

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Regionalização hidrológica para o estado de Goiás e Distrito Federal

Thaís da Silva Charles

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2020

Thaís da Silva Charles
Engenheira Agrícola e Ambiental

Regionalização hidrológica para o estado de Goiás e Distrito Federal
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **SERGIO NASCIMENTO DUARTE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Charles, Thaís da Silva

Regionalização hidrológica para o estado de Goiás e Distrito Federal /
Thaís da Silva Charles .- - versão revisada de acordo com a resolução
CoPGr 6018 de 2011 - Piracicaba, 2020.

93 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz
de Queiroz”.

1. Análise de cluster 2. Regiões hidrologicamente homogêneas 3.
Modelagem hidrológica 4. krigagem ordinária . I. Título

Dedico,

*À minha mãe Simone e ao meu irmão João Pedro,
que sempre acreditaram e incentivaram meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Simone, que com toda sua força e dedicação me mostrou que a educação é a chave da mudança.

Ao meu padrasto Adriano, que com toda sua paciência, respeito e honestidade me ajudou a ser uma pessoa melhor.

Aos meus irmãos João Pedro e Ana Clara, amores da minha vida, que entendem minha ausência e são o motivo pelo qual busco ser melhor a cada dia.

Aos meus avós Irany, Gentil (*in memorian*) e Carolina (*in memorian*), que com humildade e muito amor me proporcionaram os maiores ensinamentos.

As minhas tias, que posso chamar de mãe, Elizete, Maria Aparecida e Sandra, por todo amor e carinho e por sempre acreditarem no meu potencial.

Aos meus primos André, Taynara, Tamires, Isabela e Juan, por estarem sempre dispostos a me escutar, tenho sorte de ter vocês ao meu lado.

À todos os amigos do departamento: Ana, Ângelo, Beth, Brenda, Carlos, Dani, Débora, Diego, Juliana, Júnior, Lari, Luciano, Luísa, Martiliana, Rubmara, Simone, Tércio e Tibério por todos os momentos e conversas.

Aos irmãos de orientação Jéssica, Adriano e Hugo por toda paciência, amizade, companheirismo e carinho, além da valiosa contribuição na realização desse trabalho.

Aos amigos da vida por todo apoio, amor e paciência.

Aos funcionários: Ângela, Paulinha, Sr. Antônio, Ivone, Bia e Davilmar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sergio Nascimento Duarte, por acreditar no meu trabalho, além da disponibilidade e paciência.

Aos membros da banca Profs. Drs. Carolina Bozzeti, Conan Ayade e Fernando Mendonça por todas as contribuições que enriqueceram o trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

MUITO OBRIGADA A TODOS VOCÊS!

*“O ser humano esqueceu que a água vem da chuva e a comida do solo.
Passamos a acreditar que a água e nosso alimento são produtos de uma corporação.”*

Vandana Shiva, física, ambientalista e ecofeminista

SUMÁRIO

ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1. PRINCIPAIS MARCOS REGULATÓRIOS NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DOS LOCAIS DE ESTUDO	17
3.1.1. <i>Brasil</i>	17
3.1.2. <i>Goiás</i>	18
3.1.3. <i>Distrito Federal</i>	19
3.2. OUTORGA DO DIREITO DE USO DA ÁGUA	20
3.3. VAZÕES DE REFERÊNCIA	22
3.4. REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA	23
3.4.1. <i>Contextualização</i>	23
3.4.2. <i>Definições e metodologias</i>	24
3.4.3. <i>Regiões hidrologicamente homogêneas</i>	27
3.5. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL APLICADA A DADOS PLUVIOMÉTRICOS	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	35
4.1.1. <i>Estado de Goiás</i>	35
4.1.2. <i>Distrito Federal</i>	37
4.2. FLUXOGRAMA METODOLÓGICO	38
4.3. DADOS FLUVIOMÉTRICOS.....	39
4.3.1. <i>Obtenção dos dados</i>	39
4.3.2. <i>Preenchimento de falhas</i>	40
4.3.3. <i>Características fisiográficas</i>	42
4.3.4. <i>Cálculo das vazões de referência</i>	44
4.4. DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	45
4.5. DELIMITAÇÃO DAS REGIÕES HIDROLOGICAMENTE HOMOGÊNEAS	46
4.6. REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA DE VAZÕES.....	47
4.6.1. <i>Desenvolvimento dos modelos hidrológicos</i>	47
4.6.2. <i>Avaliação dos modelos hidrológicos</i>	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1. DELIMITAÇÃO DAS BACIAS DE DRENAGEM.....	51
5.2. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	52
5.3. AJUSTES DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA OBTIDAS POR INTERMÉDIO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS.....	55
5.4. REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA	56
5.4.1. <i>Regiões hidrologicamente homogêneas</i>	56
5.4.2. <i>Modelos de regionalização hidrológica</i>	57
5.4.3. <i>Avaliação dos modelos de regionalização</i>	58
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
7. CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS.....	77
ANEXO A	87
ANEXO B	90

RESUMO

Regionalização hidrológica para o estado de Goiás e Distrito Federal

O gerenciamento dos recursos hídricos visa solucionar problemas decorrentes do uso intensivo da água, visto o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico e, dessa forma, garantir e preservar esse recurso para esta e para as futuras gerações, possibilitando a disponibilidade e qualidade adequada da água, além da preservação ambiental. A gestão adequada desse recurso é baseada no conhecimento acerca da disponibilidade hídrica dos cursos d'água, e para tal são utilizadas informações provenientes de estações hidrométricas distribuídas ao longo do território. No Brasil, devido à grande extensão territorial, a disponibilidade de informações por muitas vezes não é suficiente para todas as regiões de interesse. Para suprir essa problemática, há uma técnica denominada regionalização hidrológica, sendo uma alternativa na obtenção de informações da rede hídrica, como vazão, em regiões com ausência de dados, ou com dados insuficientes. Salienta-se que essa técnica consiste na transferência de informações entre locais monitorados e não monitorados, desde que esses possuam similaridade hidrológica. No Brasil, não são todas as regiões que já possuem modelos de regionalização hidrológica definidos, afetando o correto gerenciamento por falta de informações. Como acontece no estado de Goiás e no Distrito Federal, duas importantes regiões no que tange à conservação dos recursos hídricos, dado que englobam três grandes bacias hidrográficas do território nacional. Isso posto, o objetivo geral desse trabalho consistiu em desenvolver uma proposta de regionalização hidrológica de vazões de referência para o estado de Goiás e para o Distrito Federal, baseada em regiões hidrologicamente homogêneas e na regressão multivariada. A partir das séries históricas disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e posterior preenchimento das falhas existentes, foram calculadas as vazões: Q_{90} , Q_{95} e \bar{Q} e as áreas de drenagem utilizadas para cálculo da \bar{q}_{esp} , referentes às estações fluviométricas que compuseram o estudo. Já com os dados das estações pluviométricas foram calculadas a precipitação anual média, de cada uma delas, por meio da interpolação espacial por *krigagem* ordinária, sendo comparada aos dados obtidos com o satélite TRMM. Posteriormente, calculou-se as características fisiográficas de cada bacia: declividade média da bacia, densidade de drenagem e comprimento do talvegue principal. Em posse desses dados, foram delimitadas as regiões hidrologicamente homogêneas utilizando a análise de *cluster* com algoritmo *k-means*, obtendo-se 7 regiões. Desenvolveu-se, então, os modelos de regionalização das vazões de interesse (Q_{90} , Q_{95} e \bar{Q}) para cada uma dessas regiões por regressão linear múltipla, em que a variável dependente foi a \bar{q}_{esp} e as variáveis independentes foram: declividade média da bacia, densidade de drenagem e comprimento do talvegue principal. Por fim, os modelos de regionalização foram avaliados pelos índices de performance: coeficiente de determinação (R^2), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), percentual de viés (PBIAS), índice de concordância de Willmont (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c). Os resultados obtidos comprovam que os modelos, de maneira geral, apresentaram um bom desempenho quanto aos índices de performance. Entretanto, quando analisado o índice PBIAS isoladamente, o modelo da região hidrologicamente homogênea 2 apresentou o pior desempenho, seguido pela região 6, que apresentou bom desempenho para os índices PBIAS, r, d e c. A região 6 apresentou valores apenas satisfatório dos índices R^2 e NSE para Q_{90} e Q_{95} quando analisado os índices R^2 e NSE. Graficamente, os modelos apresentaram boa correlação entre os dados regionalizados e calculados, representando uma importante ferramenta para auxiliar as agências de água do estado de Goiás e do Distrito Federal no processo de concessão de outorgas.

Palavras-chave: Análise de *cluster*; Regiões hidrologicamente homogêneas; Modelagem hidrológica; *krigagem* ordinária

ABSTRACT

Hydrological regionalization for the Goiás state and the Federal District

The management of water resources aims to solve problems of intensive use of water, given population growth and economic development and, in this way, to guarantee and preserve resources for these and future generations, the availability and the personalized quality of water, in addition to environmental preservation. However, to ensure the proper management of these resources, it is necessary to know about the water availability of watercourses. For this purpose, monitoring information from hydrometric stations distributed throughout the territory is used. In Brazil, due to a large territorial extension the availability of information is often not sufficient for all regions of interest. Thus, to suppress this problem there is a technique called hydrological regionalization, being an alternative in hydrological information, such as leakage, in regions with data loss, or with insufficient data, since a technique is determined in the transfer information between the monitored and not monitored, as long as they have a hydrological similarity. In the country some regions already have regional hydrology models, but this is not a reality in all states, which end up being affected by the lack of hydrological information to carry out the correct management, or that occurs in the state of Goiás and the Distrito Federal, two important regions when it comes to respecting water resources, given that they encompass three large hydrographic basins in the national territory. This post, the aim of this work is to develop a proposal for hydrological regionalization of reference leaks for the state of Goiás and the Distrito Federal, homogeneous hydrographic regions and multivariate regression. From the historical series made available by the National Water and Basic Sanitation Agency and subsequent filling in of faults occurred calculated as flows: Q_{90} , Q_{95} , and \bar{Q} , as drainage areas, used for \bar{q}_{esp} calculation, with pluviometric stations used in the study. With the data for the pluviometric stations were calculated the annual average precipitation for each station using spatial interpolation by ordinary kriging and compared to the data obtained with the TRMM satellite. Subsequently, the physiographic characteristics of each basin were calculated: the mean slope of the basin, drainage density, and length of the principal river. In possession of these data, they were delimited as hydrologically homogeneous regions, using cluster analysis with k-means algorithms, totaling seven regions. Then, regionalization models were developed for each hydrologically homogeneous region by linear multiple regression, to determine Q_{90} , Q_{95} , and \bar{Q} , in which a dependent variable was specified, and as independent variables were: the mean slope of the basin, drainage pressure and length of the principal river. Finally, the regionalization models were evaluated by performance indexes: determination coefficient (R^2), Nash-Sutcliffe efficiency test (NSE), percent bias (PBIAS), Willmott agreement index (d), coefficient of determination (r) and confidence index (c). The models, in general, presented a good performance concerning these indices, being the model of the hydrologically homogeneous region 2 the one of worst performance, when analyzed the PBIAS index alone, followed by the region 6, which presented a good performance for the PBIAS indices, r, d, and c, but only satisfactory for Q_{90} and Q_{95} when analyzing the R^2 and NSE indices. The other regions performed well for all indexes. Graphically, the models presented a good correlation between the regionalized and calculated data, since the regionalized values were very close to the real ones, representing an important tool to assist water agencies in the state of Goiás and the Distrito Federal in the granting process.

Keywords: Cluster analysis; Homogeneous hydrological regions; Hydrological modeling; Ordinary kriging

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aspecto visual da classificação de dados por análise de <i>cluster</i> . Fonte: (JAIN; MURTY; FLYNN, 1999).....	28
Figura 2. Exemplo de um semivariograma. Fonte: (CAMARGO, 1998).	31
Figura 3. Localização geográfica do estado de Goiás e do Distrito Federal.	35
Figura 4. Macro bacias do estado de Goiás e Distrito Federal, separadas pelo antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE).	36
Figura 5. Fluxograma metodológico da Dissertação, apresentando etapas e <i>softwares</i> utilizados.	38
Figura 6. Estações fluviométricas do estado de Goiás, Distrito Federal e circunvizinhas, localizadas nas bacias Ottocodificadas – nível 3 e utilizadas nesse trabalho.	40
Figura 7. A) Total de dados disponíveis para as respectivas estações; B) Total de dados disponíveis para as respectivas estações nos anos em que foi realizado o preenchimento de falhas; C) Vazão diária ao longo dos anos antes do preenchimento de falhas; D) Vazão diária ao longo dos anos após do preenchimento de falhas.....	41
Figura 8. Modelo Digital de Elevação do estado de Goiás e do Distrito Federal.	42
Figura 9. Estações pluviométricas do estado de Goiás, Distrito Federal e circunvizinhas, utilizadas nesse estudo.....	45
Figura 10. Bacias de drenagem das estações fluviométricas do estado de Goiás e Distrito Federal utilizadas nesse trabalho.	51
Figura 11. Distribuição espacial da chuva do estado de Goiás e do Distrito Federal, obtidos por meio de <i>krigagem</i> ordinária.	52
Figura 12. Distribuição espacial da chuva no estado de Goiás e do Distrito Federal, obtidos por meio do satélite TRMM.	53
Figura 13. Comparação lâminas médias anuais precipitadas (mm ano^{-1}) nas bacias de drenagem, utilizando dados obtidos por meio da <i>krigagem</i> ordinária e do satélite TRMM.	54
Figura 14. Dispersão da precipitação anual média (mm ano^{-1}) obtida por meio da <i>krigagem</i> ordinária e pelo satélite TRMM. Com correlação linear significativa para $p < 0,05$, teste <i>t-student</i>	54
Figura 15. Regiões hidrologicamente homogêneas do estado de Goiás e do Distrito Federal segundo a análise de <i>cluster</i>	56
Figura 16. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 1, significativa para $p < 0,05$ pelo teste <i>t-student</i>	60
Figura 17. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 2, significativa para $p < 0,05$, teste <i>t-student</i>	62
Figura 18. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 3, significativa para $p < 0,05$, teste <i>t-student</i>	63
Figura 19. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 4, significativa para $p < 0,05$ pelo teste <i>t-student</i>	64
Figura 20. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 5, significativa para $p < 0,05$, teste <i>t-student</i>	66
Figura 21. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 6, significativa para $p < 0,05$, teste <i>t-student</i>	67

Figura 22. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 7, significante para $p < 0,05$, teste *t-student*. 69

Figura 23. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, geral, significante para $p < 0,05$, teste *t-student*. 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação qualitativa do desempenho de modelos, recomendados por Moriasi et al. (2015) e por Camargo e Sentelhas (1997), para regionalização hidrológica.	50
Tabela 2. Classificação qualitativa do desempenho do modelo por meio do índice de confiança (c), sugerido por Camargo e Sentelhas (1997).	50
Tabela 3. Número de estações fluviométricas por distribuições de probabilidade das curvas de permanência utilizadas para obtenção das vazões de referência, em função de cada teste de aderência. ...	55
Tabela 4. Coeficiente angulares das equações de regionalização para o cálculo da vazão média específica regionalizada para cada região hidrologicamente homogênea.	57
Tabela 5. Coeficientes angulares de redução para cálculo da Q_{90} e Q_{95} regionalizada.	58
Tabela 6. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 1.	60
Tabela 7. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 2.	62
Tabela 8. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 3.	63
Tabela 9. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 4.	65
Tabela 10. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 5.	66
Tabela 11. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 6.	68
Tabela 12. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 7.	69
Tabela 13. Índices de performance e classificação de desempenho geral dos modelos de regionalização. ..	71

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui cerca de 12% da disponibilidade de água doce do planeta, uma das maiores reservas mundiais. Contudo, a distribuição natural tem ampla disparidade ao longo do território, espacial e temporalmente. Esses fatores, somados aos diferentes tipos e intensivos usos da água nas bacias hidrográficas, e a problemas com a qualidade inadequada da água devido a poluição hídrica, ocasionam conflitos pelo direito de uso e exigem ações mais efetivas na gestão dos recursos hídricos (ANA, 2019a). Desta forma, é essencial a conservação dos recursos hídricos para manutenção da vida e preservação ambiental.

O estado de Goiás e o Distrito Federal, localizados na região Centro-Oeste do país, são regiões estratégicas no gerenciamento dos recursos hídricos. Essa relevância se explica pelo abastecimento de três das principais bacias hidrográficas do Brasil (bacia do Rio Tocantins, bacia do Rio Paranaíba e bacia do Rio São Francisco), pois além de contarem com uma rica rede de drenagem, ainda contêm as nascentes dos principais afluentes dessas bacias (CODEPLAN, 2017; IMB, 2014).

Segundo a edição 2013-2017 das Contas Ambientais da Água (CEAA), a região Centro-Oeste teve o uso de 1.511,9 L para cada R\$ 1 gerado na economia da região, principalmente por conta da agricultura de sequeiro, que depende da água das chuvas, predominante na região (ANA; IBGE, 2020). Até 2030 o estado de Goiás tem previsão de aumento de 44% da demanda hídrica atual, sendo o terceiro maior entre os estados brasileiros. Tal situação é preocupante dada a realidade da escassez enfrentada nos últimos anos (ANA, 2019b).

Já o Distrito Federal (DF) passou por um período de crise hídrica (2016/2017), em que foram necessárias a criação de diversas resoluções. Como suspensão das liberações de direito de uso da água, além de ter sido realizada uma abordagem pioneira de planejamento, prevenção e enfrentamento dessas crises. Além da criação curvas de acompanhamento dos reservatórios, permitindo que no ano de 2018 pudesse ser reestabelecida a liberação da utilização dos recursos hídricos, com algumas restrições (ADASA, 2018b; BRANDÃO; PAVIANI, 2018).

Neste contexto, é indispensável a gestão adequada dos recursos hídricos nessa região visando a conservação desses recursos, a manutenção da vida e a preservação ambiental. Para garantir a gestão dos recursos hídricos, o Brasil tem como base a Lei 9.433/97 (Lei das Águas), que instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), em que a outorga de direito de uso é um de seus principais instrumentos de planejamento. Consiste em um documento que estabelece o direito de uso dos recursos hídricos, concedido pelo poder público ao cidadão ou empresa, assegurando controle quantitativo e qualitativo da captação da água ao lançamento de efluentes nos corpos hídricos, sendo um documento indispensável, exceto a demandas de pouca expressão (BRASIL, 1997).

Contudo, o gerenciamento adequado dos recursos hídricos depende de informações precisas de dados hidrológicos, principalmente de dados de vazão (ARAUJO, 2019). O conhecimento da vazão dos cursos d'água é essencial também ao planejamento e ao monitoramento de atividades de uso e

controle da água como: obtenção de energia hidroelétrica; abastecimento de água; irrigação; dessedentação animal; insumo industrial; controle de cheias; e, manutenção de ecossistemas.

Para que o possível outorgado receba a autorização de direito de uso da água é necessário avaliar a disponibilidade hídrica no ponto de interesse. Essa quantificação é realizada por meio da estimativa da vazão do curso d'água, levando em consideração outorgas já estabelecidas à montante do ponto de interesse e a vazão que deve permanecer a jusante do mesmo.

Essa disponibilidade é quantificada de forma diferenciada em cada estado brasileiro, devido à falta de consenso entre as legislações estaduais ou regionais. Contudo, majoritariamente existem três vazões de referência utilizadas: a vazão mínima de sete dias de duração com período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), e as vazões com 90 ou 95% de permanência no tempo no curso d'água (Q_{90} ou Q_{95} , respectivamente).

O órgão responsável pela concessão das outorgas no estado de Goiás é a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). A secretaria estabeleceu o critério para concessão da outorga do direito de uso das águas de domínio do estado por meio da Resolução nº 9/2005 e alterado pela Resolução nº 11/ 2007, em que são liberados no máximo 50% da Q_{95} , considerando a soma das vazões outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal no local de interesse para captação.

No Distrito Federal, o órgão responsável pela gestão dos recursos hídricos é a Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal (ADASA), que criou a Resolução nº 350, de 23 de junho de 2006, que estabelece os valores de referência para outorga dos recursos hídricos de domínio do DF, como, de maneira geral, a vazão máxima outorgável de 90% das vazões de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} ou Q_{\min}) de acordo com cada finalidade de uso.

Estações pluviométricas e fluviométricas, distribuídas ao longo do território nacional, são utilizadas para obtenção de dados de precipitação pluvial e de vazão, respectivamente, que devem ser representativos quanto à variabilidade do evento hidrológico em análise, além de possuir uma extensa e consistente série temporal de dados. Todavia, existem grandes vazios de séries históricas de dados significativos no território nacional. Em tais condições, uma alternativa é a regionalização de variáveis hidrológicas. Essa técnica consiste na transferência de dados de um local monitorado para outro não monitorado, ou ainda, monitorado e com quantidade de dados insuficiente, desde que esses locais possuam comportamento hidrológico semelhantes (FILL, 1987; SIVAPALAN et al., 2012).

Nesse sentido, a hipótese do presente trabalho é que seja possível identificar regiões hidrologicamente homogêneas no estado de Goiás e no Distrito Federal, e, assim, desenvolver equações de regionalização, com indicadores de desempenho aceitável, por meio da regressão múltipla para cada região com comportamento hidrológico semelhante.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho consiste em desenvolver uma proposta de regionalização hidrológica de vazões de referência para o estado de Goiás e para o Distrito Federal, baseada na separação de regiões hidrologicamente homogêneas e no uso de regressão linear multivariada.

2.2. Objetivos específicos

- a) Determinar a precipitação anual média nas bacias de drenagem das estações pluviométricas utilizadas no estudo e, avaliar a consistência dos dados quando comparadas as imagens do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM);
- b) Determinar as regiões hidrologicamente homogêneas para o estado de Goiás e para o Distrito Federal;
- c) Desenvolver o modelo de regionalização hidrológica de vazões de referência, por meio da regressão linear múltipla entre variáveis dependentes (vazões de referência) e independentes (características fisiográficas), para cada região hidrologicamente homogênea; e,
- d) Avaliar a performance dos modelos de regionalização hidrológica propostos, por meio de índices estatísticos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Principais marcos regulatórios na gestão dos recursos hídricos dos locais de estudo

3.1.1. Brasil

Ao longo do tempo foram criadas diversas normas, legislações e órgãos para realizar o controle de águas naturais no Brasil. A primeira medida ocorreu em 10 de julho de 1934 com o Decreto nº 24.643, denominado Código das Águas, cuja execução competia ao Ministério da Agricultura. Nesse decreto a água foi dividida em três vertentes principais: águas públicas (Capítulo I), comuns (Capítulo II) e particulares (Capítulo III) (BRASIL, 1934).

Com a elaboração da nova Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 foi determinado no artigo 20, capítulo III, que são bens públicos da união “os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais” (BRASIL, 1988).

Em 8 de janeiro de 1997, para garantir a utilização racional e integrada dos recursos hídricos e assegurar à atual e às futuras gerações a disponibilidade de água necessária, foi instituída a Lei nº 9.433 (“Lei das Águas”) que dispõe sobre a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), e foi criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Nesse sistema, encontram-se instrumentos que permitem um melhor gerenciamento das águas do território nacional: enquadramento dos corpos de água em classes, outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, cobrança pelo uso da água, compensação a municípios e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

Para cumprir todos objetivos e diretrizes da PNRH foi criada a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. A agência segue basicamente quatro linhas de ação (ANA, 2019c; BRASIL, 2000):

- ✓ regulação - regula o acesso e o uso dos recursos hídricos de domínio da União, serviços públicos de irrigação e adução de água bruta, além de emitir e fiscalizar o cumprimento de normas, em especial outorgas;
- ✓ monitoramento - acompanha a situação dos recursos hídricos no território nacional, coordenando a Rede Hidrometeorológica Nacional, o que permite planejar o uso da água e prevenir eventos críticos. Além disso, procura definir as regras de operação dos reservatórios das usinas hidrelétricas, juntamente do Operador Nacional do Sistema Elétrico;

- ✓ aplicação da lei - coordena a implementação da PNRH, realizando e apoiando programas e projetos, órgão gestores estaduais e a instalação de comitês e agências de bacias hidrográficas; e,
- ✓ planejamento - elabora ou participa de estudos estratégicos em parceria com instituições e órgãos do poder público.

Concomitantemente à criação da ANA, foram fundados órgãos gestores de recursos hídricos estaduais (Entidades Estaduais), para auxiliar no cumprimento da PNRH e facilitar o planejamento e promoção de ações direcionadas à preservação da quantidade e qualidade das águas de cada estado (ANA, 2019d). Os órgãos estaduais foram criados para fazer parte da estrutura do SINGREH, e, atuar de forma integrada e articulada com os demais elementos do sistema.

O SINGREH tem como principal função a gestão dos usos da água de forma democrática e participativa, sendo composto por: Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental (SRQA), ANA, Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERH), Entidades Estaduais, Comitês de Bacia Hidrográfica e Agências de Água (ANA, 2019e).

3.1.2. Goiás

O Plano Estadual de Recursos Hídricos do estado de Goiás (2017-2020) foi instituído pela Lei nº 13.123 de 16 de julho de 1997, e aprovado pela Lei nº 20.096, de 23 de maio de 2018. Tem como objetivo “assegurar que a água possa ser controlada e utilizada, em quantidade e em padrões de qualidade satisfatórios, por seus usuários atuais e pelas gerações futuras, em todo território de Goiás” (GOIÁS, 1997, 2018).

O estado passou por recentes modificações na secretaria responsável pelos recursos hídricos, sendo anteriormente a Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos (SECIMA). Em 28 de novembro de 2019, com o Decreto nº 9.568, foi aprovado o regulamento da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). Assim, a SEMAD se tornou o órgão responsável por executar e elaborar políticas públicas no que se refere (GOIÁS, 2019a):

- ✓ à formulação e execução da política estadual do meio ambiente e de recursos hídricos, visando o desenvolvimento sustentável;
- ✓ à formulação das políticas estaduais de saneamento básico e de resíduos sólidos;
- ✓ à proteção dos ecossistemas, dos recursos hídricos e minerais, da flora e fauna, bem como o exercício do poder de polícia sobre as atividades que causem impacto ambiental;

- ✓ à adoção de estratégias, mecanismos e instrumentos econômicos e sociais para a melhoria da qualidade ambiental e o uso sustentável dos recursos naturais;
- ✓ à formulação e execução de políticas de regularização ambiental rural e licenciamento ambiental, para integração de meio ambiente e produção econômica;
- ✓ à produção, sistematização e divulgação de informações nas áreas de ciências atmosféricas, agrometeorologia, meteorologia e hidrologia;
- ✓ à coordenação do zoneamento ecológico-econômico do estado em articulação com instituições federais, estaduais e municipais; e,
- ✓ à promoção da educação ambiental, mediação de conflitos ambientais e a produção de conhecimento científico com vistas ao uso sustentável dos recursos ambientais e hídricos.

Além do plano estadual de gerenciamento e da SEMAD, responsáveis pelos recursos hídricos do estado, foi introduzida a Lei nº 12.603 de 7 de abril de 1995, na qual uma das disposições foi a criação do Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CERH (GOIÁS, 1995), vide decreto que aprova seu regimento nº 4.724, de 5 de novembro de 1996. O órgão é de coordenação e de integração participativa, com objetivo de administrar a oferta e a outorga de uso, para todos os fins, dos recursos hídricos de domínio do estado de Goiás, respeitados os casos de competência da União, garantindo o seu uso múltiplo de forma racional e integrada (GOIÁS, 1995, 1996).

Além do CERH, foram também criados: (a) diretrizes para formação e funcionamento dos Comitês de Bacias Hidrográficas do estado de Goiás (Resolução nº 003, de 10 de abril de 2001) (GOIÁS, 2001); (b) regulamento do sistema de outorga das águas de domínio do estado de Goiás (Resolução nº 09, de 4 de maio de 2005) (GOIÁS, 2005); e, (c) normas para o licenciamento ambiental do estado de Goiás (Lei nº 20.694, de 26 de dezembro de 2019) (GOIÁS, 2019b).

3.1.3. Distrito Federal

A Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA), reestruturada por meio da Lei Distrital nº 4.285/2008 (DISTRITO FEDERAL, 2008), é a agência responsável pela gestão dos recursos hídricos do Distrito Federal, e tem como objetivos fundamentais implementar os princípios estabelecidos pela Lei Distrital nº 2.725/2001, que estabelece a Política de Recursos Hídricos do Distrito Federal (DISTRITO FEDERAL, 2001), que são:

- ✓ assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade e quantidade adequados aos respectivos usos;
- ✓ promover a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, com vista ao desenvolvimento humano sustentável;

- ✓ implementar a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos, de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais; e,
- ✓ buscar o aumento das disponibilidades líquidas de recursos hídricos.

Essas atribuições da ADASA são exercidas, prioritariamente, pela Superintendência de Recursos Hídricos, a qual é composta por cinco coordenações: Coordenação de Regulação (CORH), Coordenação de Fiscalização (COFH), Coordenação de Informações Hidrológicas (COIH), Coordenação de Outorga (COUT) e Coordenação de Agência de Bacias Hidrográficas (CABH). A CABH foi criada posteriormente (Resolução nº 20, 9 de outubro de 2018), com os objetivos de fortalecer os comitês de bacia hidrográfica do Distrito Federal e aprimorar o acompanhamento das atividades dos órgãos colegiados de meio ambiente e recursos hídricos (ADASA, 2018a).

Mesmo com a criação da Resolução ADASA nº 15, de 21 de outubro de 2016, que declarou a situação crítica de escassez hídrica nos Reservatórios do Descoberto e de Santa Maria (ADASA, 2016) durante a crise hídrica de 2015/2016, o Distrito Federal passou por acentuada queda nos níveis dos seus reservatórios. Em 2017, o Reservatório do Descoberto, responsável pelo abastecimento de mais de 60% da população do Distrito Federal, terminou o período chuvoso com 42,31% do seu volume útil. Este fato fez com que outras medidas restritivas fossem tomadas, como exemplo o Decreto 37.976, de janeiro de 2017 (ADASA, 2017), que instaurou o estado de emergência e restrições ao uso da água (ADASA, 2018b).

