaBanco.py, responsável por armazenar todas as funções usadas neste sistema, é importado logo no começo do código e algumas de suas funções são executadas. Abaixo elas são discriminadas:

- returnIdRiverConvert(x,y,epsg) – Tendo como parâmetros a coordenada e o EPSG informado, primeiramente é feita a conversão da coordenada para o

por finalizar a opção, invocando uma ação atrelada ao *form*, como abertura de outra página HTML ou execução de um código (W3Shcools.com, 2015).

sistema GCS Sirgas 2000, EPSG 4674, utilizando a função nativa do PostGis *ST_Transform*. Em seguida a função verifica espacialmente, (*ST_CONTAINS*), em qual área de contribuição o ponto está contido, verificando na tabela *pghgt_hydro_intel*¹⁴, por meio de pesquisa relacional, qual rio está contido nesta área, visto que esta tabela contém o relacionamento espacial, por meio de chaves primárias e chaves estrangeiras, de todos os trechos de drenagem e áreas de contribuição hidrográficas presentes na base.

- b) *returnAreaMontante(pk_river)* – Tendo como parâmetro a chave primária do trecho ao qual o ponto está relacionado, é verificado no banco o valor da área de contribuição hidrográfica à montante para a coordenada especificada. A tabela *pghgt_drainage_stretch* contém a área de contribuição hidrográfica a montante de cada trecho da base, no campo *drs_nu_upstreamarea*.
- c) *getQmmmByXYConvert(x,y,EPSG)* – Tomando como parâmetros novamente a coordenada e o código EPSG, é verificado na tabela *pghgt_uh*, em qual unidade hidrográfica o ponto está contido (*ST_CONTAINS*), qual a área da UH e quais os valores das médias das vazões mínimas para cada mês do ano.
- d) Com base na área da UH e na área da área de contribuição é obtido um coeficiente por meio da divisão entre o valor da área da UH e o da área de contribuição. Este coeficiente representa a base para a regionalização hidrológica, pois basta multiplicar a média das vazões mínimas por ele que se obtém a média das vazões mínimas para o ponto desejado.
- e) *getSomaVazOutorgas(pk_river)* – Executa a função *pghfn_upstreamstretches*, tomando como parâmetro a chave primária do rio ao qual está associado o ponto, que retorna as chaves primárias de todos trechos de drenagem¹⁵ a montante do ponto. Em seguida, por meio destas chaves, são verificadas na tabela *pghgt_hydro_intel*¹⁶ quais áreas de contribuição contêm estes trechos e depois a soma das vazões, agrupadas por mês, de todas as outorgas (tabela *prght_outorga*) que estão contidas nessas áreas (*ST_CONTAINS*).

¹⁴ As tabelas que compõem o PGHydro podem ser analisadas em Amorim (2012).

¹⁵ Para que os cursos d'água de uma base estejam validados topologicamente e adquiridos dentro das normas vigentes, estes devem ser elaborados de acordo com a ET-ADVG, a qual coloca que a união de n trechos de drenagem forma um curso d'água. Todos os trechos que compõem o curso devem estar conectados e quebrados nos pontos de interseção (DSG, 2008).

- f) `getInfoOutorgas(pk_river)` – É realizada a mesma pesquisa da função `getSomaVazOutorgas`, retornando o nome, CPF e os valores das vazões autorizadas para cada mês do ano, para cada outorga emitida, para a área de contribuição do ponto que será outorgado.

The screenshot shows a web interface for 'Sistema de Gerenciamento' with a navigation bar containing 'Inserir Nova Outorga', 'Renovação ou Alteração Cadastral de Outorgas', and 'Disponibilidade Hídrica da UH'. The main form area is titled 'Inserir Nova Outorga' and contains several input fields arranged in a grid. On the left, there are fields for 'Nome:' (with a dropdown menu showing 'None'), 'CPF:', 'CNPJ:', and 'Endereço:' (with a dropdown menu showing 'None'). To the right, there are 12 input fields for monthly flow rates, labeled 'Vazão de janeiro:' through 'Vazão de dezembro:', each containing the number '0'. At the bottom center of the form is a blue button labeled 'Enviar'.

Figura 34: Tela 4 do Sistema

Tela 4 – inserção de dados (figura 34):

- a) É exibido um formulário que contém os campos necessários para a inclusão de dados da nova outorga a ser inserida no banco.

A coordenada inserida na tela 2 é repassada por meio de um *input type hidden*¹⁷ a esta tela, que é invocada pelo código `digitaInfoOut.py`, onde esta informação se junta às outras que serão inseridas pelo usuário e que irão ser utilizadas no código da tela seguinte.

The screenshot shows the 'Inserção de Outorga' page in the 'Sistema de Gerenciamento'. The navigation bar is the same as in Figure 34, but the 'Inserção de Outorga' tab is highlighted. The main content area displays a message: 'O procedimento foi realizado com sucesso, a outorga foi inserida no banco de dados.'