Já em 2018, os afluentes do reservatório do Descoberto apresentaram vazões mensais superiores às médias dos anos 2016 e 2017, em praticamente todos os meses, sendo que em novembro a vazão superou a média histórica e observou-se a sua recuperação. Perante esse cenário, após a realização de diversas simulações da tendência de vertimento dos reservatórios, foi publicada a Resolução ADASA nº 36, de 20 de dezembro de 2018 (ADASA, 2018c), que revogou as Resoluções ADASA nº 15/2016 (que declarou a situação crítica de escassez hídrica nos Reservatórios do Descoberto e de Santa Maria) e nº 15/2018 (que regularizava o processo de concessão de outorga de direito de uso de recursos hídricos à montante do reservatório do Descoberto) (ADASA, 2018d).

Mesmo com o término da “situação crítica de escassez hídrica”, a Resolução ADASA nº 36/2018 recomenda que a sociedade civil do Distrito Federal continue adotando medidas de redução de consumo de água e restrinja o uso de água tratada, já que o fim do racionamento não referiu-se ao retorno das condições iniciais dos reservatórios antes da crise hídrica (ADASA, 2018c).

3.2. Outorga do direito de uso da água

A outorga é um instrumento compulsório da PNRH e consiste em um dos principais meios de controle e gestão dos recursos hídricos no território brasileiro. Tem como objetivo assegurar o controle

quantitativo e qualitativo dos usos da água, bem como o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos. Na legislação federal vigente existem três categorias de outorga: outorga preventiva, declaração de reserva de disponibilidade hídrica e outorga de direito de uso (ANA, 2014, 2019f; BRASIL, 1997).

A outorga preventiva, prevista no artigo 6º da Lei nº 9.984/2000, foi criada com a finalidade de declarar a disponibilidade de água para os usos requeridos. Não confere o direito de uso dos recursos hídricos e tem a função de reservar a vazão passível de outorga, possibilitando o planejamento de empreendimentos que careçam desses recursos (ANA, 2014; BRASIL, 2000).

A declaração de reserva de disponibilidade hídrica, em geral, se destina ao aproveitamento hidrelétrico em casos que demandem quantidades consideráveis de recursos hídricos, e, que tenham potencial de impactar de forma significativa a disponibilidade hídrica. É um documento que deve ser obtido previamente por meio da autoridade do setor elétrico responsável pela concessão/autorização do uso do potencial hidráulico do curso d'água de interesse, visando implantação do aproveitamento hidrelétrico (ANA, 2019g).

A outorga de direito de uso dos recursos hídricos confere ao outorgado (solicitante) o direito de uso de recursos hídricos e não autoriza a instalação de empreendimentos, podendo ser individual ou coletiva. Pode ser destinada aos usos consuntivos da água, àqueles que subtraem uma parcela da disponibilidade hídrica no ponto de interesse, e aos usos não consuntivos, esses últimos não envolvem a retirada de volumes de água do corpo hídrico, entretanto, possuem potencial de modificar as suas características naturais (ANA, 2014).

O órgão responsável por sua concessão é a ANA, exceto em corpos hídricos de domínio dos estados e do Distrito Federal, devendo a solicitação ser realizada junto à entidade estadual da localidade requerida. Segundo o artigo 12 da Lei nº 9.433/97, estão sujeitos à outorga pelo poder público os seguintes usos dos recursos hídricos (ANA, 2014, 2019f):

- ✓ derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo d'água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;
- ✓ extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo;
- ✓ lançamento de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, em corpo de água com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final;
- ✓ uso de recursos hídricos com fins de aproveitamento dos potenciais hidrelétricos; e,
- ✓ outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

Existem critérios para que o outorgante (órgão responsável pela gestão dos recursos hídricos) conceda ao outorgado o documento de outorga; esses critérios estão vinculados à disponibilidade hídrica

no local da captação. Para tal, consideram-se as outorgas já existentes a montante do ponto de interesse e a vazão que deve permanecer a jusante, necessária para que haja garantia da manutenção dos fatores ecológicos e dos usos múltiplos da água. Com o intuito que seja calculada a vazão máxima outorgável, determina-se uma vazão de referência, escolhida dentre as principais vazões de estudos hidrológicos. Dessa forma, para que o candidato obtenha a outorga, deve ser apresentada ao órgão responsável a vazão requerida e os demais documentos solicitados (ANA, 2014).

3.3. Vazões de referência

A utilização da vazão como medida hidrológica, além de ser uma exigência da PNRH para obtenção da outorga de direito de uso, também desempenha um importante papel na utilização dos recursos hídricos. Essa variável representa a integração de todos os processos hídricos que ocorrem na bacia hidrográfica, sendo parte elementar no entendimento dos fenômenos na parte terrestre do ciclo hidrológico (COLLISCHONN; TUCCI, 2001). Ademais, a estimativa da vazão é pré-requisito na solução de diversos problemas ambientais e de engenharia (AGARWAL et al., 2016).

As principais vazões de referência utilizadas nos estudos hidrológicos são: vazão mínima (Q_{\min}), vazão máxima (Q_{\max}), vazão média de longo período (\bar{Q}), vazão que se espera que ocorra maior ou igual em 90 ou 95% do tempo (Q_{90} ou Q_{95} , respectivamente) e vazão mínima de sete dias consecutivos, que ocorre em um período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) (ANA, 2011).

A vazão máxima outorgável adotada pela ANA para captação a fio d'água nos rios federais, ou seja, rios que cortam dois ou mais estados é de 70% da Q_{95} , podendo variar em função da particularidade de cada região. Contudo, como cada entidade estadual é responsável por determinar seu critério de captação nos cursos hídricos contidos nos seus limites estaduais, ocorre uma grande diversificação da vazão de referência adotada em cada unidade da federação. Desta forma, há um grande desafio para a articulação entre os órgãos gestores na prática da gestão compartilhada de bacias hidrográficas (ANA, 2011, 2014).

No estado de Goiás o critério adotado para concessão da outorga do direito de uso das águas de domínio do estado é de no máximo 50% da Q_{95} , considerando a soma das vazões outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal no local de interesse. Esse critério foi estabelecido pela Resolução nº 9/2005 e alterado pela Resolução nº 11, de 20 de março de 2007 (GOIÁS, 2005, 2007). O pedido de outorga no estado é de responsabilidade da SEMAD e pode ser solicitado por meio do endereço eletrônico: <http://weboutorga.meioambiente.go.gov.br/> (SEMAD, 2020).

Já no Distrito Federal, a COUT é a coordenação responsável pela concessão das outorgas, e utiliza como base a Resolução nº 350, de 23 de junho de 2006, a qual estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga prévia e de outorga de direitos de uso dos recursos hídricos em corpos de água de domínio do Distrito Federal e naqueles delegados pela União e estados, em que, de

maneira geral, a vazão máxima outorgável é de 90% das vazões de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} ou Q_{\min}) de acordo com cada finalidade (ADASA, 2006a).

Contudo, em 15 de agosto de 2017 foi aprovada a Resolução nº 17, que altera alguns dispositivos da Resolução nº 350/2006. Como exemplo, concede no máximo 80% da vazão de referência quando não houver barramento, enquanto na prestação de serviços de abastecimento pode atingir até 90% da vazão de referência (ADASA, 2017). Além disso, a COUT utiliza a Instrução Normativa nº 2, de 11 de outubro de 2006, na qual estabelece valores de vazão a serem outorgados para cada finalidade, em que devem ser considerados na análise nos processos de requerimento de outorga (ADASA, 2006b).

3.4. Regionalização hidrológica

3.4.1. Contextualização

A conservação ambiental busca soluções no âmbito do desenvolvimento social e econômico, visando assegurar a gestão adequada dos recursos naturais. Está intimamente relacionada à sustentabilidade, exploração racional dos recursos associada a proteção ecológica, bem como a utilização sustentável dos recursos hídricos. Assim, tornam-se fundamentais estudos alusivos à sua preservação e o entendimento acerca das bacias hidrográficas, visando evitar que os recursos hídricos disponíveis sejam vistos puramente como uma mercadoria explorável de desenvolvimento econômico (FLOTEMERSCH et al., 2016; OLALEKAN et al., 2019; ZHANG et al., 2019).

A bacia hidrográfica pode ser definida como uma área natural de captação da água proveniente da precipitação, delimitada por divisores topográficos, que formam cursos d'água que confluem para um único ponto, denominado exutório (FLOTEMERSCH et al., 2016; TUCCI, 2012; WAGENER; WHEATER; GUPTA, 2004). Ou seja, é um conjunto de elementos físicos, químicos e biológicos conectados pelo fluxo da água (FLOTEMERSCH et al., 2016). Considerada como um elemento sistêmico, onde existem balanços de entrada, provenientes principalmente da precipitação, e saída, por meio do exutório e da evapotranspiração (PORTO; PORTO, 2008).

Contudo, há uma grande dificuldade na obtenção de dados, consistentes e suficientes, necessários à realização dos estudos hidrológicos devido à baixa densidade de estações fluviométricas e meteorológicas distribuídas ao longo do território nacional (ARAUJO, 2019; SILVEIRA; TUCCI; SILVEIRA, 1998).

Para mitigar esse problema são utilizados modelos hidrológicos como alternativa de predição de eventos hidrológicos em locais não monitorados (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015; RAZAVI; COULIBALY, 2016). Estimativas eficazes das variáveis hidrológicas (por exemplo, vazão) nesses locais, auxiliam na tomada de decisões objetivas em relação ao gerenciamento de recursos hídricos e avaliações de desastres naturais (LI et al., 2010).

Como exemplos citam-se: curvas de permanência, simulação chuva-vazão, métodos independentes de modelo hidrológico e hidrogramas (RAZAVI; COULIBALY, 2013). Do mesmo modo, uma das alternativas para estimativa de vazões é a utilização de técnicas de regionalização hidrológica, pois desta forma se torna possível quantificar a disponibilidade hídrica do ponto de interesse (HALL; MINNS, 1999; KOKKONEN et al., 2003; PRUSKI et al., 2012; TUCCI, 2012; RAZAVI; COULIBALY, 2016; TEGEGNE; KIM, 2018).

3.4.2. Definições e metodologias

A regionalização hidrológica é definida como um processo de transferência de informações de um local com dados existentes para outro com dados inexistentes (FILL, 1987; SIVAPALAN et al., 2012; BESKOW et al., 2016), de acordo com a similaridade espacial de funções, variáveis e parâmetros do modelo que permitam essa transferência (PECHLIVANIDIS; MCINTYRE; WHEATER, 2010; LELIS et al., 2020).

A regionalização requer uma sólida compreensão e conhecimento dos processos hidrológicos e da heterogeneidade espaço-temporal das características climáticas e fisiográficas das bacias hidrográficas, representando um desafio para predição de variáveis nas bacias não monitoradas (LI et al., 2010). Existem diversas metodologias que podem ser aplicadas na construção de um modelo de regionalização hidrológica para diferentes propósitos (BESKOW et al., 2016).

Para Tucci (2002), um modelo hidrológico de regionalização, seja qual for a variável a ser regionalizada, deve seguir quatro etapas: (a) definir os limites territoriais a serem estudados; (b) determinar a variável dependente e suas possíveis variáveis explicativas (variáveis independentes); (c) selecionar os dados necessários e calcular as variáveis; e, (d) definir as áreas que possuam um comportamento hidrológico semelhante.

Já para Razavi e Coulibaly (2013) há basicamente cinco etapas a serem seguidas para realizar a regionalização hidrológica: (a) coletar e gerenciar atributos de captação (atributos meteorológicos e informações fisiográficas); (b) determinar e esclarecer as variáveis hidrológicas de interesse; (c) desenvolver uma relação entre os parâmetros do modelo hidrológicos (índices de vazão ou escoamento) e os atributos de captação; (d) avaliar o desempenho do modelo em outra bacia diferente da bacia real do estudo; e, (e) incluir a análise de incerteza dos dados obtidos.

Atualmente, alguns estudos têm utilizado múltiplos modelos, com diferentes estruturas, que têm se mostrado eficazes quando se trata da confiabilidade e redução da incerteza (RAZAVI; COULIBALY, 2016). Dentre eles, pode-se citar: (a) análises estatísticas multivariadas (ELESBON et al., 2015); (b) interpolação espacial pelo inverso da distância ao quadrado (WOLFF, 2013); e, (c) regressão paramétrica (ELETROBRÁS, 1985; LIAZI et al., 1988).

A regressão paramétrica (tipicamente a regressão linear múltipla) é um dos métodos mais antigos e amplamente utilizados, em que os valores dos parâmetros dos locais aferidos são determinados por meio de regressão múltipla entre as variáveis dependentes e independentes. É capaz de incorporar uma gama de informações além de apresentar um desempenho eficiente quando aplicada em locais com características climáticas e fisiográficas semelhantes (LI et al., 2010).

Dessa forma, um modelo de regressão múltipla aplicado a regionalização hidrológica busca correlacionar a variável que se deseja regionalizar (por exemplo, vazão específica) com suas possíveis variáveis explicativas, como apresentado na Eq. 1 (LIMA et al., 2012):

$$\bar{Q}_{\text{espr}} = f(P, I, Dd, L, \dots) \quad \text{Eq. 1}$$

em que:

\bar{Q}_{espr} – vazão média específica regionalizada, $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$;

P – precipitação anual média, mm ano^{-1} ;

I – declividade média da bacia, %;

Dd – densidade de drenagem, km km^{-2} ; e,

L – comprimento do talvegue principal, km.

Um dos estudos pioneiros na construção de um modelo de regionalização utilizando a regressão múltipla, e que serve de base para diversos trabalhos até hoje, foi desenvolvido pela Eletrobrás em 1985, intitulado “Metodologia de Regionalização de Vazões” (ou Método Tradicional). Nele, foi utilizado o método da curva adimensional regional, ou método “index-flood”. Essa metodologia é baseada em análises estatísticas e foi elaborada em três etapas principais: (a) seleção e análise dos dados; (b) identificação das regiões hidrológicamente homogêneas; e, (c) ajuste do modelo hidrológico por meio da regressão múltipla regional (ELETROBRÁS, 1985).

Em um estudo realizado na bacia do Alto do São Francisco (MG), fundamentado no Método Tradicional, Euclides et al. (2001) testaram dois métodos distintos de regionalização: (a) “Regionalização Hidrológica I/II” – baseado nas estatísticas dos resultados da aplicação da regressão múltipla das vazões, com características físicas e climáticas das sub-bacias da região; e, (b) “Regionalização Hidrológica II/II”, em que o objetivo foi avaliar as potencialidades e disponibilidades hídricas a partir da precipitação pluvial espacializada na bacia hidrográfica. No estudo foi possível observar que a “Regionalização Hidrológica I/II” foi a mais recomendada para fins de planejamento.

No ano de 2010 foi desenvolvida com sucesso uma metodologia de regionalização denominada “index model”, realizada no sudeste da Austrália, a qual estabelece uma relação não paramétrica entre cada parâmetro do modelo de uma ferramenta preditiva (variáveis dependentes) com um conjunto de covariáveis (variáveis independentes), definidas a partir das características físicas e climáticas da bacia hidrográfica. Foram relacionadas por meio de uma combinação entre o modelo de

regressão linear, características semelhantes ao vizinho mais próximo e uma abordagem de similaridade hidrológica (LI et al., 2010).

Outro método com resultados satisfatórios encontrado na literatura foi o utilizado por Elesbon et al. (2015), no qual foram aplicadas análises estatísticas multivariadas para regionalizar as vazões ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}) na bacia do rio Doce. Os autores consideraram as três vazões a serem regionalizadas como variáveis dependentes e outras sete variáveis como independentes, levando em consideração as características fisiográficas e climáticas da bacia (precipitação total anual, precipitação total no período seco e chuvoso, área de drenagem, comprimento do talvegue principal, comprimento total dos talvegues e declividade média da bacia). Foram identificadas no estudo quatro regiões hidrologicamente homogêneas e verificado que a área de drenagem e a precipitação total no período chuvoso foram as variáveis mais representativas.

Na bacia do Alto Pó (Itália) foram estimadas curvas de permanência por meio da regionalização, em que foram analisadas e classificadas em duas estruturas diferentes: (a) aplicação de dois métodos de agrupamento em uma série de seis índices hidrológicos; (b) utilização de índices climáticos, fisiográficos, de solo e de uso da terra com o mesmo procedimento de agrupamento. As curvas de permanência foram ajustadas a uma distribuição log-normal, enquanto a regionalização foi construída aplicando uma regressão linear múltipla gradual, seguida de uma validação cruzada de exclusão (BOSCARELLO et al., 2016).

Recentemente, Araujo et al. (2018) propuseram a regionalização das vazões de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}) na bacia do rio Piquiri (PR). Foram adotados os métodos de regionalização: tradicional, interpolação linear, chaves, interpolação linear modificada e chaves modificada. Como características físicas foram selecionadas: área de drenagem, comprimento e declividade do talvegue principal, declividade média da bacia e densidade de drenagem, enquanto a precipitação total anual foi utilizada como característica climática.

Um outro estudo, realizado no estado do Pará, teve como objetivo a regionalização por meio do agrupamento de bacias hidrográficas em função da área de drenagem, sem o uso de técnicas de agrupamento. As curvas de permanência foram ajustadas a modelos de regressão matemática e o modelo de regionalização se deu por regressão múltipla, em que as variáveis independentes utilizadas foram: área de drenagem, precipitação média anual e comprimento do talvegue principal (SILVA; BLANCO; PESSOA, 2019).

Como foi possível observar, em geral, grande parte dos estudos utilizam abordagens de regionalização com relação à similaridade climática e fisiográfica e/ou que calibram simultaneamente várias regiões com características semelhantes (DU et al., 2020). Ou seja, independente da metodologia a ser aplicada, a escolha de parâmetros explicativos da variável a ser regionalizada é uma etapa crucial, devendo ser selecionados aqueles que melhor representam as principais características do regime hidrológico da região (PRIETO et al., 2019).

Desta forma, podem ser usadas como variáveis explicativas atributos fisiográficos como área de captação, elevação e inclinação de bacias ou canais, comprimento do talvegue principal, entre outros, e, informações climáticas como séries temporais de chuva e temperatura. (RAZAVI; COULIBALY, 2013; BRUNNER et al., 2018). No estudo realizado por Araujo et al. (2018), por exemplo, quando adicionado o comprimento do talvegue principal ou a densidade de drenagem nas equações geradas pelo método Tradicional, o desempenho do modelo apresentou uma melhora significativa, quanto ao coeficiente de determinação (R^2).

3.4.3. Regiões hidrologicamente homogêneas

A metodologia de transferência de informações dentro de regiões hidrologicamente homogêneas é comum em grande parte dos modelos de regionalização hidrológica (HALL; MINNS, 1999; BESKOW et al., 2016; GOMES; BLANCO; PESSOA, 2018). O termo regiões hidrologicamente homogêneas está associado a regiões onde há similaridade hidrológica (SWAIN; SAHOO; PATRA, 2016), ou seja, quando duas ou mais bacias hidrográficas, mesmo quando não são próximas geograficamente, apresentam semelhanças em relação às suas características físicas e climáticas.

Tais regiões são delimitadas, visto que a vazão dos cursos hídricos é uma variável dependente de diversos fatores atmosféricos e terrestres, como temperatura, precipitação pluvial, insolação, umidade relativa e velocidade do vento (KAHYA; DEMIREL; BÉG, 2008). Portanto, não é viável considerar o comportamento hidrológico de uma região para outra com diferentes características hidrológicas, pois caso contrário, podem ocorrer erros de predição das variáveis desejadas (KJELDSEN; JONES, 2007; SIVAPALAN et al., 2012; BESKOW et al., 2016; SCHEIHING, 2018).

A identificação dessas regiões tem dois propósitos: impor limites entre regiões e caracterizar hidrologicamente cada região (GOMES; BLANCO; PESSOA, 2018). É considerada a etapa de maior importância e complexidade no desenvolvimento de um modelo de regionalização hidrológica, pois envolvem decisões subjetivas, podendo resultar em diferentes regiões homogêneas dependendo do método empregado e das decisões tomadas pelo pesquisador e, em consequência, diferentes equações de regionalização (FARSADNIA et al., 2014; CASSALHO et al., 2019).

Há diversos métodos desenvolvidos para identificar as regiões hidrologicamente homogêneas como: (a) análise de agrupamentos (*cluster*); (b) análise de correlação canônica; (c) abordagem hierárquica; e, (d) região de influência (GOYAL; GUPTA, 2014). A análise multivariada está inserida em vários desses métodos e permite analisar mais de dois fatores concomitantemente, desta forma, é possível identificar as relações e interações entre as variáveis independentes (ELESBON et al., 2015). Isso ocorre na análise de *cluster*, que tem sido amplamente aceita como uma ferramenta importante para auxiliar a regionalização hidrológica (RAO; SRINIVAS, 2006).

A análise de *cluster* (Figura 1) surge como uma técnica de *machine-learning* com potencial para reduzir a subjetividade do processo e gerar um agrupamento de regiões mais adequado sob o ponto de vista hidrológico (CASSALHO et al., 2019). É um processo de classificação não supervisionada de um conjunto de dados observados, que são agrupados em *clusters* com base na similaridade, ou seja, os dados agrupados em um *cluster* são mais semelhantes entre si do que outro grupo de dados pertencente a um *cluster* diferente, de acordo com alguns atributos pré-selecionados (JAIN; MURTY; FLYNN, 1999).

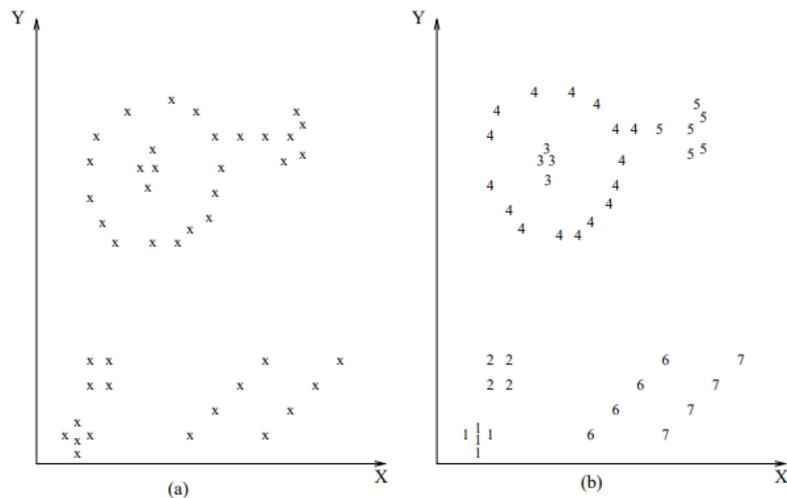


Figura 1. Aspecto visual da classificação de dados por análise de *cluster*. Fonte: (JAIN; MURTY; FLYNN, 1999).

Um dos pontos principais na análise de *cluster* é que um mesmo conjunto de dados pode ser classificado em um número diferente de classes, sendo um dos desafios encontrar o número ótimo de classes (k) (OLIVEIRA, 2018). Para buscar a melhor solução existem diversos métodos, em que pode-se apontar dois deles como principais: o hierárquico e o de partições (RAO; SRINIVAS, 2006).

No método hierárquico a formação dos *clusters* ocorre por meio da criação de uma hierarquia, no qual cada passo da classificação é uma derivação decorrente do passo anterior, formando assim uma hierarquia. O nível mais alto dessa hierarquia corresponde a um *cluster* exclusivo que compreende todos os outros *clusters* formados, enquanto o nível mais baixo corresponde a cada objeto alocado em um *cluster* (JAIN; DUBES, 1988; OLIVEIRA, 2018).

Em contrapartida, o método de partições separa os *clusters* em uma quantidade pré-definida de classes, e assim os dados são realocados para chegar ao melhor resultado de classificação, ou seja, é necessário definir o número ótimo de classes antes da análise de *cluster*. Nesse caso, cada *cluster* deve possuir ao menos um ponto, e cada ponto pertencerá a apenas uma classe. Para realizar essa classificação há alguns algoritmos, como: *k-means*, *k-means++* e *k-medoids* (JAIN; DUBES, 1988; OLIVEIRA, 2018).

Devido a sua eficiência relativa, considerando a velocidade de execução e a simplicidade da implementação, o algoritmo *k-means* é considerado o mais popular quando comparado aos demais. É

um algoritmo baseado em centroides, em que a medida de similaridade em um *cluster* é calculada por uma técnica de realocação iterativa (otimização), que busca melhorar o particionamento de dados a cada iteração, considerando uma medida de proximidade, geralmente a distância euclidiana (JAIN; MURTY; FLYNN, 1999; WU et al., 2008; JAIN, 2010; HAN; KAMBER; PEI, 2011).

O método *k-means* é uma técnica antiga e popular utilizada, em que o número de *cluster* deve ser predefinido antes de se iniciar a análise (RAVAL; JANI, 2016). Para determinar o número ideal de agrupamentos foi utilizado o algoritmo *elbow*, o qual possibilita explicar e verificar a consistência da análise de *cluster*, visando estimar um número ótimo de classes. Para isso, a ideia do algoritmo é minimizar a função de custo, por meio da Eq. 2 (LIU; DENG, 2020).

$$J = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} |x - C_i|^2 \quad \text{Eq. 2}$$

em que:

J – Função de custo;

x – Elemento do *cluster* C_i ; e

k – Número de *clusters* $|C_i|$.

Diversos trabalhos encontrados na literatura vêm adotando a análise de *cluster* e o algoritmo *k-means* como alternativa para delimitação de regiões hidrologicamente homogêneas, como: (a) Calegario (2014) compararam três diferentes métodos - *cluster* (algoritmo *k-means*), de entropia *Shannon* e de conveniência geográfica - na bacia do rio Doce (MG); (b) Farsadania et al. (2014) utilizaram três análises de *cluster* - *c-means* difuso, *k-means* e agrupamento hierárquico de *Ward* - na província de Mazandaran (Irã); e, (c) Latt, Wittenberg e Urban (2015) utilizaram uma abordagem de rede neural na análise de componentes principais e na análise de *cluster* (algoritmo *k-means*), na bacia do rio Chindwin (Mianmar).

Os resultados obtidos nos estudos que utilizaram a análise de *cluster* para delimitação das regiões hidrologicamente homogêneas, em geral, mostraram ter potencial de contribuir para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. De modo que, as características físicas e climáticas selecionadas são fatores determinantes para um bom agrupamento dos dados, bem como a seleção do algoritmo utilizado, sendo mais interessante em alguns casos a junção de mais de uma técnica (FARSADNIA et al., 2014; CALEGARIO, 2014; LATT; WITTENBERG; URBAN, 2015; BESKOW et al., 2016; CASSALHO et al., 2019).

3.5. Interpolação espacial aplicada a dados pluviométricos

O gerenciamento das bacias hidrográficas e a utilização de modelos hidrológicos utilizam dados relacionados à precipitação, que geralmente são medidos em estações pluviométricas. Os modelos hidrológicos, de maneira geral, exigem uma interpolação espacial antes do processo de modelagem, pois os dados obtidos nas estações pluviométricas são pontuais e com a utilização da interpolação se torna possível realizar a espacialização da chuva para toda área desejada (WAGNER et al., 2012; LY; CHARLES; DEGRÉ, 2013).

A interpolação espacial é geralmente realizada estimando-se um valor em pontos não amostrados, com base no peso dos valores observados, por meio de uma combinação linear ponderada, como apresentado na Eq. 3 (LY; CHARLES; DEGRÉ, 2013):

$$Z_g = \sum_{i=1}^{ns} \lambda_i Z_{s_i} \quad \text{Eq. 3}$$

em que:

Z_g – valor estimado nos pontos desejados;

λ_i – peso que contribui para a interpolação; e,

Z_{s_i} – valor observado no i -ésimo ponto.

O bom desempenho da interpolação espacial é determinado pelo modelo selecionado, seu modo de gestão geográfica e a resolução utilizada. Na literatura, há várias técnicas que reproduzem a continuidade espacial da chuva na área estudada com base na medição dos pluviômetros, que podem ser classificadas em dois grupos principais: métodos determinísticos e métodos geoestatísticos (LY; CHARLES; DEGRÉ, 2013).

Os métodos determinísticos, como o polígono de Thiessen e o Inverso da Distância ao Quadrado (IDW), tem como premissa que os valores próximos ao ponto medido têm maior influência sobre o valor gerado do que valores mais distantes. Isto é, à medida que a distância do local da previsão aumenta, o peso relativo de um valor observado diminui. Deste modo, o valor gerado leva em consideração a média ponderada dos valores observados (KISAKA et al., 2016; MENDEZ; CALVO-VALVERDE, 2016).

Por outro lado, os métodos geoestatísticos consistem em um conjunto de técnicas estatísticas utilizadas para incorporar a correlação espacial das observações no processamento de dados considerando a distribuição e a variabilidade espacial (MENDEZ; CALVO-VALVERDE, 2016). São técnicas que demonstram melhor desempenho quando comparadas aos métodos determinísticos, visto que apresentam uma maior facilidade na estimativa de médias de chuvas, de incertezas e a possibilidade

de utilizar informações secundárias, como topografia. Além disso, permitem uma exploração mais realista dos erros e sua propagação em modelos hidrológicos (GRIMES; PARDO-IGÚZQUIZA, 2010).

A geoestatística usa o semivariograma como base para determinar a correlação espacial entre as observações, e serve para denotar a dependência espacial de um parâmetro natural. É calculado como metade da diferença quadrática média entre os componentes dos pares de dados e representa a dependência espacial dos pontos (Eq. 4), sendo determinado antes de realizar a interpolação dos dados (GOOVAERTS, 2000; ALBUQUERQUE; NUÑEZ, 2012; LY; CHARLES; DEGRÉ, 2013).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z_{s_i} - Z(s_i + h))^2 \quad \text{Eq. 4}$$

em que:

$\hat{\gamma}$ – semivariograma estimado; e,

$N(h)$ – número de pares de valores separados por um vetor de distância h .

O semivariograma (Figura 2) é composto por alguns elementos: (a) alcance – distância em que as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente; (b) patamar – valor do semivariograma correspondente ao seu alcance, deste ponto em diante, considera-se que não há mais dependência espacial entre as amostras; (c) efeito pepita – representa a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as observações; e, (d) contribuição – diferença entre o patamar e o efeito pepita (ALBUQUERQUE; NUÑEZ, 2012).

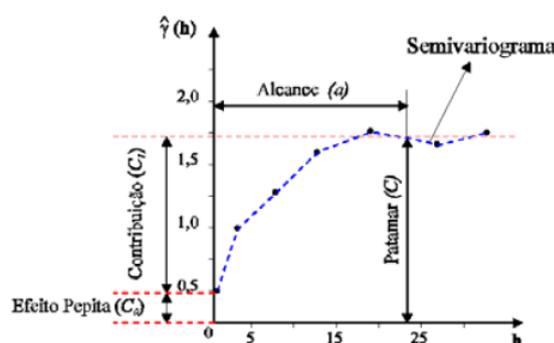


Figura 2. Exemplo de um semivariograma. Fonte: (CAMARGO, 1998).

Existem diversos modelos de semivariograma teóricos, podendo destacar dois tipos básicos principais: modelos com patamar (transitivos) – atingem o patamar assintoticamente, desta forma o alcance é arbitrariamente definido como a distância correspondente a 95% do patamar; e, modelos sem patamar – esses modelos como o nome sugere, não atingem o patamar, e continuam aumentando

juntamente com a distância. Para dados de precipitação os modelos transitivos são os mais utilizados, como modelo esférico, modelo exponencial e modelo gaussiano (CAMARGO, 1998).

A *krigagem* ordinária é um exemplo de um conjunto de técnicas geoestatísticas convencionalmente utilizadas para interpolar os valores de precipitação em uma região, baseado em modelos estatísticos de autocorrelação e na minimização da estimativa da variância do erro e da redundância dos dados. Nessa técnica, o valor da variável de interesse é estimado para um ponto específico usando uma matriz de covariância espacial (Eq. 5) que determina os pesos atribuídos às observações (CAMARGO, 1998; ALBUQUERQUE; NUÑEZ, 2012; LY; CHARLES; DEGRÉ, 2011, 2013; ADHIKARY; MUTTIL; YILMAZ, 2016).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{ns} \lambda_i \gamma_{ij} - \mu = \gamma_{i0} \quad \text{para } j = 1, \dots, ns \\ \sum_{i=1}^{ns} \lambda_i = 1 \end{array} \right. \quad \text{Eq. 5}$$

em que:

μ – parâmetro de *Lagrange*.

Diversos estudos hidrológicos encontrados na literatura adotam a *krigagem* ordinária como interpolador espacial dos dados de precipitação. Adhikary, Muttil e Yilmaz (2016) utilizaram uma variação da *krigagem* ordinária, que foi baseada em um semivariograma obtido por “*genetic programming-based ordinary kriging*” (GPOK) para estimar a precipitação na bacia do rio Yarra Médio (Austrália). Os resultados indicaram que o método GPOK se mostrou uma opção viável para interpolação espacial.

Um outro trabalho, este produzido na bacia do rio Mula e Mutha (Índia), teve como um dos objetivos comparar diferentes métodos de interpolação espacial: polígono de Thiessen; IDW; *krigagem* ordinária; regressão – IDW com dados das estações pluviométricas e com dados do TRMM; e *krigagem* por regressão com dados das estações pluviométricas e com dados do TRMM. Os diferentes métodos foram avaliados incorporando a validação cruzada e a avaliação espacialmente integrada do desempenho da interpolação com a ajuda de um modelo hidrológico. Os resultados mostraram que as abordagens de interpolação com as covariáveis apropriadas apresentam melhor desempenho, e que os métodos por regressão podem ser favoráveis pois são métodos rápidos e diretos (WAGNER et al., 2012).

Piazza et al. (2011) testaram diferentes métodos de interpolação espacial da precipitação na região da Sicília (Itália): métodos determinísticos (IDW, regressão linear simples, regressão múltipla, regressão geograficamente ponderada e redes neurais artificiais) e métodos geoestatísticos (*krigagem*

ordinária e *krigagem* ordinária residual). Os autores concluíram que os métodos geoestatísticos tiveram um melhor desempenho quando comparados aos métodos determinísticos.

Ly, Charles e Degré (2011) também realizaram a comparação de métodos determinísticos (Polígono de Thiessen e IDW) e métodos geoestatísticos (*krigagem* ordinária, *krigagem* universal, *krigagem* com deriva externa e *co-krigagem* ordinária). O estudo ocorreu nas bacias de Ourthe e Ambleve (Bélgica). Foram construídos sete modelos de semivariograma e a elevação foi incorporada às análises geoestatísticas. Dentre os modelos de semivariograma utilizados o *gaussiano* foi o mais adequado, e dentre os algoritmos, o polígono de Thiessen teve o pior desempenho enquanto a *krigagem* ordinária e o IDW foram considerados os métodos com melhor desempenho.

Em um estudo mais recente, realizado no leste do Quênia, foram analisadas a variabilidade das chuvas, a ocorrência de secas e a eficácia de técnicas de interpolação espacial (*spline*, IDW e *krigagem*). A validação dos métodos de interpolação selecionados foi baseada na qualidade do ajuste entre as chuvas (observadas) e estimadas, derivadas de estatísticas de erros residuais, coeficiente de determinação (R^2), erros absolutos médios (MAE) e erro quadrático médio (RMSE). Os resultados indicaram que a interpolação espacial por *krigagem* foi a técnica mais apropriada para geração dos mapas de chuva na região (KISAKA et al., 2016).

Uma série de outros estudos encontrados na literatura que aplicaram a geoestatística para realizar a interpolação espacial da precipitação mostraram que a *krigagem* ordinária tem um desempenho satisfatório. Terassi et al. (2020) utilizaram a *krigagem* ordinária e a análise de *cluster* para espacializar a precipitação e analisar a erosividade no município do Rio de Janeiro. Isto mostra a versatilidade de aplicações possíveis da *krigagem* ordinária a estudos hidrológicos, inclusive para obtenção de dados para regionalização hidrológica.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

4.1.1. Estado de Goiás

O estado de Goiás - GO (Figura 3) está localizado na região Centro-Oeste do Brasil, entre os paralelos de 12°23'S e 19°29'S e os meridianos de 45°54'O e 53°14'O, com uma área territorial de aproximadamente 340.111 km², representando 4% da área total do país, engloba 246 municípios, incluindo sua capital Goiânia (IMB, 2014). De acordo com último censo realizado em 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Goiás apresentou uma população de 6.003.788 habitantes, densidade demográfica de 17,65 hab km⁻² e índice de desenvolvimento humano (IDH) de 0,735, o que o coloca na 8ª posição quando comparado aos demais estados brasileiros em relação a esse índice (IBGE, 2020a). Além disso, seus limites territoriais são: ao norte, Tocantins; ao sul, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul; ao leste, Bahia e Minas Gerais; e à oeste, Mato Grosso.

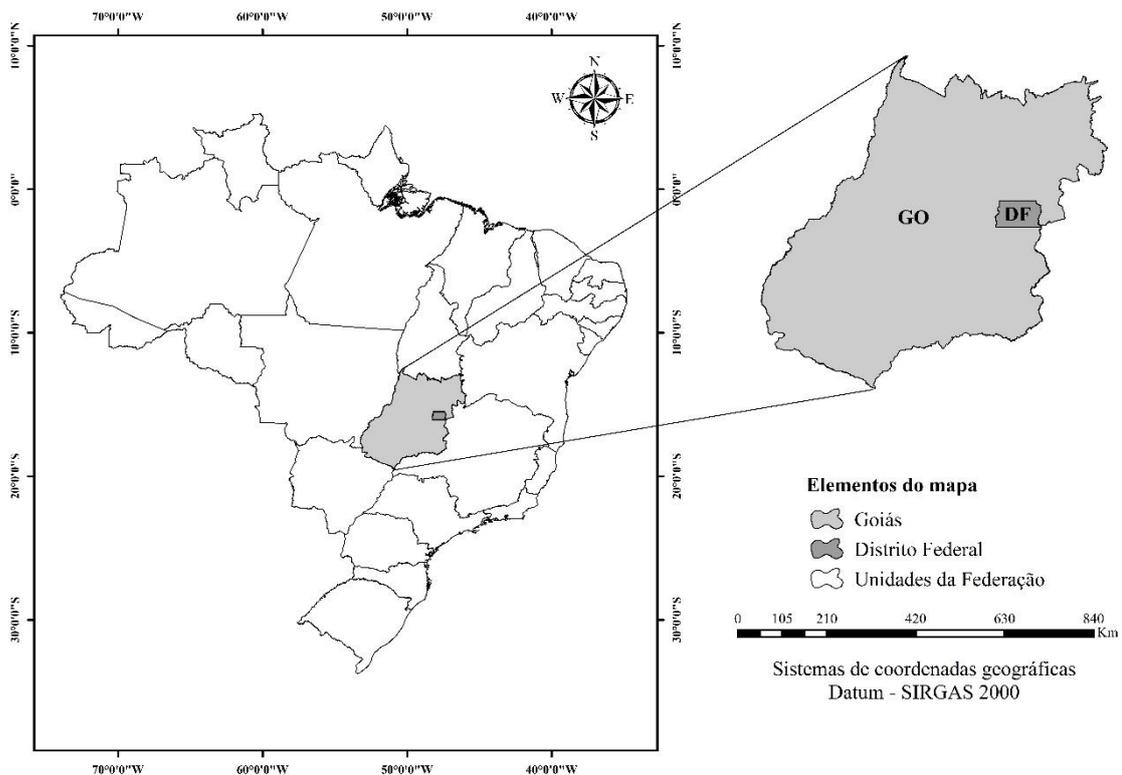


Figura 3. Localização geográfica do estado de Goiás e do Distrito Federal.

O estado apresenta quatro tipos de clima conforme a classificação de Köppen-Geiger (Am, Aw, Cwa e Cwb) com a predominância do clima Aw. Dessa forma, o território goiano é classificado como clima tropical, o qual possui duas estações bem definidas, seca e chuvosa, e com precipitação

anual média variando de 1.200 a 2.500 mm. Normalmente, na região central do Norte goiano e no município de Piracanjuba (Sudeste do estado) ocorrem os maiores índices pluviométricos comparados aos demais municípios, nos meses de outubro a abril (estação úmida). Nos outros meses do ano observa-se uma diminuição significativa dos volumes precipitados, o que caracteriza a estação seca (CARDOSO; MARCUZZO; BARROS, 2014; IMB, 2014).

Quanto ao relevo, o estado apresenta baixa amplitude altimétrica, sendo plano em sua maior parte. Os solos encontrados na região são classificados predominantemente como Latossolo Vermelho Amarelo e sua vegetação é majoritariamente formada por Cerrado, com grande parte de áreas antrópicas ocupadas por agricultura e pastagem. Sua Geologia é composta por rochas com idades variando do Arqueano ao Cenozoico. O estado ainda se destaca por possuir dois parques nacionais (Parque das Emas e Chapada dos Veadeiros), onze áreas como parques estaduais e diversas unidades de proteção ambiental (IMB, 2014).

Sua hidrografia é constituída por rios que alimentam três Regiões Hidrográficas importantes do país: bacia do Rio Tocantins, bacia do Rio Paranaíba e bacia do Rio São Francisco (Figura 4). Também tem uma rede de drenagem densa e formada por rios de médio e grande porte, além de ser a unidade da federação com o maior número de províncias hidrogeológicas (IMB, 2014).

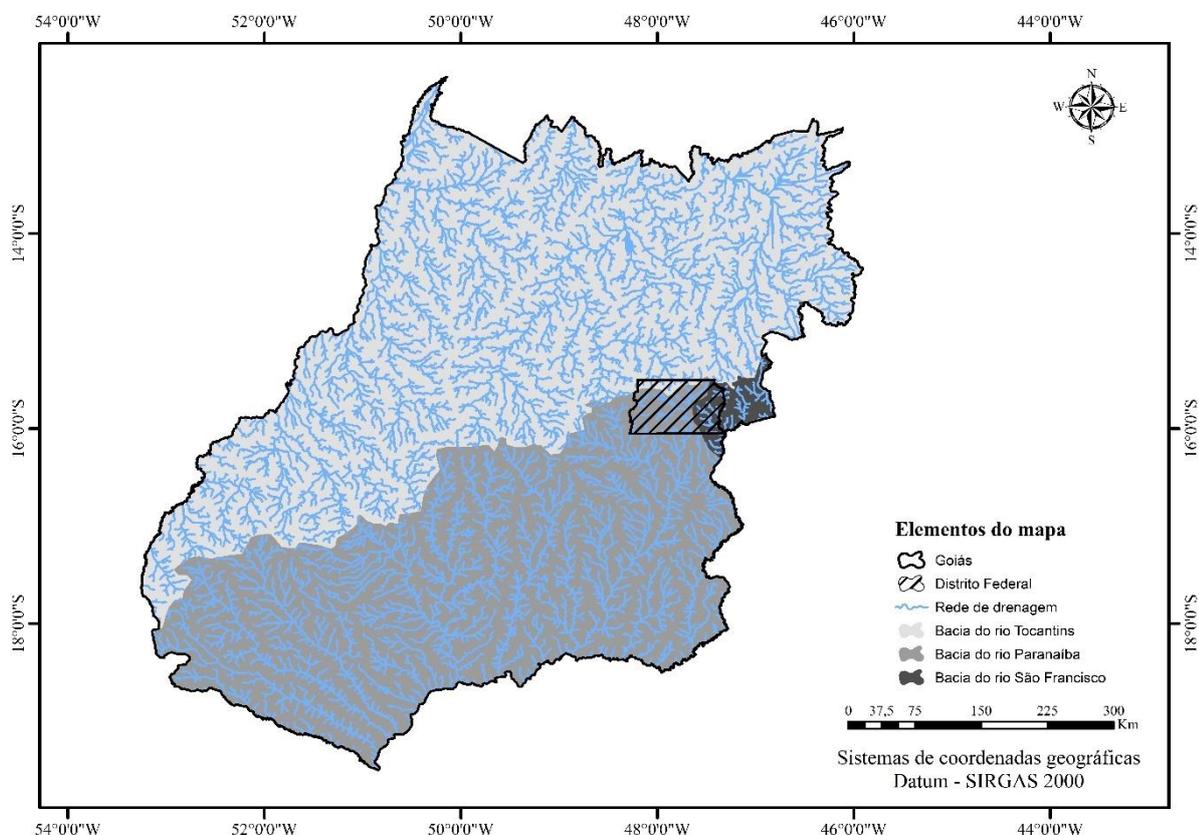


Figura 4. Macro bacias do estado de Goiás e Distrito Federal, separadas pelo antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE).

4.1.2. Distrito Federal

O Distrito Federal (Figura 3) está localizado entre os paralelos de 15°30'S e 16°03'S e os meridianos de 47°25'O e 48°12'O, na região Centro-Oeste do Brasil. Cercado por 10 municípios do estado de Goiás, possui apenas uma pequena faixa territorial (2 km) ao leste que faz divisa com o município de Cabeceira Grande do estado de Minas Gerais. Consiste no menor território autônomo do Brasil com área de aproximadamente 5.783 km², o que representa 0,06% da área total do país e que por determinação constitucional não pode ser dividido em municípios, sendo assim é formado pela Capital Federal Brasília e por 31 Regiões Administrativas (CODEPLAN, 2017). A população estimada no censo realizado pelo IBGE em 2010 foi de 2.974.703 habitantes, com densidade demográfica de 444,66 hab km⁻², com IDH de 0,824, maior IDH do país (IBGE, 2020b).

O clima do Distrito Federal é Aw, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o que caracteriza essa região como tropical com estação seca no inverno (CARDOSO; MARCUZZO; BARROS, 2014). Tal como no estado de Goiás, existem duas estações definidas, primavera-verão (estação chuvosa) e outono-inverno (estação seca). As precipitações anuais médias variam de 900 mm a 1.660 mm, sendo que as regiões de maior pluviosidade encontram-se na porção noroeste do território do Distrito Federal (Unidade Hidrográfica (UH) Rio do Sal e cabeceira da UH Alto Rio Descoberto), e no extremo sudeste (UH Alto Rio Preto) e na região central (UH Riacho Fundo) (CODEPLAN, 2017).

O relevo possui atributos típicos do Planalto Central, com altitudes entre 950 m e 1.400 m, destacando-se formas de relevo evoluídas por processo de erosão, caracterizadas por chapadas. Os solos predominantes na região são os Latossolos seguidos por Cambissolos, enquanto a vegetação é em sua maioria Formação Savânica, tipificada pelo Cerrado *stricto sensu*, ou seja, engloba espécies vegetais em grande parte arbustivas, troncos tortuosos, cascas grossas e folhas largas e grossas (CHAVEIRO; CASTILHO, 2007; CODEPLAN, 2017).

A rede de cursos d'água é principalmente perene, e abrange exatamente o divisor de águas de três grandes regiões hidrográficas brasileiras: Rio Maranhão, Rio Preto e os Rios Bartolomeu e Descoberto, afluentes dos rios das bacias Tocantins, São Francisco e Paranaíba, respectivamente (Figura 4). Por conseguinte, são regiões de nascedouros de pequenos cursos d'água que fluem em direções distintas, razão pelo qual a região possui baixa disponibilidade hídrica (CODEPLAN, 2017; LIMA et al., 2017). Por meio de decreto administrativo foram instituídos três Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH): CBH Paranaíba, CBH Maranhão e CBH Preto. Devido ao fato de o território estar situado em uma região que não apresenta boa drenagem superficial é fundamental o desenvolvimento e aplicação de estratégias na gestão das águas subterrâneas e proteção dos mananciais (CODEPLAN, 2017).

4.2. Fluxograma metodológico

O desenvolvimento metodológico do trabalho foi caracterizado por etapas contínuas para que os objetivos propostos fossem atingidos. Cada uma dessas etapas e *softwares* utilizados estão representadas na Figura 5. A metodologia aplicada em cada fase, será descrita nos itens subsequentes.

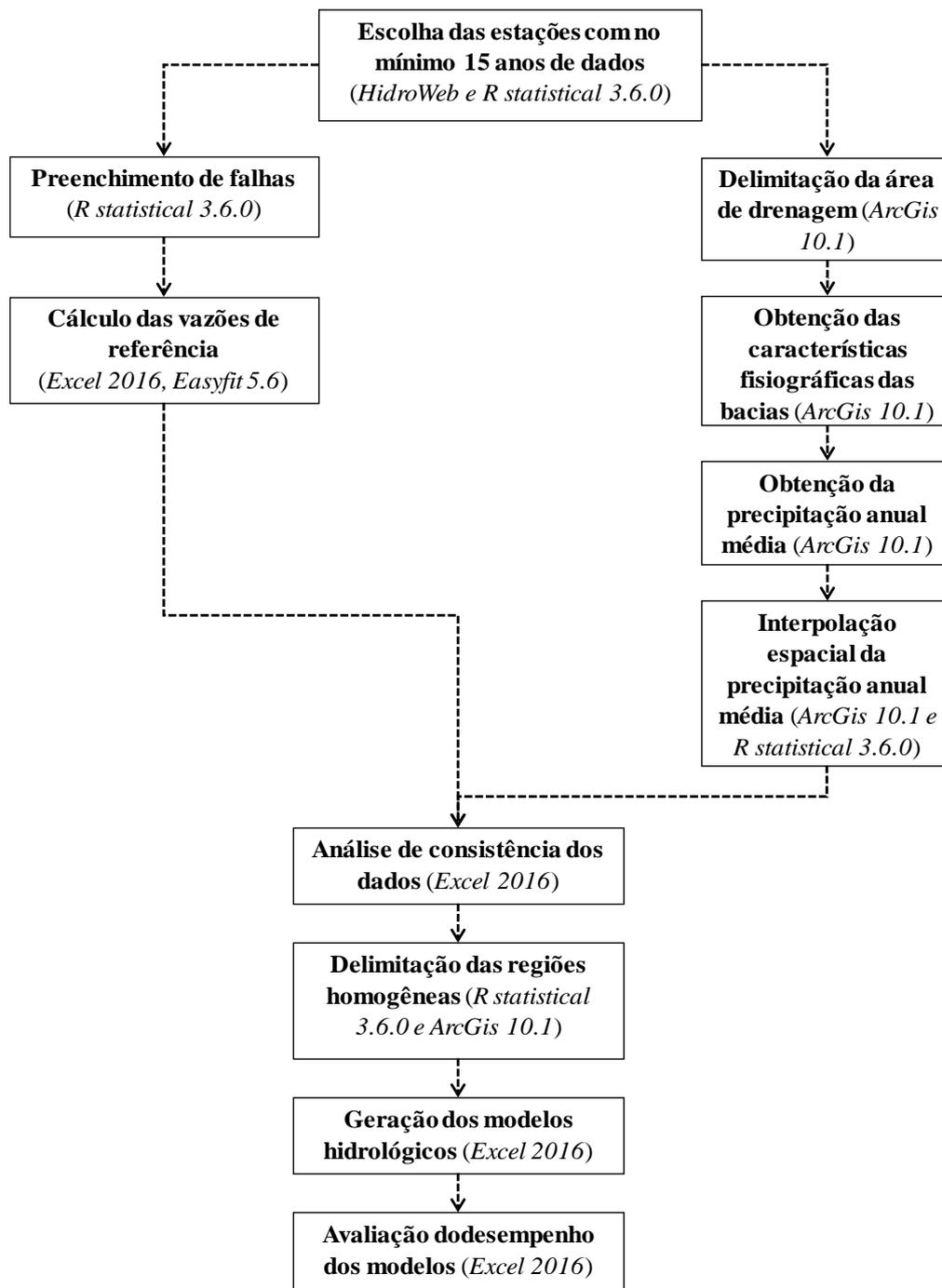


Figura 5. Fluxograma metodológico da Dissertação, apresentando etapas e *softwares* utilizados.

4.3. Dados fluviométricos

4.3.1. Obtenção dos dados

Os dados de vazão foram obtidos por meio das séries históricas das estações fluviométricas consistidas e administradas pela ANA para o estado de Goiás, Distrito Federal e de estações geograficamente próximas às áreas de estudo, no portal HidroWeb, ferramenta do Sistema de Informações Hidrológicas, localizadas no endereço eletrônico <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Foram selecionadas estações com períodos de dados que variam de 1948 a 2018, com no mínimo 15 anos de informações, sem que esses apresentassem necessariamente um período base comum a todas as estações. Considerou-se que esse período mínimo de dados é suficiente para representar uma série hidrológica estacionária, ou seja, que se repete ao longo do tempo (HOSKING; WALLIS, 1997; MALEKINEZHAD; ZARE-GARIZI, 2014). As estações, foram submetidas a análise da ausência de dados nas séries históricas, em que selecionou-se aquelas que continham pelo menos 80% dos dados anuais.

A análise e a seleção das estações fluviométricas foram realizadas nos *softwares*: Excel 2016 e R *Statistical* 3.6.0 (EXCEL, 2016; R CORE TEAM, 2019). Desta forma, foram selecionadas 77 estações no estado de Goiás, 25 estações no Distrito Federal e 12 estações circunvizinhas. As estações estão apresentadas no Anexo A.

Em seguida, foi realizado o preenchimento de dados faltantes com base nas estações dentro da Bacia Ottocodificada - nível 3 da ANA (Figura 6). As estações circunvizinhas foram utilizadas com a finalidade de auxiliar no preenchimento de falhas das demais estações, visando maximizar o número de dados e assim reduzir o efeito de dados faltantes. Tais estações estão localizadas nos estados de Mato Grosso, Tocantins, Bahia, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul.

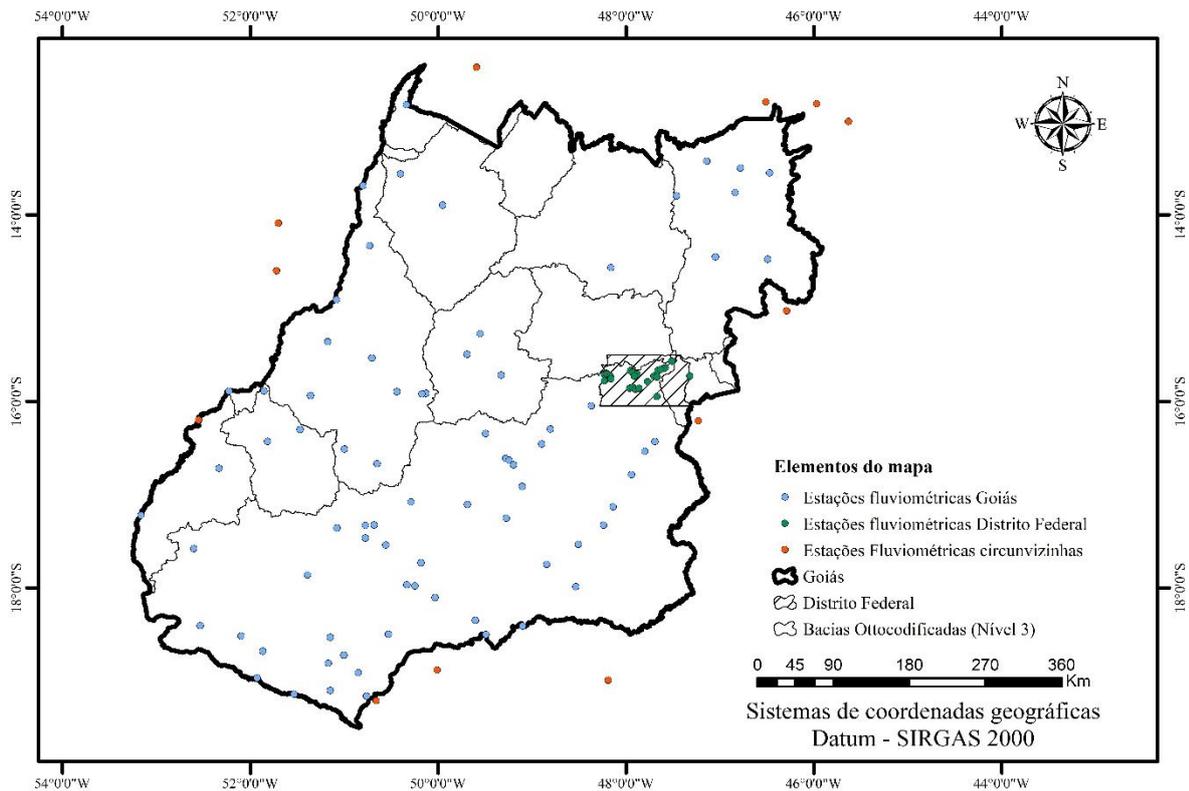


Figura 6. Estações fluviométricas do estado de Goiás, Distrito Federal e circunvizinhas, localizadas nas bacias Ottocodificadas – nível 3 e utilizadas nesse trabalho.

4.3.2. Preenchimento de falhas

Constantemente, as medições nas estações hidrométricas apresentam falhas ou possuem erros grosseiros, esses podem decorrer devido a problemas na unidade de medição ou à falta do operador na estação. Entretanto, para estudos hidrológicos é fundamental a utilização de séries ininterruptas, assim, torna-se indispensável a preparação dos dados para identificar e corrigir as possíveis falhas e erros (ARAI; PEREIRA; GONÇALVES, 2012).

Existem diversas metodologias para o preenchimento dessas lacunas, o qual consistem, em sua maioria, em análises estatísticas correlacionando ponderações espaciais e regionais (OLIVEIRA et al., 2010). Desse modo, as estações fluviométricas utilizadas no presente estudo foram agrupadas por meio da divisão hidrográfica Ottocodificada - nível 3 (interbacia Orenoco – Amazonas) (Figura 6), visando agregar as estações por interbacias, no qual suas características tendem a ser similares, e assim, torna-se factível aplicar o método de preenchimento de suas falhas.

A divisão hidrográfica Ottocodificada é a principal referência para uma série de atividades na gestão de recursos hídricos. Consiste em um método de codificação de bacias hidrográficas desenvolvido por Otto Pfafstter, instituído pela Resolução nº 30/2002 do CNRH. É hierárquico, e se inicia pelos maiores rios de uma determinada bacia, descendo em nível de detalhe a cada etapa,

continuamente, até que se tenha codificado todos os trechos da rede hidrográfica. Os níveis de número ímpar (1, 3, 5, 7 e 9) são atribuídos às áreas de drenagem que fluem diretamente para o curso d'água principal, essas áreas são denominadas interbacias (MMA, 2002; SNIRH, 2002).

Após a separação das estações por interbacias, foi utilizado o *software R statistical 3.6.0* (R CORE TEAM, 2019) para o preenchimento de falhas das séries de dados das vazões diárias, por meio do pacote *mtsdi*. No pacote é utilizado um algoritmo adaptado especificadamente para dados climáticos, com informações ausentes de várias estações em uma determinada região. O método é fundamentado no algoritmo Esperança Maximizada para imputação de valores ausentes em séries temporais multivariadas, e responde pelas estruturas de correlação espacial e temporal (JUNGER; LEON, 2018).

O *script* utilizado permite visualizar os momentos em que as falhas ocorrem em cada estação no decorrer dos anos, por interbacia. Dessa forma foi possível identificar e definir a partir de que ano as falhas deveriam ser preenchidas, bem como, se as estações dispunham dados suficientes para o procedimento.

O preenchimento de falhas é exemplificado na Figura 7 para a interbacia 699. Inicialmente, foi verificada a disponibilidade anual dos dados obtidos por meio do HidroWeb para cada estação (Figura 7A). Após a análise dos anos com ausência de informações, foram selecionados os anos para o preenchimento de falhas (Figura 7B). Nas 7C e 7D são apresentadas a vazão diária ao longo dos anos antes e após o preenchimento de falhas, respectivamente. Vale ressaltar, que os dados obtidos por meio do preenchimento de falhas, somente foram utilizados quando as falhas ocorreram nos anos disponíveis, descartando assim, anos precedentes e posteriores.