Figura 35: Tela 5 do Sistema

Tela 5 – Procedimento realizado com sucesso (figura 35):

¹⁷ *Input type hidden* é uma estrutura HTML que permite transferir valores de uma tela para outra de forma escondida, sem que seja exibida na tela (http://www.w3schools.com/tags/att_input_type.asp).

- a) É demonstrada a informação de que o cadastro se deu de forma adequada ou emite uma mensagem de erro, onde se pede ao usuário para voltar para tela anterior e corrigir informações.

Esta tela é invocada pelo código `insereInfoOutorga.py` e as informações passadas pela tela 4 são utilizadas como parâmetro para a função `insertOutorga` (todos os atributos funcionam como parâmetros para esta função), onde se cria uma nova outorga na tabela `pgtgt_outorga`.

Figura 36: Tela 6 para renovação ou alteração de dados cadastrais

Tela 6 – alteração de dados cadastrais (figura 36) para outorgas já emitidas por meio de pesquisa via CPF. O *form* de alteração cadastral executa `alterOutorga.py` que abre a Tela 7.

Escolha a interferência	CPF/CNPJ	Nome	Endereço	Janeiro	Fevereiro	Marco	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
<input checked="" type="radio"/> Alterar	*****	*****	*****	0.0	14.9	15.6	15.6	13.0	10.0	8.8	7.21	6.2	5.77	7.31	0.0

Figura 37: Tela 7 do Sistema

Tela 7 – Verificação de dados (figura 37)

- a) São demonstradas as outorgas existentes para o CPF especificado, bem como informações cadastrais como endereço do ponto e vazões autorizadas.
- b) É possível a escolha por meio de *radio button* da interferência (outorga) que se deseja alterar.

É invocada pelo código `alterOutorga.py`, o qual se utiliza da função `getOut_by_cpf`, responsável por buscar as informações especificadas acima usando como parâmetro o CPF informado no *form* da tela 6.

Mês	Vazão
Janeiro	0.0
Fevereiro	14.9
Março	15.6
Abril	15.6
Maio	13.0
Junho	10.0
Julho	8.8
Agosto	7.21
Setembro	6.2
Outubro	5.77
Novembro	7.31
Dezembro	0.0

Figura 38: Tela 8 do Sistema

Tela 8 – Alteração de dados (figura 38)

- a) É exibido um formulário que contém os campos necessários para a alteração de dados da interferência contida no banco e exibe, já preenchidos, os valores contidos no banco referente aos campos do formulário.

É executado por meio do código `preencherDadosOut.py`, que se utiliza da função `getOut_by_id`, que é responsável por buscar as informações especificadas acima, usando como parâmetro a chave primária selecionada no *radio button* da tela 5.

O procedimento foi realizado com sucesso, a outorga foi alterada no banco de dados

Figura 39: Tela 9 do Sistema

Tela 9 – Alteração realizada com sucesso (figura 39)

- b) É demonstrada a informação de que a alteração cadastral se deu de forma adequada ou emite uma mensagem de erro, onde se pede ao usuário para voltar para tela anterior e corrigir informações.

É executado o código `updateOutorga.py` que executa a alteração (Update) de todas as informações inseridas pelo usuário para outorga selecionada.

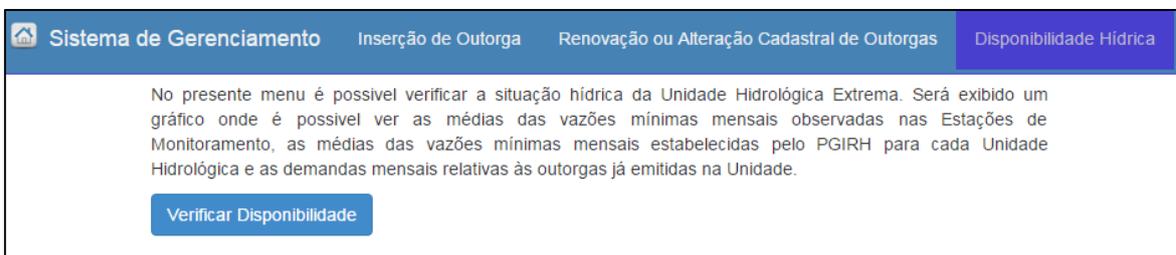


Figura 40: tela 10 do sistema

Tela 10 – Nesta tela (figura 40) é possível verificar a disponibilidade hídrica de toda a bacia.