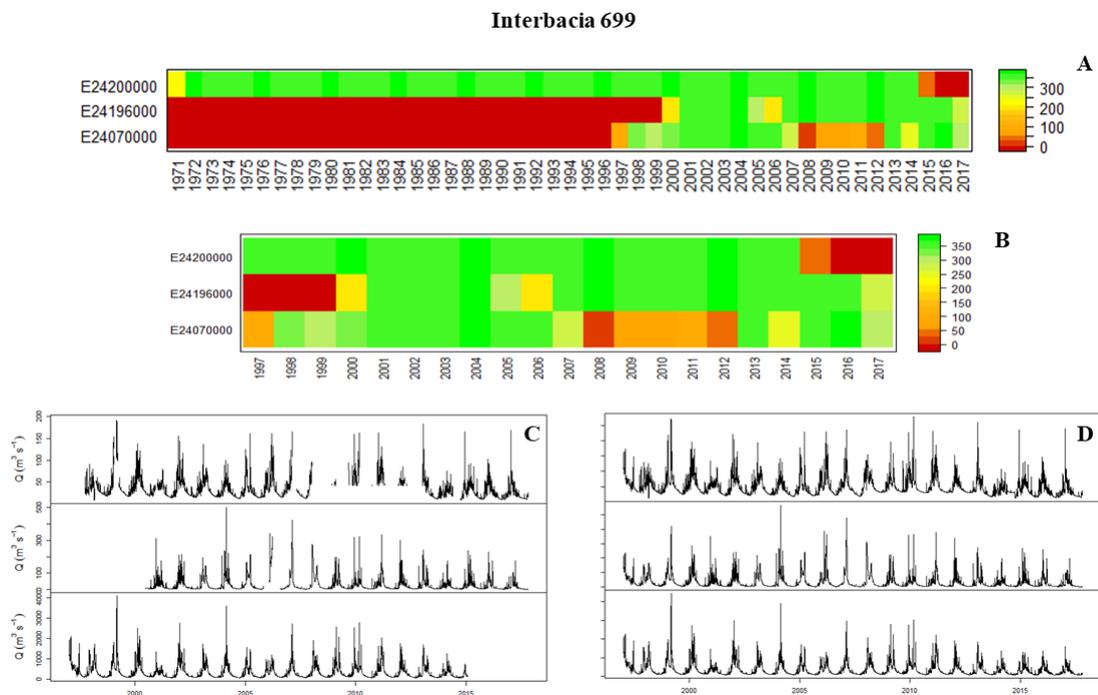


Figura 7. A) Total de dados disponíveis para as respectivas estações; B) Total de dados disponíveis para as respectivas estações nos anos em que foi realizado o preenchimento de falhas; C) Vazão diária ao longo dos anos antes do preenchimento de falhas; D) Vazão diária ao longo dos anos após do preenchimento de falhas.

4.3.3. Características fisiográficas

O potencial de água superficial e subterrânea em uma bacia hidrográfica pode ser associado e afetado diretamente pelas características fisiográficas da área de drenagem (EL-HATTAB; AHMED; EL-RAEY, 2019). Dessa forma, a análise dessas características é fundamental para identificar o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, e assim, auxiliar na tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos (HAJAM et al., 2013). Para determinação e descrição quantitativa de tais características, podem ser utilizadas técnicas disponíveis em Sistema de Informações Geográficas (SIG), amplamente aplicadas em estudos hidrológicos nas últimas duas décadas, e que apresentam grande eficácia quando comparadas a outras ferramentas (EL-HATTAB; AHMED; EL-RAEY, 2019).

As características fisiográficas utilizadas no estudo foram: área de drenagem, declividade média da bacia, densidade de drenagem e comprimento do talvegue principal. Para extrair esses valores foram delimitadas as bacias hidrográficas para cada estação fluviométrica, por meio do ArcHydro, um conjunto de ferramentas para análises hidrológicas do *software* ArcGIS 10.1, com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) (Figura 8). O MDE utilizado no estudo foi obtido por meio das imagens do satélite *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m, disponíveis na plataforma *Google Earth Engine* e reprojetaadas para coordenada plana UTM 22s (ESRI, 2012; GOOGLE, 2019).

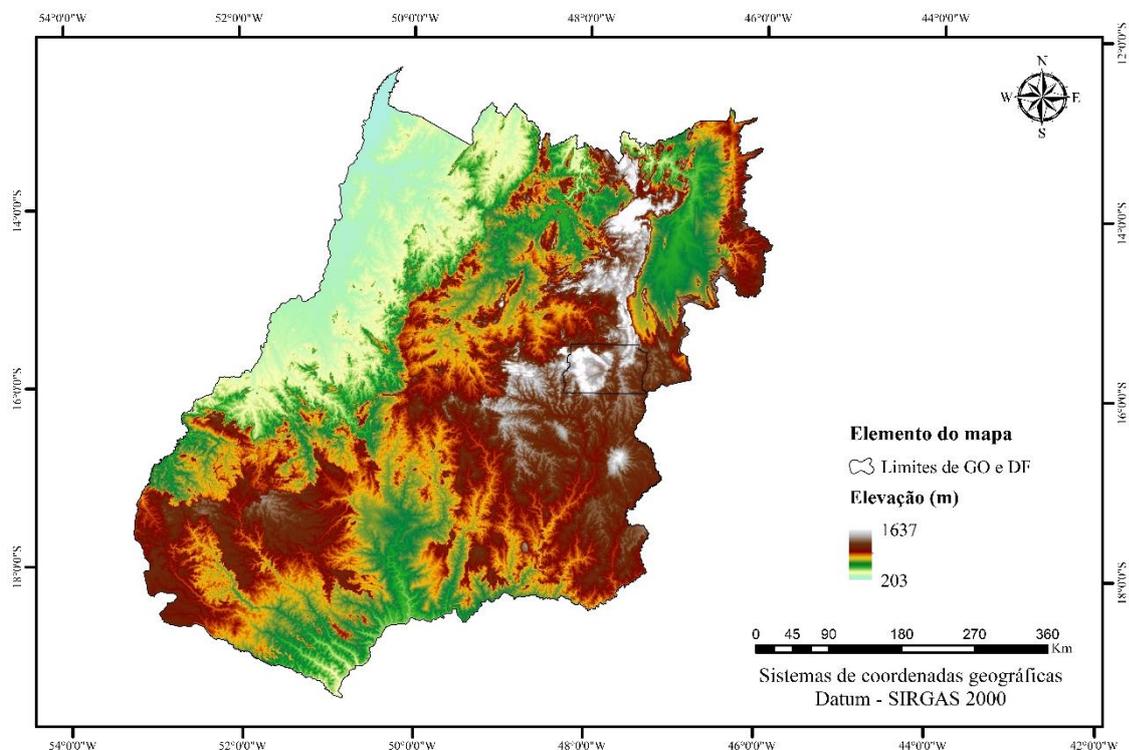


Figura 8. Modelo Digital de Elevação do estado de Goiás e do Distrito Federal.

Para a delimitação das bacias foram aplicados os seguintes passos no ArcHydro:

*Fill Sinks > Flow Direction > Flow Accumulation > Stream Definition > Stream Segmentation > Catchment Grid Delineation > Catchment Polygon Processing > Drainage Line Processing > Adjoint Catchment Processing > Drainage Point Processing > **Batch Point Generation > Watershed Delineation.***

Esses dois últimos passos foram aplicados para cada uma das 102 estações fluviométricas, em que foi gerado um *shapefile* denominado *Watershed*, a partir do qual foi possível calcular suas respectivas áreas, em km², por meio da ferramenta *calculate geometry*, localizada na tabela de atributos do arquivo (ESRI, 2012). As áreas obtidas foram comparadas às disponibilizadas pela ANA.

Ainda no ArcHydro, foram encontrados os centroides de cada bacia, por meio do caminho: *Watershed Processing > Drainage Area Centroid* (ESRI, 2012), em que foram utilizados como ponto de referência para delimitação de regiões hidrologicamente homogêneas, como será descrito no item 4.5.

A declividade média das bacias hidrográficas foi obtida pela ferramenta *Slope*, disponível no caminho: *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Slope* (ESRI, 2012). O cálculo da declividade com essa ferramenta é realizado *pixel a pixel*, com base nos valores altimétricos dos 8 *pixels* adjacentes ao central, em que a declividade (relação base/altura) do *pixel* central é calculado pelas Eq. 6, Eq. 7 e Eq. 8 (DUNN; HICKEY, 1998).

$$I = \left(\sqrt{I_{e-o}^2 + I_{n-s}^2} \right) * 100 \quad \text{Eq. 6}$$

$$I_{e-o} = \frac{((z_3 + 2z_4 + z_5) - (z_1 + 2z_8 + z_7))}{8 * \text{resolução espacial em x}} \quad \text{Eq. 7}$$

$$I_{n-s} = \frac{((z_1 + 2z_2 + z_3) - (z_7 + 2z_6 + z_5))}{8 * \text{resolução espacial em y}} \quad \text{Eq. 8}$$

em que:

I – Declividade do *pixel* central, %;

I_{e-o} – Distância horizontal do *pixel*, m;

I_{n-s} – Altitude no *pixel*, m; e,

z₁ a z₈ – Valores das variáveis nos *pixels* de número de 1 a 8, m.

Desse modo, foi gerado um arquivo *raster* com os valores da declividade do terreno, em porcentagem, para toda área de estudo. A extração dos dados do *raster* se deu por meio da ferramenta *Zonal Statistical as Table*, localizada no caminho: *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Zonal > Zonal Statistical as Table.*

A densidade de drenagem foi obtida com auxílio da ferramenta **Intersect**, localizada no menu *Geoprocessing* do ArcGis10.1, em que foram inseridas as feições com as bacias hidrográficas (*Watershed*) e com as linhas de drenagem (*DrainageLine*), geradas por meio do ArcHydro. Obteve-se um arquivo *raster*, no qual a tabela de atributos possui o nome de cada estação associado a cada curso d'água da área de drenagem equivalente. Desta forma, foi possível calcular o comprimento das linhas de drenagem, em km, associado a cada área de drenagem utilizando a ferramenta **calculate geometry** (ESRI, 2012). E assim, a tabela de atributos foi exportada para planilha eletrônica, na qual foi calculada a densidade de drenagem por meio da Eq. 9 (EXCEL, 2016).

$$Dd = \frac{\sum L}{A} \quad \text{Eq. 9}$$

em que:

Dd – Densidade de drenagem, km km⁻²;

L – Comprimento de cada curso d'água, km; e,

A – Área de drenagem, km².

Por fim, o comprimento do talvegue principal de cada área de drenagem foi obtido com a ferramenta **Longest Flow Path**, disponível no *ArcHydro > Watershed Processing > Longest Flow Path*. Para funcionamento da ferramenta, foi necessário separar o *shapefile* com todas as bacias de drenagem (*Watershed*) em *shapefiles* individuais, por meio da ferramenta **Multipart to Singlepart**. Assim, os valores de comprimento do talvegue principal foram calculados e exportados para planilha eletrônica (ESRI, 2012; EXCEL, 2016).

4.3.4. Cálculo das vazões de referência

O cálculo das vazões de referência é fundamental para concessão da outorga de direito de uso, visto que é o meio utilizado para quantificação da disponibilidade hídrica no ponto de interesse. Devido a problemas decorrentes da baixa densidade de estações ao longo do território nacional, buscam-se alternativas para contornar tal questão, tal como a regionalização hidrológica. Contudo, para validação dos modelos hidrológicos são utilizadas as variáveis calculadas a partir dos dados disponíveis.

Dessa forma, a partir da série histórica de vazão diária foram calculadas as médias aritméticas mensais para cada estação fluviométrica com auxílio de planilha eletrônica (EXCEL, 2016). Por conseguinte, por meio do *software* EasyFit 3.6 (MATHWAVE TECHNOLOGIES, 2017), com os valores médios mensais de vazão dispostos em ordem decrescente, foi realizado o ajuste de probabilidade da curva de permanência de cada estação, e identificados os valores de \bar{Q} , $Q_{\text{máx}}$, $Q_{\text{mín}}$, Q_{90} e Q_{95} . A \bar{q}_{esp} , utilizada no modelo como variável dependente, foi calculada por meio da Eq. 10.

$$\bar{Q}_{\text{esp}} = \frac{\bar{Q}}{A} \quad \text{Eq. 10}$$

em que:

\bar{Q}_{esp} – Vazão média específica, $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$;

\bar{Q} – Vazão média de longo período, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; e,

A – Área de drenagem, km^2 .

4.4. Dados pluviométricos

Para o levantamento das estações pluviométricas foi utilizada a plataforma HidroWeb da ANA, assim como foi feita na obtenção dos dados fluviométricos. Do mesmo modo, para identificação das séries históricas com período superior a 15 anos de dados, foram utilizados os *softwares* Excel 2016 e R *statistical* 3.6.0 (EXCEL, 2016; R CORE TEAM, 2019). Em seguida, foram observadas 112 estações em Goiás, 26 no Distrito Federal e 29 circunvizinhas (Figura 9, Anexo B), com período de dados variando nos anos de 1944 a 2018. As estações circunvizinhas foram obtidas com a finalidade de maximizar o número de dados do estudo, e assim, possibilitar a realização da interpolação da precipitação anual média próximo à divisa do estado de Goiás.

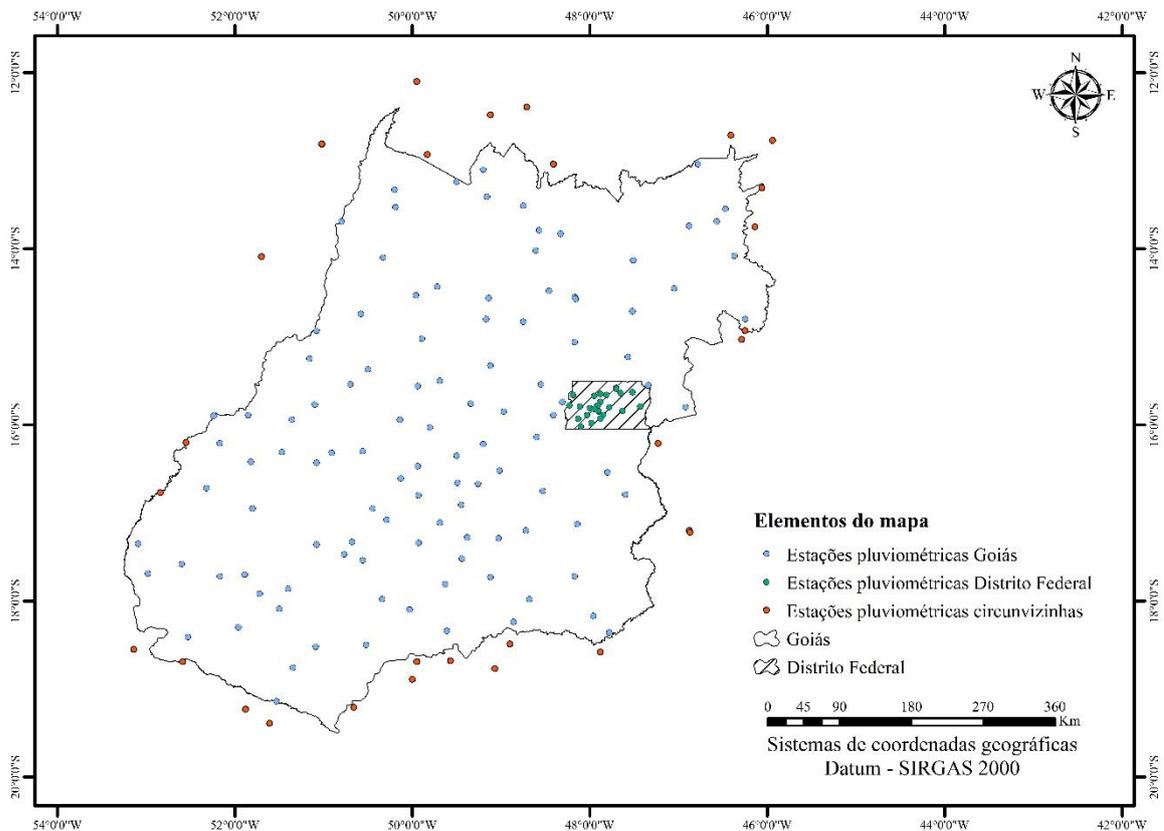


Figura 9. Estações pluviométricas do estado de Goiás, Distrito Federal e circunvizinhas, utilizadas nesse estudo.

Para assegurar a qualidade e a consistência dos dados foi utilizado um *script* no R *statistical* 3.6.0 (R CORE TEAM, 2019), o qual permitiu calcular a porcentagem anual e mensal de dias faltantes. Dessa maneira, foi possível garantir que os dados obtidos estavam adequados e nenhuma estação pluviométrica precisou ser suprimida.

A interpolação da precipitação anual média foi realizada por meio da *krigagem* ordinária, com ajuste ao semivariograma experimental *gaussiano*, aplicando a ferramenta **Kriging**, no software ArcGis 10.1. Na modelagem hidrológica foram utilizadas os valores de precipitação anual média das bacias, obtidas por meio da ferramenta **Zonal Statistical as Table** (ESRI, 2012).

Para fins da avaliação do desempenho do interpolador utilizado, a precipitação anual média obtida por *krigagem* foi comparada com a precipitação anual média obtida por meio dos produtos do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) da *Earth Data* da *National Aeronautics and Space Administration*, no período de 2000 a 2015, para cada bacia hidrográfica, disponíveis no endereço eletrônico <https://github.com/daniel-althoff/SPP-Down/blob/master/README.md> (ALTHOFF, 2019; NASA, 2020).

4.5. Delimitação das regiões hidrologicamente homogêneas

A estatística multivariada vem sendo amplamente empregada na delimitação de regiões homogêneas, em que técnicas estatísticas de homogeneização são essenciais sob o ponto de vista de encontrar um padrão de similaridade de uma determinada região. A análise de *cluster* é uma dessas técnicas, que consiste na classificação de fatores que possuam características semelhantes em um número de classes estabelecido (NETO; ALMEIDA, 2013).

Assim, para delimitar as regiões hidrologicamente homogêneas foi realizada a análise de *cluster*, por meio do algoritmo *k-means*, no *software* R *statistical* 3.6.0 (R CORE TEAM, 2019). Foram consideradas como variáveis independentes: latitude e longitude do centroide das bacias hidrográficas, precipitação anual média, declividade média da bacia, densidade de drenagem e comprimento do talvegue principal. O centroide das bacias foi utilizado como distância geográfica entre as bacias, para representar o escoamento como uma função da área total da bacia (EL TAHAN; ELHANAFY, 2016).

Estabelecido o número ótimo de *clusters*, ou seja, de regiões hidrologicamente homogêneas nas áreas do estado de Goiás e do Distrito Federal, foi realizada a espacialização dos agrupamentos por meio do algoritmo *k – Nearest Neighbor (knn)* no *software* R *statistical* 3.6.0 (R CORE TEAM, 2019). Como as variáveis independentes apresentam diferentes unidades, foi realizada sua padronização por meio da Eq. 11, que consiste na normalização do *score z*, que redimensiona cada variável em termos da relação do desvio padrão e sua média (PANDEY; JAIN, 2017).

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \text{Eq. 11}$$

em que:

z – valor padronizado;

x – variável observada;

μ – média; e,

σ – desvio padrão.

O algoritmo *knn* considera medidas de similaridade entre os dados para separação dos grupos na sua classe correspondente. Dessa forma, foi considerada a distância euclidiana dos centroides das áreas de drenagem, ou seja, a distância em linha reta entre os pontos, que foram estabelecidas pela Eq. 12.

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum (x_{in} - x_{jn})^2} \quad \text{Eq. 12}$$

em que:

d – distância euclidiana entre os centroides das bacias i e j ;

x – variável observada; e

n – número de variáveis independentes.

4.6. Regionalização hidrológica de vazões

4.6.1. Desenvolvimento dos modelos hidrológicos

Para regionalização das vazões de referência foi realizada a correlação da variável dependente (\bar{Q}_{esp}) com as variáveis independentes (precipitação anual média, declividade média da bacia, densidade de drenagem e comprimento do talvegue principal), por meio da regressão linear múltipla (Eq. 13) em cada região hidrologicamente homogênea, considerando a análise estatística de variância (ANOVA) pelo teste *t-student* ($p < 0,05$), para determinar quais coeficientes utilizados em cada modelo era, de fato, significativo.

$$\bar{Q}_{\text{espr}} = a + bP + cI + dDd + eL \quad \text{Eq. 13}$$

em que:

\bar{Q}_{espr} – vazão média específica regionalizada, $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$;

P – precipitação anual média, mm ano^{-1} ;

I – declividade média da bacia, %;

Dd – densidade de drenagem, km km^{-2} ;

L – comprimento do talvegue principal, km ; e,

a, b, c, d, e – coeficientes do modelo, adimensional.

Assim, com os modelos hidrológicos já definidos, foram determinadas as vazões médias para cada estação, por meio da Eq. 14. A determinação das vazões de referências estimadas foi realizada visando compor a avaliação dos modelos hidrológicos, que será abordado o item posterior.

$$\bar{Q}_r = \bar{q}_{espr} \cdot A \quad \text{Eq. 14}$$

em que:

\bar{Q}_r – vazão média de longo período regionalizada, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; e,

\bar{q}_{espr} – vazão média específica regionalizada, $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$.

As vazões de referência Q_{90} e Q_{95} regionalizadas foram determinadas com base nos coeficientes lineares obtidos por meio da relação entre a Q_{90} e Q_{95} com a \bar{Q} , todas observadas nas estações fluviométricas, para cada região hidrológicamente homogênea, ou seja, como demonstrado nas Eq. 15 e Eq. 16.

$$Q_{90r} = a_{q90} \cdot \bar{Q}_r \quad \text{Eq. 15}$$

$$Q_{95r} = a_{q95} \cdot \bar{Q}_r \quad \text{Eq. 16}$$

em que:

Q_{90r} - vazão mínima regionalizada esperada em 90% do tempo, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

Q_{95r} – vazão mínima regionalizada esperada em e 95% do tempo, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

a_{q90} e a_{q95} – coeficientes angulares, da relação entre Q_{90} e Q_{95} com a \bar{Q} , adimensional; e,

\bar{Q}_r – vazão média de longo período regionalizada, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

4.6.2. Avaliação dos modelos hidrológicos

Com a finalidade de avaliar o desempenho dos modelos de regionalização hidrológica propostos nesse estudo, foram comparados os dados estimados por cada um dos modelos com os dados observados nas estações fluviométricas administradas pela ANA, por meio de índices de performance.

Desta forma, foram determinados quatro índices de performance recomendados por Moriasi et al. (2015): coeficiente de determinação (R^2), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), percentual de viés (PBIAS) e índice de concordância de Willmont (d). Ademais, foram determinados o coeficiente de correlação (r) e o índice de confiança (c), sugeridos por Camargo e Sentelhas (1997).

O coeficiente de determinação (R^2) (Eq. 17), bem como o coeficiente de correlação (r) (Eq. 18), são métricas amplamente utilizadas em estudos hidrológicos para avaliação de modelos, pois refletem a qualidade do ajuste entre simulações e observações, além de serem medidas do grau de

dependência entre as variáveis, ambos variam de 0 a 1, em que quanto mais próximo de 1 menor é o erro (PANDEY et al., 2017).

$$R^2 = \left[\frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - O)(S_i - S)]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (|O_i - O|)^2} \right] \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (|S_i - O|)^2} \right]} \right]^2 \quad \text{Eq. 17}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(S_i - S)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2)(\sum_{i=1}^n (S_i - S)^2)}} \quad \text{Eq. 18}$$

em que:

O_i – valor observado;

S_i – valor estimado;

O – média dos valores observados; e,

S – média dos valores estimados.

O teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (Eq. 19) consiste em um índice relativo de concordância (ou discordância) entre o valor observado e o estimado. Varia de $-\infty$ a 1, sendo que o valor 1 indica concordância perfeita e valores menores ou igual a zero indicam que o modelo não é representativo (MATHEVET et al., 2006; NASH; SUTCLIFFE, 1970).

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum (O_i - S_i)^2}{\sum (O_i - O)^2} \quad \text{Eq. 19}$$

O índice de concordância de Willmont (d) (Eq. 20) é uma estatística descritiva que reflete o grau em que a variável observada é estimada com exatidão pela variável simulada. Não é uma medida de correlação ou associação, mas uma medida do grau em que as previsões de um modelo estão livres de erros. Consiste em uma medida padronizada que possui variação de 0 a 1, em que quanto mais próximo a 1, melhor o desempenho e, em contrapartida, quando mais próximo de 0, indica discordância completa entre as variáveis (WILLMOTT, 1981).

$$d = 1 - \frac{\sum (S_i - O_i)^2}{\sum (|S_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad \text{Eq. 20}$$

O percentual de viés (PBIAS) (Eq. 21) é utilizado para determinar quão bem o modelo simula as magnitudes médias para os valores estimados. Extensamente usado para simulações contínuas a longo prazo, é um índice robusto e que auxilia na identificação do viés médio da simulação do modelo. É

determinado em porcentagem e quanto mais próximo a zero, melhor o desempenho do modelo (varia de $-\infty$ a $+\infty$). Entretanto, pode ser próximo a zero mesmo quando o modelo não apresenta boa performance, por essa razão é recomendado utilizar juntamente a outros modelos estatísticos (HARMEL; SMITH; MIGLIACCIO, 2010; MORIASI et al., 2015).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \right] \quad \text{Eq. 21}$$

O índice de confiança (c) (Eq. 22) é um método proposto para indicar o desempenho de modelos, reunindo índices de precisão e exatidão, r e d, respectivamente. O índice varia de 0 a 1, apresentando desempenho ótimo quando maior que 0,85 e péssimo quando menor que 0,40 (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

$$c = r \cdot d \quad \text{Eq. 22}$$

Por fim, para avaliar o desempenho dos modelos, também foram utilizadas classificações qualitativas relacionados a cada índice estatístico. Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentados tais critérios, recomendados por Moriasi et al. (2015) e Camargo e Sentelhas (1997), respectivamente.

Tabela 1. Classificação qualitativa do desempenho de modelos, recomendados por Moriasi et al. (2015) e por Camargo e Sentelhas (1997), para regionalização hidrológica.

Parâmetros estatísticos	Performance do modelo			
	Muito bom	Bom	Satisfatório	Insatisfatório
R ²	> 0,85	0,75 < R ² ≤ 0,85	0,60 < R ² ≤ 0,75	≤ 0,60
r	> 0,85	0,75 < R ² ≤ 0,85	0,60 < R ² ≤ 0,75	≤ 0,60
NSE	> 0,80	0,70 < NSE ≤ 0,80	0,50 < NSE ≤ 0,70	≤ 0,50
PBIAS (%)	< ± 5	± 5 ≤ PBIAS ≤ ± 10	± 10 ≤ PBIAS ≤ ± 15	PBIAS ≥ ± 15
d	> 0,90	0,85 < d ≤ 0,90	0,75 < d < 0,85	d ≤ 0,75

Fonte: adaptado de Moriasi et al. (2015) e de Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 2. Classificação qualitativa do desempenho do modelo por meio do índice de confiança (c), sugerido por Camargo e Sentelhas (1997).

Desempenho	Ótimo	Muito bom	Bom	Regular	Ruim	Péssimo
c	> 0,85	0,75 < c ≤ 0,85	0,65 < c ≤ 0,75	0,50 < c ≤ 0,65	0,40 < c ≤ 0,50	< 0,40

Fonte: adaptado de Camargo e Sentelhas (1997).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Delimitação das bacias de drenagem

Na Figura 10 são apresentadas as bacias de drenagem das estações fluviométricas utilizadas no estudo. A maior área de drenagem medida foi na estação 60625080 (UHE Cachoeira Dourada Barramento), com aproximadamente 91.819 km², localizada no município de Cachoeira Dourada, que faz divisa com o estado de Minas Gerais. A estação mede a vazão do rio Paranaíba, pertencente a bacia do Rio Paraná. A menor área de drenagem também foi na bacia do Rio Paraná, entretanto, no córrego Cabeça de Veado, na estação 60478600 (Dom Bosco - Cabeça de Veado), com área de 33 km².

Ao analisar a distribuição espacial das bacias, observa-se uma menor concentração de estações na parte da região norte do estado de Goiás, o que faz com que a regionalização hidrológica na região dependa da interpolação de informações de regiões mais distantes. Devido à baixa densidade da rede hidrométrica, as vazões de referência obtidas nessa região devem ser utilizadas com maior prudência para não ocasionar complicações no gerenciamento dos recursos hídricos da região.

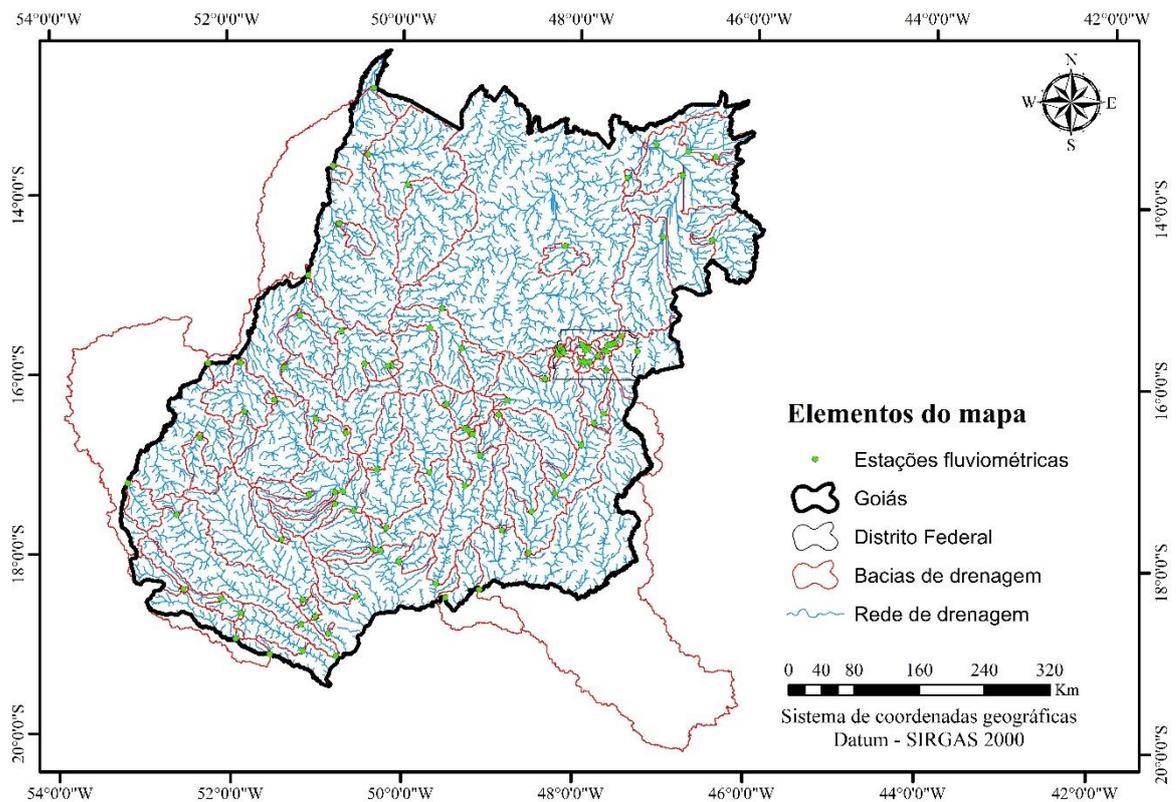


Figura 10. Bacias de drenagem das estações fluviométricas do estado de Goiás e Distrito Federal utilizadas nesse trabalho.