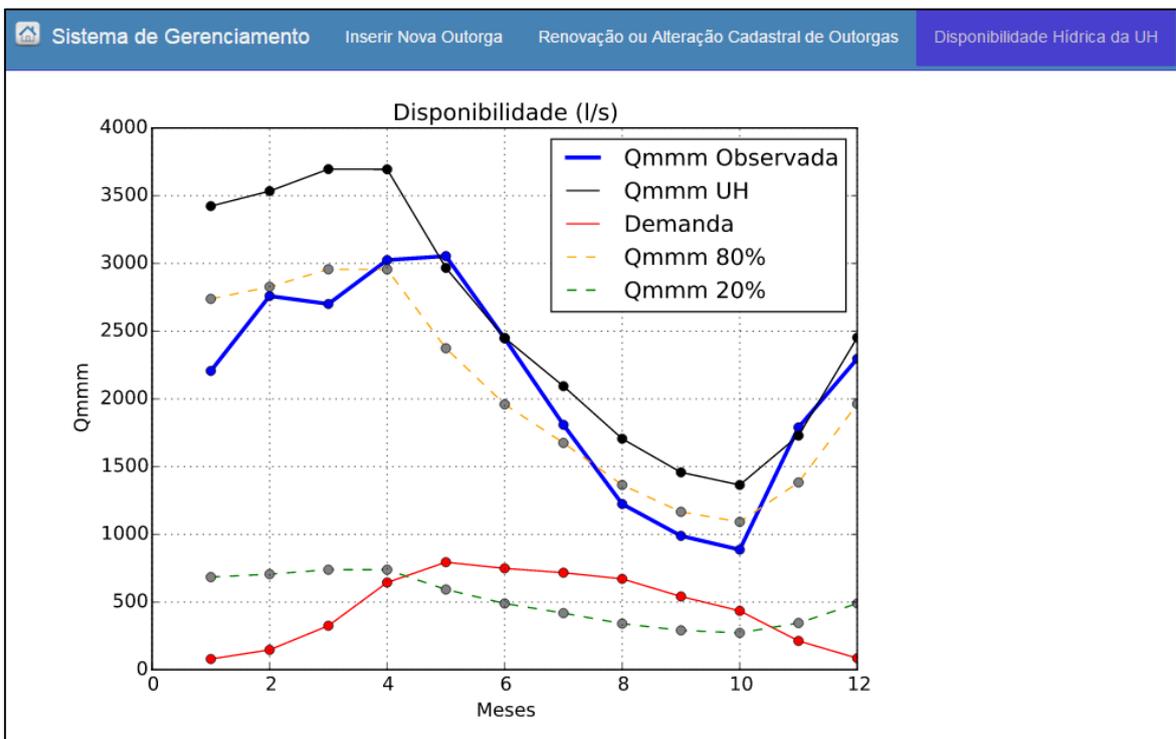


Figura 41: tela 11 do sistema

Tela 11: Nesta tela (figura 41) é executado o código `disponibilidade.py`, onde são verificadas as outorgas concedidas para toda a bacia, e é exibido na tela um gráfico demonstrando a situação hídrica da mesma.

8. Capítulo VII – Considerações Finais

Em vista da crescente demanda por recursos hídricos, a existência de uma ampla rede de monitoramento hidrometeorológica consistente é de grande valia para a gestão desses recursos em uma determinada região, principalmente do ponto vista histórico, onde a existência desses dados permite o conhecimento dos piores cenários já registrados. No entanto, com o uso de algumas técnicas hidrológicas, como a regionalização de vazões, é possível a obtenção de dados de forma indireta de pontos próximos ou correlatos. Dessa forma, a necessidade da existência de estações de monitoramento ainda não é questionada, contudo essas técnicas, principalmente com o apoio da estatística, contribuem em muito para análise dos dados hidrológicos disponíveis. O método trabalhado por Chaves et al. (2012), é um exemplo do aproveitamento desses dados, como ficou evidenciado no resultado dos testes realizados. A análise dos dados permitiu a aceitabilidade do método Chaves et al. (2002), tanto para a área em estudo como para sugestão para outras áreas.

Para uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos, o uso das geotecnologias também se torna muito importante, permitindo uma análise mais ampla, além de reduzir em muito o tempo de análise dos dados, devido a rotinas de processamento.

Os testes estatísticos bem como as análises provenientes do geoprocessamento, permitem uma série de otimizações possíveis com uso da linguagem de programação *Python*, a qual, juntamente com as suas bibliotecas, demonstrou-se satisfatória para os testes e procedimentos desempenhados.

Ter o *Raspberry Pi* como servidor foi também muito eficaz. O seu sistema operacional, o *Raspbian*, demonstrou-se muito estável para suportar as diversas pesquisas que demandam a aplicação, barateando em muito uma possível implantação do sistema.

O sistema de gerenciamento proposto por este trabalho atende plenamente a gestão de recursos hídricos superficiais, permitindo um controle maior da disponibilidade hídrica, haja vista que sua análise se dá de trecho de drenagem por trecho de drenagem, além de sempre ser levado em conta o uso da água na área de influência de qualquer ponto analisado na bacia. Sua interface *html* traz uma interação mais intuitiva para o usuário e o uso do sistema gerenciador *Postgresql/Postgis* permitiu o uso de uma série de ferramentas de pesquisa espacial que, para serem executadas por meio programação, demandariam inúmeras linhas de códigos.

Os *softwares* livres também atenderam muito bem as demandas e operações realizadas neste trabalho. Todas as rotinas necessárias foram suportadas tanto pelo

PostgreSQL/PostGis, como pelo *Qgis*, utilizando o *Linux* como sistema operacional. As potencialidades dos *softwares* livres, de forma geral, não deixam a desejar quando comparados com *softwares* proprietários da área.

9. Literatura Citada

ABRH. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Carta de Salvador. Disponível em <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Arquivos/Eventos/Cartas/cartasalvador1987.pdf> acesso em 04 de abril de 2014.

ABRH. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Carta de Salvador. Disponível em http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?P1=2&P2=115&P3=118&P1T=institucional&P2T=cartas&P3T=foz_iguacu_1989, acesso em 04 de abril de 2014.

ADASA. Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal, Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal (PGIRH), Brasília, 2012.

ADASA. Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Dados coletados junto ao órgão em 2015.

Alchin, M. *Pro Python: Advanced coding techniques and tools*. New York, NY, Apress, 2010, 363 pp.

Alves, W.; Campos, C. A. e Xavier, F. F., Monitoramento quantitativo como instrumento de gestão dos recursos hídricos superficiais no Distrito Federal, tendo o Geoprocessamento como ferramenta de suporte. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.

Alves, W., Campos, C. A. e Freitas, E. Y. Análise da distribuição pluviométrica no distrito federal, brasil, de 2010 a 2014. 12º Silusba, 2015.

ANA & Embrapa/CNPMS, Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil - ano 2013, 2014. Disponível em: <http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/>, acesso em 13 de julho de 2015.

Anselmo, A. R. Hydrologic data management and analysis extensions for an open source geographic. Idaho State University, 2008.

Baena, L. G. N.; Silva, D. D.; Pruski, F. F. & Calijuri, M. L. Regionalização De Vazões Combate Em Modelo Digital De Elevação Para a Bacia Do Rio Paraíba Do Sul. Eng. Agríc., Jaboticabal, 24(3), 612–624, 2004.

Baltokoski, V., Tavares, M. H. F., Machado, R. E. & Oliveira, M. P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos Rios Conrado e Pinheiro - Pato Branco (PR). Rev. Bras. Ciênc. Solo, vol.34, no.1, p.253-261, 2010.

Barnes, R., Lehman, C., & Mulla, D. Priority-flood: An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models. Computers and Geosciences, 62, 117–127. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.024>, 2014.

Baptista, G. M. M. - *Caracterização climatológica do Distrito Federal*. In: IEMA/SEMATEC/UnB, Inventário Hidrológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. Vol. 1, p. 187-208, 1998..

Bazílio, S., Souza, C. H. W. de, Wrublack, S. C., Mercante, E., & Vilas Boas, M. A.. Delimitação automática da microbacia hidrográfica do Rio das Lontras, através de dados SRTM. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 5515–5522, 2013.

Bezerra, N.L. Metodologias para definição de vazões mínimas garantidas em cursos d'água. Dissertação de mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. 130 p, 2001.

Bieniek, A., & Moga, A. N. An efficient watershed algorithm based on connected components. *Pattern Recognition*, 33(6), 907–916. [http://doi.org/DOI: 10.1016/S0031-3203\(99\)00154-5](http://doi.org/DOI: 10.1016/S0031-3203(99)00154-5), 2000.

Borcherds, P. H. Python: a language for computational physics. *Computer Physics Communications*, 177, 199–201, 2007. <http://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.02.019>

Borges, K. A. V., Davis Jr., C. A., Laender, A. H. F. *Modelagem Conceitual de Dados Geográficos*. In: Casanova, M. A., Câmara, G., Davis Jr., C. A., Vinhas, L., Queiroz, G. R. (Eds.) *Bancos de Dados Geográficos*. Curitiba (PR): EspaçoGeo, 2005, p. 93-146.

Brasil. Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/leis/L9433.htm, acesso em 20 de fevereiro de 2016.

Callow, J. N., Van Niel, K. P., & Boggs, G. S. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? *Journal of Hydrology*, 332(1-2), 30–39, 2007. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.020>.

Câmara, G. e Davis, C., *Introdução*, In. Câmara, G., Davis, C., Monteiro, A. M. & D'Alge, J.C *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos, INPE, 2001 (on-line, 2a. edição, revista e ampliada).

Câmara, G.; Casanova, M.A.; Medeiros, C. B.; Hemerly, A.; Magalhães, G. *Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica*. Curitiba, Sagres Editora, 1997.