5.2. Interpolação espacial dos dados pluviométricos

A distribuição espacial da precipitação anual média obtida por meio da *krigagem* ordinária, com semivariograma experimental *gaussiano*, é apresentada na Figura 11. A precipitação anual média varia espacialmente entre 1233,20 a 1638,57 mm, com média de 1480,16 mm nas bacias de drenagem do estado, corroborando com o resultado obtido por Marcuzzo; Faria; Filho (2012), que observaram uma tendência de 1485,3 mm de precipitação anual média na região.

Os maiores índices pluviométricos ocorreram no norte goiano e no município de Piracanjuba, assim como apresentado no Atlas do estado de Goiás (IMB, 2014). Já os menores volumes precipitados ocorreram no nordeste goiano, que podem ser explicados pela ação das massas de ar (como a massa de ar tropical atlântica), que apesar de carregarem umidade, quando chegam nas regiões costeiras que apresentam maiores altitudes essa umidade é eliminada por chuvas orográficas (CARDOSO; MARCUZZO; BARROS, 2014).

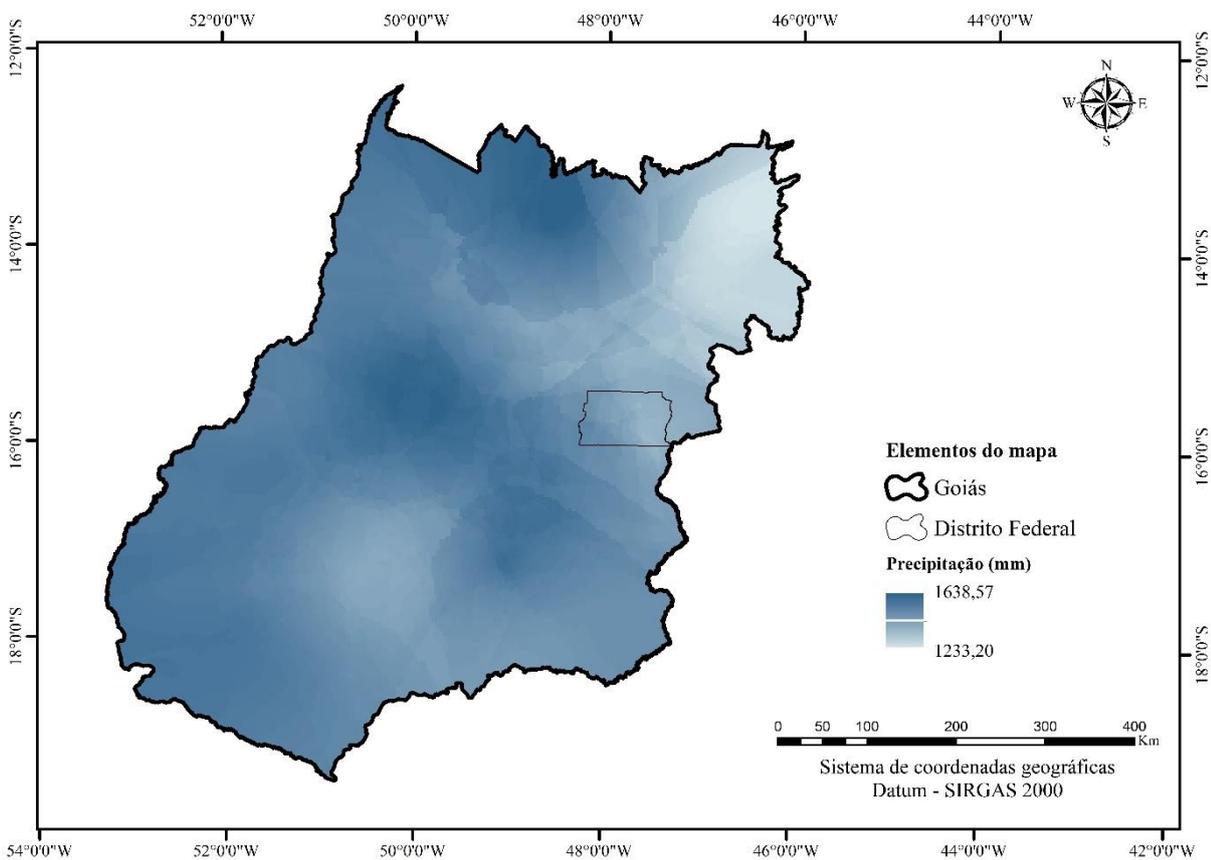


Figura 11. Distribuição espacial da chuva do estado de Goiás e do Distrito Federal, obtidos por meio de *krigagem* ordinária.

Para analisar a coerência da espacialização da precipitação por interpolação, foram utilizados os produtos do TRMM (Figura 12). A precipitação anual média obtida por *krigagem* e pelo satélite apresentaram distribuição espacial semelhantes, sendo que no TRMM a precipitação variou entre 1100,78 e 1700,39 mm. Desse modo, a máxima foi superior em 61,82 mm e a mínima foi inferior em

132,42 mm, quando comparada a *krigagem* ordinária, o que corresponde a uma diferença de aproximadamente 5,15 mm na precipitação máxima e cerca de 11,04 mm na precipitação mínima mensal.

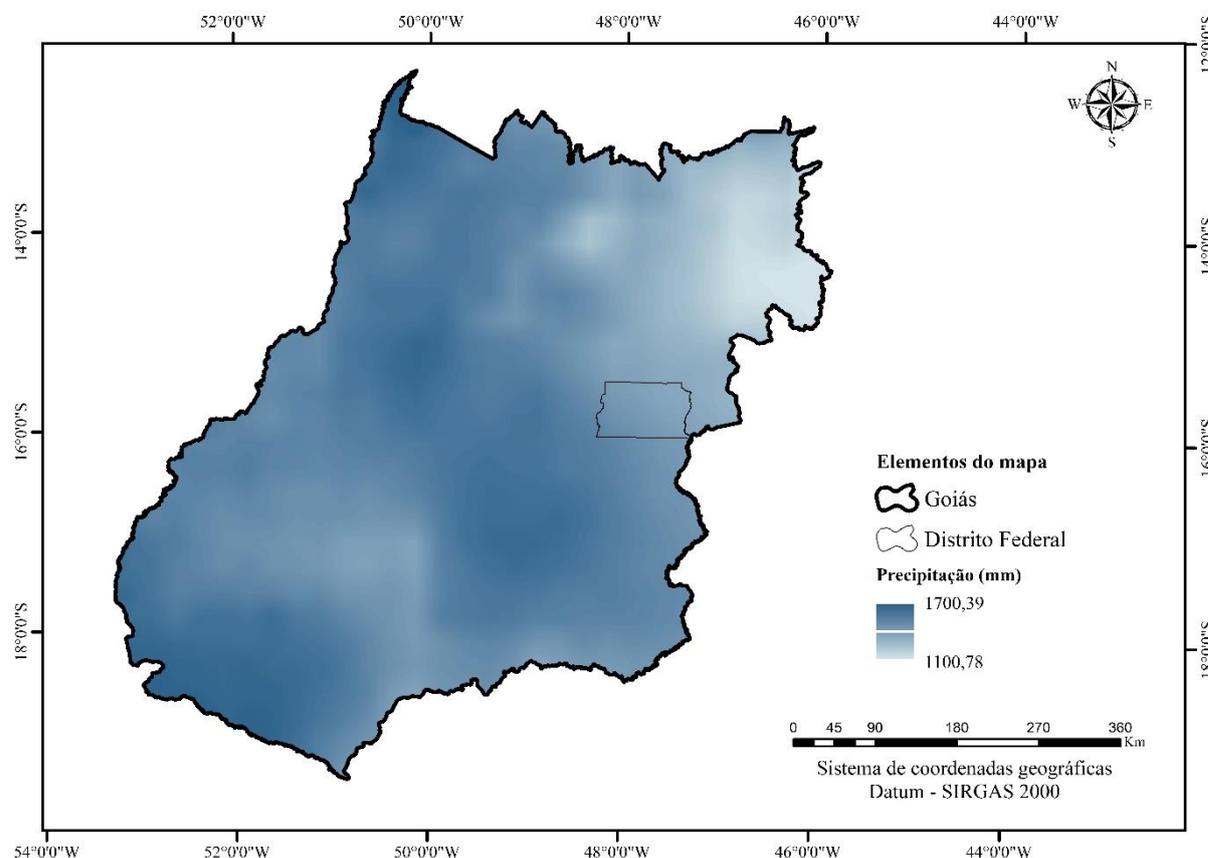


Figura 12. Distribuição espacial da chuva no estado de Goiás e do Distrito Federal, obtidos por meio do satélite TRMM.

Teng et al. (2014) demonstraram que há uma boa relação entre dados obtidos por meio da *krigagem* e dados provenientes do TRMM, em um estudo realizado na província de Zhejiang (China). Os autores mostraram que a precipitação diária obtida com a interpolação e com o TRMM é semelhante com um coeficiente de correlação geral $r = 0,66$, e que os dados provenientes do satélite superestimam os volumes precipitados em uma escala diária, principalmente para valores menores de $2,0 \text{ mm dia}^{-1}$.

Na Figura 13 são apresentadas as lâminas médias anuais precipitadas em cada bacia de drenagem obtidos por meio da interpolação espacial (*krigagem* ordinária) e do satélite TRMM. Verifica-se semelhança entre os dados interpolados e os observados na maioria das bacias, bem como ocorreu em um estudo realizado por Pereira et al. (2013) nas regiões do Brasil. Nesse estudo os dados do TRMM apresentaram concordância com os dados obtidos por *krigagem* em todas as regiões, incluindo o Centro-Oeste do Brasil, região em que Goiás e Distrito Federal estão inseridas.

É possível observar a correlação da precipitação anual média entre os dados da *krigagem* e do TRMM na Figura 14, em que o coeficiente de correlação é de $r = 0,9380$ e coeficiente de determinação

é de $R^2 = 0,8798$ (significantes para $p < 0,05$, teste *t-student*). Verifica-se no estudo de Pereira et al. (2013) que foi encontrado um R^2 igual a 62% e maior que 80%, na época chuvosa e seca, respectivamente. Os autores ainda destacam que, apesar do Centro-Oeste ser uma região com número reduzido de estações quando comparada a outras regiões do país, há boa concordância entre os dados espaciais da precipitação anual. Desta forma, como o coeficiente de determinação foi elevado e a distribuição espacial foi semelhante à do TRMM, comprovou-se boa qualidade da interpolação por intermédio da *krigagem* ordinária e, portanto, o resultado da interpolação por esse método foi utilizado para obtenção da precipitação anual média das bacias.

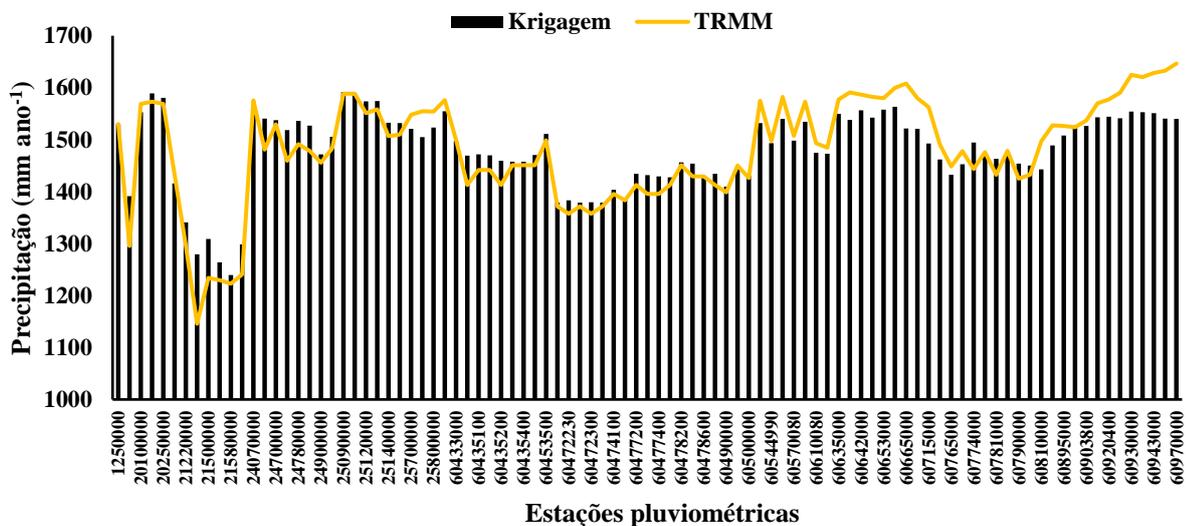


Figura 13. Comparação lâminas médias anuais precipitadas (mm ano^{-1}) nas bacias de drenagem, utilizando dados obtidos por meio da *krigagem* ordinária e do satélite TRMM.

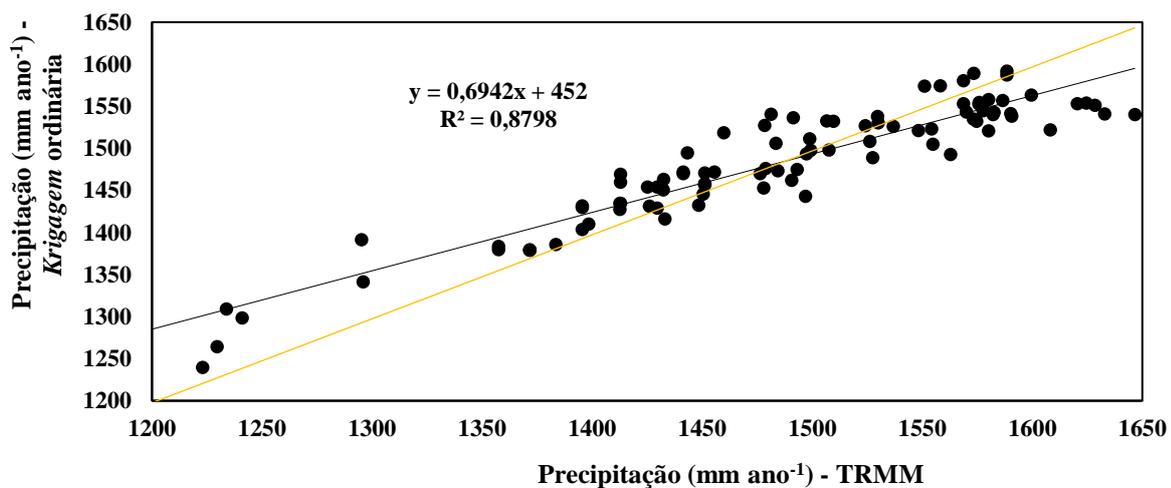


Figura 14. Dispersão da precipitação anual média (mm ano^{-1}) obtida por meio da *krigagem* ordinária e pelo satélite TRMM. Com correlação linear significativa para $p < 0,05$, teste *t-student*.

5.3. Ajustes das curvas de permanência obtidas por intermédio das estações fluviométricas

Na Tabela 3 estão apresentados os números de estações para as funções de densidade e probabilidade (fdp) que apresentaram melhor ajuste às curvas de permanência observadas, obtidas pelas séries de dados das estações fluviométricas do estudo. As curvas de permanência, utilizadas para obtenção das vazões de referências (\bar{Q} , $Q_{\text{máx}}$, $Q_{\text{mín}}$, Q_{90} e Q_{95}), apresentaram melhores ajustes à 34 distribuições, ao se realizar os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov, Anderson Darling e Qui-Quadrado.

Tabela 3. Número de estações fluviométricas por distribuições de probabilidade das curvas de permanência utilizadas para obtenção das vazões de referência, em função de cada teste de aderência.

Distribuição de probabilidade	KS	AD	QQ	Distribuição de probabilidade	KS	AD	QQ
Beta	3	4	3	Hipersecante	0	0	1
Burr	3	5	1	Inv. Gaussiana	0	1	2
Burr (4P)	7	9	7	Inv. Gaussiana (3P)	7	10	9
Qui-Quadrado (2P)	1	0	0	Johnson SB	21	11	5
Dagum	0	0	3	Kumaraswamy	1	3	1
Dagum (4P)	3	4	0	Log-Gamma	1	1	0
Exponencial (2P)	1	0	2	Log-Logística	0	0	1
Fatigue Life	1	6	6	Log-Logística (3P)	1	1	2
Fatigue Life (3P)	17	25	15	Log-Normal	3	0	4
Frechet	0	0	3	Log-Normal (3P)	4	2	4
Frechet (3P)	0	1	1	Log-Pearson 3	1	1	1
Gamma	2	0	1	Pearson 5	1	3	6
Gamma (3P)	0	0	5	Pearson 6	1	2	4
Gen. Valor Extremo	1	0	1	Pearson 6 (4P)	1	3	2
Gen. Gamma	0	0	4	Pert	0	1	0
Gen. Gamma (4P)	4	6	6	Weibull	3	0	2
Gen. Pareto	14	1	0	Weibull (3P)	0	2	0

KS – Kolmogorov Smirnov; AD – Anderson Darling; QQ – Qui-Quadrado; Gen. – generalizada; Inv. – inverso; P – parâmetros.

A distribuição de Fatigue Life (3P) apresentou o maior número de curvas de permanência com distribuições de probabilidades com melhor adequabilidade aos testes de aderência, seguida pela distribuição Johnson SB, que apresentou adequabilidade das fdp's principalmente para os testes de aderência Kolmogorov-Smirnov e Anderson Darling, os quais são testes baseados na função distribuição empírica.

A análise individualizada para cada curva de permanência permitiu a identificação da fdp mais adequada para cada estação fluviométrica, com base nos testes de aderência. Assim, os valores das vazões de referência adotados, para análises posteriores no presente estudo, foram selecionados a partir

da distribuição de probabilidade com melhor aderência (comparando os três testes de aderência), para cada estação fluviométrica.

5.4. Regionalização hidrológica

5.4.1. Regiões hidrologicamente homogêneas

As regiões hidrologicamente homogêneas foram delimitadas a partir da análise de *cluster*, considerando como variáveis independentes em cada bacia: latitude e longitude do centroide, precipitação anual média, declividade média, densidade de drenagem e comprimento do talvegue principal. Para estimar o número ótimo de classes foi gerado o gráfico da relação *J* e *k* por meio do algoritmo *elbow*, em que o valor *k* correlato do “cotovelo” foi de 7 classes para região de estudo (valor de entrada no algoritmo *knn*), ou seja, foram delimitadas sete regiões hidrologicamente homogêneas (*clusters*) (Figura 15).

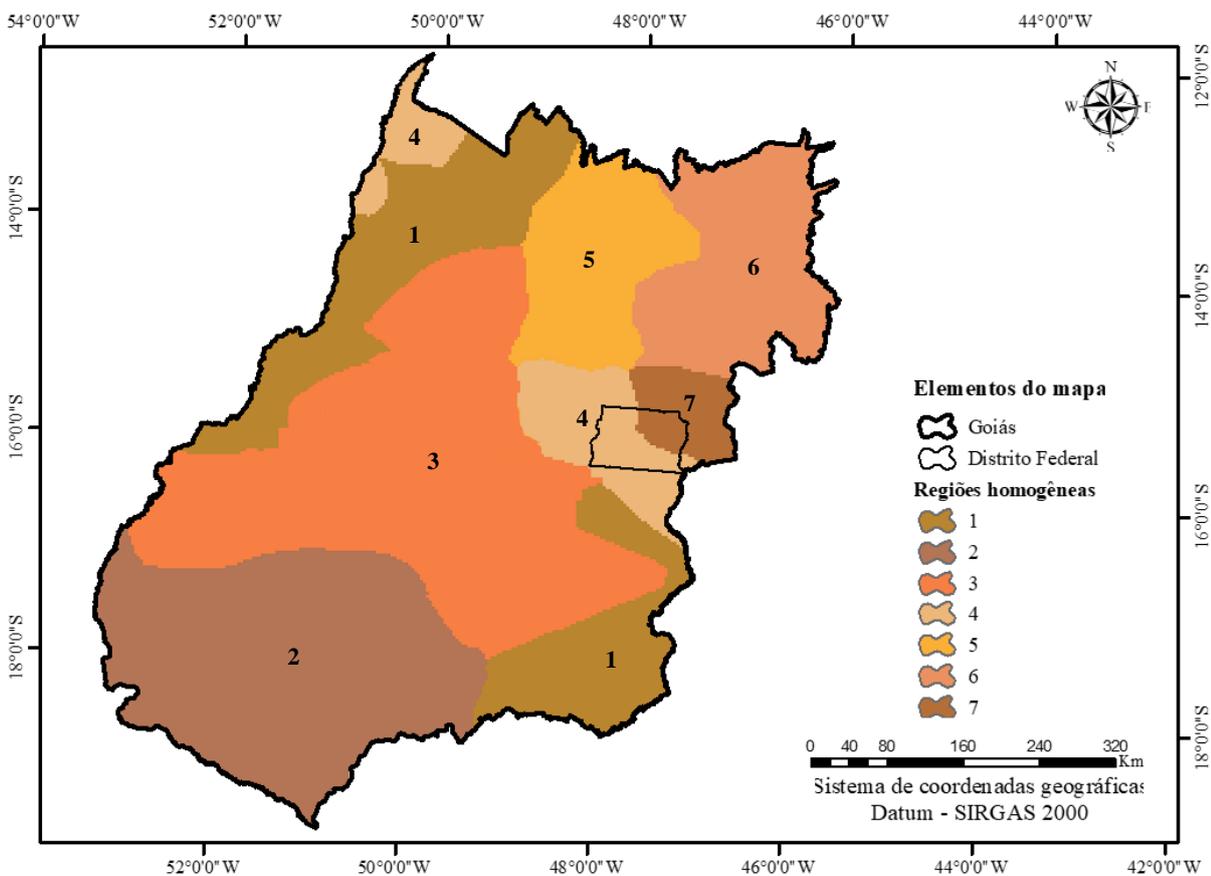


Figura 15. Regiões hidrologicamente homogêneas do estado de Goiás e do Distrito Federal segundo a análise de *cluster*.

De acordo com a metodologia utilizada para o agrupamento das regiões, o estado de Goiás possui sete regiões com semelhanças hidrológicas, enquanto o Distrito Federal possui apenas duas

dessas regiões (4 e 7). Como a troca de informações hidrológicas deve ocorrer apenas dentro de cada região hidrológicamente homogênea, como sugerido na literatura (CALEGARIO, 2014; FARSADNIA et al., 2014; BESKOW et al., 2016; CASSALHO et al., 2019), foram necessários sete diferentes modelos hidrológicos.

Os grupos das regiões hidrológicamente homogêneas aqui apresentados, representam uma importante ferramenta na gestão dos recursos hídricos na área de estudo, uma vez que na literatura é encontrado apenas um estudo sobre o agrupamento de regiões hidrológicamente semelhantes no estado de Goiás, entretanto, apenas para a região do alto rio Araguaia, no oeste goiano (CPRM, 2002). Já para o Distrito Federal, ainda não foram realizados estudos acerca da identificação dessas regiões.

Ao se considerar a extensão territorial da área de estudo, o número de regiões hidrológicamente homogêneas pode ser considerado expressivo, e como o relevo da região é majoritariamente plano, supõem-se que a declividade pode ter sido a variável de menor influência no agrupamento dos dados.

5.4.2. Modelos de regionalização hidrológica

Os modelos de regionalização hidrológica foram gerados com base nas regiões hidrológicamente homogêneas, por meio de regressão linear múltipla. Para cada uma das sete regiões foram calculadas regressões considerando a correlação entre diferentes combinações das variáveis independentes (P, I, Dd e L) e a variável dependente (\bar{q}_{esp}). Por conseguinte, foi selecionado o modelo com melhor desempenho para cada região, significativos para $p < 0,05$, pelo teste *t-student*. Assim, foram geradas sete equações de regionalização cujos respectivos índices estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Coeficiente angulares das equações de regionalização para o cálculo da vazão média específica regionalizada para cada região hidrológicamente homogênea.

Regiões Homogêneas	a	b	c	d	e
1	0,010914645	$-3,17622 \times 10^{-6}$	0,002575523	-	-
2	-1,013575685	0,0002731610	0,010471610	1,450755963	-0,000320544
3	-0,071062622	$1,89542 \times 10^{-5}$	0,003220494	0,115966774	-
4	0,073822880	$-5,12397 \times 10^{-5}$	-0,002570331	0,072357388	-0,000119287
5	-0,068276192	$9,64324 \times 10^{-5}$	0,005572445	0,196064381	$-1,76075 \times 10^{-5}$
6	-0,602081666	0,0002755150	0,026696695	0,432849037	-
7	-0,147393511	$4,24326 \times 10^{-5}$	0,005936218	0,220347388	$4,17005 \times 10^{-6}$

Todas as variáveis foram testadas nos sete modelos, com diferentes combinações; no entanto, nem todas as variáveis independentes foram significativas para todos os modelos pelo teste *t-student* ($p < 0,05$). Na região 1 apenas a P e a I foram explicativas, enquanto nas regiões 3 e 6 o L não teve influência significativa no modelo. No estudo realizado no estado do Rio Grande do Sul, por Beskow et al. (2016), por exemplo, apenas a área de drenagem foi significativa para determinação da Q_{90} . Desta forma, nota-se que as variáveis explicativas estão relacionadas com as características das regiões de estudo, não existindo uma regra clara para escolha das mesmas.

A partir do valor da \bar{q}_{esp} regionalizada, o usuário pode obter a \bar{Q} por intermédio da multiplicação pela área da bacia (Eq. 14). Para cálculo da Q_{90} e Q_{95} regionalizada, devem ser utilizadas as Eq. 15 e Eq. 16, respectivamente, em que os coeficientes angulares de abatimento para cada região hidrologicamente homogênea estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Coeficientes angulares de redução para cálculo da Q_{90} e Q_{95} regionalizada.

Regiões Homogêneas	a_{q90}	a_{q95}
1	0,4850	0,3992
2	0,3135	0,2887
3	0,2511	0,1972
4	0,5501	0,5145
5	0,5714	0,5150
6	0,4306	0,3744
7	0,3627	0,2927

5.4.3. Avaliação dos modelos de regionalização

Para validação dos modelos de regionalização foram utilizados seis índices de desempenho e suas respectivas classificações, em que são relacionados os valores estimados pelo modelo e os calculados com os dados obtidos pelas estações fluviométricas, referentes as vazões de referência (Q_{90} , Q_{95} e \bar{Q}). Os critérios de avaliação de desempenho proporcionam classificações qualitativas do modelo, com limiares quantitativos correspondentes a cada índice estatístico (LELIS et al., 2020). Para os índices R^2 , r , NSE, d e PBIAS as classificações qualitativas são: muito bom, bom, satisfatório e insatisfatório, e para o índice “c” são: ótimo, muito bom, bom, regular, ruim e péssimo.

Desta forma, para cada região geraram-se três gráficos de correlação entre as variáveis regionalizadas e calculadas, um para cada vazão de referência (Q_{90} , Q_{95} e \bar{Q}) (Figuras 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22), além das tabelas com os índices de performance e sua respectiva classificação quantitativa e qualitativa (Tabelas 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12).

Para região hidrologicamente homogênea 1, os valores dos índices estatísticos R^2 , NSE, d, r e c foram superiores a 0,88 e assim obtiveram a classificação máxima. Por outro lado, para o índice PBIAS, que mede a tendência média das vazões simuladas serem maiores ou menores que as correspondentes observadas (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999), o desempenho foi “muito bom” para Q_{90} e Q_{95} e “bom” para \bar{Q} , como é possível observar na Tabela 6.

As vazões Q_{90} e Q_{95} (Figuras 16A e 16B, respectivamente), apresentaram desempenho máximo para todos os índices (Tabela 6). Foi observado, uma superestimativa dos dados obtidos pelo modelo, especialmente na estação 25200000, em que o valor do modelo foi superestimado na ordem de 67% para Q_{90} e 72% para Q_{95} , valor considerado elevado. Desta forma, ao adotar esse modelo para determinação da Q_{90} e Q_{95} nessa região é importante estabelecer critérios mais rigorosos para assegurar a conservação dos recursos hídricos.

Por outro lado, o modelo para determinação da \bar{Q} nessa região foi considerado “bom” para o índice PBIAS, entretanto com o valor do percentual de viés de 5,68%, bem próximo ao limiar quantitativo (5,00%), valor correspondente a um ajuste “muito bom”. Adicionalmente, foi observado bom desempenho do modelo para determinação da \bar{Q} (Figura 16C), em que os pontos estão próximos à reta 1:1, o que indica que os valores regionalizados foram próximos aos calculados com os dados observados nas estações fluviométricas.

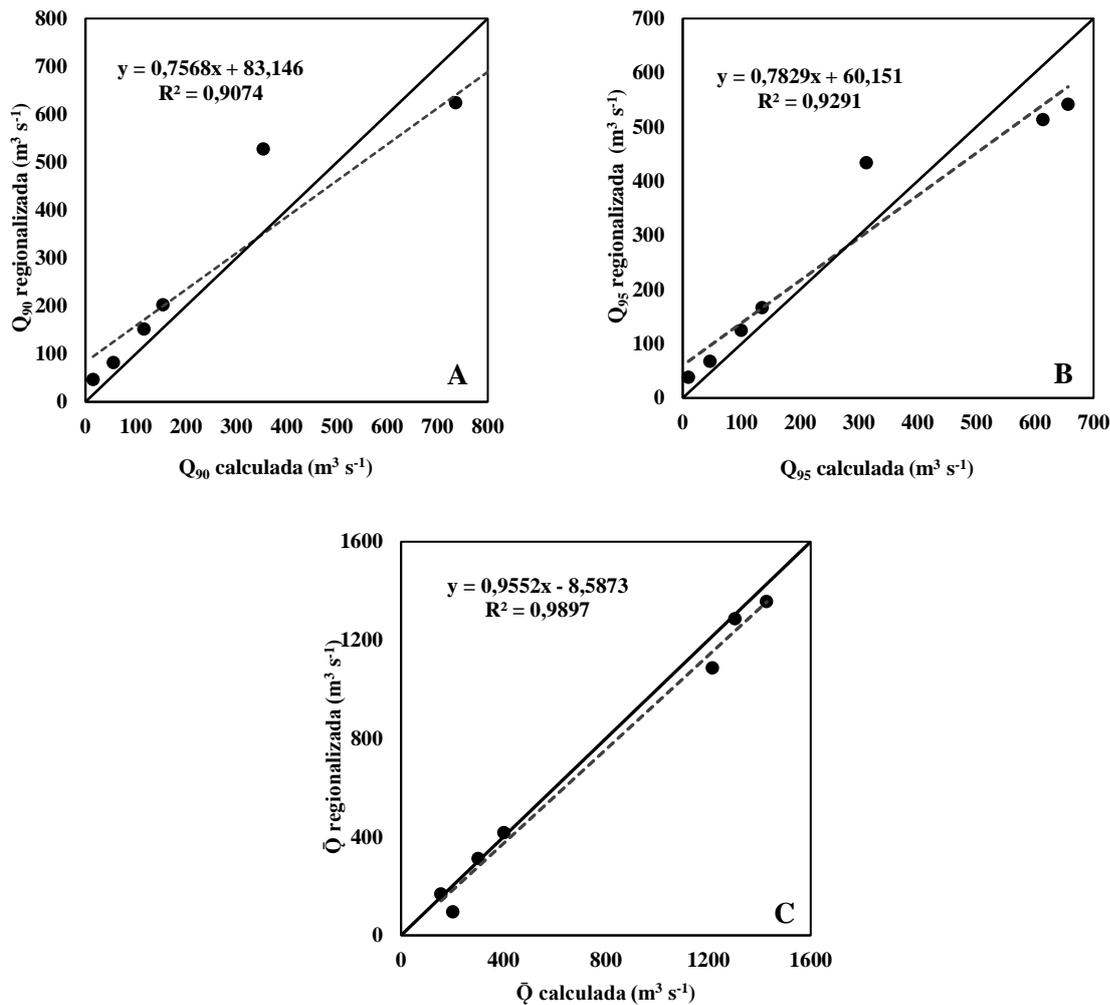


Figura 16. **A)** Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; **B)** Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; **C)** Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 1, significativa para $p < 0,05$ pelo teste *t-student*.