- Campos, J. E. G. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Revista Brasileira de Geociências*. 34:41-48. 2004.
- Campos, J. E. G. & Freitas Silva, F. H.. Inventário Hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. 1998.
- Carneiro, P. J. R. et. al. Evolução do Uso da Água na Bacia do Rio Preto no Distrito Federal. *Espaço & Geografia*, Vol. 10, N° 2, 325:353, 2007.
- Caissie, D. & El-Jabi, N. Comparirison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(2): 235-246, 10.1139/195-033, 1995.
- Cawley, A. M. & Cunnane, C., Comment on estimation of greenfield runoff rates, *National Hydrology Seminar*, pp. 29-43, 1993.
- Chaves, H. M. L., Rosa, J. W. C., Vadas, R. G., Oliveira, R. V. T. Regionalização de Vazões Mínimas em Bacias Através de Interpolação em Sistemas de Informações Geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.7, n. 3, p. 43-51, 2002.
- Christofoletti, A. *Modelagem de Sistemas Ambientais*. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 1999.
- Chudoba, R., Sadílek, V., Ryppl, R. & Vořechovský, M. Using Python for scientific computing: Efficient and flexible evaluation of the statistical characteristics of functions with multivariate random inputs. *Computer Physics Communications*, 184, pp. 414-427, 2013.
- Collischonn, B. & Lopes, A.V. Sistema de apoio à decisão para outorga na bacia do Rio Grande (MG/SP). In: *II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste*, Rio de Janeiro, 2008.
- Collischonn, B & Lopes, A.V. Sistema de apoio à decisão para análise de outorga na bacia do Paraná. In: *XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Campo Grande, 2009.
- Collischonn, W.; Allasia, D. G.; Silva, B. C. & Tucci, C. E. M.. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal* Vol. 52, Iss. 5, 878-895 pp. 2007.
- Collischonn, W.; Tucci, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, n., p.27-39, 2003.
- Consórcio GOLDBER/ FAHMA (Golder Associates do Brasil Ltda / Fahma Planejamento e Engenharia Agrícola Ltda). Secretaria de Infraestrutura e Obras. Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal (PGIRH). Brasília, 2005.

CONCAR – Comissão Nacional de Cartografia. Especificação técnica para estruturação de dados geoespaciais vetoriais (ET-EDGV). Rio de Janeiro, 2012.

Cruz, J.C. Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 199 p, 2001.

Davis, J. C. Statistics and data analysis in Geology, 3a edição. New York: John Wiley & Sons, 2002. 635 p, 2002.

Debian. Debian: The universal operation system. Disponível em <https://www.debian.org/index.pt.html>, acesso em 20 de fevereiro de 2016.

DeGroot, M. H., Schervish, M. J. Probability and Statistics. Fourth Edition. Boston: Ed. Pearson Education, 2002. 893 p.

DSG – Diretoria do Serviço Geográfico, Especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais (ET-ADGV). Brasília, 2008.

Distrito Federal, Zoneamento Ecológico-Econômico do DF Subproduto 3.5 - Relatório de Potencialidades e Vulnerabilidades. 2012.

Distrito Federal, Lei 4.285, de 26 de Dezembro de 2008. Reestrutura a Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal – ADASA/DF, dispõe sobre recursos hídricos e serviços públicos no Distrito Federal e dá outras providências. Disponível em Lei Distrital nº 4.285, acesso em 20 de fevereiro de 2016.

Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Metodologia para regionalização de vazões. 2 v. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1985.

Elmasri, R.; Navathe, S.B. Fundamentals of Database Systems, Sixth Edition. Pearson. pp. 1200 pp. 2010.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento de solos do Distrito Federal. Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS. 1978. 455p. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim Técnico, 53).

Engeland, K. Gottschalk, L & Tallaksen, L. Estimation of regional parameters in a macro scale hydrological model (In press) Nordic Hydrology Vol. 32, 2001.

EPSG. EPSG Org. IOGP – International Association of Oil & Gas Producers. Disponível em <http://www.epsg.org/>, acesso em 01 de novembro de 2015.

ESRI (Environmental Systems Research Institute), "Modelling Our World: The ESRI Guide to Geodatabase Design", Redlands, CA, 2000.

Euclides, H.P. et. al., Atlas Digital das Águas de Minas. 2012. Disponível em < http://www.hidrotec.ufv.br/download/Sintese_atlas.pdf > acesso em 02 de abril de 2014.

Fan, F. M.; Collischonn, W. .Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, p. 243-254, 2014.

Felgueiras, C. A.; Câmara, G., Modelagem Numérica de Terreno. In: Câmara, G.; Davis JR, C. A.; Monteiro, A. M. V.; D'Alge, J. C. L. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, 2001, cap. 7. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf> Acesso em: 01 de novembro 2015.

Gonçalves, T. D. Recursos Hídricos no Distrito Federal: Modelagem Hidrológica para subsidiar a gestão sustentável na bacia do Ribeirão Pipiripau. Universidade de Brasília, 2012.

Gonçalves. T.D.; Campos, J. E. G. & Roig, H. L.. Sistema de informação geográfica como ferramenta de apoio à outorga dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. Revista Brasileira de Geociências, v. 39, p. 169-180, 2009.

Goodchild, M. F. Geographic Information Systems. Chapter 84 in W.S. Bainbridge, editor, Leadership in Science and Technology. 2: 238–245. Thousand Oaks, CA: SAGE. [515], 2012. Disponível em from <http://www.geog.ucsb.edu/~good/papers/515.pdf>, acesso em 15 de novembro 2015.

Gottschalk, L.; Beldring, S.; Engeland, K.; Tallaksen, L.; Sælthun, N. R.; Kolberg, S. & Motovilov, Y. Regional/macro scale hydrological modelling: a Scandinavian experience. Hydrological Sciences Journal, 46(6), 963–982, 2001. <http://doi.org/10.1080/02626660109492889>.

GRASS OSGeo Project Org. Geographic Resources Analysis Support System. Disponível em <https://grass.osgeo.org/home/about-us/>, acesso em 08 de março de 2016.

Hsu, L., & Obe, R. *PostGIS in action*. (Manning, Ed.). Stamford: Manning Publications, 2011.

Hsu, L., & Obe, R. *PostgreSQL: Up and Running*. (O'Reilly, Ed.). Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA.: O'Reilly, 2012.

IBGE. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoas/introducao.html, acesso em 25 02 de 2016.

Inde – Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. Disponível em <http://www.metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/br/metadata.show.embedded?uuid=43539328-3a83-4bf2-9cea-2b47513f4b07>, acesso em 20 de fevereiro de 2016.

- Jenson, S. K. & Domingue, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11): 1593-1600, 1988.
- Jones, R. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computers & Geosciences*, 28(9), 1051–1060, 2002. [http://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00022-5](http://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00022-5).
- Kitchin, R., Thrift, N., & Goodchild, M. F. GIS and Cartography. *International Encyclopedia of Human Geography*, 500–505, 2009. <http://doi.org/DOI: 10.1016/B978-008044910-4.00034-1>
- Lampert, D. J., & Wu, M. Development of an open-source software package for watershed modeling with the Hydrological Simulation Program in Fortran. *Environmental Modelling & Software*, 68, 166–174, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.018>
- Hellweger, F.L. AGREE – DEM surface reconditioning system, University of Texas, Austin, 1997.
- Lanna, A.E. Gestão dos recursos hídricos. In: Tucci, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1993. p. 727-768.
- Linux. Viva o Linux. Disponível em <https://www.vivaolinux.com.br/linux/>, acesso em 20 de fevereiro de 2016.
- Lutz, M. Learning Python 4th Edition. Gravenstein Highway North: O’Reilly Media, Inc., 2009. 501 pp.
- Maia, J. L. Estabelecimento de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Alto Sapucaí, com a utilização de sazonalidade. Dissertação de mestrado, Área de concentração de Planejamento Energético, Universidade Federal de Itajubá. 116 p, 2003.
- Maguire, D. An overview and definition of GIS. *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, 1991. Disponível em <http://lidecc.cs.uns.edu.ar/~nbb/ccm/downloads/Literatura/OVERVIEW%20AND%20DEFINITION%20OF%20GIS.pdf>, acesso em 15 de novembro de 2015.
- Medeiros, C.B. & Pires, F. Databases for GIS. *ACM Sigmod Record*, 23(1), 107–115, 1994. <http://doi.org/10.1145/181550.181566>
- Mendes, L. A. Análise dos critérios de outorga de direito de usos consuntivos dos recursos hídricos baseados em vazões mínimas e em vazões de permanência. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, São Paulo. 187 p, 2007.

Menezes, P. H. B. J. et. al. *Análise da Evolução do Padrão de Uso e Ocupação do Solo na Bacia de Contribuição do Lago Paranoá - DF*. Estudos Geográficos (UNESP), v. 8, p. 87-105, 2012.

Microsoft. SQL Server. Disponível em <http://www.oracle.com/technetwork/pt/database/enterprise-edition/overview/index.html>, acesso em 22 de fevereiro de 2016.

MMA, Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos, 1997

Molina, S. K. M.; Almeida, I. K.; Steffen, J. L. & Alves Sobrinho, T. Caracterização de disponibilidade hídrica e comparação de metodologias de regionalização de vazões. São Paulo, UNESP, Revista Geociências, v. 33, n. 3, p.506-515, 2014.

Moore, I. D., Grayson, R. B.; & Ladson, A. R. Digital Terrain Modeling : A Review of Hydrological Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30, 1991.