Tabela 6. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 1.

	R^2	NSE	PBIAS (%)	d	r	c
Q_{95}	0,9291	0,9060	-0,7718	0,9709	0,9639	0,9358
Q_{90}	0,9074	0,8822	-1,4234	0,9625	0,9526	0,9169
\bar{Q}	0,9897	0,9826	5,6810	0,9955	0,9948	0,9903
Q_{95}	Muito bom	Ótimo				
Q_{90}	Muito bom	Ótimo				
\bar{Q}	Muito bom	Muito bom	Bom	Muito bom	Muito bom	Ótimo

No tocante ao ajuste dos dados estimados pelo modelo para a região hidrologicamente homogênea 2, em relação aos observados pelas estações fluviométricas, verificou-se que para a Q_{90} , a Q_{95} e a \bar{Q} o modelo apresentou um ajuste classificado pelos índices d, r e c, como, em geral, “muito bom” e pelo índice R^2 , como “bom”. Assim, o modelo apresentou um ajuste de qualidade, com alto grau

de dependência, precisão e exatidão. Por outro lado, analisando o índice NSE, o modelo apresentou ajuste classificado como “satisfatório”, apresentando certo grau de concordância, mas não o ideal. Ao analisar o PBIAS isoladamente o modelo apresenta um desempenho “satisfatório” para Q_{90} e Q_{95} , e “insatisfatório” para \bar{Q} , com erro relativo percentual de 15,34% (próximo ao limiar de 15%), ou seja, não apresentou uma boa simulação das magnitudes médias (Tabela 7).

A Figura 17 mostra a relação entre os valores de Q_{90} , Q_{95} e \bar{Q} do modelo em relação aos calculados, em que é possível observar que o modelo possui melhor desempenho para a estimativa de valores de vazão abaixo de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para Q_{90} e Q_{95} e abaixo de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para \bar{Q} . Adicionalmente, o modelo subestimou os valores na maioria dos postos observados, trabalhando em favor da conservação dos recursos hídricos, com exceção da estação 21500000 em que a vazão determinada pelo modelo foi superior a observada em 54,8% para Q_{90} , 53,5% para Q_{95} e 56,7% para \bar{Q} .

O modelo da região hidrologicamente homogênea 2 foi o de pior desempenho quando comparado aos demais, o que pode estar relacionado ao pequeno número de estações contidas nessa região em relação a extensão da área, o que acarreta em maiores incertezas na geração do modelo, e sugere maior rigor na utilização do mesmo.

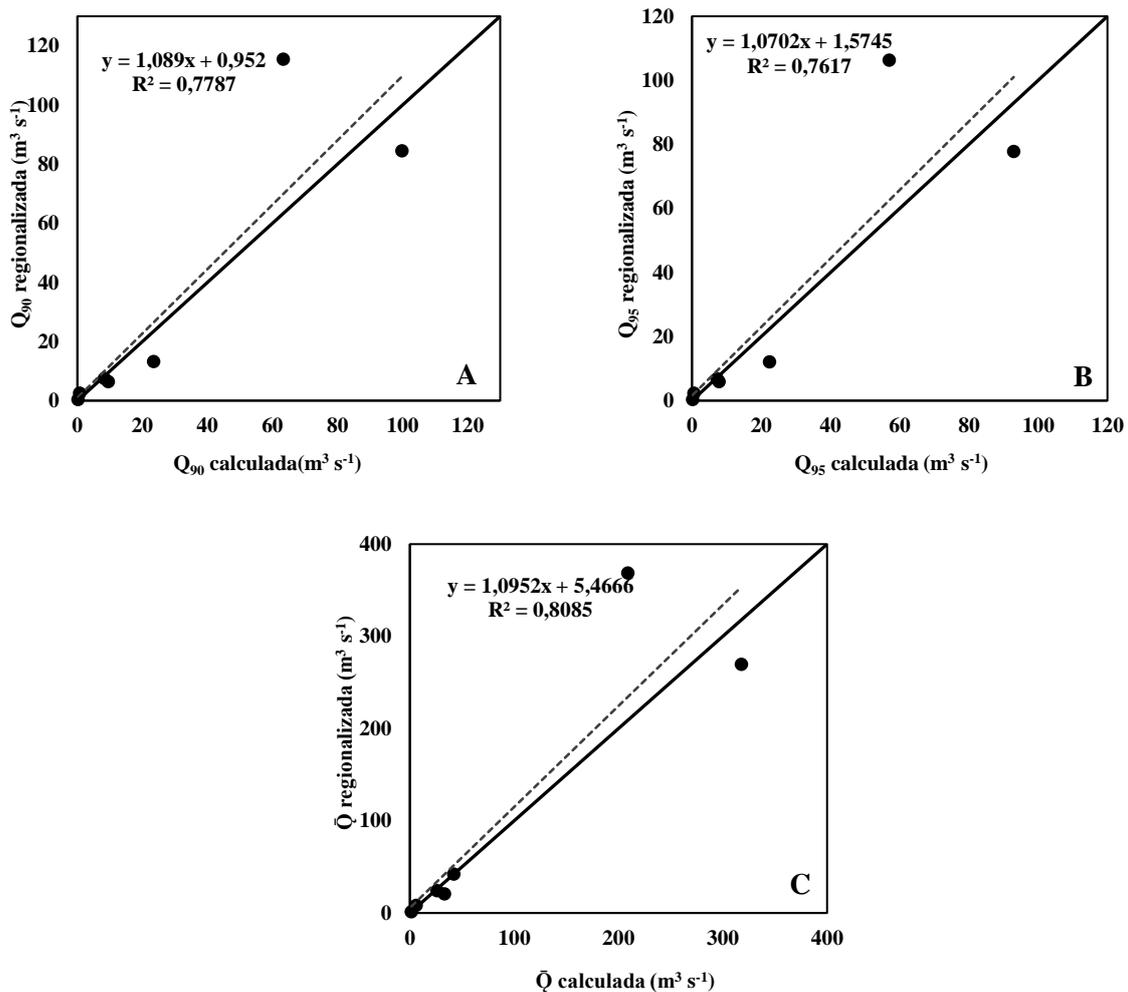


Figura 17. **A)** Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; **B)** Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; **C)** Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 2, significativa para $p < 0,05$, teste *t-student*.

Tabela 7. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 2.

	R^2	NSE	PBIAS (%)	d	r	c
Q_{95}	0,7617	0,6256	-12,8858	0,9196	0,8728	0,8026
Q_{90}	0,7787	0,6447	-12,1504	0,9246	0,8824	0,8159
\bar{Q}	0,8085	0,6915	-15,5361	0,9342	0,8992	0,8400
Q_{95}	Bom	Satisfatório	Satisfatório	Muito bom	Muito bom	Muito bom
Q_{90}	Bom	Satisfatório	Satisfatório	Muito bom	Muito bom	Muito bom
\bar{Q}	Bom	Satisfatório	Insatisfatório	Muito bom	Muito bom	Muito bom

O desempenho do modelo de regionalização hidrológica para a região hidrologicamente homogênea 3 está apresentado na Tabela 8. Foi observado que, para as vazões de referência (Q_{90} , Q_{95} e \bar{Q}), o modelo apresentou classificação máxima para maioria dos índices, com exceção do índice PBIAS para Q_{90} , em que a classificação foi “bom”, entretanto com o limiar muito próximo a classificação máxima (5,14%).

Na Figura 18 é apresentada a relação entre os dados regionalizados e observados, nela pode-se observar o notório o grau de dependência entre os dados obtidos por meio do modelo e pelas séries históricas das estações fluviométricas. Uma vez que os pontos estão concentrados próximos à linha 1:1, os valores estimados bem próximos aos observados, especialmente para a \bar{Q} (Figura 18C). O bom desempenho desse modelo pode estar relacionado ao número de estações contidas na região (20 estações). Na estimativa da Q_{90} e Q_{95} (Figura 18A e 18B), o modelo superestimou vazões superiores à 12 e 18 $m^3 s^{-1}$, respectivamente, em algumas estações da região 3.

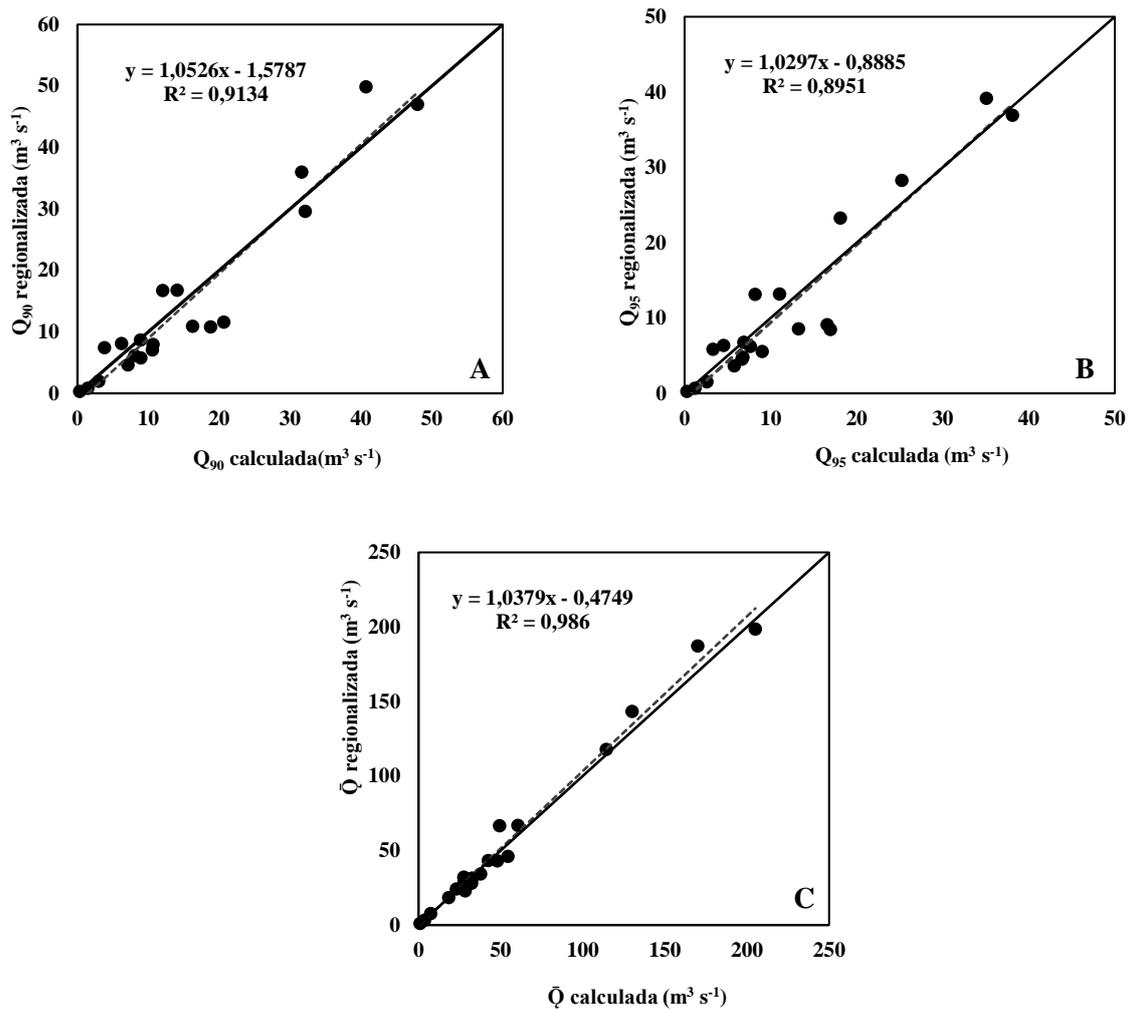


Figura 18. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 3, significativa para $p < 0,05$, teste *t-student*.

Tabela 8. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 3.

	R^2	NSE	PBIAS (%)	d	r	c
Q_{95}	0,8951	0,8737	4,5251	0,9699	0,9461	0,9176
Q_{90}	0,9134	0,8885	5,1350	0,9742	0,9557	0,9310
\bar{Q}	0,9860	0,9824	-2,9385	0,9958	0,9930	0,9888
Q_{95}	Muito bom	Ótimo				
Q_{90}	Muito bom	Muito bom	Bom	Muito bom	Muito bom	Ótimo
\bar{Q}	Muito bom	Ótimo				

Na Figura 19 estão apresentadas as relações das variáveis regionalizadas e calculadas para a região hidrologicamente homogênea 4. É possível observar que as variáveis regionalizadas têm alto grau de correlação com as variáveis calculadas por meio dos dados obtidos nas estações fluviométricas, uma vez que os pontos estão concentrados próximos à reta 1:1 para Q_{90} , Q_{95} e \bar{Q} (Figuras 19A, 19B e 19C,

respectivamente). Assim, os valores obtidos pelo modelo de regionalização são próximos aos reais, caracterizando um bom modelo. O bom desempenho do modelo também pode ser observado na análise da Tabela 9, na qual a Q_{90} , Q_{95} e \bar{Q} tiveram excelente performance para os índices aqui analisados (R^2 , NSE, PBIAS, d , r e c).

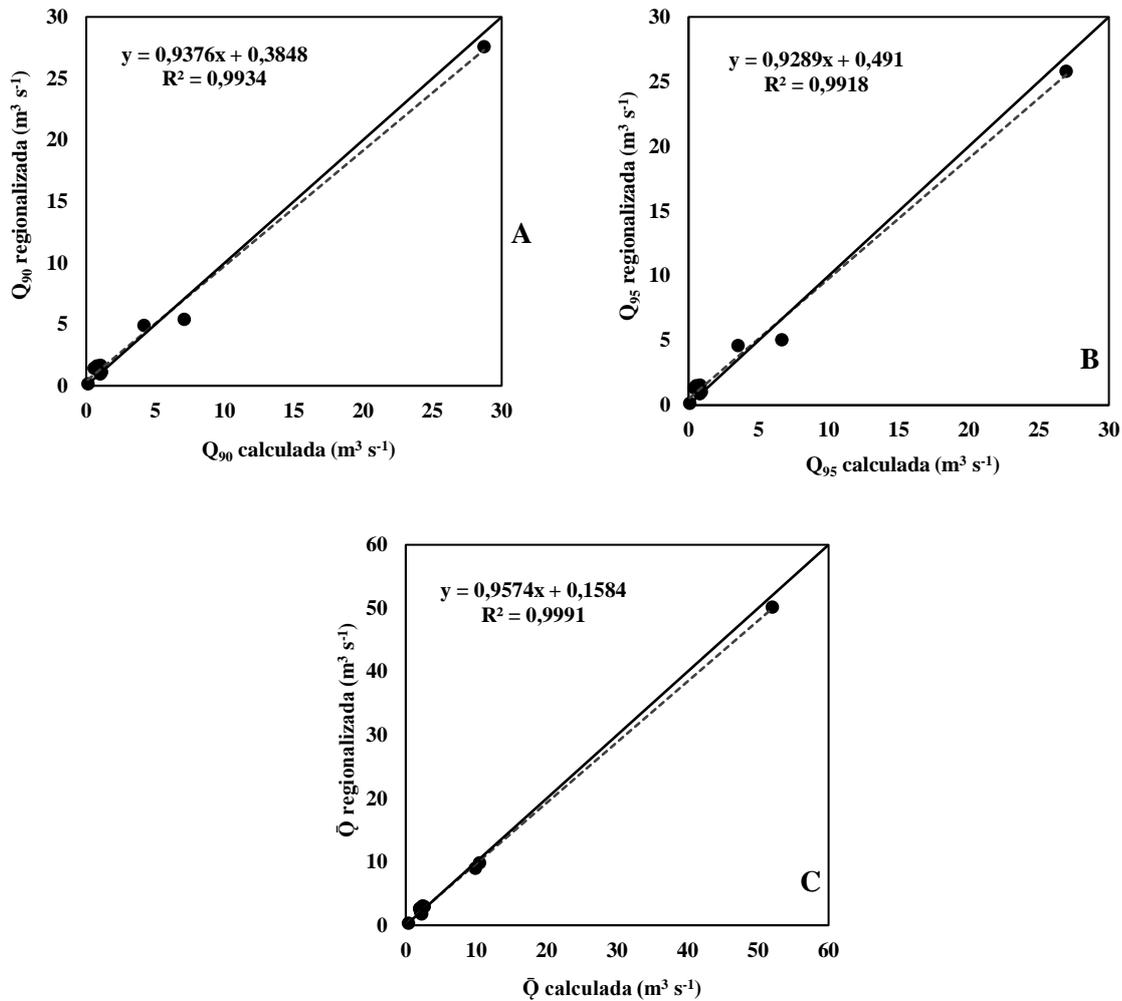


Figura 19. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 4, significativa para $p < 0,05$ pelo teste *t-student*.

Tabela 9. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 4.

	R²	NSE	PBIAS (%)	d	r	c
Q₉₅	0,9918	0,9872	-4,7662	0,9966	0,9959	0,9925
Q₉₀	0,9934	0,9901	-2,2589	0,9974	0,9967	0,9940
Q̄	0,9991	0,9971	2,4240	0,9993	0,9995	0,9995
Q₉₅	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Ótimo
Q₉₀	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Ótimo
Q̄	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Ótimo

O modelo de regionalização da região hidrologicamente homogênea 5 apresentou bom desempenho quando se avalia os índices de performance (Tabela 10), bem como a boa correlação existente entre os valores regionalizados e calculados (Figura 20). Uma possível justificativa para o bom desempenho do modelo é que nessa região as vazões apresentam alta correlação com as variáveis morfométricas das bacias, bem como com a precipitação.

Desta forma, o modelo pode ser utilizado como instrumento para auxiliar na concessão de outorgas e na gestão dos recursos hídricos dessa região. Observa-se que para valores acima de $43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o modelo superestimou as vazões em algumas estações fluviométricas para Q_{90} e Q_{95} (Figuras 20A e 20C). Em relação à \bar{Q} , os dados observados e estimados apresentaram maior concordância, com erro relativo percentual de 0,15% (Tabela 10).

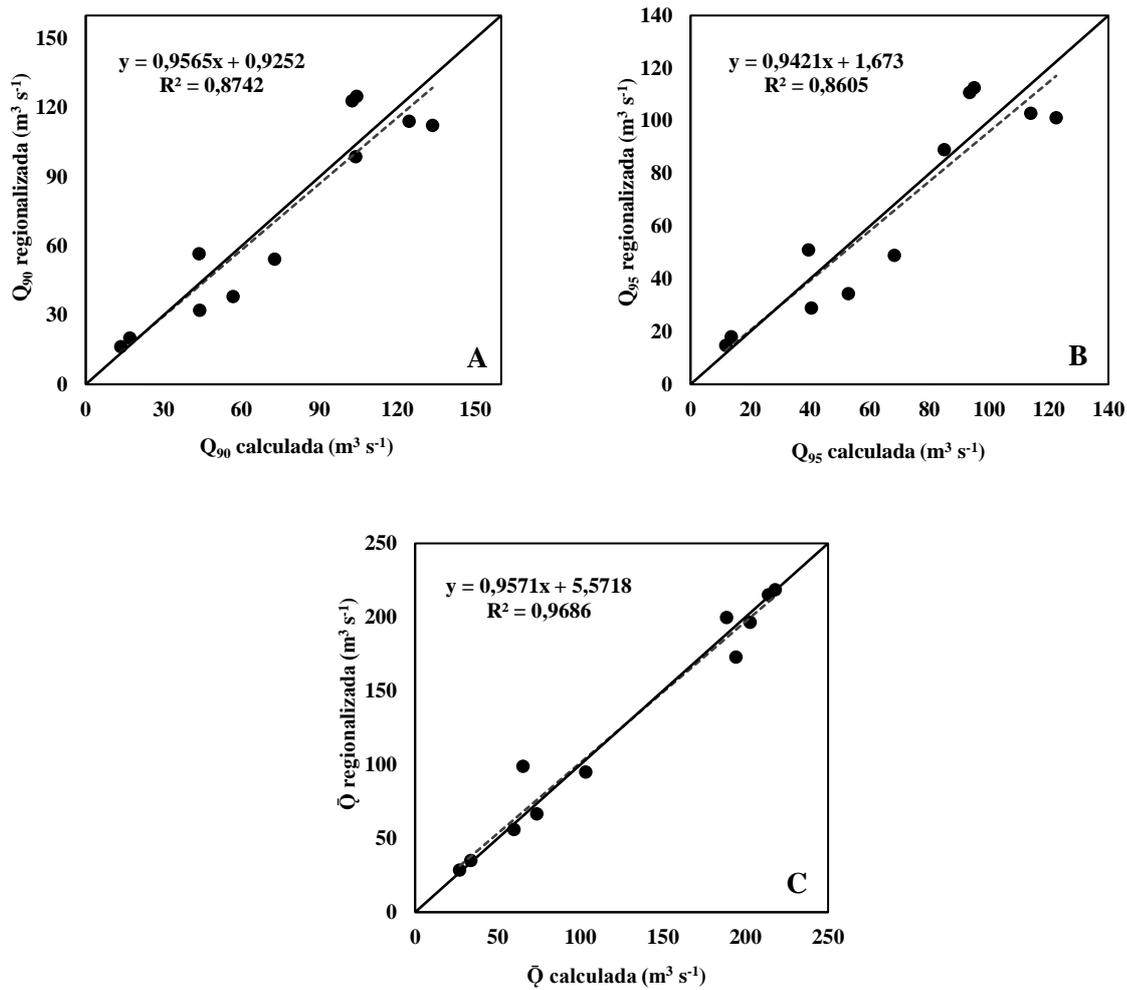


Figura 20. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 5, significativa para $p < 0,05$, teste *t-student*.

Tabela 10. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 5.

	R^2	NSE	PBIAS (%)	d	r	c
Q_{95}	0,8605	0,8492	3,2966	0,9615	0,9276	0,8919
Q_{90}	0,8742	0,8632	3,0980	0,9655	0,9350	0,9027
\bar{Q}	0,9686	0,9685	-0,1463	0,9918	0,9995	0,9842
Q_{95}	Muito bom	Ótimo				
Q_{90}	Muito bom	Ótimo				
\bar{Q}	Muito bom	Ótimo				

Na Figura 21 é apresentada a correlação dos dados regionalizados e calculados para região hidrologicamente homogênea 6, localizada no nordeste goiano. Observa-se que houve boa correlação entre as vazões, com exceção da estação 60765000, em que os valores foram superestimados em 28,2% para Q_{90} (Figura 21A), 25,1% para Q_{95} (Figura 21B) e 47,3% para \bar{Q} (Figura 21C). Todavia, verificou-

se que para a maioria das outras estações, o modelo subestimou os valores, assim, pode-se dizer que o modelo trabalha em favor da conservação dos recursos hídricos.

Quanto aos indicadores estatísticos (Tabela 11), verificou-se que para Q_{90} e Q_{95} , o modelo apresentou ajuste, classificados pelo R^2 e NSE como, “satisfatório” e para \bar{Q} ajuste “bom” o que indicam ter um certo grau de dependência e concordância, entretanto, não o ideal. Por outro lado, para o índice PBIAS o modelo apresentou ajuste “muito bom” para Q_{90} , Q_{95} e \bar{Q} , indicando uma boa simulação das magnitudes médias. Além de apresentar um ajuste como, em geral, “bom” para Q_{90} , Q_{95} em relação aos índices d, r e c; e, em geral, “muito bom” para \bar{Q} , apontando um bom grau de dependência, de precisão e exatidão.

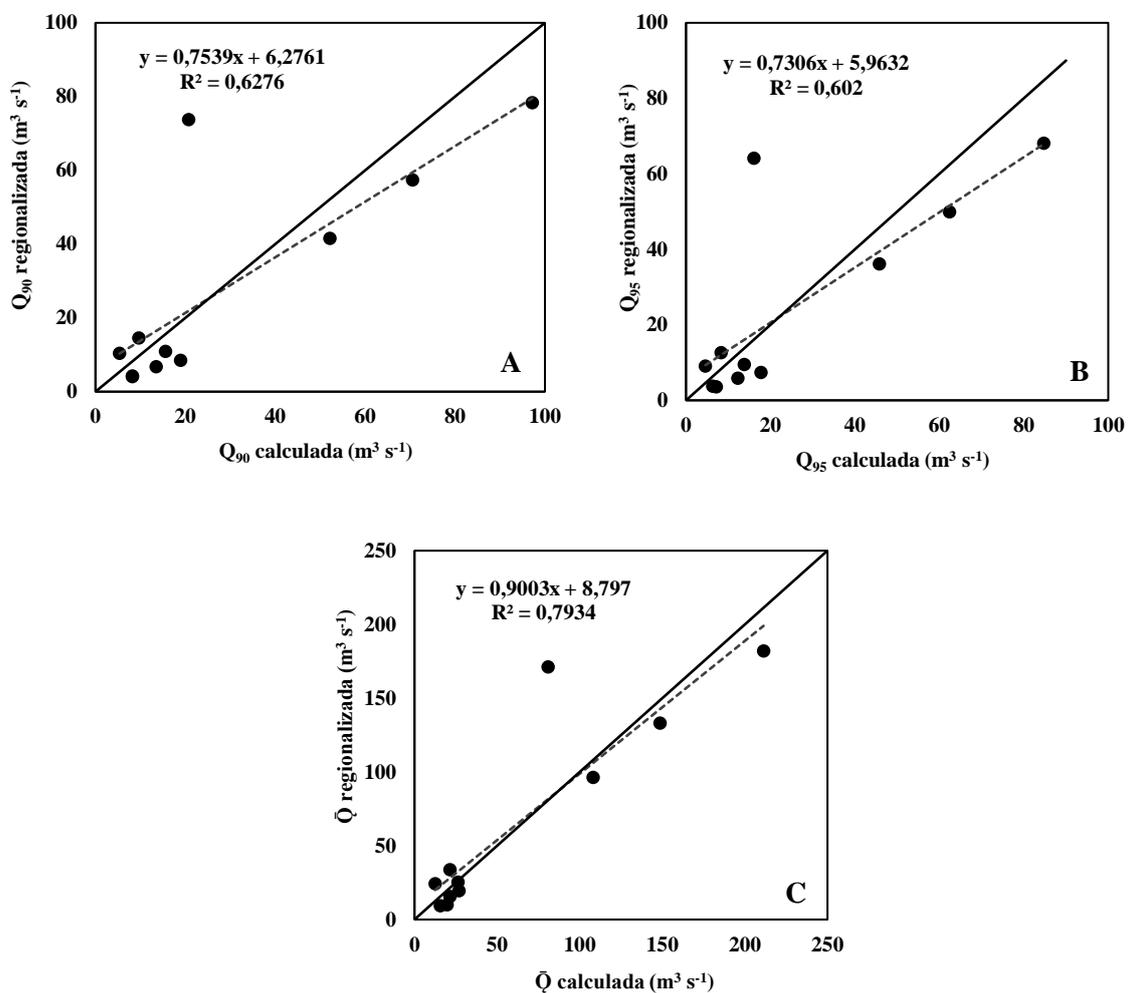


Figura 21. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 6, significativa para $p < 0,05$, teste *t-student*.

Tabela 11. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 6.

	R²	NSE	PBIAS (%)	d	r	c
Q₉₅	0,6020	0,5733	3,4750	0,8726	0,7922	0,6913
Q₉₀	0,6276	0,6012	3,0487	0,8832	0,9350	0,8258
Q̄	0,7934	0,7774	-3,9958	0,9418	0,8907	0,9842
Q₉₅	Satisfatório	Satisfatório	Muito bom	Bom	Bom	Bom
Q₉₀	Satisfatório	Satisfatório	Muito bom	Bom	Muito bom	Muito bom
Q̄	Bom	Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Ótimo

O desempenho do modelo de regionalização para região hidrologicamente homogênea 7, está apresentado na Tabela 12. Pode-se observar que a classificação do modelo foi máxima para todos os índices analisados (R^2 , NSE, PBIAS, d, r e c), caracterizando dessa forma um modelo com alta qualidade de ajuste, grau de dependência, concordância, precisão, exatidão e boa simulação das magnitudes médias. Além disso, observou-se que o modelo subestimou a maioria dos dados nos postos analisados, favorecendo a conservação dos recursos hídricos.

Nessa perspectiva, na adoção desse modelo para região, é possível estabelecer critérios na concessão da outorga de direito de uso menos conservadores, tal como adotar fluxos sazonais considerando os períodos de menores e maiores índices pluviométricos. Assim, em períodos chuvosos a concessão da utilização dos recursos hídricos poderia ser de maiores volumes.