Moreira, M. C., Pruski, F. F., Silva, D. D. & Silva, J. M. A. Comparação dos valores da $Q_{7,10}$ estimados por diferentes métodos de regionalização de vazões. Engenharia na Agricultura, v. 18, p. 522-528, 2010.

Naghetini, M. & Pinto, E. J. A. Correlação e regressão. In: Naghetini, M. & Pinto, E. J. A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 561 p.

NERC (Natural Environmental Research Council) Flood Studies Report , Vols 1 to 5, London: NERC, 1975.

Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10. 282-290, 1970.

Novaes, L. F., Pruski, F. F., Queiroz, D. O., Rodriguez, R. G., Silva, D. D. & Ramos, M. M. Avaliação de desempenho de cinco metodologias de regionalização de vazões. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.12, p.51-61, 2007.

Novaes, L.F., Pruski, F.F., Pereira, S.B., Queiroz, D.O. & Rodriguez, R. G. Gestão de recursos hídricos: uma nova metodologia para a estimativa das vazões mínimas. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.17, n.1, p.62-74, 2009.

O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 27(2), 247, 1984.

ONU (Organização das Nações Unidas), A Declaração da Conferência das Nações Unidas sobre o meio ambiente humano – 1972, Estocolmo: Conferência das nações Unidas, 1972.

Disponível em <http://www.direitoshumanos.usp.br/index.php/Meio-Ambiente/declaracao-de-estocolmo-sobre-o-ambiente-humano.html>, acesso em 02 de novembro de 2015.

ONU (Organização das Nações Unidas), A ONU e o meio ambiente, 2016. Disponível em <https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>, acesso em 08 de março de 2016.

ONU (Organização das Nações Unidas), Nosso Futuro Comum - Relatório Brundtland, 1987. Disponível em <http://www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm>, acesso em 08 de março de 2016.

ONU (Organização das Nações Unidas), The Dublin Statement on Water and Sustainable Development. 1992. Disponível em <<http://www.un-documents.net/h2o-dub.htm>>, acesso em 13 de março de 2014. ONU (Organização das Nações Unidas), Agenda 21. 1992. Disponível em <http://www.onu.org.br/rio20/img/2012/01/agenda21.pdf>, acesso em 08 de março de 2016.

Oracle. Disponível em <http://www.oracle.com/technetwork/pt/database/enterprise-edition/overview/index.html>, acesso em 22 de fevereiro de 2016.

Ormeling, F. J. 25 years International Cartographic Association: 1959-1984. Ensbebe: ICA, 1984.

Pfafstetter, O. Classificação de bacias hidrográficas: Metodologia de codificação. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), 1989, p. 19. Trabalho Não Publicado.

Pereira, J. S. & Lanna, A. E. L. Análise de critério de outorga dos direitos de uso. In: Simpósio de recursos hídricos do nordeste, 3., Salvador - Ba. Anais. ABRH, 1996.

Pelletier, J. D. A robust, two-parameter method for the extraction of drainage networks from high-resolution digital elevation models (DEMs): Evaluation using synthetic and real-world DEMs. *Water Resources Research*, 49, 75–89, 2013. <http://doi.org/10.1029/2012WR012452>.

Perens, B. The Open Source Definition, *Linux Gazette* issue 26, February 10, 1998, disponível em <http://www.oreilly.com/openbook/opensources/book/perens.html>, acesso em 01 de novembro de 2015.

Pessoa, M. M. E. P., Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica na análise de processos de outorga quantitativa de uso da água: aplicação na bacia do Rio dos Sinos – RS. Dissertação (mestrado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 90 p, 2010.

PgHydro. PgHydro – Hydrographic Objects for PostgreSQL. Disponível em <http://pghydro.org/>, acesso em 22 de fevereiro de 2016.

Planchon, Olivier, and Frédéric Darboux. “A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models.” *Catena* 46: 159–176, 2001.

Python Org. Disponível em <https://docs.python.org/2/tutorial/index.html>, acesso em 20 de fevereiro de 2016.

PostgreSQL. Disponível em <http://www.postgresql.org/about/>, acesso em 20 de fevereiro de 2016.

Postgis. Spatial and Geographic objects for PostgreSQL. Disponível em <http://postgis.net/>, acesso em 22 de fevereiro de 2016.

QGis Brasil Org. Disponível em <http://qgisbrasil.org/blog/2015/04/10/qgis28-delimitacao-de-bacias-hidrograficas-com-taudem/>, acesso em 21 de fevereiro de 2016.

QGis. QGis Project. Disponível em http://www.qgis.org/pt_BR/site/, acesso em 20 de fevereiro de 2016.

Ramos, V. M.; Guimarães, R. F.; Redivo, A. L., Abílio; O., Júnior, D. C.; Arnaldo, R. & Gomes, T. Avaliação de Metodologias de Determinação do Cálculo de Áreas de Contribuição. *Water Resources*, 2, 41–49, 2003.

Raspberry Pi Org. Disponível em <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>, acesso em 20 de fevereiro de 2016.

Revista Águas do Brasil, Ano 1, nº2, disponível em Revista Águas do Brasil, Ano 1, nº2, 2011, disponível em http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/artigos/20111103_Revista%20%C3%81guas%20do%20Brasil_Ano%201,%20n%C2%BA%202.pdf

Richardson, M., & Wallace, S. Primeiros passos com o raspberry pi, 192, 2013.

Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F., Lorenzen, W. *Object-oriented Modeling and Design*. Prentice-Hall, 1991.

SAGA Org. System for Automated Geoscientific Analyses. Disponível em <http://www.saga-gis.org/en/index.html>, acesso em 08 de março de 2016.

Sampaio, E. V. D. S. B., & Costa, T. L. Da. (2012). Espacialização e Sazonalidade da Precipitação Pluviométrica do Estado de Goiás e Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 05(1), 87–100.

Sano, E.; Lima, J.E.F.W.; Siva, E.M & Oliveira, E.C., Estimativa da variação na demanda de água para irrigação por pivô-central no Distrito Federal entre 1992 e 2002. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 25, n. 2. 508-515. 2005.

Sarmiento, R. Estado da arte da vazão ecológica no Brasil e no mundo. Produto 2. Unesco/Ana/CBHSF, 2007. Disponível em <http://www.grh.ufba.br/%5Cecovazao%5CSARMENTO.pdf>, acesso em 05 de março de 2014.

Senevirathne, N., & Willgoose, G. A Comparison of the Performance of Digital Elevation Model Pit Filling Algorithms for Hydrology. 20th International Congress on Modelling and Simulation, (December), 1624 – 1630, 2013. Disponível em <http://www.mssanz.org.au/modsim2013/H2/senevirathne.pdf>, acesso em 15 de novembro de 2015.

Silva, P.M.O.; Mello, C.R.; Silva, A.M. & Coelho, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. R. Bras. Engenharia Agrícola Ambiental. 12:258-265, 2008.

Silveira, A. L. L., Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: Tucci, C.E.M. (Org.) Hidrologia: ciência e aplicação. 3ª Ed. Porto alegre: Editora da UFRGS/ABRH. 2001. 943 p. Tarboton, D. G. The analysis of river basins and channel networks using digital terrain data. Massachusetts Institute of Technology, 1991.

Tarboton, D. G., "Terrain Analysis Using Digital Elevation Models in Hydrology," 23rd ESRI International Users Conference, San Diego, California, July 7-11. 2003.

Tarboton, D. G., Hydrologic Research Group. Utah State University. Disponível em <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/>, acesso em 21 de fevereiro de 2016.

Teixeira, Alexandre de Amorim. Ottocodificação estendida e inteligência hidrográfica em banco de dados geográficos. 2012. xi, 425 f., il. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

Teixeira, A. de A. & Silva, A. PgHydro—Objetos Hidrográficos Em Banco De Dados Geográficos. XX Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, 8, 2013. Disponível em http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20131118_PAP012911.pdf, acesso em 20 de novembro de 2015

Tomaz, P. Vazão base e mínima ecológica. In Critério Unificado para Manejo das Águas pluvias em áreas urbanas. Livro Virtual, 2010. Disponível em http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_poluicao_difusa/capitulo105.pdf, acesso em 05 de março de 2014.

Tucci, C.E.M. Regionalização de vazões. In: Tucci, C.E.M. (Org.) Hidrologia: ciência e aplicação. 3ª Ed. Porto alegre: Editora da UFRGS/ABRH. 2001. 943 p.

_____, Vazão de Referência. 2009. In: *Blog do Tucci: Recursos Hídricos e meio ambiente*. Disponível em <http://rhama.net/wordpress/?p=113>, acesso em 05 de março de 2014.

- Vieira, Paulo. Monitoramento para o controle e gestão dos Recursos Hídricos. Revista Águas do Brasil, ano 1, número 2, p. 22-25. São Paulo: REBOB – Rede Brasil de Organismos de Bacia, 2011.
- Wang, L., & Liu, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. International Journal of Geographical Information Science, 20(2), 193–213, 2006. <http://doi.org/10.1080/13658810500433453>.
- Westra, E. Python Geospatial Development, Second Edition. Packt Publishikng, Birmingham, UK. 2013. 491 p.
- W3Shools.com. (2015). The <form> Element The <input> Element, 1–11. Disponível em http://www.w3schools.com/html/html_forms.asp, acesso em 2 de novembro de 2015.
- W3Schools, HTML(5) Tutorial. <http://www.w3schools.com/html/default.asp>, acesso em 20 de fevereiro de 2016.
- Yeung, A. K. W. & Hall, G. B., *Spatial Database Systems: design, implementation and project management*. GeoJournal library, vol. 87. Dordrecht, The Netherlands: Springer. Springer. 2007.