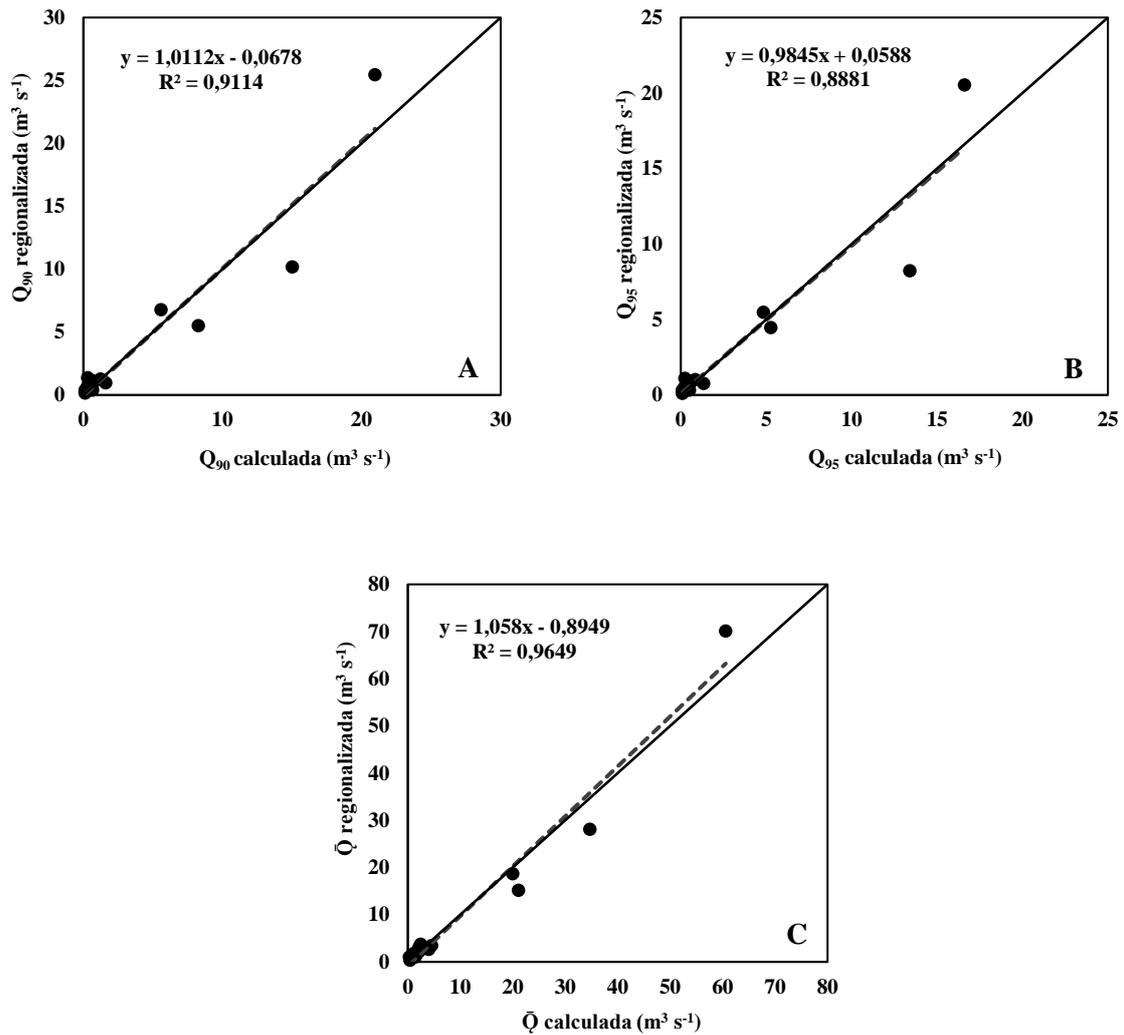


Figura 22. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, para região hidrologicamente homogênea 7, significativa para $p < 0,05$, teste *t-student*.

Tabela 12. Índices de performance e classificação de desempenho do modelo para região hidrologicamente homogênea 7.

	R^2	NSE	PBIAS (%)	d	r	c
Q_{95}	0,8881	0,8776	-0,2930	0,9699	0,9424	0,9140
Q_{90}	0,9114	0,9004	0,5831	0,9760	0,9547	0,9317
\bar{Q}	0,9649	0,9557	2,2013	0,9896	0,9823	0,9842
Q_{95}	Muito bom	Ótimo				
Q_{90}	Muito bom	Ótimo				
\bar{Q}	Muito bom	Ótimo				

Na Figura 23 são apresentadas as correlações entre as variáveis calculadas nas estações fluviométricas e estimadas pelos modelos para avaliação geral dos sete modelos conjuntamente, no qual relacionou-se Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada (Figura 23A), Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada (Figura 23B) e \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada (Figura 23C). É possível observar que os valores regionalizados

possuem alta correlação com os valores calculados por meio dos dados obtidos nas estações fluviométricas.

Na Tabela 13 são apresentados os índices de performance e a classificação de desempenho para cada vazão de referência. Verificou-se, portanto, que para Q_{90} , Q_{95} e \bar{Q} , os modelos apresentaram ajuste aos índices R^2 , NSE, PBIAS, d e r, como, “muito bom” e pelo índice c, como, “ótimo”. Desta forma, pode-se dizer que os modelos aqui apresentados têm desempenho suficiente para auxiliar as agências do estado de Goiás e Distrito Federal no processo de concessão de outorga.

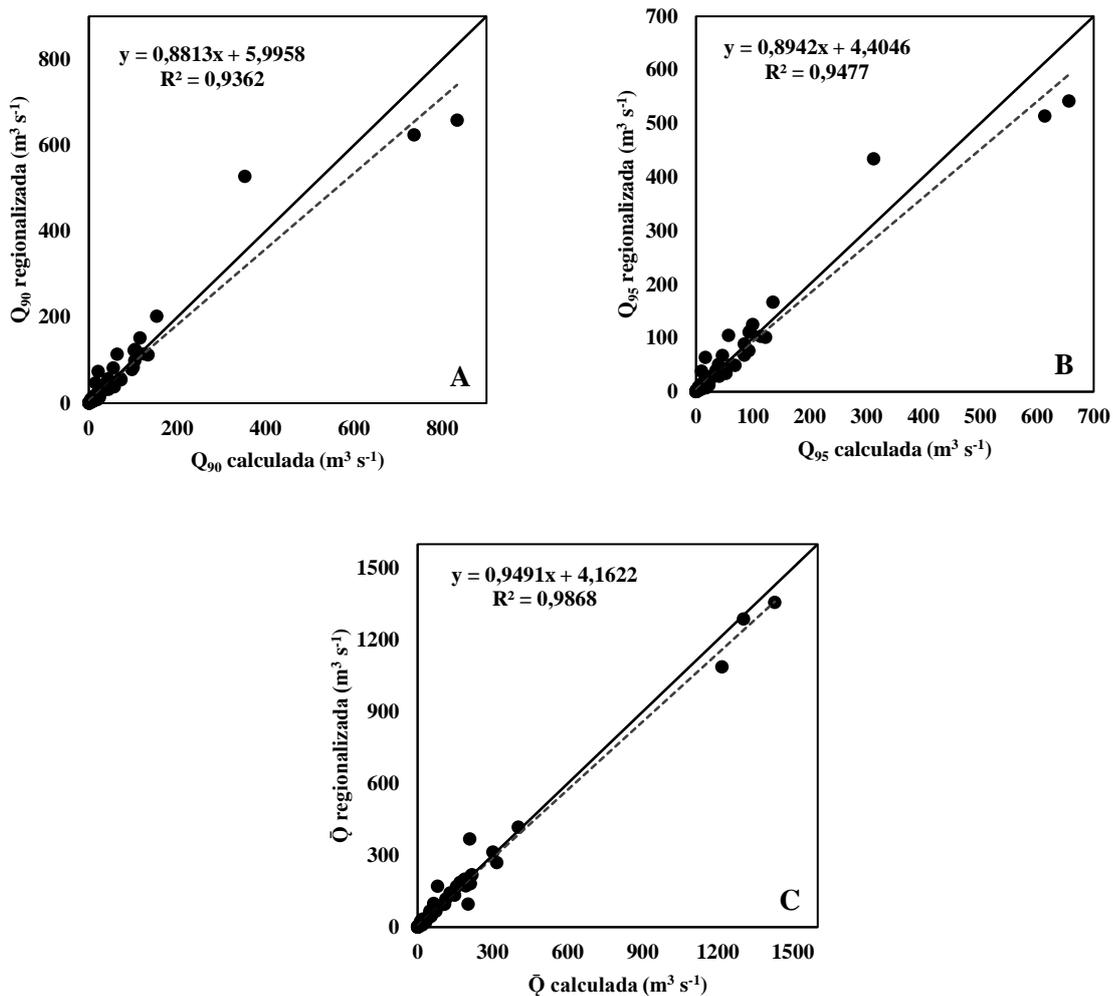


Figura 23. A) Relação Q_{90} regionalizada e Q_{90} calculada; B) Relação Q_{95} regionalizada e Q_{95} calculada; C) Relação \bar{Q} regionalizada e \bar{Q} calculada, geral, significativa para $p < 0,05$, teste *t-student*.

Tabela 13. Índices de performance e classificação de desempenho geral dos modelos de regionalização.

	R²	NSE	PBIAS (%)	d	r	c
Q₉₅	0,9477	0,8946	0,1164	0,9678	0,9735	0,9422
Q₉₀	0,9362	0,8753	-0,1798	0,9610	0,9676	0,9298
Q̄	0,9868	0,9661	1,4216	0,9913	0,9934	0,9847
Q₉₅	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Ótimo
Q₉₀	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Ótimo
Q̄	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Ótimo

Além da disponibilidade de estações fluviométricas, o desempenho desses modelos está relacionado com as características fisiográficas e climáticas utilizadas como variáveis independentes. A altitude é um importante fator de influência em uma determinada região, assim como o relevo e os divisores de água que delimitam geograficamente as bacias hidrográficas. Adicionalmente, o relevo interfere no regime de chuva em uma determinada região, visto que pode consistir em barreira geográfica e culminar em chuvas orográficas. Contudo, os estado de Goiás e o Distrito Federal não apresentam altitudes tão elevadas que possam vir a criar grandes barreiras naturais às massas de ar que passam por essa região (CARDOSO; MARCUZZO; BARROS, 2014).

Ao se relacionar o MDE (Figura 8) com os agrupamentos das regiões homogêneas (Figura 15), foi observada relação entre a elevação do terreno com as regiões de semelhança hidrológica. Na região 1 foram agrupadas as áreas planas, com as menores altitudes no estado de Goiás. A região 2, não apresentou homogeneidade quanto à altitude das áreas agrupadas, sendo a maior parte de elevadas altitudes, o que pode ter acarretado no baixo desempenho do modelo na região quando comparado aos demais. Nas regiões 4 e 7 foram agrupadas as maiores altitudes na área de estudo e essas apresentaram desempenho classificado como “muito bom”.

A região 3 se concentrou no meio do estado de Goiás e apresentou a maior área dentre todas as regiões hidrologicamente homogêneas, e heterogeneidade quando à altitude, contudo possuía o maior número de pontos com coleta de dados. A mesma heterogeneidade foi observada nas regiões 5 e 6, no norte e noroeste de Goiás. No entanto, foi observada maior área de baixas altitudes nas regiões supracitadas, as quais apresentaram desempenho classificado como muito bom para Q₉₀, Q₉₅ e Q̄, e “satisfatório” para Q₉₀ e Q₉₅ nos índices R² e NSE, respectivamente.

A precipitação é um dos fatores mais importantes no ciclo hidrológico e exerce grande influência na qualidade dos modelos, visto que é um fator que está diretamente relacionada à vazão dos cursos d’água. De maneira geral, a precipitação está uniformemente distribuída ao longo da área de estudo, sendo os menores volumes na região 6, no nordeste de Goiás, em que o desempenho do modelo apresentou boa performance para PBIAS, d, r e c, e apenas “satisfatório” na avaliação da Q₉₀ e Q₉₅ para os índices R² e NSE. Desta forma, nota-se que também existe uma semelhança entre os volumes precipitados e as regiões hidrologicamente homogêneas, o que possivelmente explica o bom desempenho dos modelos de maneira geral.

Contudo, para uma análise mais minuciosa da influência das chuvas nos modelos é importante, a partir dos modelos aqui propostos, realizar mais estudos acerca da sazonalidade na região, visto que a região possui duas estações bem definidas, sendo a sazonalidade um fator importante na disponibilidade hídrica de uma região (BESKOW et al., 2016).

Apesar do bom desempenho dos modelos hidrológicos em escala global, vale ressaltar que nem sempre eles apresentam desempenho satisfatório em todas as estações de seus domínios territoriais, assim, restringe-se sua aplicação para fins de gerenciamento (DU et al., 2020). Desse modo, os modelos hidrológicos representam uma importante ferramenta na gestão dos recursos hídricos, principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil, em que a disponibilidade de dados observados ao longo do território é baixa e recente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo de regionalização da região hidrologicamente homogênea 2 foi o de pior desempenho, principalmente, quando analisado o índice PBIAS para \bar{Q} . Entretanto, quando analisados os índices d , r e c , o modelo apresentou desempenho classificado como “muito bom”. Quando realizou-se a análise gráfica foi possível observar que a estação 21500000 foi a estação que teve menor correlação entre a variável regionalizada e a calculada, em que o valor regionalizado foi superestimado. Contudo para as outras estações dessa região o modelo apresentou boa correlação e subestimou alguns valores, trabalhando em favor da conservação dos recursos hídricos.

De outra forma a região hidrologicamente homogênea 6 apresentou um bom desempenho para os índices: PBIAS, r , d e c . Por outro lado, o desempenho foi classificado apenas como “satisfatório” para a Q_{90} e Q_{95} quando analisados os índices R^2 e NSE. Graficamente, foi possível notar que os valores na estação 60765000 foram discrepantes quando comparado aos demais, que apresentaram uma boa correlação e proximidade da reta 1:1, o que indica um valor próximo ao real.

Já os modelos de regionalização para as regiões hidrologicamente homogêneas 1, 3, 4, 5 e 7 apresentaram os melhores desempenhos, destacando-se o modelo da região 4, que tiveram seus valores regionalizados bem próximos aos calculados. De maneira geral esses modelos apresentaram bom grau de concordância, exatidão, precisão e representação das magnitudes médias. A partir dos modelos aqui apresentados é possível realizar mais estudos para melhoria dos mesmos, como a análise da sazonalidade das chuvas, estabelecendo diferentes modelos para cada época do ano, além do cálculo de outras variáveis como a $Q_{7,10}$.

Por fim, de maneira geral, os modelos apresentaram boa performance pelos índices avaliados, e assim, representam uma ferramenta com grande utilidade para auxiliar as agências de água do estado de Goiás e Distrito Federal no processo de concessão de outorgas, e desta forma, contribuir para o gerenciamento dos recursos hídricos da região; visto que, não foram encontrados outros estudos acerca da regionalização hidrológica de vazões para região.

7. CONCLUSÕES

Com base no objetivo geral e nas análises realizadas no trabalho, conclui-se que:

- a) A interpolação espacial dos dados pluviométricos, por meio da *krigagem*, foi de boa qualidade e semelhante à do satélite TRMM e pôde ser utilizada para obtenção da precipitação anual média das bacias do local de estudo;
- b) Foram identificadas sete regiões hidrologicamente homogêneas, utilizando análise de *cluster*, para o estado de Goiás, sendo duas delas pertencentes também ao Distrito Federal;
- c) Por sua vez, foram desenvolvidos sete modelos de regionalização por intermédio da regressão múltipla entre as variáveis dependentes e independentes; e,
- d) De maneira geral, os modelos desenvolvidos apresentaram bom desempenho, sendo capazes de auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos no estado de Goiás e no Distrito Federal.

REFERÊNCIAS

- ADASA. **Resolução nº 350, de 23 de junho de 2006.** Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga prévia e de outorga de direitos de uso dos recursos hídricos, em corpos de água de domínio do Distrito Federal e naqueles delegados pela União e estados. Brasília, DF, 2006a. 16p.
- ADASA. **Instrução normativa nº. 02 de 11 de outubro de 2006.** Estabelece valores de referência para outorga de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio do Distrito Federal e dá outras providências. Brasília, DF, 2006b. 5p.
- ADASA. **Resolução nº 15, de 16 de setembro de 2016.** Declara a Situação Crítica de Escassez Hídrica nos Reservatórios do Descoberto e de Santa Maria. Brasília, DF, 2016. 2p.
- ADASA. **Resolução nº 17, de 15 de agosto de 2017.** Altera dispositivos da Resolução nº 350, de 23 de junho de 2006, e dá outras providências. Brasília, DF, 2017. 17p.
- ADASA. **Resolução nº 20, de 09 de outubro de 2018.** Altera o Regimento Interno aprovado pela Resolução nº 16, de 17 de setembro de 2014 e suas alterações posteriores. Brasília, DF, 2018a. 4p.
- ADASA. **Relatório de Atividades.** Brasília, DF, 2018b. 180p.
- ADASA. **Resolução nº 36, de 20 de dezembro de 2018.** Revoga as Resoluções ADASA nº 15, de 2016, que declara a Situação Crítica de Escassez Hídrica nos Reservatórios do Descoberto e de Santa Maria, e nº 15, de 2018, que regulariza o processo de concessão de outorga. Brasília, DF, 2018c. 2p.
- ADASA. **Resolução nº 15, de 25 de junho de 2018.** Regulariza o processo de concessão de outorga de direito de uso de recursos hídricos a montante do reservatório do Descoberto e dá outras providências. Brasília, DF, 2018d. 2p.
- ADHIKARY, S. K.; MUTTIL, N.; YILMAZ, A. G. Genetic programming-based ordinary kriging for spatial interpolation of rainfall. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 2, p. 1–14, 2016.
- AGARWAL, A.; MAHESWARAN, R.; SEHGAL, V.; KHOSA, R.; SIVAKUMAR, B.; BERNHOFER, C. Hydrologic regionalization using wavelet-based multiscale entropy method. **Journal of Hydrology**, v. 538, p. 22–32, 2016.
- HAJAM, R. A.; HAMID, A.; DAR, N. A.; BHAT, S. U. Morphometric analysis of vishav drainage basin using geo-spatial technology (GST). **International Research Journal of Geology and Mining (IRJGM)**, v. 3, n. 3, p. 2276–6618, 2013.
- ALBUQUERQUE, F. S.; NUÑEZ, W. P. Otimização do monitoramento de bacias deflectométricas para gerência de pavimentos pelo uso da geoestatística. **Transportes**, v. 20, n. 1, p. 5–12, 2012.
- ALTHOFF, D. **Satellite Precipitation Products Download.** Disponível em: <<https://github.com/daniel-althoff/SPP-Down/blob/master/README.md>>. Acesso em: 25 mar. 2020.
- ANA. **Caderno de capacitação em recursos hídricos. Outorga de direito de uso de recursos hídricos.** 6. ed. Brasília, DF, 2011. 54p.

ANA. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília, DF, 2013. 252p.

ANA. **Conjuntura recursos hídricos Brasil**. Informe anual, 2019a. 110p.

ANA. **Manual de usos consuntivos da água no Brasil**. Brasília, DF, 2019b. 75p.

ANA. **Sobre a ANA**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/aceso-a-informacao/institucional>>. Acesso em: 21 jan. 2019c.

ANA. **Órgão gestores**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/gestao-da-agua/sistema-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos/orgaos-gestores>>. Acesso em: 21 jan. 2019d.

ANA. **O que é o SINGREH**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/gestao-da-agua/sistema-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos/o-que-e-o-singreh/o-que-e-singreh>>. Acesso em: 21 jan. 2019e.

ANA. **Outorga e fiscalização**. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/gestao-da-agua/outorga-e-fiscalizacao>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

ANA. **Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica**. Disponível em: <http://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/cbaec3d2fd44459db09fb505c2586177_0>. Acesso em: 2 jun. 2020g.

ANA; IBGE. **Contas econômicas ambientais da água: Brasil 2013-2017**, 2020. 12p.

ARAI, F. K.; PEREIRA, S. B.; GONÇALVES, G. G. G. Characterization of water availability in a hydrographic basin. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 3, p. 591–601, 2012.

ARAUJO, F. C.; MELLO, E. L.; GOLLIN, G. M.; QUADROS, L. E.; GOMES, B. M. Streamflow regionalization in Piquiri river basin. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 38, n. 1, p. 22–31, 2018.

ARAUJO, F. C. **Regionalização de vazões na bacia hidrográfica do rio Paranapanema**. Tese (doutorado) Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campos Cascavel, 2019. 134p.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; VARGAS, M. M.; CORRÊA, L de L.; CALDEIRA, T. L.; DURÃES, M. F.; AGUIAR, M. S de. Artificial intelligence techniques coupled with seasonality measures for hydrological regionalization of Q90 under Brazilian conditions. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1406–1419, 2016.

BOSCARELLO, L.; RAVAZZANI, G.; CISLAGHI, A.; MANCINI, M. Regionalization of flow-duration curves through catchment classification with streamflow signatures and physiographic – Climate indices. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 3, p. 1–17, 2016.

BRANDÃO, A.; PAVIANI, A. **A crise e o consumo de água em Brasília**. Texto para discussão, Brasília, DF, n. 39, 2018. 26p.

BRASIL. **Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934**. Código das Águas. Brasília, DF, 1934. 25p.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Brasília, DF, 1988. 498p.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, DF, 1997. 13p.

- BRASIL. **Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.** Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA. Brasília, DF, 2000. 17p.
- BRUNNER, M. I.; FURRER, R.; SIKORSKA, A. E.; VIVIROLI, D.; SEIBERT, J.; FAVRE, A. Synthetic design hydrographs for ungauged catchments: a comparison of regionalization methods. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 32, p. 1993–2023, 2018.
- CALEGARIO, A. T. **Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e comportamento das vazões mínimas e média regionalizadas.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. 80p.
- CAMARGO, Â. P. DE; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.
- CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: Fundamentos e Aplicações. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. 2. ed. São José dos Campos - SP, p. 1–36, 1998.
- CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Climatic classification of Köppen-Geiger for the state of Goiás and Federal District. **Acta Geográfica**, v. 8, n. 16, p. 40–55, 2014.
- CASSALHO, F.; BESKOW, S.; MELLO, C. R.; MOURA, M. M.; OLIVEIRA, L. F.; AGUIAR, M. S. Artificial intelligence for identifying hydrologically homogeneous regions: A state of the art regional flood frequency analysis. **Hydrological Processes**, p. 1–16, 2019.
- CHAVEIRO, E. F.; CASTILHO, D. Cerrado: patrimônio genético, cultural e simbólico. **Revista Mirante**, v. 2, n. 1, p. 13, 2007.
- CODEPLAN. **Atlas do Distrito Federal**. Brasília, DF, 2017. 114p.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95–118, 2001.
- CPRM. **Relatório-síntese do trabalho de regionalização de vazões da Sub-bacia 24**, 2002. 28p.
- DEVI, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, n. December, p. 1001–1007, 2015.
- DISTRITO FEDERAL. **Lei nº 2.725, de 13 de junho de 2001.** Institui a Política de Recursos Hídricos e cria o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Distrito Federal. Brasília, DF, 2001. 13p.
- DISTRITO FEDERAL. **Lei nº 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. Brasília, DF, 2008. 28p.
- DU, T. L. T.; LEE, H.; BUI, D. D.; ARHEIMER, B. LI, H.; OLSSON, J.; DARBY, S. E.; SHEFFIELD, J.; KIM, D.; HWANG, E. Streamflow prediction in “geopolitically ungauged” basins using satellite observations and regionalization at subcontinental scale. **Journal of Hydrology**, v. 588, p. 1–21, 2020.
- DUNN, M.; HICKEY, R. The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. **Cartography**, v. 27, n. 1, p. 9–15, 1998.

EL-HATTAB, M.; AHMED, A.; EL-RAEY, M. Morphometric analyses of tarhuna drainage basins to accesses groundwater potential using GIS techniques. **Earth Observations and Geospatial Science in Service of Sustainable Development Goals**, p. 57–68, 2019.

EL TAHAN, A. H. M. H.; ELHANAFY, H. E. M. Statistical analysis of morphometric and hydrologic parameters in arid regions, case study of Wadi Hadramaut. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 2, p. 1–10, 2016.

ELESBON, A. A. A.; SILVA, D. D. D.; SEDIYAMA, G. C.; GUEDES, H. A.; RIBEIRO, C. A.; RIBEIRO, C. B. D. M. Multivariate statistical analysis to support the minimum streamflow regionalization. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 35, n. 5, p. 838–851, 2015.

ELETROBRÁS. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, 2 v., 1985.

ESRI. **ArcGIS**, 2012.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; RUBERT, O. A. V.; SANTOS, R. D. Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias , Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, p. 81–105, 2001.

EXCEL, M. **Excel**, 2016.

FARSADNIA, F.; KAMROOD, M. R.; NIA, A. M.; MODARRES, R.; BRAY, M. T.; HAN, D.; SADATINEJAD, J. Identification of homogeneous regions for regionalization of watersheds by two-level self-organizing feature maps. **Journal of Hydrology**, v. 509, p. 387–397, 2014.

FILL, H. D. Informações hidrológicas. In: Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. In: (Ed.). Nobel: ABRH. cap. 2, p. 93-210, 1987.

FLOTEMERSCH, J. E.; LEIBOWITZ, S.; HILL, R.; STODDARD, J.; THOMS, M.; THARME, R. A watershed integrity definition and assessment approach to support strategic management of watersheds. **River research and applications**, v. 32, p. 1654–1671, 2016.

GOIÁS. **Lei nº 12.603 de 7 de abril de 1995**. Introduz alterações na estrutura organizacional básica da administração direta do Poder Executivo. Goiânia, GO, 1995. 27p.

GOIÁS. **Decreto nº 4.724, de 5 de novembro de 1996**. Aprova o regimento Interno do Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH. Goiânia, GO, 1996. 5p.

GOIÁS. **Lei nº 13.123, de 16 de julho de 1997**. Estabelece normas de orientação à política estadual de recursos hídricos. Goiânia, GO, 1997. 13p.

GOIÁS. **Resolução nº 003, de 10 de abril de 2001**. Estabelece diretrizes para a formação e funcionamento dos Comitês de Bacias Hidrográficas do Estado de Goiás. Goiânia, GO, 2001. 5p.

GOIÁS. **Resolução nº 9, de 4 de maio de 2005**. Estabelece o regulamento do sistema de outorga das águas de domínio do Estado de Goiás. Goiânia, GO, 2005. 9p.

GOIÁS. **Resolução nº 11, de 20 de março de 2007**. Estabelece alterações na vazão alocável para outorga em cursos d'água sob domínio do Estado de Goiás. Goiânia, GO, 2007. 1p.

- GOIÁS. **Lei nº 20.096, de 23 de maio de 2018**. Aprova o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) para o triênio 2017-2020. Goiânia, GO, 2018. 1p.
- GOIÁS. **Decreto nº 9.568 de 28 de novembro de 2019**. Aprova o Regulamento da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Goiânia, GO, 2019a. 48p.
- GOIÁS. **Lei nº 20.694, de 26 de dezembro de 2019**. Dispõe sobre normas gerais para o Licenciamento Ambiental do Estado de Goiás. Goiânia, GO, 2019b. 1p.
- GOMES, E. P.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. Regionalization of precipitation with determination of homogeneous regions via fuzzy c-means. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 23, n. 51, p. 1–19, 2018.
- GOOGLE. **Google Earth Engine**. Disponível em: <<https://earthengine.google.com/>>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. **Journal of Hydrology**, v. 228, p. 113–129, 2000.
- GOYAL, M. K.; GUPTA, V. Identification of homogeneous rainfall regimes in northeast region of India using Fuzzy Cluster analysis. **Water Resources Management**, v. 28, p. 4491–4511, 2014.
- GRIMES, D. I. F.; PARDO-IGÚZQUIZA, E. Geostatistical analysis of rainfall. **Geographical Analysis**, v. 42, p. 136–160, 2010.
- GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, p. 135–143, 1999.
- HALL, M. J.; MINNS, A. W. The classification of hydrologically homogeneous regions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 44, n. 5, p. 693–704, 1999.
- HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J. **Data mining: Concepts and techniques**. 3. ed. São Francisco, 2011. 773p.
- HARMEL, R. D.; SMITH, P. K.; MIGLIACCIO, K. W. Modifying goodness-of-fit indicators to incorporate both measurement and model uncertainty in model calibration and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 53, n. 1, p. 55–63, 2010.
- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis**. Cambridge University Press, 1997. 242p.
- IBGE. **População**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/panorama>>. Acesso em: 17 abr. 2020a.
- IBGE. **População**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/panorama>>. Acesso em: 17 abr. 2020b.
- IMB. **Atlas do Estado de Goiás**. Goiânia, GO, 2014. 100p.
- JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means q. **Pattern Recognition Letters**, v. 31, p. 651–666, 2010.
- JAIN, A. K.; DUBES, R. C. **Algorithms for Clustering Data**. Nova Jersey, 1988. 320p.

- JAIN, A. K.; MURTY, M. N.; FLYNN, P. J. Data Clustering : A Review. **ACM Computing Surveys**, v. 31, n. 3, p. 264–323, 1999.
- JUNGER, W.; LEON, P. mtsdi - Multivariate Time Series Data Imputation, 2018. 16p.
- KISAKA, M. O.; MUCHERU-MUNA, M.; NGETICH, F. K.; MUGWE, J.; MUGENDI, D.; MAIRURA, F.; SHISANYA, C.; MAKOKHA, G. L. Potential of deterministic and geostatistical rainfall interpolation under high rainfall variability and dry spells : case of Kenya's Central Highlands. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, p. 349–364, 2016.
- KJELDSSEN, T. R.; JONES, D. Estimation of an index flood using data transfer in the UK. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 1, p. 86–98, 2007.
- KOKKONEN, T. S.; JAKEMAN, A. J.; YOUNG, P. C.; KOIVUSALO, H. J. Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. **Hydrological Processes**, v. 17, p. 2219–2238, 2003.
- LATT, Z. Z.; WITTENBERG, H.; URBAN, B. Clustering hydrological homogeneous regions and neural network based index flood estimation for ungauged catchments: an example of the Chindwin River in Myanmar. **Water Resources Management**, v. 29, p. 913–928, 2015.
- LELIS, L. C. da S.; NASCIMENTO, J. G.; DUARTE, S. N.; PACHECO, A. B.; BOSQUILIA, R. W. D.; WOLFF, W. Assessment of hydrological regionalization methodologies for the upper Jaguari River basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 97, p. 1–10, 2020.
- LI, M.; SHAO, Q.; ZHANG, L.; CHIEW, F. H. S. A new regionalization approach and its application to predict flow duration curve in ungauged basins. **Journal of Hydrology**, v. 389, n. 1–2, p. 137–145, 2010.
- LIAZI, A.; CONEJO, J. G. L.; PALOS, J. C. F.; CINTRA, P. S. Regionalização hidrológica no estado de São Paulo. **Revista Águas e Energia Elétrica**, v. 5, n. 14, p. 4–10, 1988.
- LIMA, A.; AZEVEDO, C.; ROSSI, M. S.; ALLEN, J. Catálogo hidrográfico do Distrito Federal. Toponímias dos cursos d'água. p. 1–44, 2017.
- LIMA, C. J. G. de S.; SALVADOR, C. A.; ALVES, D. G.; SILVA, E. M.; MENDONÇA, F. C.; SILVA, J. F.; JOSÉ, J. V.; PIMENTEL, J.; JACOMAZZI, M. A.; FOLEGATTI, M. V.; MINGOTI, R.; COELHO, R. D.; DUARTE, S. N.; WOLFF, W.; SOUZA, W. **Hidrologia**. Piracicaba: ESALQ/LEB, 2012. 342p.
- LIU, F.; DENG, Y. Determine the number of unknown targets in Open World based on Elbow method. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, p. 1–12, 2020.
- LY, S.; CHARLES, C.; DEGRÉ, A. Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale : the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 2259–2274, 2011.
- LY, S.; CHARLES, C.; DEGRÉ, A. Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale . A review. **Biotechnology, Agronomy, Society and Environment**, v. 17, n. 2, p. 392–406, 2013.

- MALEKINEZHAD, H.; ZARE-GARIZI, A. Regional frequency analysis of daily rainfall extremes using L-moments approach. **Atmosfera**, v. 27, n. 4, p. 411–427, 2014.
- MARCUZZO, F.; FARIA, T. G.; FILHO, R. DE F. P. Chuvas no estado de Goiás: Análise histórica e tendência futura. **Acta Geográfica**, v. 6, n. 12, p. 125–137, 2012.
- MATHEVET, T.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C. A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. **IAHS Publications**, p. 211–219, 2006.
- MATHWAVE TECHNOLOGIES. **EasyFit 3.6**, 2017.
- MENDEZ, M.; CALVO-VALVERDE, L. Assessing the performance of several rainfall interpolation methods as evaluated by a conceptual hydrological model. **Procedia Engineering**, v. 154, p. 1050–1057, 2016.
- MMA. **Resolução nº 30, de 11 de dezembro de 2002**. Codificação de Bacias Hidrográficas pelo Método de Otto Pfafstetter, 2002. 7p.
- MORIASI, D. N.; GITAU, M.; PAI, N.; DAGGUPATI, P. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 58, n. 6, p. 1763–1785, 2015.
- NASA. **TRMM_3B43**. Disponível em: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B43_7/summary>. Acesso em: 25 mar. 2020.
- NASH, E.; SUTCLIFFE, V. River flow forecasting through conceptual models: Part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282–290, 1970.
- NETO, H. G.; ALMEIDA, T. F. de. Análise de agrupamentos na identificação de regiões homogêneas de índices climáticos no estado da Paraíba, PB – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, p. 732–748, 2013.
- OLALEKAN, R. M.; MONSURAT, S.; EMMANUEL, O. O.; TOLULOPE, S. J.; MODUPE, O.; OLALEKAN, A. S.; CHRISTIANAH, M. B. Women role in environmental conservation and development in Nigeria. **Ecology & Conservation Science: Open access**, v. 1, n. 2, 2019.
- OLIVEIRA, L. F. C. de; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, M. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1186–1192, 2010.
- OLIVEIRA, L. F. **Proposta de métodos de clusterização de dados com validação por testes de heterogeneidade e discordância aplicados à regionalização de bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pelotas, 2018. 63p.
- PANDEY, A.; JAIN, A. Comparative analysis of KNN algorithm using various normalization techniques. **International Journal of Computer Network and Information Security**, v. 9, n. 11, p. 36–42, 2017.

- PANDEY, K. B.; GOSAIN, A. K.; PAUL, G.; KHARE, D. Climate change impact assessment on hydrology of a small watershed using semi-distributed model. **Applied Water Science**, v. 7, n. 4, p. 2029–2041, 2017.
- PECHLIVANIDIS, I. G.; MCINTYRE, N. R.; WHEATER, H. S. Calibration of the semi-distributed PDM rainfall – runoff model in the Upper Lee catchment , UK. **Journal of Hydrology**, v. 386, p. 198–209, 2010.
- PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. da S. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 139–148, 2013.
- PIAZZA, A. D.; CONTI, F. L.; NOTO, L. V.; LOGGIA, G. L. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. **International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation**, v. 13, p. 396–408, 2011.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de Bacias Hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43–60, 2008.
- PRIETO, C.; VINE, N. L.; KAVETSKI, D.; GARCIA, E.; MEDINA, R. Flow prediction in ungauged catchments using probabilistic Random Forests regionalization and new statistical adequacy tests. **American Geophysical Union**, p. 1–58, 2019.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A.; REGO, F. S.; SOUZA, M. F. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: alternativas para atenuar os riscos. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 1, n. 1, p. 51–59, 2012.
- R CORE TEAM. **R statistical 3.6.0**, 2019.
- RAO, A. R.; SRINIVAS, V. V. Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. **Journal of Hydrology**, v. 318, p. 37–56, 2006.
- RAVAL, U. R.; JANI, C. Implementing & improvisation of K-means clustering algorithm. **International Journal of Computer Science and Mobile Computing**, v. 5, n. 5, p. 191–203, 2016.
- RAZAVI, T.; COULIBALY, P. Streamflow prediction in ungauged basins: Review of regionalization methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 8, p. 958–975, 2013.
- RAZAVI, T.; COULIBALY, P. Improving streamflow estimation in ungauged basins using a multi-modelling approach. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 15, p. 2668–2679, 2016.
- SCHEIHING, K. W. Evidence of short-term groundwater recharge signal propagation from the Andes to the central Atacama Desert : a singular spectrum analysis approach Andes to the central Atacama Desert : a singular spectrum analysis approach. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 8, p. 1255–1261, 2018.

- SEMAD. **Web outorga. Sistema digital.** Disponível em: <<http://weboutorga.meioambiente.go.gov.br/>>. Acesso em: 2 jun. 2020.
- SILVA, R. DA S. E.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. L. C. Alternative for the regionalization of flow duration curves. **Journal of Applied Water Engineerind and Research**, v. 7, n. 3, p. 198–206, 2019.
- SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 111–131, 1998.
- SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S. W.; GUPTA, V. K.; KARAMBIRI, H.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; McDONNELL, J. J.; MEDIONDO, E. M.; O'CONNEL, P. E.; OKI, T.; POMEROY, J. W.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003 – 2012 : shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 6, p. 857–880, 2012.
- SNIRH. Divisão Hidrográfica por Ottocodificação, 2002. 8p.
- SWAIN, J. B.; SAHOO, M. M.; PATRA, K. C. Homogeneous region determination using linear and nonlinear techniques. **Physical Geography**, v. 37, n. 5, p. 361–384, 2016.
- TEGEGNE, G.; KIM, Y. Modelling ungauged catchments using the catchment runoff response similarity. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 452–466, 2018.
- TENG, H.; TENG, Z.; MA, Z.; LI, Y. Estimating spatially downscaled rainfall by regression kriging using TRMM precipitation and elevation in Zhejiang Province , southeast China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 22, p. 7775–7794, 2014.
- TERASSI, P. M. de B.; OLIVEIRA-JUNIOR, J. F.; GOIS, G. de; JUNIOR, A. C. O.; SOBRAL, B. S.; BIFFI, V. H. R.; BLANCO, C. J. C.; FILHO, W. L.; VIJITH, H. Rainfall and erosivity in the municipality of Rio de Janeiro - Brazil. **Urban Climate**, v. 33, p. 1–23, 2020.
- TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre, Ed. ABRH/UFRGS, 2002. 256p.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, Ed. ABRH/UFRGS, 2012. 944p.
- WAGENER, T.; WHEATER, H. S.; GUPTA, H. V. **Rainfall-runoff Modelling In Gauged And Ungauged Catchments**. London, UK: World Scientific Publishing Company, 2004.
- WAGNER, P. D.; FIENER, P.; WILKEN, F.; KUMAR, S.; SCHNEIDER, K. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. **Journal of Hydrology**, v. 464–445, p. 388–400, 2012.
- WILLMOTT, C. I. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981.
- WOLFF, W. **Avaliação e nova proposta de regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, Piracicaba, 2013. 111p.
- WU, X.; KUMAR, V.; QUINLAN, J. R.; GHOSH, J.; YANG, Q.; MOTODA, H.; McLACHLAN, G.; NG, A.; LIU, B.; YU, P. S.; ZHOU, Z.; STEINBACH, M.; HAND, D. J.; STEINBERG, D. Top 10 algorithms in data mining. **Knowledge and Information Systems**, v. 14, p. 1–37, 2008.

ZHANG, J.; ZHANG, C.; SHI, W.; FU, Y. Quantitative evaluation and optimized utilization of water resources-water environment carrying capacity based on nature-based solutions. **Journal of Hydrology**, v. 568, n. October 2018, p. 96–107, 2019.

ANEXO A

Informações das estações fluviométricas utilizadas no estudo.

Código	Latitude	Longitude	Nome	UF
1250000	-12,82	-50,34	CRUZEIRO DO SUL	GO
1347000	-13,80	-47,46	CAVALCANTE	GO
1450000	-14,33	-50,73	LAGOA DA FLECHA	GO
1650000	-16,67	-50,65	CACHOEIRA DE GOIÁS	GO
1750000	-17,73	-50,18	BARRA DO MONJOLO	GO
1851000	-18,91	-50,85	CACHOEIRA ALTA	GO
1852000	-18,97	-51,93	APORÉ	GO
20100000	-15,72	-49,33	JARAGUÁ	GO
20200000	-15,50	-49,69	URUANA	GO
20250000	-15,28	-49,55	UHE SERRA DA MESA CERES	GO
20699000	-14,57	-48,16	UHE SERRA DA MESA MUQUEM VAU DA ONÇA	GO
21220000	-14,45	-47,05	FLORES DE GOIÁS	GO
21300000	-14,48	-46,49	ALVORADA DO NORTE	GO
21500000	-13,76	-46,84	NOVA ROMA (FAZ.SUCURI)	GO
21560000	-13,50	-46,78	FAZENDA VENEZA	GO
21580000	-13,55	-46,47	SÃO VICENTE	GO
21600000	-13,43	-47,14	UHE PEIXE ANGICAL PONTE PARANÁ	GO
24070000	-17,22	-53,16	MONTANTE DO RIBEIRÃO BABILÔNIA	GO
24196000	-16,72	-52,33	RIO DO PEIXE	GO
24700000	-15,89	-52,23	BARRA DO GARÇAS	GO
24750000	-16,30	-51,47	SÃO FERREIRA	GO
24780000	-16,43	-51,82	PIRANHAS	GO
24800000	-15,89	-51,85	PERES	GO
24900000	-16,51	-51,00	IVOLÂNDIA	GO
24950000	-15,94	-51,36	MONTES CLAROS DE GOIÁS	GO
25090000	-15,91	-50,13	FAZENDA PACIÊNCIA	GO
25100000	-15,92	-50,17	BALNEÁRIO CACHOEIRA GRANDE	GO
25120000	-15,90	-50,44	COLÔNIA DOS ALEMÃES	GO
25130000	-15,54	-50,70	TRAVESSÃO	GO
25140000	-15,36	-51,18	FAZENDA ÁGUA LIMPA	GO
25200000	-14,91	-51,08	ARUANÃ	GO
25700000	-13,69	-50,80	BANDEIRANTES	GO
25750000	-13,90	-49,95	RIO CRIXAS-AÇU	GO
25800000	-13,56	-50,40	JUSANTE DO RIO PINTADO	GO
60432000	-16,30	-48,80	RIBEIRÃO DAS ANTAS	GO
60453500	-16,79	-47,94	UHE CORUMBÁ III BARRAMENTO	GO
60495000	-16,43	-47,69	RIO PAMPLONA	GO
60500000	-16,54	-47,80	UHE BATALHA RIO SÃO BARTOLOMEU	GO
60540000	-17,13	-48,14	UHE CORUMBÁ I RIO PIRACANJUBA	GO
60544990	-17,33	-48,24	UHE CORUMBÁ I MONTANTE 1	GO
60564000	-17,53	-48,51	UHE CORUMBÁ I RIO DO PEIXE	GO
60570080	-17,99	-48,53	UHE CORUMBÁ I BARRAMENTO	GO
60591000	-17,75	-48,84	UHE ITUMBIARA JUSANTE PONTE GO-213	GO

Código	Latitude	Longitude	Nome	UF
60625080	-18,50	-49,49	UHE CACHOEIRA DOURADA BARRAMENTO	GO
60635000	-16,35	-49,49	INHUMAS	GO
60640000	-16,61	-49,28	MONTANTE DE GOIÂNIA	GO
60642000	-16,63	-49,24	CAPTAÇÃO JOÃO LEITE	GO
60650000	-16,68	-49,20	JUSANTE DE GOIÂNIA	GO
60653000	-16,46	-48,90	RIBEIRÃO DAS CALDAS	GO
60654000	-16,91	-49,10	FAZENDA SUCURI	GO
60665000	-17,25	-49,28	PROFESSOR JAMIL	GO
60680000	-18,35	-49,60	PONTE MEIA PONTE	GO
60715000	-17,11	-49,69	FAZENDA BOA VISTA	GO
60750000	-17,08	-50,29	FAZENDA NOVA DO TURVO	GO
60765000	-17,73	-50,18	BARRA DO MONJOLO	GO
60772000	-17,98	-50,25	FAZENDA SANTA MARIA	GO
60774000	-17,36	-51,08	MONTIVIDIU	GO
60778000	-17,33	-50,77	FAZENDA MONTE ALEGRE	GO
60781000	-17,33	-50,68	PONTE RODAGEM	GO
60785005	-17,47	-50,77	FAZENDA PARAÍSO	GO
60790000	-17,54	-50,56	PONTE RIO VERDÃO	GO
60798000	-17,97	-50,33	MAURILÂNDIA	GO
60810000	-18,10	-50,03	FAZENDA ALIANÇA	GO
60870000	-18,50	-50,53	QUIRINÓPOLIS	GO
60895000	-17,86	-51,39	PONTE RIO DOCE	GO
60901800	-18,53	-51,15	UHE CAÇU BARRAMENTO	GO
60903800	-18,72	-51,00	UHE BARRA DOS COQUEIROS BARRAMENTO	GO
60910000	-17,58	-52,60	PONTE DO CEDRO	GO
60920400	-18,81	-51,17	UHE SALTO BARRAMENTO	GO
60921500	-19,16	-50,76	UHE SALTO DO RIO VERDINHO BARRAMENTO	GO
60930000	-18,41	-52,53	FAZENDA FORMOSO	GO
60940000	-18,52	-52,10	CAMPO ALEGRE	GO
60943000	-18,68	-51,87	UHE ESPORA BARRAMENTO	GO
60950000	-19,10	-51,15	CANASTRA	GO
60970000	-19,14	-51,53	ITAJÁ	GO
60433000	-16,05	-48,37	AREIAS - FAZ. SÃO BENTO	GO
60610080	-18,41	-49,10	UHE ITUMBIARA BARRAMENTO	GO
42450350	-15,73	-47,32	RIO PRETO	DF
60435000	-15,71	-48,23	DESCOBERTO - CHACARA 89	DF
60435100	-15,70	-48,21	CHAPADINHA - AVIÁRIO - DF 180	DF
60435150	-15,71	-48,20	OLARIA - DF 080	DF
60435200	-15,73	-48,17	RODEADOR - DF 435	DF
60435300	-15,75	-48,16	CAPÃO COMPRIDO - DESCOBERTO	DF
60435400	-15,76	-48,16	RIBEIRÃO DAS PEDRAS (DF-180)	DF
60436000	-15,78	-48,23	DESCOBERTO - JUSANTE BARRAGEM	DF
60471200	-15,67	-47,66	MESTRE D'ARMAS - VALE AMANHECER	DF
60472230	-15,57	-47,51	PIPIRIPAU - BR-020 - CHACARA 14	DF
60472240	-15,64	-47,58	PIPIRIPAU MONTANTE CANAL	DF

Código	Latitude	Longitude	Nome	UF
60472300	-15,65	-47,60	PIPIRIPAU MONTANTE CAPTAÇÃO	DF
60473000	-15,66	-47,63	PIPIRIPAU FRINOCAP - DF 230	DF
60474100	-15,73	-47,70	SOBRADINHO JUSANTE - DF-330	DF
60476100	-15,74	-47,67	DF-06 / DF 250	DF
60477200	-15,67	-47,95	TRES BARRAS - JUSANTE SANTA MARIA	DF
60477300	-15,69	-47,93	TORTO - GRANJA	DF
60477400	-15,71	-47,88	TORTO - LAGO (Montante Paranoá)	DF
60477600	-15,73	-47,91	BANANAL - EPIA 003	DF
60478200	-15,86	-47,96	MONTANTE ZOOLOGICO - EPIA 003 - RIACHO FUNDO	DF
60478400	-15,85	-47,93	PONTE AEROPORTO -EPAR 002	DF
60478500	-15,87	-47,90	GAMA - BASE AÉREA	DF
60478600	-15,86	-47,86	DOM BOSCO - CABEÇA DE VEADO	DF
60480000	-15,79	-47,77	PARANOÁ - JUSANTE BARRAGEM	DF
60490000	-15,95	-47,67	DF-18 / BR 251	DF
46400000	-13,00	-45,63	CASA REAL	BA
46420000	-12,81	-45,97	RODA VELHA DE BAIXO	BA
42460000	-16,21	-47,23	FAZENDA LIMEIRA	MG
43360000	-15,03	-46,29	PIRATINGA	MG
60856000	-18,88	-50,01	PONTE BR-365 (FAZ.BOA VISTA)	MG
60925001	-19,21	-50,66	PONTE SÃO DOMINGOS	MG
26200000	-14,09	-51,70	TRECHO MÉDIO	MT
26150000	-14,60	-51,72	RIO PINDAIBA	MT
24200000	-16,20	-52,55	TORIXOREU	MT
21750000	-12,79	-46,51	LAVANDEIRA	TO
26720000	-12,42	-49,59	PRAIA ALTA	TO
60877080	-18,99	-48,19	UHE SÃO SIMÃO BARRAMENTO	MS

UF – Unidade da Federação; UHE – Usina Hidrelétrica; Faz – Fazenda.

ANEXO B

Informações das estações pluviométricas utilizadas no estudo.

Código	Latitude	Longitude	Nome	UF
1346001	-13,74	-46,88	NOVA ROMA (FAZ.SUCURI)	GO
1346002	-13,69	-46,57	FAZENDA INGAZEIRO	GO
1346004	-13,04	-46,78	CAMPOS BELOS	GO
1346005	-13,55	-46,47	SÃO VICENTE	GO
1348000	-13,79	-48,57	CAMPINAÇU	GO
1348003	-13,51	-48,75	TROMBAS	GO
1348004	-13,83	-48,33	UHE SERRA DA MESA BARRAMENTO	GO
1349001	-13,24	-49,50	NOVO PLANALTO	GO
1349002	-13,41	-49,16	PORANGATU (DESCOBERTO)	GO
1349003	-13,10	-49,20	ENTRONCAMENTO SÃO MIGUEL	GO
1350000	-13,69	-50,80	BANDEIRANTES	GO
1350001	-13,53	-50,19	RIO PINTADO (FAZ.PONTAL)	GO
1350002	-13,33	-50,20	SÃO MIGUEL DO ARAGUAIA	GO
1446002	-14,08	-46,37	POSSE	GO
1446004	-14,80	-46,25	SÍTIO D'ABADIA	GO
1447000	-14,13	-47,51	ALTO PARAÍSO DE GOIÁS	GO
1447001	-14,45	-47,05	FLORES DE GOIÁS	GO
1447002	-14,71	-47,52	SÃO JOÃO D'ALIANÇA	GO
1448001	-14,48	-48,46	NIQUELÂNDIA	GO
1448004	-14,55	-48,17	MOQUEM - FAZENDA VAU DA ONÇA	GO
1448005	-14,02	-48,61	PALMEIRINHA	GO
1448007	-14,83	-48,75	UHE SERRA DA MESA PORTEIRAS SANTA BÁRBARA	GO
1448009	-14,57	-48,16	UHE SERRA DA MESA MUQUEM VAU DA ONÇA	GO
1449001	-14,56	-49,14	PORTO URUAÇU	GO
1449002	-14,43	-49,72	SANTA TEREZINHA DE GOIÁS	GO
1449003	-14,53	-49,96	CRIXAS	GO
1449005	-14,80	-49,17	UHE SERRA DA MESA FAZENDA CAJUPIRA	GO
1450001	-14,74	-50,58	MOZARLÂNDIA (CHAC. FOGUEIRA)	GO
1450002	-14,10	-50,33	GOVERNADOR LEÔNINO	GO
1451000	-14,93	-51,08	ARUANÃ	GO
1546005	-15,80	-46,92	CABECEIRAS	GO
1547003	-15,55	-47,34	FORMOSA	GO
1547027	-15,23	-47,57	SÃO GABRIEL DE GOIÁS	GO
1548001	-15,06	-48,17	MIMOSO	GO
1548003	-15,85	-48,97	PIRENÓPOLIS	GO
1548004	-15,85	-48,97	PIRENÓPOLIS	GO
1548011	-15,54	-48,55	FAZENDA MARAJÁ	GO
1548020	-15,74	-48,31	ÁGUAS LINDAS	GO
1549001	-15,33	-49,12	GOIANÉSIA	GO
1549002	-15,56	-49,94	ITAPURANGA	GO
1549003	-15,76	-49,34	JARAGUÁ	GO
1549004	-15,02	-49,89	NOVA AMÉRICA	GO
1549009	-15,50	-49,69	URUANA	GO

Código	Latitude	Longitude	Nome	UF
1550001	-15,37	-50,50	JEROAQUARA	GO
1550002	-15,54	-50,70	TRAVESSÃO	GO
1550003	-15,94	-50,14	GOIÁS	GO
1551000	-15,25	-51,16	BRITÂNIA	GO
1551001	-15,94	-51,36	MONTES CLAROS DE GOIÁS	GO
1551002	-15,89	-51,85	PERES	GO
1551003	-15,77	-51,10	SANTA FÉ	GO
1552000	-15,89	-52,23	BARRA DO GARÇAS	GO
1552003	-15,90	-52,24	ARAGARÇAS	GO
1647001	-16,54	-47,80	UHE BATALHA RIO SÃO BARTOLOMEU	GO
1647002	-16,79	-47,60	UHE BATALHA CRISTALINA	GO
1648001	-16,14	-48,60	PONTE ANÁPOLIS - BRASÍLIA	GO
1648002	-16,75	-48,53	VIANÓPOLIS	GO
1649000	-16,47	-49,94	ANICUNS	GO
1649001	-16,91	-49,45	ARAGOIÂNIA	GO
1649004	-16,52	-49,02	GOIANÁPOLIS	GO
1649006	-16,35	-49,50	INHUMAS	GO
1649007	-16,03	-49,80	ITABERAÍ	GO
1649009	-16,22	-49,20	OURO VERDE DE GOIÁS	GO
1649010	-16,80	-49,93	PALMEIRAS DE GOIÁS	GO
1649012	-16,66	-49,49	TRINDADE	GO
1649013	-16,67	-49,26	GOIÂNIA	GO
1650001	-16,30	-50,56	CÓRREGO DO OURO	GO
1650002	-16,32	-50,91	ISRAELÂNDIA	GO
1650003	-16,61	-50,13	TURVÂNIA	GO
1651000	-16,95	-51,80	CAIAPONIA	GO
1651001	-16,43	-51,08	IPORÁ	GO
1651002	-16,42	-51,82	PIRANHAS	GO
1651003	-16,31	-51,47	SÃO FERREIRA	GO
1652000	-16,21	-52,17	BOM JARDIM DE GOIÁS	GO
1652003	-16,72	-52,32	DOVERLÂNDIA	GO
1748000	-17,20	-48,72	CRISTIANÓPOLIS	GO
1748004	-17,98	-48,68	MARZAGÃO	GO
1748005	-17,13	-48,14	UHE CORUMBÁ I RIO PIRACANJUBA	GO
1748012	-17,72	-48,17	IPAMERI	GO
1749000	-17,34	-49,93	EDÉIA (ALEGRETE)	GO
1749001	-17,11	-49,69	FAZENDA BOA VISTA	GO
1749002	-17,81	-49,63	JOVIÂNIA	GO
1749003	-17,73	-49,12	MORRINHOS	GO
1749004	-17,52	-49,44	PONTALINA	GO
1749005	-17,29	-49,03	PIRACANJUBA	GO
1749009	-17,28	-49,38	CROMÍNIA	GO
1750001	-17,08	-50,29	FAZENDA NOVA DO TURVO	GO
1750003	-17,54	-50,56	PONTE RIO VERDÃO	GO
1750004	-17,33	-50,68	PONTE RODAGEM	GO

Código	Latitude	Longitude	Nome	UF
1750008	-17,47	-50,77	FAZENDA PARAÍSO	GO
1750013	-16,95	-50,45	PARAUNA	GO
1751001	-17,86	-51,40	PONTE RIO DOCE	GO
1751002	-17,70	-51,89	BENJAMIN BARROS	GO
1751003	-17,92	-51,72	JATAÍ	GO
1751004	-17,36	-51,08	MONTIVIDIU	GO
1752002	-17,69	-52,98	FAZENDA SÃO BERNARDO	GO
1752003	-17,58	-52,60	PONTE DO CEDRO	GO
1752006	-17,72	-52,17	BOM JARDIM	GO
1753002	-17,35	-53,09	FAZENDA BABILÔNIA	GO
1847004	-18,17	-47,96	CATALÃO	GO
1847006	-18,36	-47,78	TRÊS RANCHOS	GO
1848007	-18,24	-48,86	CORUMBAZUL	GO
1849016	-18,34	-49,61	PONTE MEIA PONTE	GO
1850001	-18,10	-50,03	FAZENDA ALIANÇA	GO
1850002	-18,50	-50,52	QUIRINÓPOLIS	GO
1850003	-17,98	-50,34	MAURILÂNDIA	GO
1851001	-18,52	-51,09	CAMPO ALEGRE	GO
1851002	-18,76	-51,35	ITARUMÃ	GO
1851004	-18,09	-51,50	POMBAL	GO
1851005	-18,30	-51,96	SERRANÓPOLIS	GO
1852001	-18,41	-52,53	FAZENDA FORMOSO	GO
1951001	-19,14	-51,53	ITAJÁ	GO
1548030	-15,89	-48,41	MACACOS - (Cidade Eclética)	GO
1547002	-15,64	-47,65	PLANALTINA	DF
1547004	-15,79	-47,92	BRASÍLIA	DF
1547006	-15,85	-47,90	BRASÍLIA - AEROPORTO	DF
1547008	-15,84	-47,91	ETE SUL	DF
1547009	-15,74	-47,88	ETE NORTE	DF
1547010	-15,65	-47,88	CONTAGEM	DF
1547013	-15,63	-47,52	TAQUARA	DF
1547014	-15,98	-47,98	ÁREA ALFA	DF
1547015	-15,66	-47,81	ETE - SOBRADINHO	DF
1547016	-15,58	-47,70	CPAC - PRINCIPAL	DF
1547017	-15,67	-47,95	SANTA MARIA	DF
1547018	-15,81	-48,00	JOCKEY CLUB	DF
1547019	-15,89	-47,85	ETA CABEÇA DE VEADO	DF
1547020	-15,80	-47,78	ETE PARANOÁ	DF
1547021	-15,84	-47,63	BARREIRO DF-130	DF
1547022	-15,79	-47,43	RIO PRETO	DF
1547025	-15,59	-47,70	CPAC - CHAPADA	DF
1547026	-15,93	-47,88	RONCADOR	DF
1547029	-15,78	-47,91	CAESB-HIDROLOGIA	DF
1547032	-15,82	-47,95	ANA SEDE	DF
1548005	-16,02	-48,10	GAMA ETE ALAGADO	DF

Código	Latitude	Longitude	Nome	UF
1548006	-15,79	-48,11	TAGUATINGA - ETA RD	DF
1548007	-15,66	-48,19	ETA - BRAZLÂNDIA	DF
1548008	-15,78	-48,23	DESCOBERTO	DF
1548010	-15,89	-48,03	ETE RIACHO FUNDO-GM-3	DF
1548014	-15,93	-48,13	UEPAE	DF
1346007	-13,31	-46,06	FAZENDA PRAINHA (FAZ.ANTAS)	BA
1346006	-13,75	-46,14	FAZENDA PLANALTO	BA
1245015	-12,77	-45,94	RODA VELHA	BA
1546011	-15,03	-46,29	PIRATINGA	MG
1647008	-16,21	-47,23	FAZENDA LIMEIRA	MG
1746000	-17,20	-46,88	PARACATU	MG
1746013	-17,22	-46,87	PARACATU	MG
1847007	-18,58	-47,88	CASCALHO RICO	MG
1848008	-18,49	-48,90	BRILHANTE	MG
1849026	-18,89	-50,00	PONTE BR-365 (FAZ. BOA VISTA)	MG
1849002	-18,69	-49,95	IPIAÇU	MG
1849006	-18,77	-49,07	AVANTIGUARA	MG
1849017	-18,68	-49,57	CAPINÓPOLIS	MG
1950011	-19,21	-50,66	PONTE SÃO DOMINGOS	MG
1446003	-14,93	-46,25	FORMOSO	MG
1351000	-14,09	-51,70	TRECHO MÉDIO	MT
1652001	-16,77	-52,84	PONTE BRANCA	MT
1251002	-12,81	-51,02	VILA BERRANTE	MT
1652002	-16,20	-52,55	TORIXOREU	MT
1951004	-19,23	-51,88	ARVORE GRANDE	MS
1852003	-18,69	-52,59	CIDADE CHAPADÃO GAUCHO	MS
1853004	-18,55	-53,14	COSTA RICA	MS
1951003	-19,39	-51,61	FAZENDA PINDORAMA	MS
1249000	-12,48	-49,12	ALVORADA	TO
1249001	-12,93	-49,83	ARAGUAÇU	TO
1246001	-12,71	-46,41	AURORA DO NORTE	TO
1248003	-13,04	-48,41	PALMEIRÓPOLIS	TO
1248001	-12,39	-48,71	COLONHA	TO
1249003	-12,10	-49,95	BARREIRA DO PEQUI	TO

Chac – Chácara; ETE – Estação de tratamento de esgoto; ETA; Estação de tratamento de água; CPAC – Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado; CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal.