

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Mariana d'Ávila Fonseca Paiva de Paula Freitas

Avaliação de variáveis físicas e de qualidade das águas em
reservatórios de usinas hidrelétricas de Minas Gerais
para gestão das águas no Estado

Belo Horizonte
2017

Mariana d'Ávila Fonseca Paiva de Paula Freitas

Avaliação de variáveis físicas e de qualidade das águas
em reservatórios de usinas hidrelétricas de Minas Gerais
para gestão das águas no Estado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade
Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção
do título de mestre em Análise e Modelagem de Sistemas
Ambientais

Orientador: Ricardo Alexandrino Garcia

Co-orientador: Carlos Fernando Ferreira Lobo

Belo Horizonte
Instituto de Geociências da UFMG

2017

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Aprovada pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Dr. Ricardo Alexandrino Garcia – UFMG

Orientador

Dr. Carlos Fernando Ferreira Lobo – UFMG

Co-orientador

Dr. Diego Rodrigues Macedo – UFMG

Dra. Mônica de Cássia Souza Campos – Instituto SENAI de Tecnologia em Meio Ambiente

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família. Aos meus queridos pais Beatriz e Joaquim pela educação e pelo apoio, aos meus amados irmãos Clara e Pedro pelo carinho e Cacá, obrigada por escutar minhas apresentações, revisar textos e me ajudar! Ao Marco pelo amor, pela paciência e por sempre comemorar minhas conquistas. À minha amada vó Lourdes pela torcida e afeto, tia Beth por ser tão prestativa e presente. Ao meu avô José, que por mais que já não esteja presente há alguns anos, sempre me lembro com muita saudade e sei está comigo! Obrigada por todo o amor de vocês, e por entenderem minha ausência em alguns momentos.

À minhas amigas, principalmente à Giulianna por ser sempre companheira e me dar conselhos.

Aos colegas do Instituto Senai de Tecnologia em Meio Ambiente pela torcida, consideração, cooperação e amizade, especialmente Márcia, Helena, Tannús, Marcus, Mônica, Sylvia e Valéria. Encarar a jornada de trabalho, elaboração de mestrado e a fotografia ao mesmo tempo foi desgastante, mas o apoio de vocês contribuiu para que isso fosse possível. Ao projeto PetiCajuru que serviu de grande base para a realização desta pesquisa. E claro, minhas queridas amigas do trabalho e da vida Izabella, Mara e Karina.

À Maria Letizia Petesse pelas valiosas orientações e disponibilidade em colaborar com pesquisas científicas.

Ao Marcelo Ávila, por me apresentar a Geociências e ser tão importante na minha vida acadêmica e profissional.

Aos colegas de mestrado, especialmente Thaísa e Gustavo por compartilharmos modelos, planilhas, aflições e desabafos.

Aos professores da UFMG pelos conhecimentos passados, ao meu orientador Ricardo pelo apoio e auxílio com o trabalho, aos membros da banca e à Pamela pelo suporte e boa vontade em ajudar.

À equipe da Cemig pelo fornecimento de dados e cooperação, muito obrigada Marcela e Helen!

Menciono também as boas músicas de rock, em especial Foo Fighters, que embalsamaram meus estudos nos finais de semana e nas madrugadas, me ajudando a concentrar.

Acima de tudo, obrigada a Deus pelas oportunidades na minha vida, pelas pessoas ao meu redor e por estar comigo.

RESUMO

A água é um recurso natural de extrema importância, essencial à manutenção da vida, além de ser um bem versátil, permitindo usos múltiplos, como abastecimento, navegação, irrigação, recreação, piscicultura e geração de energia elétrica. A matriz energética do Brasil é predominantemente de origem hídrica, o que prevalece no estado de Minas Gerais. Para a geração de energia, cursos de água são represados, causando inúmeras modificações no ambiente. A relevância dos reservatórios no Estado gera atenção para manter a produção de energia e qualidade das águas, o que desperta desenvolvimento de estudos desses ambientes. O monitoramento de qualidade das águas, que é dispendioso e trabalhoso, gera um grande volume de dados, que por muitas vezes são ignorados. A estatística é uma ferramenta valiosa no tratamento desses dados, que permite interpretá-los e aplicá-los de forma prática. Partindo-se da importância desses corpos de água, bem como para interpretar aos dados de monitoramento, o presente trabalho se baseou nas informações disponíveis sobre qualidade de água de reservatórios e características físicas, especialmente morfometria. A amostra iniciou-se com as 44 represas cadastradas no Sistema de Informação de Qualidade da Água de dos Reservatórios (Siságua) da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), e posteriormente esse número foi reduzido a vinte e nove reservatórios que possuem informações disponíveis. O objetivo principal do estudo é agrupar (tipificar) os reservatórios de usinas hidrelétricas em Minas Gerais com características semelhantes, utilizando estatística: Análise de Componentes Principais (ACP) e de Similaridade (*cluster*). O resultado apontou que quanto à qualidade das águas, os parâmetros mais significativos foram turbidez, condutividade, pH, transparência, DBO e sólidos dissolvidos totais e as características morfométricas mais explicativas foram área, perímetro, volume, tempo de residência, área de drenagem e vazão média de longo período. Existiu a coincidência de parte de agrupamentos de reservatórios para as duas análises, e o agrupamento quanto às variáveis de qualidade das águas apresentou relação com a distribuição geográfica dos ambientes. O trabalho contribui para sistematizar, organizar e ordenar a gestão desses ambientes no Estado.

Palavras-chave: reservatórios, usinas hidrelétrica, gestão de recursos hídricos, qualidade de água, morfometria

ABSTRACT

Water is a natural resource of extreme importance, essential to the maintenance of life, besides being versatile, allowing multiple uses, such as water supply, navigation, irrigation, recreation, fish farming and electric power generation. The energy matrix of Brazil is predominantly of water origin, which prevails in the state of Minas Gerais. For the generation of energy, water courses are dammed, causing numerous modifications in the environment. The relevance of the reservoirs in the State generates attention to maintain energy production and water quality, which leads to the development of studies of these environments. Water quality monitoring, which is expensive and labor intensive, generates a large amount of data, which is often ignored. Statistics are a valuable tool in the treatment of these data, which enables them to be interpreted and applied in a practical way. Taking into account the importance of these bodies of water, as well as to interpret the monitoring data, the present work was based on the available information on reservoir water quality and physical characteristics, especially morphometry. The sample started with the 44 dams registered in the Water Quality Information System of the Reservoirs (Siságua) of Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), and later this number was reduced to twenty-nine reservoirs that have available information. The main objective of the study is to group (typify) reservoirs of hydroelectric power plants in Minas Gerais with similar characteristics, using statistics: Principal Component Analysis (PCA) and Similarity (cluster). The results showed that the most significant parameters were turbidity, conductivity, pH, transparency, BOD and total dissolved solids, and the most explanatory morphometric characteristics were area, perimeter, volume, residence time, drainage area, mean flow long period. There was a coincidence of part of reservoir groupings for the two analyzes, and the grouping regarding the variables of water quality was related to the geographic distribution of the environments. The work contributes to systematize, organize and order the management of these environments in the State.

Key-words: reservoir, hydroelectric power station, management of water resources, water quality, morphometry

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Matriz energética no Brasil.....	5
Figura 02: Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos de Minas Gerais (UPGRH)	10
Figura 03: Ecorregiões aquáticas na América do Sul e Minas Gerais.	11
Figura 04: Dados de coleta de amostras no Siságua.....	13
Figura 05: Funcionamento de usina hidrelétrica.....	14
Figura 06: Principais atividades econômicas nas ecorregiões aquáticas de Minas Gerais.....	18
Figura 07: Etapas do desenvolvimento da pesquisa	28
Figura08 Localização dos reservatórios estudados.	30
Figura 09: Distribuição normal ou gaussiana.	31
Figura10: Quantidade de parâmetros por reservatório.....	36
Figura 11: Resultado das médias dos reservatórios para temperatura de água (°C)...	39
Figura 12: Resultado das médias dos reservatórios para turbidez (UNT)	39
Figura 13: Resultado das médias dos reservatórios para condutividade (µS/cm)	39
Figura 14: Resultado das médias dos reservatórios para pH.....	40
Figura 15: Resultado das médias dos reservatórios para oxigênio dissolvido (mg/L)..	40
Figura 16: Resultado das médias dos reservatórios para transparência (m)	40
Figura 17: Resultado das médias dos reservatórios para DBO (mg/L).....	41
Figura 18: Resultado das médias dos reservatórios para nitrato (mg/L).....	41
Figura 19: Resultado das médias dos reservatórios para nitrogênio amoniacal (mg/L)	41

Figura 20: Resultado das médias dos reservatórios para sólidos dissolvidos totais (mg/L).....	42
Figura 21: Resultado das médias de profundidade (m) dos vinte e nove reservatórios	45
Figura 22: Áreas (km ²) dos vinte e nove reservatórios	45
Figura 23: Perímetros (km) dos vinte e nove reservatórios	45
Figura 24: Volumes (km ³) dos vinte e nove reservatórios.....	46
Figura 25: Tempo de residência (dia) dos vinte e nove reservatórios	46
Figura 26: Desenvolvimento de perímetro dos vinte e nove reservatórios	46
Figura 27: Irregularidade das margens dos vinte e nove reservatórios	47
Figura 28: Altitude (m) dos vinte e nove reservatórios	47
Figura 29: Área de drenagem (km ²) dos vinte e nove reservatórios.	47
Figura 30:Fator de envolvimento dos vinte e nove reservatórios.	48
Figura 31: Vazão média de longo período (m ³ /s) dos vinte e nove reservatórios	48
Figura 32: Data de operação dos vinte e nove reservatórios	48
Figura 33: Distribuição dos dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais com dados de qualidade das águas na primeira rodada	52
Figura 34: Distribuição dos dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais com dados de qualidade das águas na segunda rodada.	53
Figura 35: Distribuição dos dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais com dados morfométricos na primeira rodada	54
Figura 36: Distribuição dos dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais com dados morfométricos na segunda rodada	56
Figura 37: Análise de agrupamento (<i>cluster</i>) de reservatórios utilizando variáveis de qualidade das águas.....	57

Figura 38: Localização dos grupos de reservatórios quanto às variáveis de qualidade das águas em Minas Gerais.	59
Figura 39: Análise de agrupamento (<i>cluster</i>) de reservatórios utilizando variáveis morfométricas.	61
Figura 40: Localização dos grupos de reservatórios quanto às variáveis morfométricas em Minas Gerais.	63
Figura 41: Análise de agrupamento (<i>cluster</i>) de reservatórios utilizando variáveis de qualidade das águas e morfométricas.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela01: Resultado das médias das variáveis para os vinte e nove reservatórios	38
Tabela 02: Correlação entre as variáveis de qualidade das águas.	43
Tabela 03: dados morfométricos dos reservatórios estudados	44
Tabela 04: Coeficientes de correlação entre as variáveis morfométricas.	50
Tabela 05: Valores dos fatores de Análise de Componentes Principais com dados de qualidade das águas na primeira rodada	52
Tabela 06: Valores dos fatores de Análise de Componentes Principais com dados de qualidade das águas na segunda rodada	53
Tabela 07: Valores dos fatores de Análise de Componentes Principais com dados morfométricos na primeira rodada	55
Tabela 08: Valores dos fatores de Análise de Componentes Principais com dados morfométricos na segunda rodada.....	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 01: parâmetros por região de coleta no reservatório	12
Quadro 02: Descrição dos campos de cada amostra no Siságua	13
Quadro 03: Enquadramento das águas doces e usos possíveis, conforme DN Copam/CERH-MG 01/2008.	16
Quadro 04: limites para as classes I, II e III de acordo com a Conama 357/05 para parâmetros de qualidade de água estudados.	19
Quadro 05: Descrição de parâmetros de qualidade das águas.....	20
Quadro 06: Descrição e obtenção de parâmetros morfométricos.....	23
Quadro 07: Exemplos internacionais de tipificação de reservatórios e lagos	25
Quadro 08: Variáveis morfométricas utilizadas no estudo e fonte das informações	32
Quadro 09: Variáveis morfométricas utilizadas no estudo e fonte das informações	37
Quadro 10: Grupo de reservatórios quanto à qualidade das águas.	58

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abradee – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica

ACP – Análise de Componentes Principais

ANA – Agência Nacional das Águas

Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica

CBEE – Companhia Brasileira de Energia Elétrica

CEEB – Companhia de Energia Elétrica da Bahia

Cemig - Centrais Elétricas de Minas Gerais

CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos

Chesf – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

cm – centímetro

CO₂ – gás carbônico

Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente

Copam – Conselho Estadual de Política Ambiental

CPEE – Companhia paulista de Energia Elétrica

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DN – Deliberação Normativa

DQA – Diretiva Quadro das Águas

DQO – Demanda Química de Oxigênio

Eletrobras – Centrais Elétricas Brasileira S.A.

hm³ – hectômetro cúbico

IAP – Instituto Ambiental do Paraná

IET – Índice de Estado Trófico

Igam – Instituto mineiro de Gestão das Águas

IQA- Índice de Qualidade das Águas

IQAR – Índice de Qualidade de Água em Reservatório

km² – quilômetro quadrado

L - litro

m – metro

m³ – metro

mg – miligrama

MG – Minas Gerais

MMA – Ministério do Meio Ambiente

°C – grau Celsius

OD – oxigênio dissolvido

pH – potencial hidrogeniônico

PNQA – Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas

s – segundo

Semad – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

Siságua – Sistema de Informação de Qualidade da Água dos Reservatórios da Cemig

UNT – Unidade Nefelometrica de Turbidez

UPGRH – Unidades de planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

USGS – Serviço Geológico dos Estados Unidos

µS – micro siemens

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Revisão.....	3
2.1	Energia hidrelétrica- evolução no Brasil	3
2.2	Legislação	6
2.3	Gestão dos recursos hídricos em Minas Gerais	9
2.4	Reservatórios de usinas hidrelétricas	13
2.5	Usos múltiplos e enquadramento das águas	15
2.6	Qualidade de Águas.....	16
2.6.1	Qualidade das águas em Minas Gerais	17
2.6.2	Parâmetros de qualidade das águas.....	18
2.6.3	Morfometria de reservatórios	22
2.7	Tipificação de ambientes aquáticos.....	24
2.8	Estatística no tratamento de dados ambientais	26
3	Materiais e métodos.....	27
3.1	Área de estudo.....	29
3.2	Base de dados	31
3.2.1.	Qualidade das águas	31
3.2.2.	Morfometria.....	32
3.3	Estatística multivariada.....	32
4	Resultados e discussão	35
4.1	Base de dados	35
4.1.1	Qualidade das águas	35

4.1.2. Morfometria.....	44
4.2 Seleção das variáveis mais relevantes.....	51
4.2.1 Qualidade das águas	51
4.2.2. Morfometria.....	54
4.3 Grupos de reservatórios	57
4.3.1 Qualidade das águas	57
4.3.2 Morfometria.....	61
4.4 Comparação de resultados	64
5 Conclusão.....	66
Referências	68

1 Introdução

A necessidade de conservação dos recursos hídricos é cada vez mais evidente. A escassez, a poluição, o assoreamento e os acidentes que interferem na qualidade e quantidade de água são noticiados com frequência. O ser humano, bem como todo tipo de vida, é essencialmente dependente da água. No caso do homem, além do consumo próprio, esse recurso garante outros usos, como navegação, irrigação, turismo, recreação e geração de energia hidrelétrica.

Com o desenvolvimento econômico e o avanço de tecnologias, a sociedade necessita cada vez mais de energia e ao longo dos anos várias fontes vem sendo exploradas, desde a lenha e hidráulica, até combustíveis fósseis, eólica e nuclear.

A rede hidrográfica do Brasil é rica e a maior parte da energia do país é proveniente da energia hidrelétrica. A obtenção dessa energia resulta do aproveitamento do potencial hidráulico dos desníveis de cursos de água gerada pela passagem das águas pelas turbinas das usinas, transformando a potência hidráulica em mecânica. Na construção das usinas hidrelétricas, os cursos de água são barrados de forma que o volume de água seja retido em reservatórios e estes operem de acordo com a necessidade de geração de energia.

Os reservatórios de água, além da função nas usinas hidrelétricas, são utilizados para outros fins. Os primeiros da história tinham a função de armazenar água principalmente para consumo humano e irrigação. A primeira usina hidrelétrica do mundo data do final do século XIX, nas Cataratas do Niágara na América do Norte. No Brasil, a primeira usina também corresponde à mesma época, sendo localizada na cidade de Diamantina, MG. Estes ambientes artificiais, relativamente recentes, são considerados por muitos como parte integrante da paisagem, e as modificações causadas no ambiente natural são despercebidas. A crescente exploração das bacias de drenagem com usos antrópicos gera impactos ambientais nos ambientes aquáticos represados, principalmente a eutrofização.

Estudos sobre reservatórios são relevantes no Brasil, devido à demanda nacional da hidroeletricidade. O monitoramento das águas é uma ferramenta para o controle da qualidade e quantidade das águas, apoiando o gerenciamento desses ambientes. Segundo Lamparelli (2004), a existência de série histórica permite a avaliação da dinâmica do corpo de água e a interdependência com condições físicas, ambientais e

socioeconômicas, estabelecendo diretrizes de ordenação de usos, investimentos e ações na bacia hidrográfica.

Os monitoramentos, de forma ampla, geram um grande volume de dados que por muitas vezes se tornam subutilizados no mundo científico, ficando restritos ao cumprimento de leis. Além da falta de divulgação dessas informações, a não confiabilidade destas, seja por erros na coleta e armazenamento de dados, frequência insuficiente ou não padronização de métodos de análises, faz com que as séries de monitoramento não sejam estudadas.

Considerando o cenário da dependência nacional das usinas hidrelétricas, o uso múltiplo das águas reservadas, os problemas que afetam à qualidade e quantidade das águas, bem como o aproveitamento de séries históricas desses ambientes, o presente trabalho se insere no contexto do Programa de Pós-Graduação de Modelagem e Análises Ambientais. O estudo busca integrar dados ambientais com o uso de ferramentas estatísticas para analisar as características mais relevantes que interferem nos reservatórios de usinas hidrelétricas e suas relações, de forma a criar um produto que subsidie a gestão e sistematização desses ambientes.

A gestão integrada de reservatórios é importante não só para manter o potencial hidráulico da represa, mas também como para minimizar os impactos gerados seja no meio ambiente ou para os usos antrópicos, ordenar a ocupação do seu entorno e bacia de contribuição e criar programas ambientais. Além disso, contribui para a manutenção e conservação e uso racional desses ambientes, minimizando conflitos e direcionando ações.

O objetivo geral do projeto é dar diretrizes e estabelecer parâmetros para um sistema de Tipificação de reservatórios de usinas hidrelétricas em Minas Gerais, como forma de sistematizar, organizar e ordenar a gestão desses ambientes no Estado. Os objetivos específicos são:

- Organizar dados dos reservatórios de usinas hidrelétricas de Minas Gerais
- Selecionar variáveis de qualidade das águas e morfometria mais relevantes
- Agrupar os reservatórios quanto às características de qualidade das águas e morfometria
- Comparar o agrupamento de qualidade das águas e características morfométrica
- Analisar a qualidade das águas dos reservatórios estudados

2 Revisão

2.1 Energia hidrelétrica- evolução no Brasil

A energia é indispensável para a sociedade atualmente. A hidroeletricidade se tornou uma forma prática e amplamente utilizada em todo o mundo. A história da eletricidade no Brasil data do final do século XIX, com a introdução da lâmpada incandescente. Em 1883 começou a funcionar a primeira usina hidrelétrica, no ribeirão do Inferno, afluente do Jequitinhonha na cidade de Diamantina (MG). A usina operava com a energia gerada de uma queda de cinco metros e a energia distribuída a dois quilômetros de distância (MEMÓRIA DA ELETRICIDADE, 2016). No ano de 1889, Minas Gerais se destaca com a primeira usina de maior porte em Juiz de Fora, no rio Paraibuna, denominada Marmelos. A primeira usina hidrelétrica do estado São Paulo foi inaugurada em 1893 e a do Rio de Janeiro em 1896.

O início do século XX foi marcado pela entrada de capital estrangeiro, especialmente canadense, americano e inglês e a pela criação companhias privadas nacionais, como a Companhia Brasileira de Energia Elétrica (CBEE), Companhia Paulista de Energia Elétrica (CPEE), Companhia Força e Luz de Minas Gerais, Companhia Sul Mineira de Eletricidade e Companhia de Energia Elétrica da Bahia (CEEB).

A década de 1930 destacou-se por novas regulamentações para o setor elétrico e alta demanda por energia. Com governo de Getúlio Vargas (1930-1945), houve maior desenvolvimento econômico impulsionado pela industrialização, o que refletiu no aumento da necessidade por energia, o que resultou em uma crise no setor elétrico por volta do ano de 1940. Durante mandato de Vargas houve a proibição de empresas estrangeiras construírem novas usinas. Ressalta-se que esse também foi um período conturbado no cenário global, correspondente a Segunda Guerra Mundial (1939-1945). O fim dos conflitos e da Era Vargas ocasionaram a retomada dos investimentos no setor elétrico.

A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf), criada ainda no fim da presidência de Vargas em 1945 e constituída em 1948, foi marcante porque apontava para um novo modelo de usinas no país: as de grande porte, além da separação entre a geração e distribuição de energia elétrica. A “Centrais Elétricas de Minas Gerais” – Cemig, foi fundada em 1952.

Durante a presidência de Juscelino Kubitscheck (1956-1961), com o incentivo para a industrialização, a necessidade de energia foi cada vez mais crescente, impulsionando a construção de novas usinas geradoras e aumento da potência instalada no país.

No ano de 1962 houve a instalação da Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobras, proposta em 1954 por Getúlio Vargas. A empresa foi constituída com a função de impulsionar estudos e projetos de construção e operação de usinas hidrelétricas, linhas de transmissão e subestações (ELETROBRAS, 2016).

A Usina Hidrelétrica de Furnas, localizada no rio Grande (MG), entrou em operação em 1963 e na época foi a maior usina do país, com 127 metros de altura máxima. Além do tamanho, a importância da usina se deve a sua localização estratégica que interliga os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro.

No período compreendido entre 1960 e 1970 o país teve um crescimento econômico, e no início dos anos 70 essa situação se reverteu (CAMPAGNOLI e DINIZ, 2012), assim como ocorreu em outras economias mundiais, afetadas pelo choque do petróleo, devido a atitude dos países árabes de aumentar drasticamente o preço do barril e passar a regular a exportação aos países importadores. (IPEA, 2010). Diante desse quadro, o governo brasileiro procurou diminuir a dependência de importações investindo nas indústrias siderúrgica, mineral, química e na hidroeletricidade (CAMPAGNOLI e DINIZ, 2012).

A lei 5.899 (BRASIL, 1973), que dispõe sobre a aquisição dos serviços de eletricidade da Itaipu, de 1973, estabeleceu a integração interestadual dos sistemas elétricos e aproveitamento binacional. Com base nessa lei, a Eletrobras criou diretrizes para a expansão de energia nas regiões Sul e Sudeste, por meio do “Plano 90”, uma vez que a meta dessas ações era até 1990 (CAMPAGNOLI e DINIZ, 2012). Em 1974 iniciaram as obras para a construção da Itaipu Binacional, no rio Paraná. A usina, que na época foi a maior do mundo, começou a produzir energia em 1984. Atualmente, Itaipu só não é maior que a usina Três Gargantas, na China (ITAIPU, 2016).

A constituição de 1988 (BRASIL, 1988), no artigo 175 estabelece que as concessões, incluindo do setor elétrico devem passar por licitação. Em 1989, foi lançado Plano de Desestatização durante o governo de Fernando Collor de Melo, que teve continuidade nos governos seguintes, especialmente no mandato de Fernando Henrique Cardoso (FHC), em que houve mudança dos serviços públicos às empresas privadas, incluindo as concessionárias de energia elétrica. A fase de privatizações intensificou-se entre 1990 e o fim do governo FHC, em 2002. (CAMPAGNOLI e DINIZ, 2012).

Nos anos 2001 e 2002 houve uma grave crise no setor elétrico, conhecida por “Apagão”, uma vez que eram frequentes as interrupções do fornecimento de energia, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Sudeste. Essa crise foi resultado da falta de investimentos na geração e transmissão de energia, bem como escassez de chuva. Foi realizada uma intensa campanha para o racionamento de energia, tanto na iluminação pública quanto no comércio e residências a fim de evitar maiores danos pela falta de energia. A partir dessa situação entram em cenas as termoeletricas.

Recentemente, entre 2014 e 2015, o Brasil enfrentou uma severa crise hídrica, ocasionada pela falta de chuva. Os reservatórios tanto de abastecimento de água quanto de geração de energia operaram com níveis críticos, principalmente na região São Paulo. A situação começou com a baixa precipitação no final de 2015, e desde a crise os níveis de água dos reservatórios passaram a ser monitorados com maior rigor e divulgação.

Atualmente, a matriz energética do país é essencialmente composta por hidrelétricas (Figura 01). O Brasil possui a grande disponibilidade hídrica, que possibilita o aproveitamento hidrelétrico.

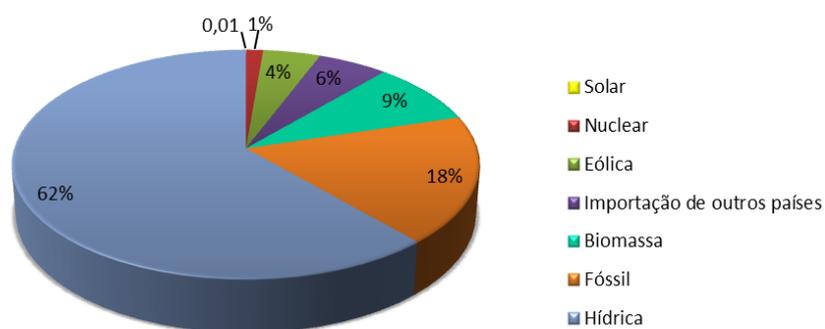


Figura 01: Matriz energética no Brasil
Fonte: Aneel, 2017.

O segmento da indústria de energia elétrica é composto basicamente pela geração, transmissão, distribuição e consumo, consistindo em uma indústria de rede. (ABRADEE, 2016). No Brasil, a partir da década de 1990, o modelo institucional do setor elétrico teve dois importantes marcos. O primeiro foi a Lei nº 9.427/1996 (BRASIL, 1996), que instituiu a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia, com o intuito de regular o setor elétrico no Brasil. Em 2004, fundamentado na Lei nº 10.847 e 10.848 (BRASIL, 2004) houve a criação de um novo modelo para o setor elétrico brasileiro, que retorna ao Estado a responsabilidade de planejamento do setor.

2.2 Legislação

Em 1904, por meio do Decreto 5.407 de 27 de dezembro (BRASIL, 1904), foi regulado o aproveitamento da força hidráulica em energia elétrica. No documento, dentre outras determinações, destaca-se um cuidado com o planejamento da obra e uma indicação de monitoramento, quando exige das concessionárias plantas topográficas, informar modificações no regime dos cursos de água, detalhar todos os aparelhos, materiais utilizados nas obras, sendo de responsabilidade do Governo fiscalizar as obras.

Em 1931, foi publicado no Decreto nº 20.395 (BRASIL, 1931), a suspensão de todos os atos de alienação, oneração, promessa ou começo de alienação ou transferência de qualquer curso perene ou queda de água. De acordo com o documento, isso ocorreu devido ao fato de a legislação ser obsoleta quanto ao aproveitamento hidráulico, devendo ser esperada a conclusão do “Código das Águas”, que na época estava em estudo e que país passava pela delicada situação do Governo Provisório.

O Código das Águas Brasileiro, definido pelo Decreto nº 24.643 de 1934 (BRASIL, 1934), se insere no contexto em que o Brasil passava por mudanças nas esferas políticas, sociais e econômicas, reflexos da “Revolução de 30”. O documento é amplo, sendo composto por três livros: I - águas em geral e sua propriedade, II - aproveitamento das águas e III - forças hidráulicas – regulamentação da indústria hidrelétrica. No código nota-se a relevância das usinas na época, uma vez que o país passava por processos de industrialização e conseqüente aumento da demanda por energia elétrica, além da predominância da matriz energética passar de térmica para hidrelétrica em meados do início do século XX. No Livro III (Forças hidráulicas – regulamentação da indústria hidrelétrica), em seu artigo 143 do Capítulo I - Energia hidráulica e seu aproveitamento, observa-se a questão de se garantir os usos múltiplos das águas, uma vez que descreve que o aproveitamento da energia hidráulica deve proteger os interesses gerais, a saber: “alimentação e das necessidades das populações ribeirinhas; da salubridade pública; da navegação; da irrigação; da proteção contra as inundações; da conservação e livre circulação do peixe e do escoamento e rejeição das águas”. Outro ponto relevante dessa lei é a indicação de monitoramento da água quanto às observações limimétricas e medições de descargas do curso de água utilizado. Esta questão é tratada no artigo 153 como uma das obrigações do concessionário da usina hidrelétrica, que deve construir e manter próximo à usina as instalações pertinentes a essas medições.

Em 1997 entrou em vigor no Brasil a Lei nº 9.433, conhecida com Lei das Águas (BRASIL, 1997), que considera em seus fundamentos:

“a água é um bem de domínio público; é um recurso natural limitado e dotado de valor econômico; a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas, com participação do Poder Público, comunidades e usuários; em caso de quantidade insuficiente de água deve-se priorizar o consumo humano e dessedentação de animais e a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos”.

A Agência Nacional das Águas (ANA) foi criada em 2000 pela Lei 9.984 (BRASIL, 2000), descrevendo-a como entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Em seu artigo 4º, a atuação da ANA

“obedecerá aos fundamentos, objetivos, diretrizes e instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos e será desenvolvida em articulação com órgãos e entidades públicas e privadas integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, cabendo-lhe: definir e fiscalizar as condições de operação de reservatórios por agentes públicos e privados, visando a garantir o uso múltiplo dos recursos hídricos, conforme estabelecido nos planos de recursos hídricos das respectivas bacias hidrográficas”.

A Resolução Conama nº 302, de 2002 dispõe sobre os parâmetros, definições e limites das Áreas de Proteção Permanente (APP) de reservatórios artificiais. As APP, situadas no entorno dos reservatórios e protegidas por lei, têm como função “preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem estar das populações humanas” (BRASIL, 2002). A resolução determina que as faixas de APP, medidas a partir do nível máximo normal é de:

- trinta metros para os reservatórios artificiais situados em áreas urbanas consolidadas e cem metros para áreas rurais;
- quinze metros, no mínimo, para os reservatórios artificiais de geração de energia elétrica com até dez hectares, sem prejuízo da compensação ambiental.

- quinze metros, no mínimo, para reservatórios artificiais não utilizados em abastecimento público ou geração de energia elétrica, com até vinte hectares de superfície e localizados em área rural.

Essas faixas poderão ser alteradas, conforme especificidades tais como: licenciamento ambiental e plano de recursos hídricos da bacia. O Novo Código Florestal (BRASIL, 2012) estabelece que para as APPs para reservatórios artificiais:

- a faixa mínima de 30 (trinta) metros e máxima de 100 (cem) metros em área rural, e a faixa mínima de 15 (quinze) metros e máxima de 30 (trinta) metros em área urbana;
- para os reservatórios artificiais de água destinados à geração de energia ou ao abastecimento público, registrados ou com seus contratos de concessão ou autorização assinados anteriormente à Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, a faixa da Área de Preservação Permanente será a distância entre o nível máximo operativo normal e a cota máxima maximorum.

O novo código reduziu as faixas mínimas de APP tanto das zonas rurais quanto urbanas, quando comparado à Conama 302, o que reduz a obrigatoriedade dessa região importante à preservação desses corpos de água.

No intuito de atender aos múltiplos usos da água, os reservatórios e rios relacionados a empreendimentos hidrelétricos se submetem às definições de características de qualidade de água por classe de enquadramento, estabelecidas pela Resolução Conama nº 357 (BRASIL, 2005).

Quanto ao monitoramento, a Aneel, juntamente com a ANA estabelecem por meio da Resolução Conjunta nº03/2010 (BRASIL, 2010) condições e procedimentos a serem adotados por

“concessionárias e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências”.

No Estado, se tratando de monitoramento, a Resolução Conjunta Semad e Igam nº 2.237, de 05 de dezembro de 2014 (MINAS GERAIS, 2014a), estabelece

“procedimentos a serem observados pelos usuários de recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais visando ao envio dos dados de monitoramento pluviométrico, limnimétrico e fluviométrico associados a reservatórios para aproveitamento hidrelétrico e para abastecimento público, e dá outras providências”.

2.3 Gestão dos recursos hídricos em Minas Gerais

No Estado de Minas Gerais, O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), criado em 1997 e regulamento em 2014 pelo decreto 46.636 (Minas Gerais, 2014), tem por “finalidade executar a política estadual de recursos hídricos e de meio ambiente formulada pela Semad, pelo CERH-MG e pelo Copam”. O Instituto é responsável por planejar e promover ações direcionadas à preservação da quantidade e qualidade das águas no Estado. A gestão dos recursos hídricos é realizada pela outorga de direito e uso da água, dos comitês de bacias hidrográficas, monitoramento de água, agências de bacias e planos de recursos hídricos (IGAM, 2017a).

A Agência Nacional das Águas (ANA) lançou em 2008 o “Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas” (PNQA), que tem como principais objetivos:

“eliminar as lacunas geográficas e temporais no monitoramento de qualidade de água; tornar as informações de qualidade de água comparáveis em âmbito nacional; aumentar a confiabilidade das informações de qualidade de água; avaliar, divulgar e disponibilizar à sociedade as informações de qualidade de água.”

Com o intuito de nortear a realização de atividades da Política Estadual de Recursos Hídricos foram delimitadas no Estado as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos – UPGRH (Figura02), totalizando 43 UPGRH. Uma maneira mais abrangente de delimitação dos recursos hídricos são as ecorregiões aquáticas, que de acordo com MMA(2009) são “áreas espaciais finitas, onde condições ambientais ou conjuntos de espécies são presumivelmente homogêneas quando comparadas à heterogeneidade observada em áreas mais amplas”. Abell *et al* (2008) espacializou em um mapa 426 ecorregiões aquáticas no mundo. Partindo dessa divisão mundial, e adaptando devido às diferenças climáticas e de drenagem, CIT (2016) estabeleceu cinco ecorregiões aquáticas para Minas Gerais (Figura03): São Francisco, Mata Atlântica Leste, Mata Atlântica Sudeste, Paraíba do Sul e Alto Paraná. As UPGRH e ecorregiões aquáticas funcionam como instrumentos para a gestão dos recursos hídricos, que auxilia nas tomadas de decisões e definição de responsabilidades, além de especializar a distribuição geográfica dos corpos de água.

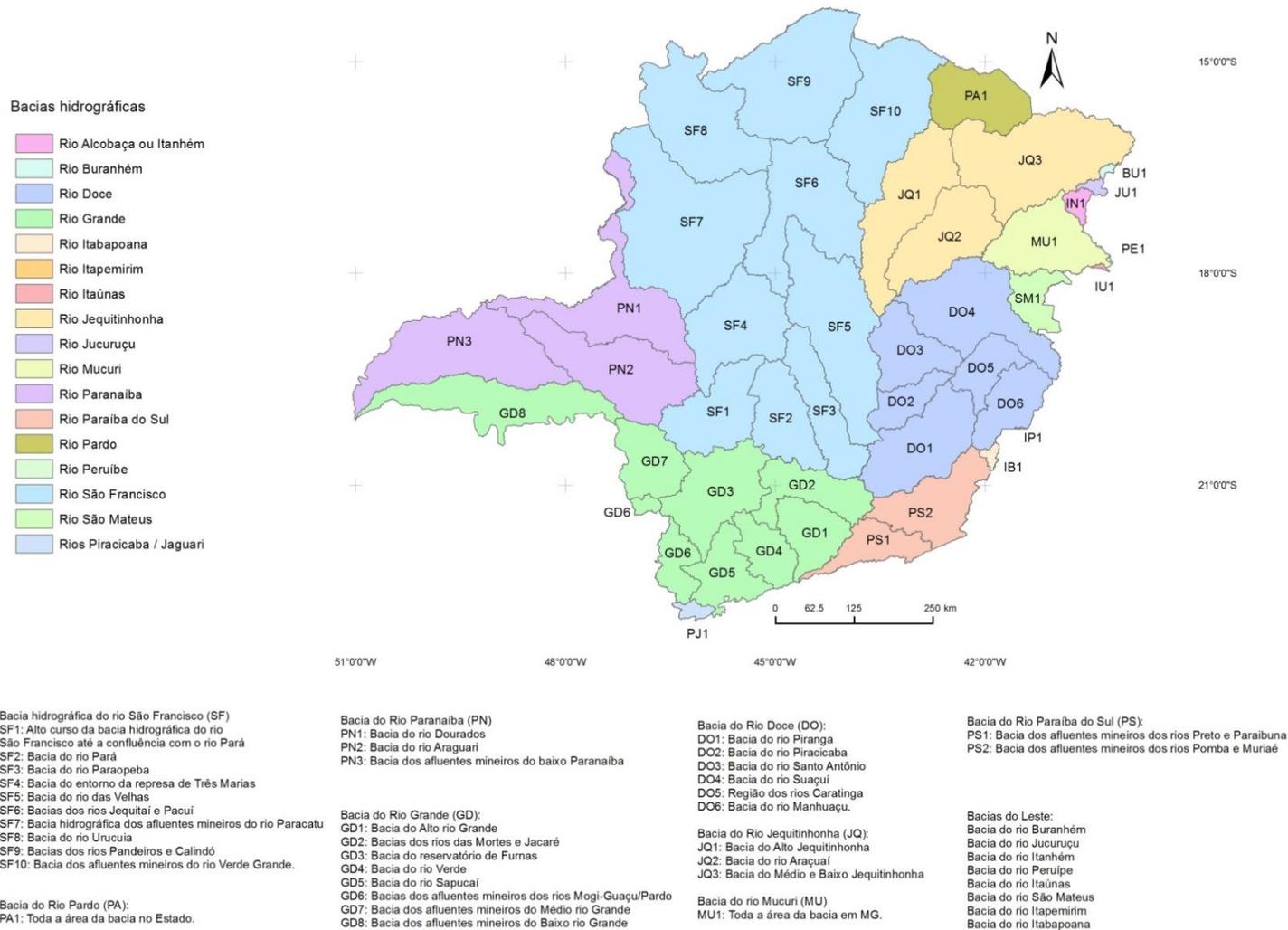


Figura 02: Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos de Minas Gerais (UPGRH)
 Fonte: IGAM, 2009 e elaborado pela autora.

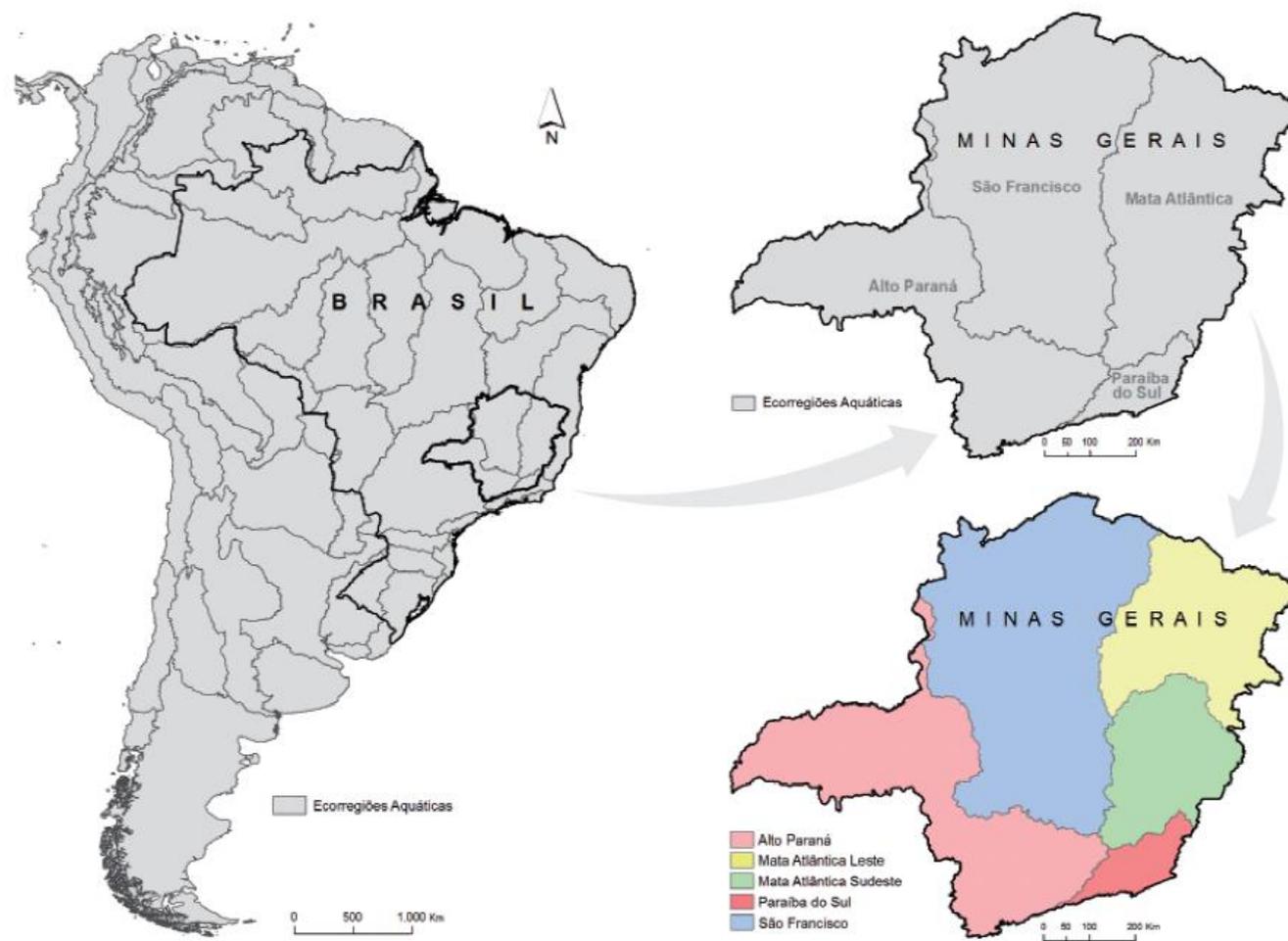


Figura 03: Ecorregiões aquáticas na América do Sul e Minas Gerais.
 Fonte: CIT, 2016.

O monitoramento das águas superficiais é realizado no estado de Minas Gerais desde 1997, por meio do Projeto “Águas de Minas”, desenvolvido pelo Igam. Atualmente a rede de coleta abrange cerca de 600 estações de amostragem em cursos de água (IGAM, 2017b). A partir de 2005, o programa foi incrementado com o monitoramento das águas subterrâneas. O resultado desse monitoramento é armazenado em um banco de dados disponibilizado no portal do Igam, por meio de relatórios e mapas com o índice de qualidade das águas.

A Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig atua na geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Os dados de monitoramento de qualidade das águas dos reservatórios e cursos de água em que a empresa possui empreendimentos são armazenados no Sistema de Informação de Qualidade da Água dos Reservatórios da Cemig – Siságua. Os dados são disponibilizados em uma plataforma *web* que permite a visualização e o *download* dos dados de coleta de água por ambiente. Nos reservatórios, as amostras são coletas na subsuperfície, metade da zona fótica e no fundo e os parâmetros indispensáveis para cada uma dessas regiões estão listados no Quadro 01.

Região de coleta no reservatório¹	Parâmetros
Subsuperfície	Transparência, temperaturas do ar e da água, óleos e graxas, coliformestermotolerantes, densidade de cianobactérias, clorofila a e malacofauna qualitativa.
Metade da zona fótica	Cor verdadeira, turbidez, pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, sólidos em suspensão, alcalinidade total, cálcio, cloreto, sulfato, fósforo total, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio amoniacal total, nitrato, óleos e graxas, ferro dissolvido, manganês total, fenóis totais.
Fundo	Cor verdadeira, turbidez, cálcio, pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, sólidos em suspensão, alcalinidade total, sulfato total, fósforo total, nitrogênio amoniacal total, nitrato, demanda bioquímica de oxigênio, ferro dissolvido, manganês total.

Quadro 01: parâmetros por região de coleta no reservatório

Fonte: Cemig, 2009.

¹Subsuperfície: 20 cm abaixo da superfície. Metade da zona fótica: metade da profundidade em que a incidência luminosa consegue penetrar na coluna de água, medida com disco de Secchi. Fundo: região de maior profundidade (Cemig, 2009).

Conforme Figura 04, os dados de coleta são organizados por código da estação, amostra, estação, situação, município, curso de água, reservatório, data, tipo e profundidade, que permite ao usuário filtrar a busca de acordo com seu interesse. O Quadro 02 descreve o significado de cada campo.

Cod. Est.	Amost.	Estação	Situação	Município	Curso D'água	Reservatório	Data	Tipo	Profund. (m)	DL	PT
C002 S	S	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	24/08/2015 13:28	Rotina	0,2		
C003 S	S	Ponto à jusante, localizado próximo a saída de água do canal de fuga.	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Santa Bárbara	Cajuru	07/07/2015 08:08	Rotina	0,2		
C002 F	F	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	07/07/2015 10:38	Rotina	6		
C002 1/2F	1/2 ZF	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	07/07/2015 10:38	Rotina	4,5		
C002 S	S	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	07/07/2015 00:00	Rotina	0,2		
C001 S	S	Ponto localizado à montante, cerca de 3Km do barramento.	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Santa Bárbara	Cajuru	07/07/2015 09:42	Rotina	0,2		
C003 S	S	Ponto à jusante, localizado próximo a saída de água do canal de fuga.	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Santa Bárbara	Cajuru	15/04/2015 08:00	Rotina	0,2		
C002 F	F	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	15/04/2015 11:33	Rotina	7		
C002 1/2F	1/2 ZF	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	15/04/2015 11:33	Rotina	1,5		
C002 S	S	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	15/04/2015 11:33	Rotina	0,2		
C001 S	S	Ponto localizado à montante, cerca de 3Km do barramento.	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Santa Bárbara	Cajuru	15/04/2015 12:39	Rotina	0,2		
C002 F	F	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	10/12/2014 12:17	Rotina	7		
C002 1/2F	1/2 ZF	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	10/12/2014 12:17	Rotina	1,5		
C002 S	S	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	10/12/2014 12:17	Rotina	0,2		
C001 S	S	Ponto localizado à montante, cerca de 3Km do barramento.	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Santa Bárbara	Cajuru	10/12/2014 13:00	Rotina	0,2		
C003 S	S	Ponto à jusante, localizado próximo a saída de água do canal de fuga.	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Santa Bárbara	Cajuru	10/12/2014 10:58	Rotina	0,2		
C003 S	S	Ponto à jusante, localizado próximo a saída de água do canal de fuga.	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Santa Bárbara	Cajuru	03/10/2014 08:34	Rotina	0,2		
C002 F	S	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	03/10/2014 10:35	Rotina	7		
C002 S	S	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	03/10/2014 10:35	Rotina	0,2		
C002 1/2F	1/2 ZF	Ponto localizado no reservatório da PCH Cajuru	Ativada	Carmo do Cajuru	Rio Pará	Cajuru	03/10/2014 10:35	Rotina	1,5		

Figura 04: Dados de coleta de amostras no Siságua
Fonte: Siságua, 2015.

Informações da amostra	Descrição
Código da estação	Identificação do ponto
Amostra	Subsuperficial, metade da zona fótica, fundo ou margem
Estação	Descrição da localização
Situação	Ativada ou desativa
Município	Município em que o ponto se localiza
Curso de água	Curso onde o ponto se localiza
Reservatório	Nome do reservatório monitorado
Data	Data e hora de coleta
Tipo	Rotina ou emergencial

Quadro 02: Descrição dos campos de cada amostra no Siságua
Fonte: Cemig, 2009.

2.4 Reservatórios de usinas hidrelétricas

A construção de represas é uma das mais antigas e importantes intervenções humanas nos sistemas naturais. Reservatórios interferem nos cursos de água alterando o fluxo e os sistemas terrestres e aquáticos de uma forma drástica e efetiva, além de modificar a natureza física, química e biológica das águas. Proporcionam

também benefícios como reserva de água para hidroeletricidade, navegação, irrigação, águas para abastecimento público e controle de cheias. (TUNDISI,1999).A Resolução Conama nº 302 (BRASIL, 2002), no artigo 2º conceitua reservatório artificial como “acumulação não natural de água destinada a quaisquer de seus múltiplos usos”.

A energia hidrelétrica é proveniente da transformação de energia hidráulica em elétrica. Para isso é preciso construir usinas em cursos de água com desníveis do relevo e que tenham volume de água abundante. A estrutura básica de uma usina é composta pelo barramento de um curso de água que origina um reservatório; o canal, onde a água passa quando as comportas são abertas; turbinas; geradores; transformador; fluxo de saída e as linhas de transmissão, que distribuem a energia obtida, conforme Figura 05.

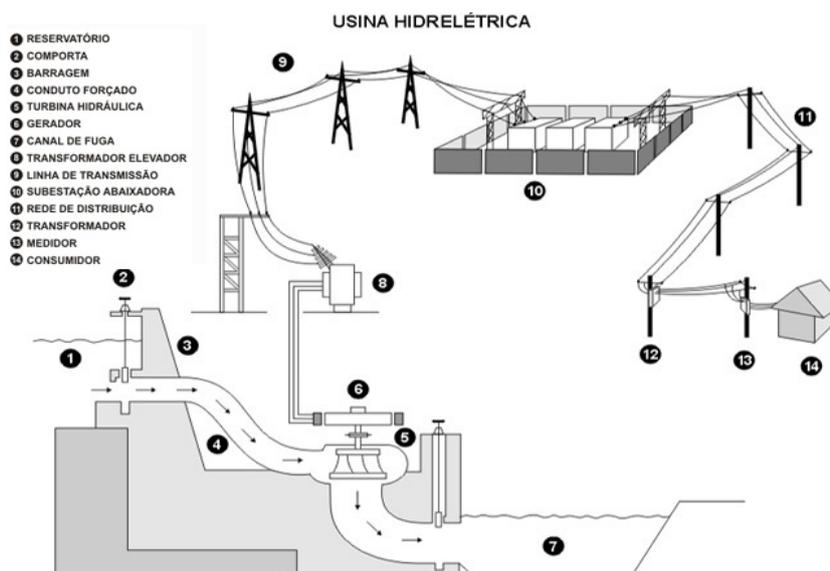


Figura 05: Funcionamento de usina hidrelétrica

Fonte: Furnas, 2016.

As usinas são classificadas de acordo com sua potência e área do reservatório (Aneel, 2005):

- CGH – Centrais Geradoras Hidrelétricas: até 1 MW de potência instalada, a fio d’água e normalmente com barragem somente para desvio do curso de água;
- PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas: entre 1,1 MW e 30 MW de potência instaladas e reservatórios com área de máximo 3 km²;

- UHE – Usina Hidrelétrica de Energia: mais de 30 MW de potência instalada e reservatório com mais de 3 km².

As represas se diferem de lagos naturais, desde a sua origem até as características que as acompanham ao longo de sua vida útil. Algumas dessas diferenças são a estratificação térmica e consequente dinâmica de nutrientes e de outros compostos químicos: em lagos predominam gradientes verticais, ao passo que em represas ocorrem com mais frequência gradientes horizontais (SPERLING, 1999). Além disso, os lagos são considerados como ambientes lênticos, e embora por muitas vezes as represas também recebam essa denominação, o adequado é o termo “ambientes lóticos represados”, uma vez que os reservatórios fazem parte de um curso de água (lótico) e não um ambiente isolado.

De acordo com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2015) os fatores básicos que melhor definem um lago são clima, *inputs* atmosféricos (precipitação, partículas), rocha, solo, uso do solo e morfometria. Os maiores problemas ambientais nos lagos são: proliferação excessiva de algas, aporte de sedimentos, depleção de oxigênio, grandes variações do nível de água e espécies exóticas. Quanto à bibliografia, especialmente a internacional, grande parte dos estudos se refere aos lagos naturais, sendo necessário avanços em trabalhos que avaliam a ecologia das represas.

Em Minas Gerais, os reservatórios de energia hidrelétrica têm volume, formas e profundidades diversas, ou seja, características morfométricas distintas. Além disso, estão localizados em diferentes regiões do Estado, recebendo interferência de diferentes usos do solo em suas bacias hidrográficas. Sendo assim, esses ambientes tendem a diferentes qualidades das águas.

2.5 Usos múltiplos e enquadramento das águas

Os recursos hídricos oferecem uma versatilidade de uso, que pode variar de acordo com a qualidade e quantidade de água, localização, características físicas e biológicas. Conforme a Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), que institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos, “a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas”. Esses usos podem ser classificados como consuntivos, quando parte da água utilizada é consumida, como na irrigação e abastecimento público e uso não consuntivo, em que não provoca a diminuição da quantidade de água, como na pesca, recreação e navegação.

O enquadramento dos corpos de água em classes, de acordo com os usos preponderantes da água também é contemplado nessa lei. Essa classificação tem como objetivos garantir a qualidade da água condizente com os usos mais exigentes e reduzir gastos com poluição das águas. O enquadramento, bem como os possíveis usos correspondentes a cada classe são listados no Quadro03, sendo que a classe especial refere-se a usos mais exigentes e a classe IV usos que não necessitam de água com alto grau de qualidade.

Classe	Usos possíveis
Especial	Abastecimento para consumo humano com desinfecção, preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e preservação dos ambientes aquáticos em unidade de conservação de proteção integral
I (Um)	Abastecimento para consumo humano após tratamento simplificado, proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário (natação), irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que desenvolvem rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película
II (Dois)	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional, proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário; irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; aquicultura e atividade de pesca.
III (Três)	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; pesca amadora; recreação de contato secundário; dessedentação de animais
IV(Quatro)	Navegação; harmonia paisagística; usos menos exigentes

Quadro 03: Enquadramento das águas doces e usos possíveis, conforme DN Copam/CERH-MG 01/2008.

Fonte: Igam, 2016.

2.6 Qualidade de Águas

Os índices são métodos frequentemente usados para indicar condições de qualidade dos ambientes aquáticos. O Índice de Qualidade das Águas (IQA), utilizado para águas superficiais foi desenvolvido pela Fundação Nacional Sanitária dos Estados Unidos, por meio da seleção de variáveis por profissionais da área ambiental escolhidas pela sua importância na qualidade das águas. Os parâmetros escolhidos foram: oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, pH, demanda bioquímica de oxigênio, nitrato, fosfato total, variação da temperatura da água, turbidez e sólidos totais. (IGAM, 2012). Cada um desses parâmetros recebeu um “peso” relativo de acordo com a sua influência no meio aquático. Este índice é habitualmente utilizado para ambientes lóticos. Os valores de IQA variam de 0 a 100, sendo que quanto maior o valor, melhor a qualidade dos ambientes. As classes são ótima, boa, razoável, ruim e péssima.

O Índice de Estado Trófico (IET) objetiva classificar corpos de água quanto ao enriquecimento por nutrientes, classificando o ambiente em diferentes graus de trofia, desde o mais baixo, ultraoligotrófico, passando por oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, supereutrófico e até o mais alto, hipereutrófico. O IET é muito utilizado para qualificar reservatórios e lagos, uma vez que os ambientes lênticos são mais susceptíveis a eutrofização. (IGAM, 2012).

O Instituto Ambiental do Paraná – IAP, criou o Índice de Qualidade de Água em Reservatório – IQAR, que assim como no IQA, variáveis significativas foram selecionadas e a cada uma atribuíram-se pesos, de acordo com sua importância. Os parâmetros escolhidos foram: déficit de oxigênio dissolvido, clorofila a, fósforo total, profundidade, demanda química de oxigênio (DQO), tempo de residência, nitrogênio inorgânico total, cianobactérias e profundidade média. Os valores de IQAR variam de 0 até > 5,51, e suas classes são não impactado a muito pouco degradado, pouco degradado, moderadamente degradado, criticamente degradado a poluído, muito poluído e extremamente poluído (PNQA, 2016).

2.6.1 Qualidade das águas em Minas Gerais

No estado de Minas Gerais predominam a agricultura, pecuária, mineração e indústria como principais atividades econômicas. Essas atividades nas bacias de contribuição ocasionam impactos negativos nos recursos hídricos. Além disso, o lançamento de efluentes domésticos é outra grave pressão sobre os corpos de água, devido à falta de saneamento básico em muitos municípios.

As principais interferências negativas sofridas pelas águas do Estado em decorrência das atividades são: aporte de sedimentos, contaminação, aumento de carga orgânica, diminuição de vazão, alterações físicas e mudanças no ciclo hidrológico. Ressalta-se que os próprios reservatórios causam alterações e impactos nos cursos de água.

Baseando-se na divisão de ecorregiões aquáticas de Minas Gerais, a Figura 06 representa as principais atividades por região. O São Francisco destaca-se por apresentar todas as principais atividades econômicas de Minas Gerais, com áreas de pecuária, agricultura, reflorestamento, indústria, mineração e a principal região urbana do Estado - a Região Metropolitana de Belo Horizonte. Em 2015, ocorreu na Mata Atlântica Sudeste o maior desastre ambiental do país, com vazamento de toneladas de rejeitos de minério de ferro decorrente do rompimento da barragem de Fundão em Mariana. Esse grave acidente demonstra como uma atividade pode ter consequência imensuráveis e não só pontualmente, uma vez que a lama escoou pela drenagem

atingindo um rio nacional, o rio Doce, levando destruição em municípios de Minas Gerais, Espírito Santo até o oceano. Usinas hidrelétricas tiveram suas atividades interrompidas ao longo dos cursos de água atingidos.



Figura 06: Principais atividades econômicas nas ecorregiões aquáticas de Minas Gerais.

Fonte: CIT, 2016.

2.6.2 Parâmetros de qualidade das águas

A qualidade das águas pode ser avaliada por parâmetros de natureza física, química e biológica. Essas variáveis podem expressar alterações e distúrbios que ocorrem tanto no corpo de água quanto na sua bacia de contribuição. É importante comparar os valores desses parâmetros com a legislação, seja para águas de abastecimento, residuárias, mananciais ou corpos receptores, a fim de atestar sua real qualidade.

Como o objeto de estudo desse trabalho são os reservatórios englobados no Siságua, nas amostras coletadas na metade da zona fótica, os parâmetros contemplados nessa situação serão explorados. O Quadro04 apresenta os limites dessas variáveis de acordo com a Conama 357/05 (BRASIL, 2005) e o Quadro 05 descreve a importância desses parâmetros e suas fontes naturais e antrópicas.

Parâmetros	Unidade	Classe I	Classe II	Classe III
Cor verdadeira	mgPt/L	Nível de cor natural do corpo de água	75	75
Turbidez	UNT	40	100	100
pH	-	6 - 9	6 - 9	6 - 9
Oxigênio dissolvido	mg/L	Não inferior a 6	Não inferior a 5	Não inferior a 4
Cond. elétrica	µS.cm-1	-	-	-
Sólidos totais dissolvidos	mg/L	500	500	500
Sólidos em suspensão	mg/L	50	100	100
Alcalinidade total	mg/L	-	-	-
Cálcio	mg/L	-	-	-
Cloreto	mg/L	250	250	250
Sulfato	mg/L	250	250	250
Fósforo total	mg/L	0,020 (lêntico), 0,025 (intermediário), 0,1 (lóticos e intermediários)	0,030 (lêntico), 0,050 (intermediário), 0,1 (lóticos e intermediários)	0,05 (lêntico), 0,075 (intermediário), 0,15 (lóticos e intermediários)
Nitrogênio amoniacal total	mg/L	3,7: pH ≤ 7,5 2,0: 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0: 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5: pH > 8,5	3,7: pH ≤ 7,5 2,0: 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0: 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5: pH > 8,5	13,3: pH ≤ 7,5 5,6: 7,5 < pH ≤ 8,0 2, 2: 8,0 < pH ≤ 8,5 1,0: pH > 8,5
Nitrato	mg/L	10	10	10
DBO	mg/L	Até 3	Até 5	Até 10
Ferro dissolvido	mg/L	0,3		5
Manganês total	mg/L	0,1	0,1	0,5
Fenóis totais	mg/L	0,003		0,01
Substâncias tensoativas	mg/L LAS	0,5	0,5	0,5

Quadro 04: limites para as classes I, II e III de acordo com a Conama 357/05 para parâmetros de qualidade de água estudados.

Fonte: Brasil, 2005, adaptado pela autora.

Parâmetro	Descrição/Importância	Origem (N:natural, A: antropogênica)
Cor verdadeira	Representa a coloração da água. Não apresenta riscos diretos à saúde	N: ferro e manganês, decomposição de matéria orgânica. A: esgotos domésticos e industriais
Turbidez	Medida da dificuldade da luz atravessar a água. Está diretamente relacionada com partículas sólidas em suspensão. Valores elevados de turbidez podem ser prejudiciais ao equilíbrio de um corpo de água, uma vez que dificultam a penetração da luz no meio e consequentemente compromete a fotossíntese. Além disso, as partículas suspensas podem trazer substâncias nocivas aos organismos	N: partículas de rocha e microorganismos. A: Esgotos domésticos e industriais, erosão
pH	Potencial hidrogeniônico (pH) é um índice que varia de 0 a 14 e indica se uma substância é ácida (<7), neutra (7) ou básica (>7). O pH tem interferência no metabolismo de espécies aquáticas, e variações nos valores podem potencializar os efeitos de substâncias tóxicas nos organismos	N: dissolução de rochas, oxidação da matéria orgânica, fotossíntese, absorção de gases atmosféricos. A: Esgotos domésticos e industriais.
Oxigênio Dissolvido	É obtido em lagos e reservatórios principalmente por meio de fotossíntese, reações químicas e do contato do ar com o corpo de água. A diminuição do OD pode ser ocasionada por redução de nível de água, excesso de matéria orgânica e em ambientes lênticos em que há piscicultura intensa, gerando desequilíbrio no ecossistema e mortalidade de espécies. Os principais consumidores do OD são a respiração dos organismos, decomposição de matéria orgânica e reações químicas	N: dissolução de oxigênio atmosférico, fotossíntese. A: aeração artificial
Condutividade elétrica	Mede a capacidade que a água tem de transmitir corrente elétrica e está diretamente relacionada à concentração de espécies iônicas dissolvidas, principalmente inorgânicas. A condutividade está diretamente relacionada com a concentração de sólidos dissolvidos totais, e é influenciada pela temperatura da água.	Pode ser alterada pela temperatura e presença de sólidos dissolvidos, tanto de origem natural ou antrópica.
Sólidos totais dissolvidos	Constituídos por partículas de diâmetro inferior a 10-3 µm e que permanecem em solução mesmo após a filtração	N: processos erosivos, organismos e detritos orgânicos. A: esgotos domésticos e industriais.
Sólidos em suspensão	Constituídos por partículas passíveis de retenção por processos de filtração	N: processos erosivos, organismos e detritos orgânicos. A: esgotos domésticos e industriais.
Alcalinidade total	A alcalinidade da água é representada pela presença dos íons hidróxido, carbonato e bicarbonato. Está relacionada à dureza, sendo responsável pela precipitação de carbonatos que provocam incrustações. Não representa um risco potencial à saúde.	N: dissolução de rochas e reação do CO ₂ (atmosférico ou de decomposição de matéria orgânica) com a água. A: esgotos industriais

Continua...

Quadro 05: Descrição de parâmetros de qualidade das águas
 Fonte: adaptado de Cetesb (2009), FUNASA (2014), Sperling (2005), ANA (2016),
 elaborado pela autora.

...continuação.

Cálcio total	O cálcio é um dos componentes que origina dureza na água, e é originado pela dissolução de rochas calcáreas. Por esse motivo, as águas subterrâneas tendem a ter maior quantidade de cálcio do que águas superficiais,	N: dissolução de rochas A: esgotos domésticos e industriais
Cloreto	O cloreto é o ânion Cl^- , provenientes principalmente de esgotos domésticos e efluentes de indústrias. O cloreto é um importante para a potabilidade da água, uma vez que em altas concentrações altera o sabor da água, tornando-a salgada e pode ocasionar problemas quanto à corrosão de tubulações hidráulicas.	N: dissolução de rochas, intrusão de águas salinas. A: esgotos domésticos e industriais, água utilizada em irrigação
Sulfato	É um dos íons mais abundantes na natureza. O excesso na água para consumo humano pode provocar efeito laxativo e para abastecimento público incrustações nas instalações.	N: dissolução de solos e rochas e oxidação do sulfeto. A: esgotos domésticos e industriais, fertilizantes.
Fósforo total	É um importante nutriente, e seu excesso na água pode causar eutrofização.	N: dissolução de compostos do solo, decomposição de matéria orgânica e fósforo de composição celular. A: esgotos domésticos e industriais, detergentes, excrementos de animais, insumos agrícolas.
Nitrogênio amoniacal total	É proveniente da hidrólise da ureia. A amônia é um tóxico limitante à vida dos peixes, e provoca consumo de oxigênio dissolvido das águas naturais.	N: composição celular. A: esgotos domésticos, insumos agrícolas.
Nitrato	O principal impacto ambiental ocasionado pelo excesso de nitrato é a eutrofização das águas e para a saúde humana, pode ocasionar uma doença letal para crianças, ametahemoglobinemia.	N: atmosfera A: esgotos domésticos, insumos agrícolas
DBO	A Demanda Bioquímica de Oxigênio representa a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente na água através da decomposição microbiana aeróbia. Valores altos estão associados por substâncias orgânicas.	N: dissolução do oxigênio atmosférico. A: esgotos domésticos, efluentes industriais e de criatórios de animais.
Fero Dissolvido	Não é tóxico, mas pode alterar o sabor e cor da água.	N: dissolução de componentes do solo. A: processos erosivos nas margens, efluentes industriais
Fenóis totais	Funções orgânicas caracterizadas por uma ou mais hidroxilas ligadas a um anel aromático. Tóxico ao homem e aos organismos aquáticos.	A: efluentes industriais
Substâncias tensoativas	São substâncias usadas para reduzir a tensão superficial, como sabões e detergentes. A presença dessas substâncias nos corpos de água podem gerar formação de espuma, que diminui a entrada de luz e reduzir o tempo com que as bolhas de ar ficam na superfície, devido a propriedade tensoativa.	A: efluentes domésticos e industriais

2.6.3 Morfometria de reservatórios

A morfometria engloba a quantificação das dimensões físicas de um indivíduo, elemento ou sistema. De maneira geral, quando comparado aos parâmetros de qualidade das águas, os morfométricos podem ser considerados de mais fácil obtenção, uma vez que não exigem um monitoramento constante, pois variam menos e podem ser obtidos via sensoriamento remoto ou por fórmulas, eliminando visitas *in situ*. Os dados morfométricos podem ser aliados na avaliação de eventos físico-químicos e biológicos e compreensão da dinâmica dos reservatórios.

Os parâmetros morfométricos podem ser do tipo primário, que são obtidos por medições em campo e escritório. ou secundários, gerados por fórmulas matemáticas. Esses parâmetros têm um significado limnológico, ou seja, são aliados na avaliação de eventos físico-químicos e biológicos e compreensão da dinâmica e ecologia dos reservatórios. Para exemplificar, um reservatório com uma forma menos circular terá um maior contato da sua região litorânea, ou seja, maior contato da área aquática com a terrestre. Sendo assim, o corpo de água sofrerá uma maior interferência do uso do solo sobre o ambiente se sua forma se afastar mais de um círculo. Essa medida é chamada de desenvolvimento de perímetro, que é relação entre o perímetro do lago e a circunferência de um círculo que possua a mesma área do lago. Corpos d'água com elevado desenvolvimento de perímetro têm boa capacidade de assimilação de impactos poluidores e maior resistência ao estabelecimento da eutrofização (SPERLING, 1999).

De acordo com Sperling (1999), a morfometria pode influenciar nos sistemas aquáticos quanto: a exposição à radiação solar; capacidade assimiladora do ambiente aquático; processos hidrológicos e hidrodinâmicos; estratificação; circulação; produtividade biológica; ciclagem de nutrientes; grau de trofia; erosão, transporte e acumulação de nutrientes e usos da água.

O Quadro 06 apresenta a descrição de parâmetros morfométricos utilizados no presente trabalho, bem como a fonte dos dados.

Descrição	Obtenção
Altitude do barramento (m): altitude do barramento em relação ao nível do mar.	Fonte: Google Earth.
Área reservatório –A_r(km^2): área do espelho de água. Convencionou-se a medida no período seco pela disponibilidade de imagens.	Fonte: medido via sensoriamento remoto.
Fator de envolvimento – F (adimensional): razão entre as áreas da bacia hidrográfica e a do reservatório. Para lagos naturais os valores mais comuns são de dezenas, e para reservatórios artificiais, esse valor pode atingir centenas. Quanto $> F$, menor a capacidade de diluição do sistema aquático frente ao material transportado a partir de sua bacia.	$F = A_{r_b} / A_r$ Em que: A_{r_b} = área da bacia (km^2) e A_r = área do reservatório (km^2).
Profundidade média do reservatório (m): razão entre o volume máximo e a área máxima do reservatório.	$D = V_{max} / A_{r_{max}}$ Em que: V_{max} = volume máximo (m^3) e $A_{r_{max}}$ = área máxima (m^2)
Volume máximo do reservatório (hm^3): máximo volume do reservatório.	Fonte: Cemig
Perímetro: comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas.	Fonte: medido via sensoriamento remoto.
Desenvolvimento do perímetro (D_p): relação entre o perímetro do lago e a circunferência de um círculo que possua a mesma área do lago, sendo adimensional. Quanto mais próximo de uma forma circular for o reservatório, mais o valor de D_p se aproxima da unidade.	$D_p = P / (2 \cdot \pi \cdot R)$ Em que: R = Raio, P = Perímetro e A = área
Coefficiente de compacidade (K_c): relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de mesma área da bacia. O K_c é sempre um valor > 1 (se fosse 1 a bacia seria um círculo perfeito). Quanto menor o K_c (mais próximo da unidade), mais circular é a bacia, menor o T_c e maior a tendência de haver picos de enchente.	$K_c = P_b / P_c$ Em que: K_c = coeficiente de compacidade, P_c = perímetro do círculo de mesma área da bacia, P_b = perímetro da bacia.
Irregularidade de margem: estabelece a forma. Se $F=2$: forma circular, $2,6 < F < 3$: forma alongada e se $F > 3$ forma desmembrada.	$F = P / \sqrt{A \cdot \pi}$ Em que: P = perímetro e A = área.
Tempo de residência: quanto mais rápido o reservatório renova suas águas (menor tempo de residência) melhor, uma vez que os poluentes são expulsos antes que causem danos maiores à biota aquática.	Fonte: Cemig.
Flutuação do nível das águas (m): variação do nível da água.	Fonte: Cemig

Quadro 06: Descrição e obtenção de parâmetros morfométricos.
Fonte: Sperling (1999); Neto e Coelho (2002); Tonello (2005); Carvalho e Silva (2006) e UFRRJ (2015). Elaborado pela autora.

2.7 Tipificação de ambientes aquáticos

Grande parte dos estudos sobre ambientes aquáticos lênticos (de água parada ou de pouco fluxo) são sobre lagos. Embora eles se diferenciem dos reservatórios, desde sua origem (natural, no caso dos lagos) até em suas características (morfometria, renovação das águas), esses estudos também foram usados como referência deste trabalho.

As classificações de corpos de água surgiram na Europa por meio da DQA – Diretiva Quadro das Águas (2000), documento oficial da Comunidade Europeia,

“criado com o objetivo de estabelecer um marco estratégico para a gestão dos ecossistemas aquáticos e estabelecer um quadro de ação comunitária no domínio da política da água por meio da coordenação, integração e adaptação das estruturas normativas e institucionais dos Estados Membros aos princípios gerais de proteção.”

À essa classificação dos ambientes aquáticos se dá o nome de tipificação, que é o agrupamento de corpos de água em tipos com características geográficas e hidrológicas relativamente homogêneas (INAG, 2009). O Quadro07 contempla as variáveis utilizadas na tipificação de reservatórios e lagos baseado em experiências internacionais.

A proposta da DQA para tipificação baseia-se em variáveis físico-química e hidromorfológicas. Portugal elaborou tipos para reservatórios (chamadas de “albufeiras”, no português de Portugal) e trabalhou principalmente com variáveis morfométricas para essa classificação. O número de ambientes trabalhados em todo o país foi setenta e sete, utilizando vinte e três variáveis, com a técnica estatística de Análise de Componentes Principais (ACP) para avaliar a explicação de cada parâmetro no modelo. Para separar os reservatórios em grupos foi usado o método de agregação hierárquica de Ward, que separou os ambientes em três grupos principais, de acordo com a posição geográfica: “albufeiras” do Tejo e Douro, “albufeiras” do Sul e “albufeiras” do Norte (INAG, 2009).

Local, documento	Variáveis
União Europeia (Diretiva Quadro das Águas)	Altitude área de drenagem, profundidade, geologia, latitude, longitude, profundidade média, forma do lago, tempo de residência, temperatura ar, amplitude térmica do ar, capacidade de neutralizar ácidos, estado de referencia de concentração de nutrientes, composição media do substrato, flutuação do nível das aguas, características de mistura – estratificação.
Portugal (Qualidade Ecológica e Gestão Integrada de Albufeiras)	Área inundada, altitude, profundidade média, altitude latitude, longitude, geologia, profundidade máxima, volume, desenvolvimento da margem, índice de forma, temperatura média do ar, variação média do nível da água, profundidade média, grau de mineralização, dureza da água, área da bacia de drenagem, declive médio da bacia de drenagem, densidade da rede de drenagem, distância à nascente, distância à foz, número de afluentes, número de ordem máximo, evapotranspiração real média anual, precipitação média anual na bacia e temperatura média anual na bacia.
Chile (Classificação de corpos de água)	Altitude, tamanho do lago, condutividade elétrica, profundidade, estratificação.
Coreia (Caracterização os efeitos do uso do solo e morfometria na qualidade da água de reservatórios)	Uso do solo; altitude, altura de margem; perímetro, comprimento e área do reservatório; área da bacia de contribuição; oxigênio dissolvido; demanda química de oxigênio; sólidos suspensos totais; nitrogênio total; fósforo total; clorofila a.

Quadro 07: Exemplos internacionais de tipificação de reservatórios e lagos
Fonte: DQA(2000), INAG (2009), Fuente (2010) e Park et al (2014), elaborado pela autora

A metodologia aplicada em Portugal foi testada para comprovar se os tipos abióticos expressavam um significado biológico, em outras palavras, se as comunidades biológicas eram próprias de cada tipo de ambiente. Para isso, utilizou-se a comunidade de peixes, uma vez que é o grupo que apresenta dados em um número maior de reservatórios. Após a realização de procedimentos estatísticos, a divisão dos três tipos de “albufeiras” foi validada biologicamente por espécies de peixes.

2.8 Estatística no tratamento de dados ambientais

O Brasil, quando comparado a outros países, como os Estados Unidos e países europeus, não possui uma longa série histórica de monitoramento de dados ambientais, o que dificulta análises estatísticas consistentes. Ao longo das últimas décadas, com o aumento da preocupação com as questões ambientais e saúde humana, bem como legislações que exigem monitoramento, a quantidade de informações geradas vem aumentando. No entanto, esses dados, por muitas vezes, não têm continuidade após os esforços de coleta de campo e análises laboratoriais. A inutilização deste material se dá tanto pela pouca divulgação, quanto pela não disponibilidade ou pela falta de consistência e confiabilidade das informações, que impedem que sejam aplicados procedimentos estatísticos, por exemplo.

Os dados de qualidade de água, de maneira geral, são obtidos por meio das etapas de coleta, análise laboratorial dos parâmetros e disponibilização de resultados. De modo a promover um estudo de dados de monitoramento, alguns cuidados devem ser tomados de forma a conferir qualidade aos resultados:

- Coleta: precisão no local de amostragem; uso de equipamentos, método e recipientes adequados; sazonalidade; preservação das amostras até a análise laboratorial; equipe experiente.
- Laboratório: uso de mesmo método e equipamentos para os parâmetros; calibração, laboratório acreditado, equipe experiente.
- Disponibilidade de informação: atenção ao digitar dados; uso de plataformas acessíveis a pesquisadores realizarem análises; divulgação do estudo.

A estatística é um instrumento amplamente utilizado para o tratamento de dados ambientais, contribuindo para a análise e interpretação de dados e auxiliando na tomada de decisões. Um inconveniente habitual dos dados ambientais é a presença de valores censurados, ou seja, abaixo do limite de detecção de métodos analíticos. Outras dificuldades no tratamento dos dados são a falta de periodicidade de monitoramento ou a falta de confiança nos valores de resultados. Essas situações acabam gerando o descarte de parte das informações para aumentar a robustez das análises.

3 Materiais e métodos

O desenvolvimento do trabalho foi executado de acordo com as etapas mostradas na Figura 07. Inicialmente, foi feita uma busca dos dados livres disponíveis, que possibilitaram definir a área de estudo de acordo com os reservatórios cadastrados no Siságua e com a existência de amostras dos ambientes. Em seguida, o desenvolvimento da pesquisa dividiu-se em duas linhas: uma referente à qualidade das águas e outra aos dados morfométricos de cada reservatório.

Na etapa de dados de qualidade de água, inicialmente, foi feito o *download* de cada amostra disponível no site Siságua, em formato PDF de todos os reservatórios que continham informação. Ao todo, foram baixados cerca de 1200 arquivos em .pdf, que posteriormente foram convertidos em planilhas do Excel, organizadas por reservatório. Foi avaliada a qualidade dos dados adquiridos, que serão explicados no item 3.2 (valores censurados, *outliers*). Alguns reservatórios e parâmetros apresentaram carência de dados e claros erros de digitação, como por exemplo, uma profundidade de 999 m, dados que foram descartados. Na sequência, foram realizadas análises estatísticas que serão descritas no item 3.2.

Paralelamente a etapa de qualidade de água, foi feito o estudo dos aspectos físicos, que levaram em consideração dados morfométricos de cada ambiente aquático. Algumas dessas informações foram disponibilizadas pela Cemig (área, volume, cota operativa, tempo de residência), outros dados (perímetro, altitude, correta localização) foram obtidos via sensoriamento remoto e os demais calculados por meio de fórmulas matemáticas.

Ao término das etapas descritas, foram adotados os mesmos procedimentos estatísticos (análise de componentes principais e *cluster*), de maneira distinta para as variáveis de qualidade da água e morfometria. Com o resultado de cada etapa, foi possível comparar se existe coerência nos resultados e quais são os ambientes semelhantes.

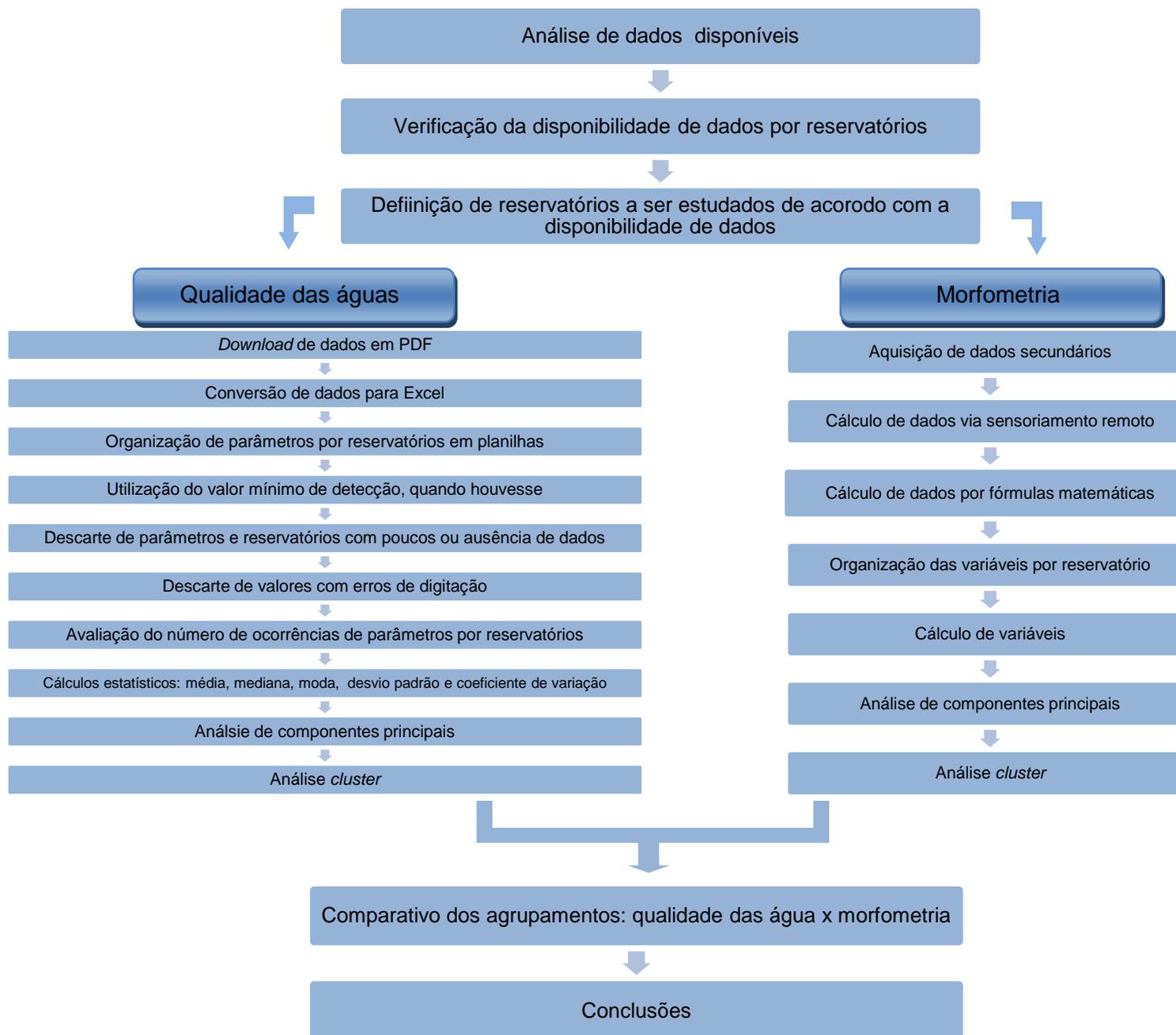


Figura 07: Etapas do desenvolvimento da pesquisa
 Fonte: elaborado pela autora

3.1 Área de estudo

Para este estudo, foram levados em consideração os quarenta e quatro reservatórios inseridos no banco de dados do Siságua. Como o objetivo deste trabalho é a avaliação dos reservatórios, foram utilizados somente os pontos que de acordo com a descrição da situação encontram-se no corpo do reservatório e na metade da zona fótica. Os 44 reservatórios considerados inicialmente foram:

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. Anil | 23. Paraúna |
| 2. Bom Jesus do Galho | 24. Peti |
| 3. Cajuru | 25. Piau |
| 4. Camargos | 26. Piçarrão |
| 5. Dona Rita | 27. Poço Fundo |
| 6. Emborcação | 28. Poquim |
| 7. Gafanhoto | 29. Rio de Pedras |
| 8. Igarapava | 30. Rosal |
| 9. Igarapé | 31. Sá Carvalho |
| 10. Irapé | 32. Salto Grande |
| 11. Itutinga | 33. Salto Morais |
| 12. Jacutinga | 34. Salto Passo Velho |
| 13. Jaguará | 35. Salto Voltão |
| 14. Joasal | 36. Santa Luzia |
| 15. Lages | 37. Santa Marta |
| 16. Luiz Dias | 38. São Bernardo |
| 17. Machado Mineiro | 39. São Simão |
| 18. Marmelos | 40. Sumidouro |
| 19. Martins | 41. Três Marias |
| 20. Miranda | 42. Tronqueiras |
| 21. Nova Ponte | 43. Volta Grande |
| 22. Paciência | 44. Xicão |

3.2 Base de dados

3.2.1. Qualidade das águas

Os dados de monitoramento de qualidade de água dos trinta e cinco reservatórios foram adquiridos no site do Siságua por meio de *download* de todas as informações (parâmetros) existentes na metade da zona fótica. Os arquivos baixados em formato pdf foram convertidos em planilhas Excel (.xml). A quantidade de amostras, bem como o número de parâmetros, variou em cada reservatório.

Os valores censurados, ou seja, abaixo do limite de detecção, foram substituídos pelo menor valor detectável, por exemplo: se o valor de Ferro total <0,001 mg/L, utilizou como valor 0,001. Outro tratamento necessário foi a remoção de valores discrepantes, os *outliers*, que podem comprometer a análise de dados. Para isso, de acordo com Lauretto (2015), utilizou-se as fórmulas dos valores “admissíveis” dentro dos limites superior (LS) e inferior(LI):

$$LI = Q1 - 1,5x IIQ$$

Em que: Q1=primeiro quartil, Q3: terceiro quartil e

$$LS = Q3 + 1,5 x IIQ$$

IIQ =intervalo inter-quartil (diferença entre Q3 e Q1).

O procedimento foi feito para cada parâmetro de cada reservatório, e a remoção dos valores de *outliers* colaborou para a redução do coeficiente de variação dos dados. Outra importante etapa para análises estatísticas ambientais é o estudo cuidadoso da distribuição das variáveis. No presente trabalho, realizou-se o teste Shapiro-Wilks (SW), considerando um nível de 5% significância. O teste SW baseia-se nos valores amostrais ordenados elevados ao quadrado, e é considerado o melhor teste de aderência à normalidade (Leotti *et al*, 2016). Muitos métodos estatísticos exigem que a distribuição dos dados seja normal, ou seja, que distribuição de probabilidade apresente um gráfico em forma de sino, também conhecida como gaussiana (Figura 09). Nela, há concentração de valores em torno de um valor central e baixa frequência de valores extremos.

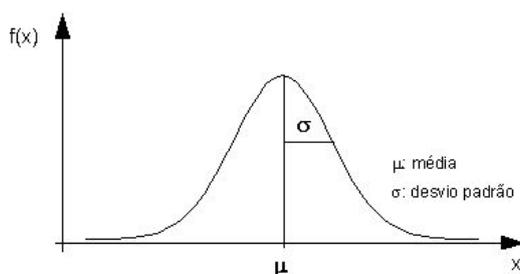


Figura 09: Distribuição normal ou gaussiana.
Fonte: Conti, 2011.

Para cada parâmetro de qualidade das águas foram também calculados medidas da estatística descritiva: média, moda, mediana, valores máximo e mínimo, desvio padrão, variância, amplitude e coeficiente de variação, com o intuito de compreender o comportamento de cada série de dados e reduzir as informações para que elas pudessem ser usadas nos demais procedimentos estatísticos. Adotou-se como valor de cada parâmetro a média de todas as amostras por reservatório, sendo a medida mais recorrente na literatura para análise de dados ambientais.

3.2.2. Morfometria

Os dados morfométricos foram fornecidos diretamente pela Cemig, por informações disponíveis no site da empresa, por medições em imagens de satélite do *Google Earth* e calculados por fórmulas matemáticas, conforme Quadro 08. Como os dados morfométricos não foram provenientes de séries históricas, ou seja, para cada parâmetro há somente um valor, não foram utilizados os procedimentos estatísticos como os apresentados no item 3.2.1 para os dados de qualidade das águas.

Variável	Unidade	Fonte
Profundidade média do reservatório	m	Siságua (Cemig)
Área do reservatório	km ²	Google Earth
Perímetro do reservatório	km	Google Earth
Volume do reservatório	hm ³	Cemig
Tempo de residência	dia	Cemig
Desenvolvimento de perímetro	-	Calculado: $\frac{Perímetro}{2\pi R}$
Irregularidade das margens	-	Calculado: $\frac{Perímetro}{\sqrt{Área\pi}}$
Altitude	m	Google Earth
Área de drenagem	km ²	Cemig
Fator de envolvimento		Calculado: $\frac{Área\ da\ bacia}{Área\ do\ reservatório}$
Vazão média de longo tempo	m ³ /s	Cemig
Data do início de operação da usina	-	Cemig

Quadro 08: Variáveis morfométricas utilizadas no estudo e fonte das informações

Fonte: elaborado pela autora

3.3 Estatística multivariada

As análises estatísticas, quando utilizadas para avaliar um conjunto de variáveis, podem ser trabalhadas isoladamente (univariada) ou em conjunto (multivariada). De acordo com Knupp *apud* Arruda (2014), a estatística multivariada é mais adequada no

tratamento de dados ambientais, uma vez que estes apresentam alta variabilidade, apresenta extração de maior quantidade de informações e considera um conjunto de dados complexo.

Dentre os métodos multivariados, está a Análise de Componentes Principais (ACP), que de acordo com Varella (2008), é uma:

“técnica estatística multivariada que consiste em transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão denominadas de componentes principais. Os componentes principais apresentam propriedades importantes: cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, são independentes entre si e estimados com o propósito de reter, em ordem de estimação, o máximo de informação, em termos da variação total contida nos dados. A análise de componentes principais é associada à ideia de redução de massa de dados, com menor perda possível da informação.”

A ACP foi aplicada ao presente trabalho com o intuito de avaliar quais variáveis, tanto de qualidade das águas quanto morfométricas, têm maior poder explicativo sobre os reservatórios, visando selecionar as variáveis mais representativas e eliminar sobreposições.

Após a seleção das variáveis pela ACP foi utilizada a análise de agrupamento (*cluster*), por meio de distância Euclidiana. A análise de *cluster* tem por objetivo “agrupar elementos de dados baseando-se na similaridade entre eles. Os grupos são determinados de forma a obter-se homogeneidade dentro dos grupos e heterogeneidade entre eles” (DONI, 2004). Os métodos de agrupamento usam frequentemente medidas de similaridade ou dissimilaridade. A mais utilizada, inclusive no presente trabalho, é a distância Euclidiana (medida de dissimilaridade), expressa genericamente por:

$$d_{ab} = \sqrt{\left[\sum_{j=1}^p (x_{aj} - x_{bj})^2 \right]}$$

em que: $p=1,2,\dots,j$; x_{aj} : valor da variável j para o indivíduo a ; x_{bj} : valor da variável j para o indivíduo b (Varella, 2017).

O método hierárquico é usualmente aplicado em agrupamentos, em que os indivíduos são ligados aos outros por similaridade, formando uma árvore de classificação, representada graficamente por dendogramas. Existem diferentes fórmulas para os agrupamentos aglomerativos, e no estudo foi utilizada a “média não ponderada de grupos pareados” (*unweighted pair-group average*), uma vez que é recorrente em

trabalhos de dados ambientais e pela sua aplicação se mostrou mais adequado do que os demais, por ser eficiente quando os indivíduos formam aglomerados naturais distintos (VIALI, 2017), situação esperada com os reservatórios. Por meio do agrupamento dos reservatórios, foram analisadas as características mais relevantes que conferiram a homogeneidade aos grupos formados.

Os dois tipos de parâmetros (qualidade das águas e morfometria) foram analisados separadamente, e após o agrupamento dos reservatórios os resultados foram comparados para avaliar se houve relação entre os dois resultados.

4 Resultados e discussão

Os resultados e discussões estão apresentados como base de dados, avaliação da qualidade das águas, seleção de variáveis mais relevantes, grupos de reservatórios e comparação de resultados.

4.1 Base de dados

4.1.1 Qualidade das águas

Dos 44 reservatórios iniciais, cinco não apresentaram nenhum dado na metade da zona fótica e três estão fora de Minas Gerais, então foram descartados da amostra. Conforme os dados disponíveis, nos trinta e cinco reservatórios, houve informação de 78 parâmetros diferentes, sendo que eles não ocorreram em todos os ambientes. O gráfico da Figura 10 mostra em quantos reservatórios cada variável ocorreu.

Nenhum parâmetro esteve presente em todos os reservatórios. Os sólidos dissolvidos totais, nitrogênio amoniacal total, nitrato, DBO, transparência, oxigênio dissolvido, pH, condutividade elétrica, turbidez, temperatura da água e profundidade foram as variáveis que ocorreram em um maior número de reservatórios (vinte e nove). Por esse motivo, esses foram os parâmetros selecionados para dar continuidade aos estudos, e seis reservatórios (Jacutinga, Jaguará, Joasal, Luiz Dias, Machado Mineiro, Marmelos) tiveram que ser excluídos da amostra por não apresentarem esses dados. Alguns parâmetros, como alacloro e berílio, foram coletados em apenas um ambiente. A variável profundidade foi retirada dessa etapa de dados de qualidade das águas e utilizada na etapa de morfometria.

Com o novo número amostral definido (29 reservatórios) e as variáveis para estudo selecionadas, as outras etapas para a consolidação dos dados foram realizadas. Inicialmente, calcularam-se dados estatísticos para cada um dos reservatórios (média, mediana, moda, valor máximo e mínimo, amplitude, desvio padrão e coeficiente de variação). Conforme citado no item 3.2, os *outliers* foram removidos, o que colaborou para a redução do coeficiente de variação.

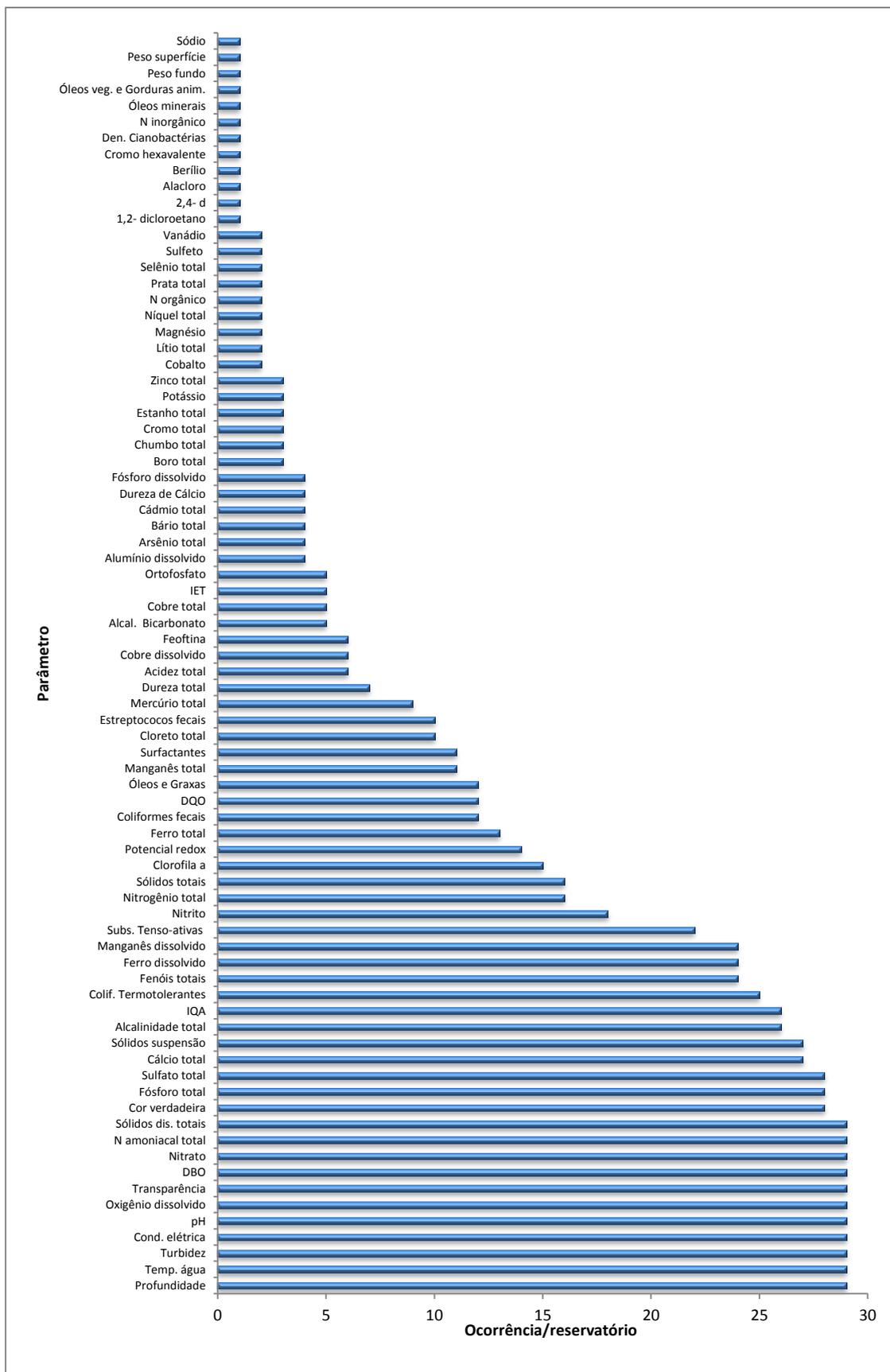


Figura10: Quantidade de parâmetros por reservatório

Fonte: elaborado pela autora.

Visando simplificar o nome dos reservatórios apresentados em tabelas, quadrados e gráficos, o quadro 09 lista os vinte e nove reservatórios estudados com suas respectivas siglas de identificação e a quantidade de dados disponível (número de coletas baixados no Siságua) para a qualidade das águas.

Reservatório	Sigla	Número de coletas para qualidade das águas
Bom Jesus do Galho	BJG	10
Cajuru	CAJ	14
Camargos	CAM	22
Dona Rita	DRT	9
Emborcação	EMB	158
Gafanhoto	GAF	20
Igarapava	IGA	16
Irapé	IRA	32
Itutinga	ITU	33
Miranda	MIR	1
Nova Ponte	NPT	207
Paraúna	PAR	8
Peti	PET	28
Piau	PIA	9
Poço Fundo	PFD	8
Poquim	POQ	12
Rio de Pedras	RPD	14
Sá Carvalho	SCA	20
Salto Grande	SGD	29
Salto Morais	SMO	9
Santa Luiza	SLZ	7
Santa Marta	SMT	8
São Bernardo	SBD	5
São Simão	SSM	106
Sumidouro	SUM	8
Três Marias	TMS	15
Tronqueiras	TRO	10
Volta Grande	VGD	40
Xicão	XIC	9

Quadro 09: Variáveis morfométricas utilizadas no estudo e fonte das informações

Fonte: elaborado pela autora

O resultado das médias dos valores das variáveis após a retirada dos *outliers* é apresentado na Tabela 01, para os vinte e nove reservatórios. Os gráficos das Figuras 11 a 20 representam os resultados da Tabela 01 por parâmetros. Os valores de referência da Resolução Conama 357/05, quando estabelecidos pela resolução, são apresentados abaixo do seu gráfico correspondente.

Tabela 01: Resultado das médias das variáveis para os vinte e nove reservatórios

Variável / Reservatório	Temp. água (°C)	Turb. (UNT)	Cond. (µS/cm)	pH	OD (mg/L)	Transp. (m)	DBO (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Namon (mg/L)	SDT (mg/L)
BJG	23,00	16,83	44,44	7,21	5,95	0,53	2,84	0,19	0,11	41,66
CAJ	23,58	6,94	39,06	7,33	6,87	1,58	2,87	0,14	0,42	32,00
CAM	22,69	8,09	18,93	7,31	6,88	2,53	2,77	0,13	0,09	22,12
DRT	23,10	13,84	23,18	6,83	6,58	1,24	2,28	0,14	0,19	28,52
EMB	25,75	9,15	32,46	7,25	6,78	2,35	1,49	0,50	0,70	23,52
GAF	23,15	16,00	41,43	7,11	6,17	1,03	2,40	0,22	0,13	42,15
IGA	24,99	2,52	35,33	6,70	6,97	3,50	2,00	0,12	0,04	16,67
IRA	24,29	19,43	25,76	6,48	6,52	1,74	2,88	0,17	0,08	20,81
ITU	21,84	7,91	19,51	6,86	6,47	1,80	2,24	0,21	0,07	21,96
MIR	24,35	1,84	21,01	6,90	6,93	3,38	0,61	0,10	0,02	17,85
NPT	24,96	1,38	22,04	5,99	7,63	3,70	0,65	0,08	0,03	23,66
PAR	21,39	5,08	17,99	7,25	6,75	1,27	2,96	0,10	0,06	31,63
PET	23,41	2,62	54,00	7,18	6,50	2,32	2,94	0,13	0,07	26,73
PIA	19,80	10,40	35,03	6,88	6,28	1,36	5,31	0,20	0,11	29,67
PFD	20,99	6,55	14,49	6,98	6,78	1,29	2,32	0,10	0,08	16,96
POQ	24,89	10,28	39,52	6,46	5,94	1,22	3,05	0,09	0,08	47,35
RPD	20,98	16,13	51,22	7,17	6,43	1,63	2,26	0,23	0,09	29,33
SCA	24,09	13,45	48,54	7,01	6,09	1,40	3,66	0,28	0,13	39,00
SGD	25,53	6,05	27,81	6,76	6,52	1,08	2,45	0,20	0,19	31,32
SMO	24,84	20,34	45,50	7,65	7,08	0,79	1,80	0,15	0,13	106,40
SLZ	23,83	16,72	32,68	7,26	6,92	0,72	1,58	0,18	0,09	26,74
SMT	22,54	8,13	10,42	6,76	6,70	1,48	3,46	0,06	0,10	16,99
SBD	19,12	10,23	13,22	6,45	6,89	0,90	2,26	0,50	0,26	15,11
SSM	27,17	1,58	39,97	7,27	6,30	2,45	2,24	0,07	0,05	38,71
SUM	21,42	14,12	47,51	7,43	7,11	0,69	1,86	0,36	0,16	42,56
TMS	25,23	14,62	66,59	6,26	8,07	2,35	0,01	0,10	0,01	47,00
TRO	23,66	7,73	26,28	6,88	6,85	1,69	2,55	0,06	0,07	24,10
VGD	25,94	1,25	32,48	5,04	7,15	4,42	0,65	0,13	0,02	34,16
XIC	24,77	5,87	19,31	7,00	5,92	1,23	1,45	0,04	0,21	6,43

Fonte: elaborado pela autora.

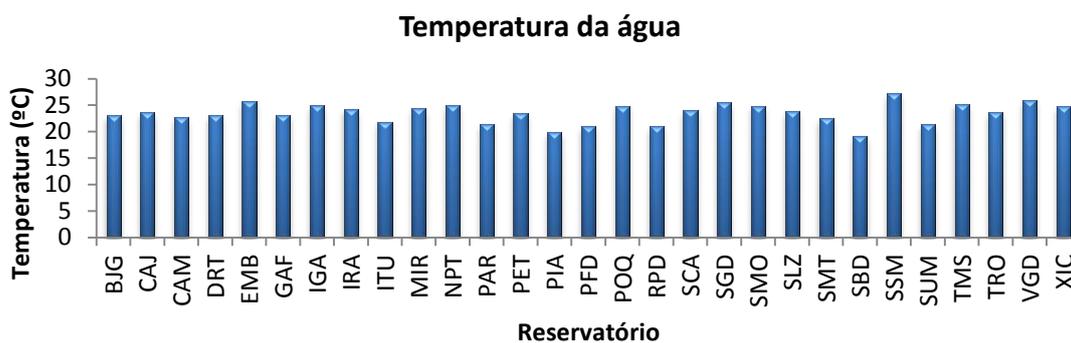
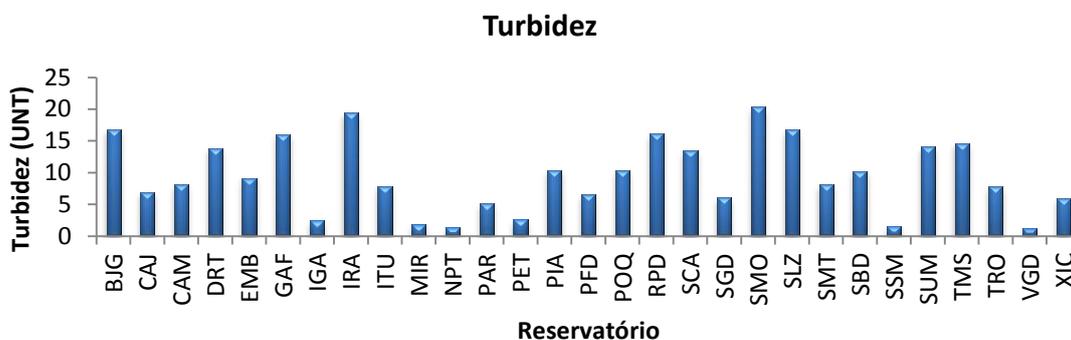


Figura 11: Resultado das médias dos reservatórios para temperatura de água (°C)
 Fonte: elaborado pela autora.



Valor de referência (CONAMA 357/05) – classe I < 40 UNT, classes II e III < 100 UNT.

Figura 12: Resultado das médias dos reservatórios para turbidez (UNT)
 Fonte: elaborado pela autora.

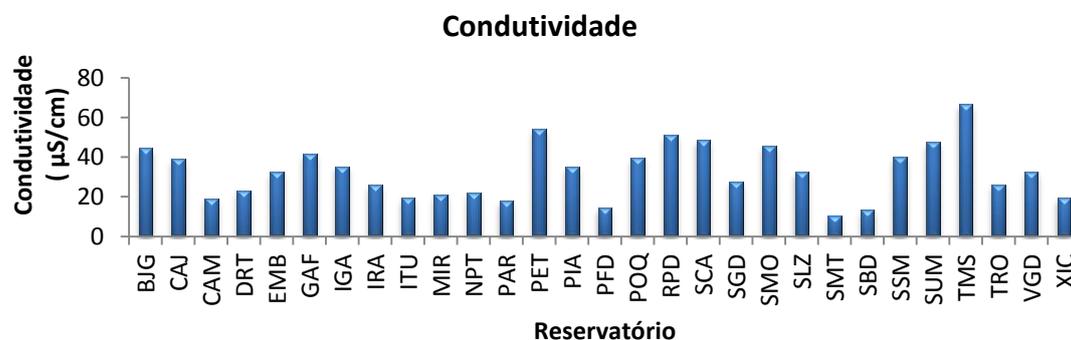
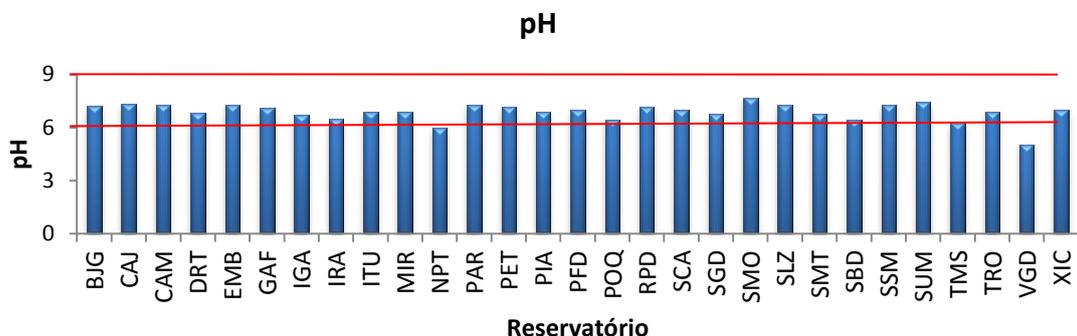


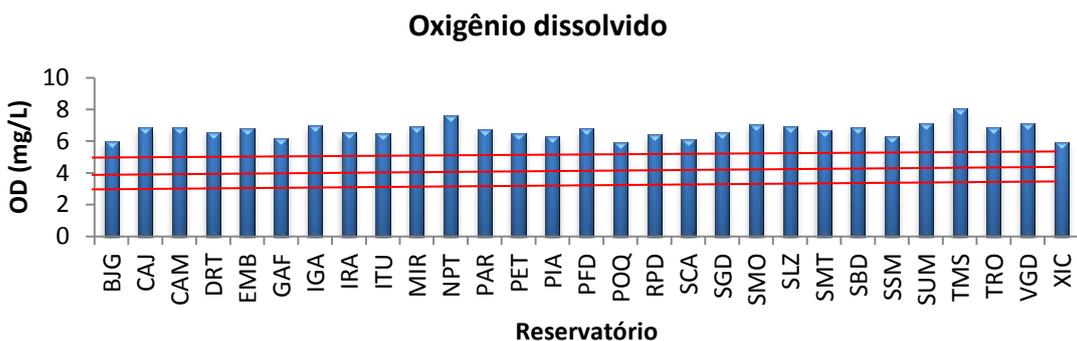
Figura 13: Resultado das médias dos reservatórios para condutividade (µS/cm)
 Fonte: elaborado pela autora.



Valor de referência (CONAMA 357/05) – classe I, II e III: entre 6 e 9. VGDe NPT abaixo de 6.

Figura 14: Resultado das médias dos reservatórios para pH

Fonte: elaborado pela autora.



Valor de referência (CONAMA 357/05) – classe I: não inferior a 6 mg/L, classe II: não inferior a 5 mg/L, III: não inferior a 4 mg/L. BJG e XIC: abaixo de 6.

Figura 15: Resultado das médias dos reservatórios para oxigênio dissolvido (mg/L)

Fonte: elaborado pela autora.

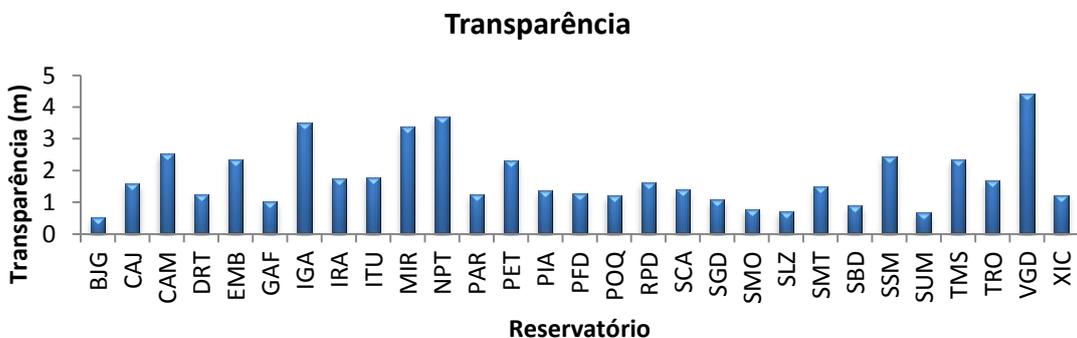
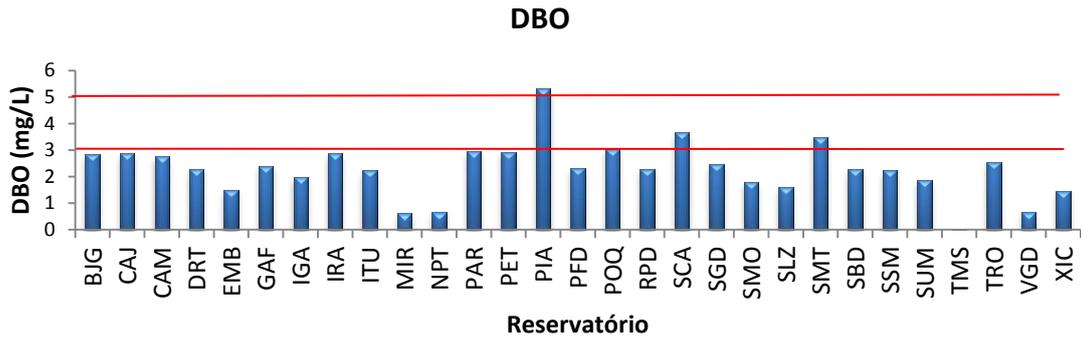


Figura 16: Resultado das médias dos reservatórios para transparência (m)

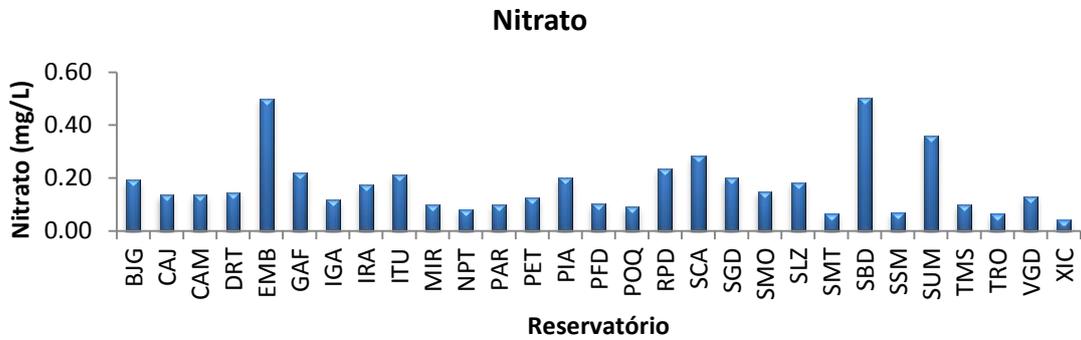
Fonte: elaborado pela autora.



Valor de referência (CONAMA 357/05) – classe I: até 3 mg/L, classe II: até 5 mg/L, III: até 10 mg/L. SCA e SMT e PIA: acima de 3 mg/L e PIA acima de 5 mg/L.

Figura 17: Resultado das médias dos reservatórios para DBO (mg/L)

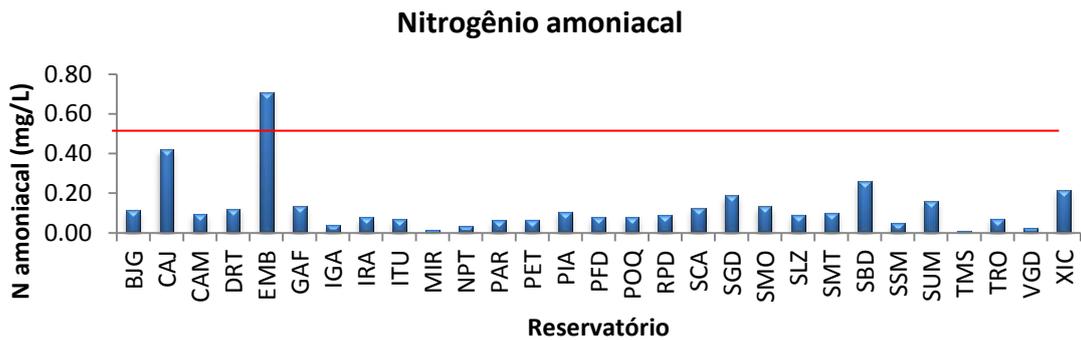
Fonte: elaborado pela autora.



Valor de referência (CONAMA 357/05) – classes I, II e III < 10 mg/L.

Figura 18: Resultado das médias dos reservatórios para nitrato (mg/L)

Fonte: elaborado pela autora.



Valor de referência (CONAMA 357/05) – classes I e II: 3,7 mg/L ($pH \leq 7,5$), 2,0 mg/L ($7,5 < pH \leq 8,0$), 1,0 mg/L ($8,0 < pH \leq 8,5$) e 0,5 mg/L ($pH > 8,5$); classe III: 13,3 mg/L ($pH \leq 7,5$), 5,6 mg/L ($7,5 < pH \leq 8,0$), 2 mg/L ($8,0 < pH \leq 8,5$) e 1,0 mg/L ($pH > 8,5$). EMB > 0,5 mg/L.

Figura 19: Resultado das médias dos reservatórios para nitrogênio amoniacal (mg/L)

Fonte: elaborado pela autora.



Valor de referência (CONAMA 357/05) – classes I, II e III < 500 mg/L.

Figura 20: Resultado das médias dos reservatórios para sólidos dissolvidos totais (mg/L).

Fonte: elaborado pela autora.

Das dez variáveis de qualidade das águas analisadas, apenas temperatura da água, condutividade elétrica e transparência não têm limites estabelecidos pela Resolução Conama 357/05. Para as demais, os reservatórios de maneira geral se encontram em boas condições quanto à qualidade de água. Considerando as médias, Volta Grande e Nova Ponte tiveram pH abaixo dos valores para as três classes. Quanto ao oxigênio dissolvido, os valores não devem ser inferiores a 6, 5 e 4 mg/L para as classes I, II e III respectivamente, e os reservatórios de Bom Jesus do Galho e Xicão tiveram valores abaixo de 6 mg/L. A DBO deve ser para as classes I até 3mg/L, II até 5 mg/L e III até 10 mg/L; sendo que Piau, Sá Carvalho e Santa Marta tiveram valores acima de 3 mg/L e Piau acima de 5mg/L.

Para avaliar quais variáveis estão mais fortemente relacionadas, utilizou-se o coeficiente de correlação, que varia de -1,00 a +1,00. Quanto mais próximo de -1,00 mais as variáveis estão inversamente relacionadas e quanto mais próxima de +1,00 mais as variáveis se relacionam diretamente. A Tabela 02 mostra a correlação entre as dez variáveis de qualidade das águas, que destaca (em negrito) quais os valores do coeficiente são mais elevados, indicando quais variáveis mais se correlacionam.

Analisando a tabela, o coeficiente mais elevado é entre transparência e turbidez (0,665), situação coerente, uma vez que a turbidez mede a dificuldade da luz atravessar à água, diretamente relacionada com a transparência, que indica a qual profundidade a luz penetra na coluna de água. O coeficiente entre os sólidos dissolvidos totais (SDT) e a turbidez (0,482) também demonstrou correlação, explicado em razão das partículas sólidas estarem diretamente relacionadas com a turbidez. A transparência também está correlaciona com o pH, parâmetros que pela sua natureza não se influenciam.

Outra correlação forte foi entre condutividade e SDT (0,560). Essa situação corrobora com a descrição dos parâmetros do item 2.6.2, que indica que a condutividade está diretamente relacionada com a concentração de sólidos dissolvidos totais.

O oxigênio dissolvido (OD) e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) também apresentaram alta correlação (-0,627), no entanto inversa. O resultado tem fundamento visto que a DBO indica quanto os microorganismos consomem o OD, e quando a DBO aumenta os níveis de OD tendem a diminuir.

Tabela 02: Correlação entre as variáveis de qualidade das águas.

Correlação	Temp. água	Turb.	Cond.	pH	OD	Transp.	DBO	Nitrato	N amon.	SDT
Temp. água	1,000	-0,235	0,256	-0,219	0,116	0,462	-0,477	-0,333	-0,038	0,219
Turb.	-0,235	1,000	0,360	0,325	-0,124	-0,665	0,168	0,334	0,150	0,482
Cond.	0,256	0,360	1,000	0,146	0,066	-0,048	-0,080	0,083	-0,133	0,560
pH	-0,219	0,325	0,146	1,000	-0,321	-0,593	0,343	0,147	-0,010	0,235
OD	0,116	-0,124	0,066	-0,321	1,000	0,448	-0,627	-0,029	-0,047	0,107
Transp.	0,462	-0,665	-0,048	-0,593	0,448	1,000	-0,470	-0,272	-0,114	-0,259
DBO	-0,477	0,168	-0,080	0,343	-0,627	-0,470	1,000	0,063	0,004	-0,037
Nitrato	-0,333	0,334	0,083	0,147	-0,029	-0,272	0,063	1,000	-0,022	-0,002
Namon.	-0,038	0,150	-0,133	-0,010	-0,047	-0,114	0,004	-0,022	1,000	-0,030
SDT	0,219	0,482	0,560	0,235	0,107	-0,259	-0,037	-0,002	-0,030	1,000

Fonte: elaborado pela autora.

Para avaliar a distribuição dos parâmetros foi feito o teste de normalidade utilizando o teste de Shapiro-Wilk, do qual se valor de $p < 0,05$ indica que a distribuição não é normal. Das dez variáveis de qualidade das águas, metade delas (pH, transparência, nitrato, nitrogênio amoniacal e sólidos dissolvidos totais) apresentaram valores de $p < 0,05$. Tendo em vista padronizar os valores dos parâmetros utilizou-se a fórmula

$$Z = \frac{x - \text{média}}{\text{desvio padrão}}$$

para todas as variáveis.

4.1.2. Morfometria

Conforme citado no item 3.2.2., foram considerados doze variáveis morfométricas a serem analisadas estatisticamente. As informações dos ambientes estudados são apresentados na Tabela 03.

Tabela 03: dados morfométricos dos reservatórios estudados

Variável/ reservatório	Prof. (m)	Área (km ²)	Per. (km)	Vol. (hm ³)	Tempo resid. (dia)	Des. per.	Irreg. marg.	Alt. (m)	Área dren. (km ²)	Fator env.	Vazão (m ³ /s)	Data op.
BJG	1,09	0,02	0,38	0,01	0,03	1,07	2,14	433	360	18000	4,31	1931
CAJ	2,27	23,29	57,00	132,70	44,01	3,33	6,66	752	2440	105	34,75	1959
CAM	3,63	73,35	303	671,85	58,84	10,00	20,00	905	6280	86	132,64	1960
DRT	1,92	0,23	4,08	0,01	0,03	2,40	4,80	541	747	3248	12,35	1952
EMB	3,33	480	919	13055	309,20	11,84	23,68	622	29178	61	471,44	1982
GAF	1,40	2,07	6,81	4,12	1,23	1,34	2,67	707	2540	1227	38,55	1946
IGA	13	50,23	121	14,61	0,15	4,84	9,68	512	64700	1288	1078	1999
IRA	3,10	143	664	3692	280,40	15,68	31,36	393	16200	113	149,11	2006
ITU	2,10	1,72	10,97	7,23	0,63	2,36	4,72	868	6280	3651	134,08	1955
MIR	2,21	51,86	202	145,60	4,83	7,94	15,87	693	17300	334	329,96	1998
NPT	4,30	449	1540	10380	400,97	20,50	41,00	803	15338	34	290,78	1994
PAR	1,98	0,16	2,64	0,08	0,03	1,86	3,72	631	1790	11188	27,71	1927
PET	3,31	5,81	59,32	36,38	28,94	6,94	13,88	723	727	125	14,55	1946
PIA	2,23	0,17	2,94	0,44	0,56	2,01	4,02	646	382	2247	9,11	1955
PFD	1,86	3,22	13,33	4,58	6,80	2,10	4,19	1170	338	105	7,80	1949
POQ	1,74	0,05	1,00	0,08	1,71	1,26	2,52	510	80	1600	0,54	2002
RPD	3,05	1,42	11,87	2,86	2,60	2,81	5,62	892	564	397	12,73	1907
SCA	1,77	0,85	2,51	0,02	0,03	0,77	1,54	377	4369	5140	83,96	1951
SGD	1,85	5,76	38,70	7,15	0,75	4,55	9,10	372	6260	1087	142,16	1956
SMO	2,91	0,29	5,72	10,89	1,51	3,00	5,99	507	5994	20669	83,37	1922
SLZ	3,75	0,03	0,61	0,02	0,01	0,99	1,99	461	1725	57500	18,70	2001
SMT	1,72	0,82	3,18	1,18	2,61	0,99	1,98	851	370	451	5,24	1944
SBD	1,40	0,26	2,68	0,19	3,19	1,48	2,97	1562	28	108	0,69	1948
SSM	3,53	703	1088	5540	26,67	11,57	23,14	367	172268	245	2306	1978
SUM	1,06	0,01	0,34	0,01	0,02	0,96	1,92	353	486	48560	5,94	1954
TMS	7,80	1104	2522	15272	256,63	21,42	42,84	572	50600	46	681,02	1962
TRO	2,25	0,73	6,64	0,97	1,82	2,19	4,38	476	510	699	6,16	1955
VGD	5,36	206	352	249,00	2,48	6,93	13,86	483	68000	330	1130	1974
XIC	2,26	1,17	9,31	8,34	107,25	2,43	4,86	993	46	39	0,90	1942

Fonte: elaborado pela autora.

Os dados revelam uma grande diferença entre os reservatórios em todos os parâmetros. Os gráficos das Figuras 21 a 32 ilustram essas discrepâncias entre os ambientes.



Figura 21: Resultado das médias de profundidade (m) dos vinte e nove reservatórios
 Fonte: elaborado pela autora.

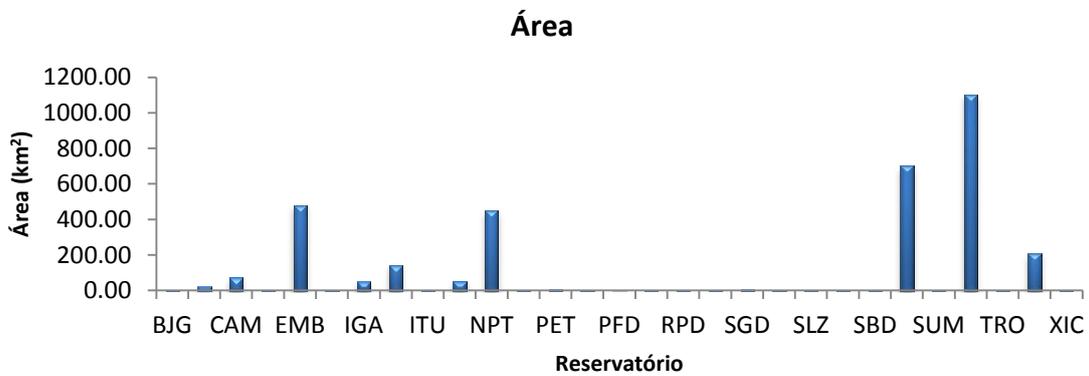


Figura 22: Áreas (km²) dos vinte e nove reservatórios
 Fonte: elaborado pela autora.

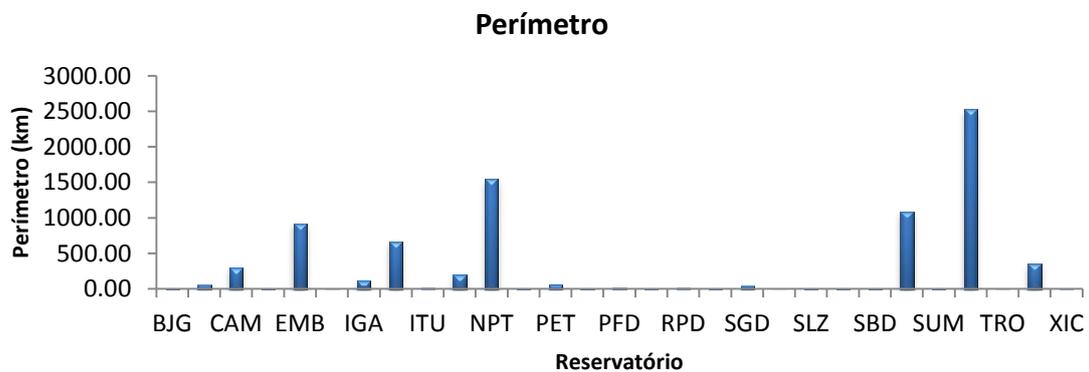


Figura 23: Perímetros (km) dos vinte e nove reservatórios
 Fonte: elaborado pela autora.

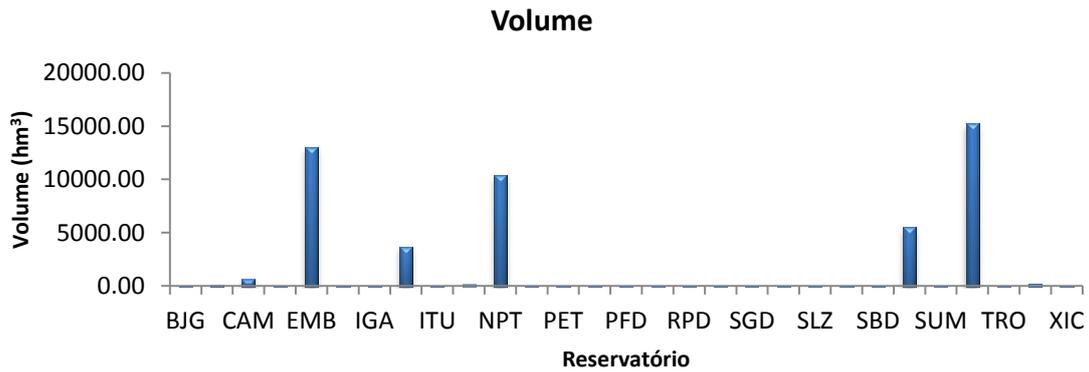


Figura 24: Volumes (km³) dos vinte e nove reservatórios
 Fonte: elaborado pela autora.

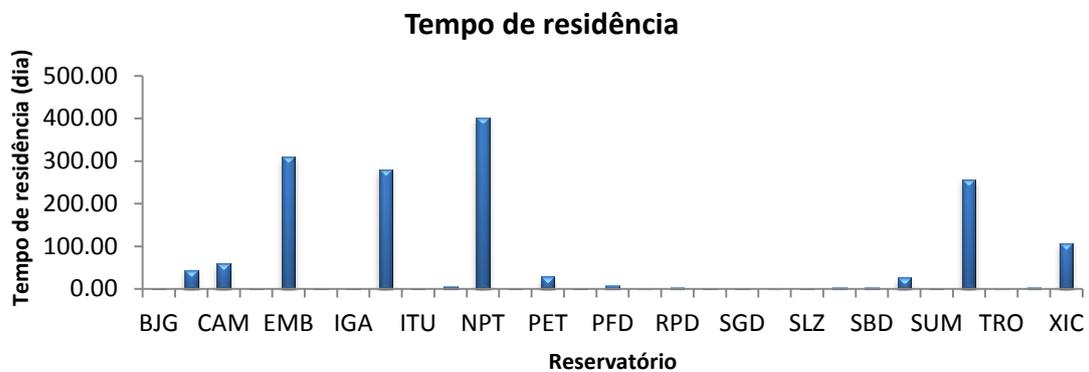


Figura 25: Tempo de residência (dia) dos vinte e nove reservatórios
 Fonte: elaborado pela autora.

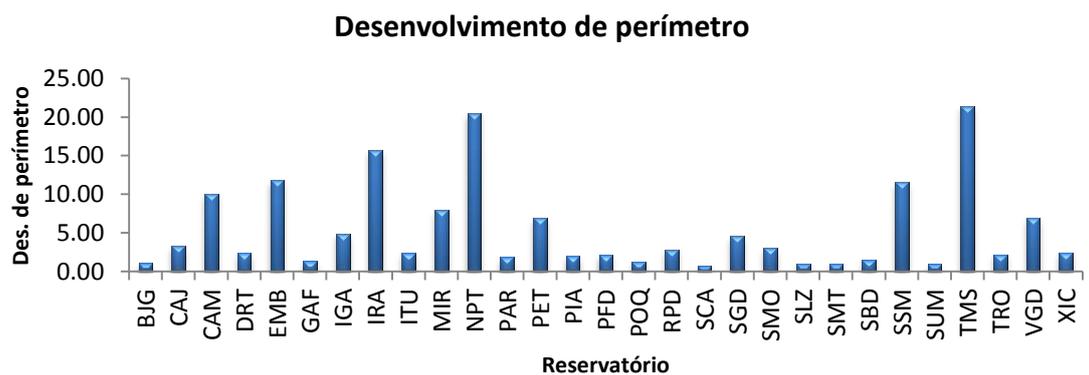


Figura 26: Desenvolvimento de perímetro dos vinte e nove reservatórios
 Fonte: elaborado pela autora.



Figura 27: Irregularidade das margens dos vinte e nove reservatórios
 Fonte: elaborado pela autora.

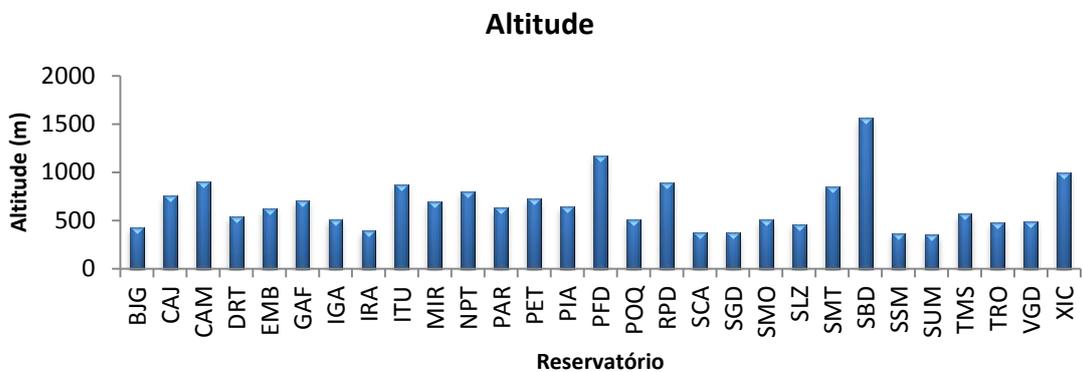


Figura 28: Altitude (m) dos vinte e nove reservatórios
 Fonte: elaborado pela autora.

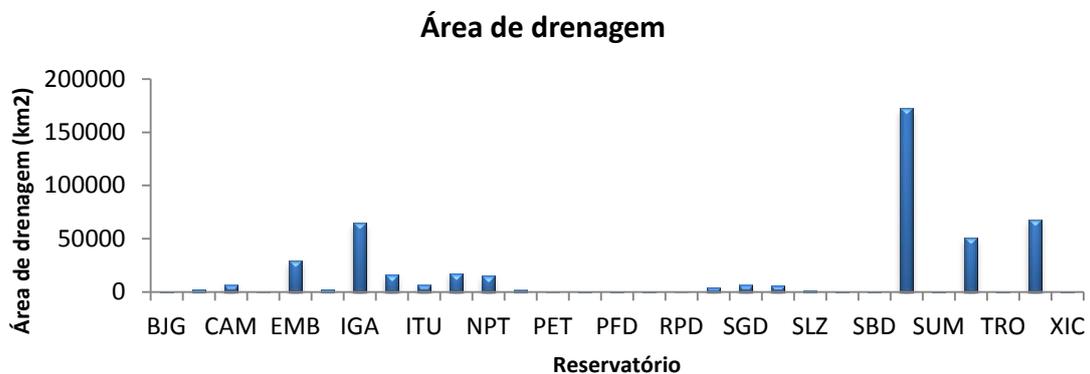


Figura 29: Área de drenagem (km²) dos vinte e nove reservatórios.
 Fonte: elaborado pela autora.

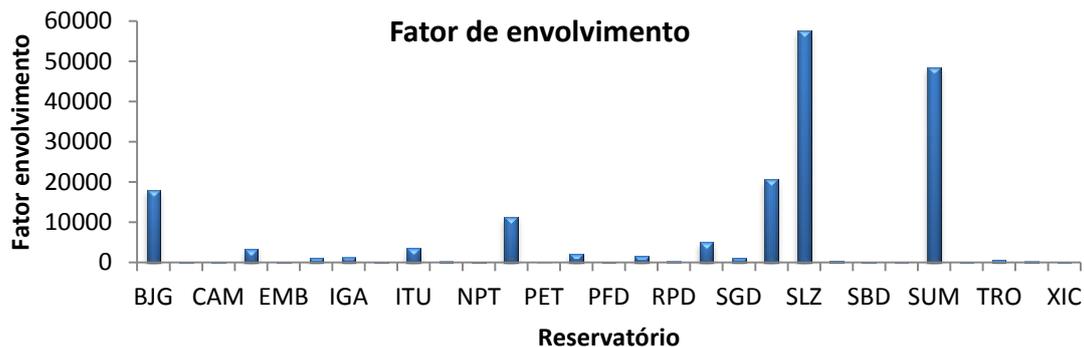


Figura 30: Fator de envolvimento dos vinte e nove reservatórios.
Fonte: elaborado pela autora.

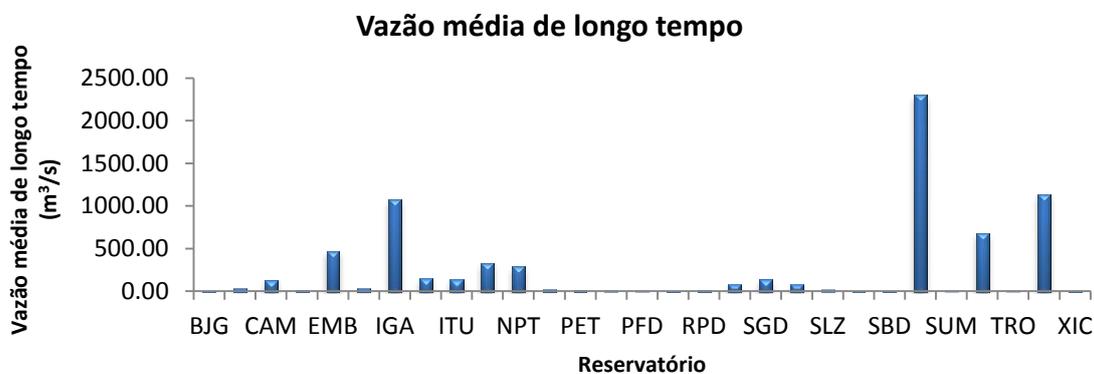


Figura 31: Vazão média de longo período (m³/s) dos vinte e nove reservatórios.
Fonte: elaborado pela autora.

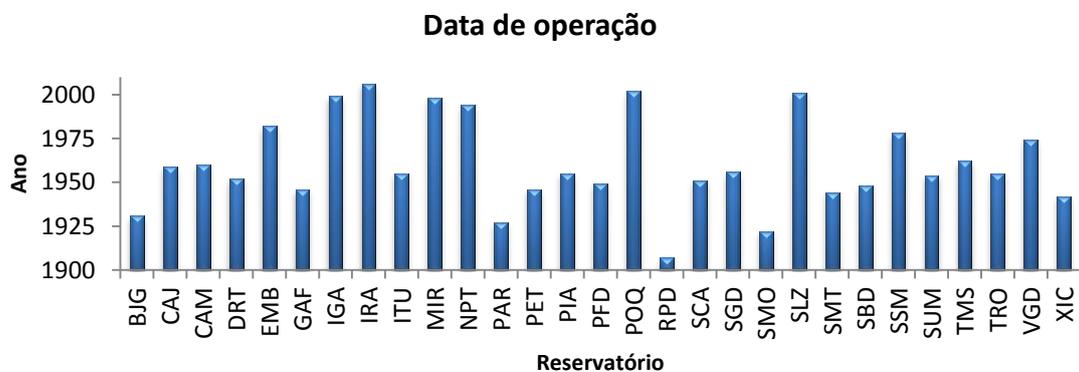


Figura 32: Data de operação dos vinte e nove reservatórios.
Fonte: elaborado pela autora.

Com base no item 2.6.3, as variáveis morfométricas refletem condições limnológicas dos ambientes aquáticos. A profundidade é um dos parâmetros de maior relevância nesse contexto (SPERLING, 1999), uma vez que ambientes rasos e profundos têm dinâmicas distintas quanto a distribuição de organismos e características físico-químicas, especialmente influenciadas pela circulação de água e incidência solar. Conforme Figura 21, os reservatórios Sumidouro, Bom Jesus do Galho, Gafanhoto e São Bernardo são mais rasos, tendendo a apresentar uma maior produção primária, ou seja, maior quantidade de biomassa, favorecida pela maior penetração de luz. Igarapava, Três Marias e Volta Grande são os mais profundos.

A área, assim como a profundidade, também está relacionada com a radiação solar. Ambientes com áreas maiores têm maior incidência de raios solares. Na amostra, Três Marias, São Simão e Emborcação têm maiores valores de área e os menores são Sumidouro, Bom Jesus do Galho e Santa Luzia.

O volume está relacionado à propensão do ambiente à diluição. No caso de poluentes, é mais favorável à qualidade das águas reservatórios de grandes volumes, porque têm mais resistência devido a maior capacidade de assimilação. Desta forma, Bom Jesus do Galho, Dona Rita e Sumidouro estariam mais vulneráveis ao aporte de esgotos e sedimentos, por apresentarem menores volumes e Três Marias, Emborcação e Nova Ponte seriam mais resistentes ao aporte de efluentes.

O tempo de residência elevado tem vantagens e desvantagens para o corpo hídrico. Por um lado, ocasiona alta produtividade e riqueza, de outro faz com que poluentes fiquem retidos mais tempo no ambiente, assim como sedimentos. Os menores valores na área de estudo são em Paraúna, Sá Carvalho, Santa Luzia, Dona Rita, Sumidouro e Bom Jesus do Galho. Ressalta-se que os três últimos, embora mencionado que estariam mais susceptíveis a poluentes devido a seus pequenos volumes, apresentam baixos tempos de residência (<0,03 dia), favorecendo a circulação e eliminação de substâncias nocivas. Emborcação, Irapé e Nova Ponte têm tempo de residência superiores a 280 dias, necessitando de atenção quanto ao aporte de sedimentos e poluentes.

Quanto mais próximo o valor do desenvolvimento de perímetro for de 1 (um), mais próximo de um círculo é a forma do ambiente. Irapé, Nova Ponte e Três Marias são os reservatórios com formas mais irregulares, apresentando maior contato da água com a região litorânea. Caso a vegetação do entorno seja preservada, maior será a proteção ao corpo de água, uma vez que a vegetação funciona como um “filtro”, além de garantir sombreamento e abrigo para algumas espécies.

Algumas relações podem ser estabelecidas quanto à altitude. Áreas mais elevadas geralmente apresentam temperaturas mais amenas, e geralmente são regiões de alto curso de rios, apresentando uma menor bacia de contribuição do que ambientes de médio e baixo curso. Na área de estudo, essa situação é pertinente: São Bernardo e Poço Fundo têm altitudes mais elevadas, áreas de drenagem pequenas e temperaturas mais baixas. São Simão é um dos mais baixos em relação ao nível do mar e apresenta a maior área de drenagem e maiores temperaturas.

O fator de envolvimento é um indicativo do quanto a bacia de contribuição interfere no reservatório (SPERLING, 1999). Quanto maior o valor, mais a bacia influencia no

corpo de água. Ambientes com altos fatores de envolvimento e um uso antrópico intenso na área de drenagem, requerem atenção, pois o risco de entrada de poluentes e sedimentos é elevado. Na amostra, Salto Morais, São Bernardo e Sumidouro apresentaram os maiores valores.

Os coeficientes de correlação entre as variáveis são apresentados na Tabela 04, destacando em negrito os valores mais altos.

Tabela 04: Coeficientes de correlação entre as variáveis morfométricas.

Correlação	Prof.	Área	Per.	Vol.	Temp. res.	Des. Per.	Irreg. marg.	Alt.	Área Dren.	Fator env.	Vazão	Data op.
Prof.	1,000	0,426	0,436	0,342	0,240	0,438	0,438	-0,163	0,475	-0,122	0,529	0,393
Área	0,426	1,000	0,962	0,905	0,636	0,821	0,821	-0,164	0,648	-0,198	0,628	0,283
Per.	0,436	0,962	1,000	0,932	0,771	0,914	0,914	-0,120	0,496	-0,211	0,482	0,335
Vol.	0,342	0,905	0,932	1,000	0,850	0,844	0,844	-0,092	0,379	-0,186	0,368	0,313
Temp. res.	0,240	0,636	0,771	0,850	1,000	0,848	0,848	0,001	0,117	-0,217	0,112	0,395
Des.per.	0,438	0,821	0,914	0,844	0,848	1,000	1,000	-0,107	0,438	-0,306	0,436	0,451
Irreg. marg.	0,438	0,821	0,914	0,844	0,848	1,000	1,000	-0,107	0,438	-0,306	0,436	0,451
Alt.	-0,163	-0,164	-0,120	-0,092	0,001	-0,107	-0,107	1,000	-0,300	-0,335	-0,295	-0,280
Área dren.	0,475	0,648	0,496	0,379	0,117	0,438	0,438	-0,300	1,000	-0,176	0,993	0,338
Fator env.	-0,122	-0,198	-0,211	-0,186	-0,217	-0,306	-0,306	-0,335	-0,176	1,000	-0,191	0,028
Vazão	0,529	0,628	0,482	0,368	0,112	0,436	0,436	-0,295	0,993	-0,191	1,000	0,362
Data op.	0,393	0,283	0,335	0,313	0,395	0,451	0,451	-0,280	0,338	0,028	0,362	1,000

Fonte: elaborado pela autora.

As variáveis desenvolvimento de perímetro e irregularidade das margens apresentaram o valor do coeficiente de correlação máximo (1,00), o que traduz que são iguais em se tratando os escores padronizados. Tal questão se explica pela fórmula similar que as representam (irregularidade das margens = $Perímetro / (2\pi R)$ e irregularidade das margens = $Perímetro / \sqrt{A\pi}$, item 2.6.3).

A vazão média de longo período e área de drenagem estão fortemente correlacionadas (0,993), uma vez que quanto maior a área de drenagem, há uma tendência de se ter um maior volume de água por unidade de tempo, assim como quanto maior a área do reservatório maior é chance do perímetro ser maior também (coeficiente de correlação entre área e perímetro de 0,962). Embora não seja regra, corpos de água com grande volume geralmente têm áreas e perímetros elevados, explicando os altos valores de coeficiente de correlação entre essas medidas.

A altitude e fator de envolvimento se demonstraram independentes perante as demais variáveis, não apresentaram valores de coeficientes superiores, em módulo, a 0,335.

Assim como nos dados de qualidade das águas, foi realizado o teste de normalidade para as variáveis utilizando o teste de Shapiro-Wilk, do qual se valor de $p < 0,05$ indica que a distribuição não é normal. Das doze variáveis, apenas uma delas (data de operação) apresentou distribuição normal. Para padronizar os valores dos parâmetros, também se utilizou a fórmula $Z = \frac{x - \text{média}}{\text{desvio padrão}}$ para todas as variáveis.

4.2 Seleção das variáveis mais relevantes

A seguir são apresentadas quais as variáveis foram mais significativas em termos de qualidade das águas e morfometria.

4.2.1 Qualidade das águas

Os parâmetros de qualidade das águas (temperatura da água, turbidez, condutividade, pH, oxigênio dissolvido, transparência, DBO, nitrato, nitrogênio amoniacal e sólidos dissolvidos totais) passaram por Análise de Componentes Principais (ACP) para avaliar quais são os parâmetros mais explicativos ao modelo.

Na primeira rodada da ACP, os dois primeiros eixos explicaram juntos 52,14% do modelo (Figura 33). Analisando os dois primeiros fatores (Tabela05), nota-se que na primeira componente a variável que mais tem influência é a transparência (-0,894), seguida da turbidez (0,695). Na segunda componente, diferente do que ocorre na primeira, os sólidos dissolvidos totais têm maior peso (0,819), seguida da condutividade elétrica (0,791). As variáveis com menores valores (abaixo de 0,6) nos dois primeiros eixos foram temperatura da água, oxigênio dissolvido, nitrato e nitrogênio amoniacal.

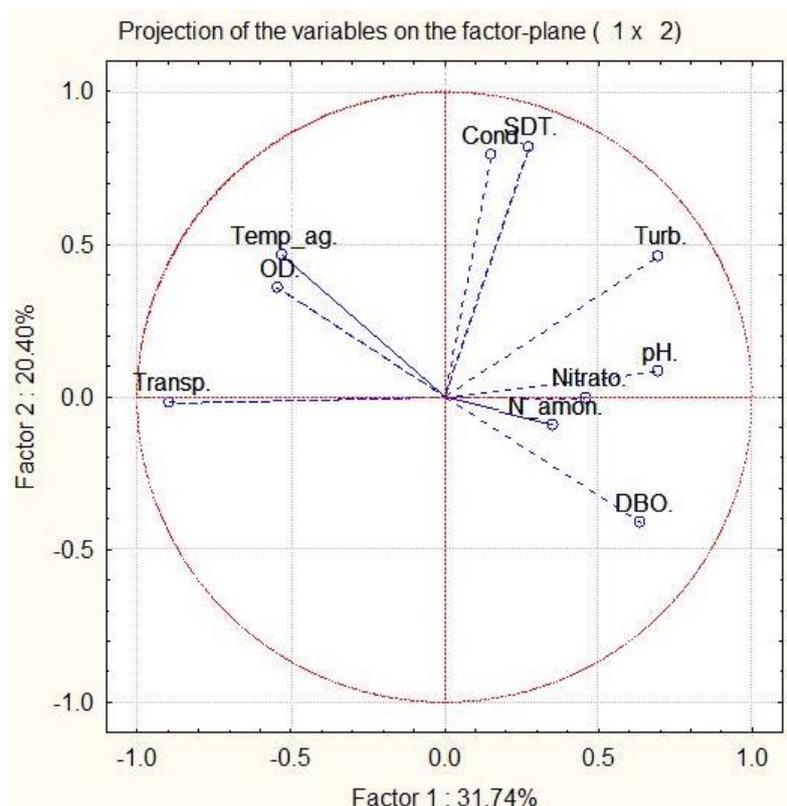


Figura 33: Distribuição dos dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais com dados de qualidade das águas na primeira rodada

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 05: Valores dos fatores de Análise de Componentes Principais com dados de qualidade das águas na primeira rodada

Parâmetro	Fator									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temp,da água	-0,527	0,465	-0,064	-0,642	0,013	-0,180	0,044	0,053	-0,148	-0,173
Turbidez*	0,695	0,463	0,084	0,251	0,027	-0,364	0,141	-0,149	-0,226	0,087
Condutividade*	0,150	0,791	-0,125	-0,052	0,372	0,336	0,158	-0,208	0,117	-0,013
pH.*	0,693	0,084	-0,100	-0,249	-0,484	0,412	0,126	0,064	-0,124	0,035
OD	-0,544	0,356	0,400	0,465	-0,302	0,156	-0,177	-0,166	-0,073	-0,147
Transparência*	-0,894	-0,017	0,074	-0,080	0,199	0,219	-0,101	-0,002	-0,207	0,219
DBO*	0,638	-0,411	-0,411	-0,038	0,265	0,121	-0,341	-0,135	-0,148	-0,109
Nitrato	0,461	-0,004	0,740	0,094	0,338	0,145	0,040	0,287	-0,076	-0,077
N amoniacal	0,350	-0,093	0,709	-0,502	-0,073	-0,066	-0,192	-0,233	0,091	0,074
SDT*	0,272	0,819	-0,175	0,019	-0,070	-0,069	-0,388	0,227	0,074	0,079

*parâmetros mais explicativos nos dois primeiros fatores

Fonte: elaborado pela autora.

Tendo em vista aumentar o percentual explicativo, foi realizada uma nova APC, com as variáveis com maiores valores dos dois primeiros fatores: turbidez, condutividade, pH, transparência, DBO e sólidos dissolvidos totais.

Na segunda rodada, o percentual explicativo subiu de 52,14% para 69,11% (Figura 34), e todas as variáveis apresentaram valores superiores a 0,6 no primeiro ou segundo fatores (Tabela06). Como essas seis variáveis foram representativas na APC e o modelo obteve cerca de 70% de explicação, elas foram selecionadas para dar continuidade nas avaliações dos grupos de reservatórios.

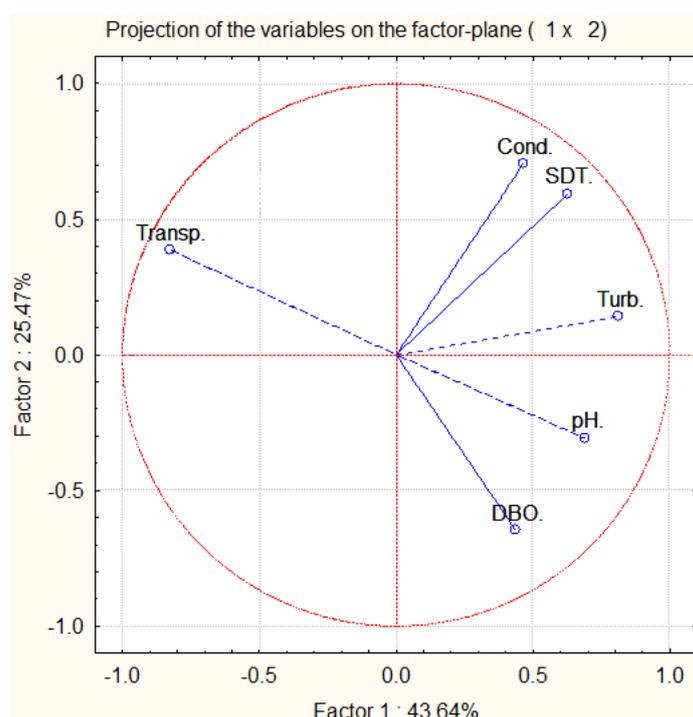


Figura 34: Distribuição dos dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais com dados de qualidade das águas na segunda rodada.

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 06: Valores dos fatores de Análise de Componentes Principais com dados de qualidade das águas na segunda rodada

Parâmetro	Fator					
	1	2	3	4	5	6
Turbidez	0,814	0,142	-0,455	0,169	-0,165	0,235
Condutividade	0,463	0,703	0,378	0,121	-0,352	-0,095
pH	0,691	-0,307	0,289	-0,573	-0,038	0,121
Transparência	-0,828	0,386	0,262	0,026	0,026	0,310
DBO	0,434	-0,646	0,393	0,480	0,074	0,069
SDT	0,625	0,594	0,067	0,025	0,501	-0,006

Fonte: elaborado pela autora.

4.2.2. Morfometria

Assim como na qualidade das águas, os dados morfométricos foram submetidos à Análise de Componentes Principais, tendo em vista selecionar as variáveis mais relevantes. Os doze parâmetros iniciais foram: profundidade, área, perímetro, volume, tempo de residência, desenvolvimento de perímetro, irregularidade das margens, altitude, área de drenagem, fator de envolvimento, vazão média de longo período e data de operação.

Na primeira rodada na APC, o modelo obteve 69,71% (Figura 35) de explicação nos dois primeiros eixos, sendo que no primeiro fator somente altitude, fator de envolvimento e data de operação tiveram valores abaixo de 0,6 (Tabela 07). Essas três variáveis também tiveram baixos valores no segundo fator, sendo retiradas para a etapa seguinte. Ressalta-se que desenvolvimento de perímetro e irregularidade das margens obtiveram os mesmos valores nos fatores, explicado pela fórmula similar que as representam (item 2.6.3) e valor máximo de correlação (item 4.1.1). Para que não exista redundância no modelo, variáveis com respostas iguais devem ser retiradas, bastando apenas uma delas. No caso, o desenvolvimento de perímetro continuou incorporado às análises, devido a maior frequência que ele é apresentado na bibliografia.

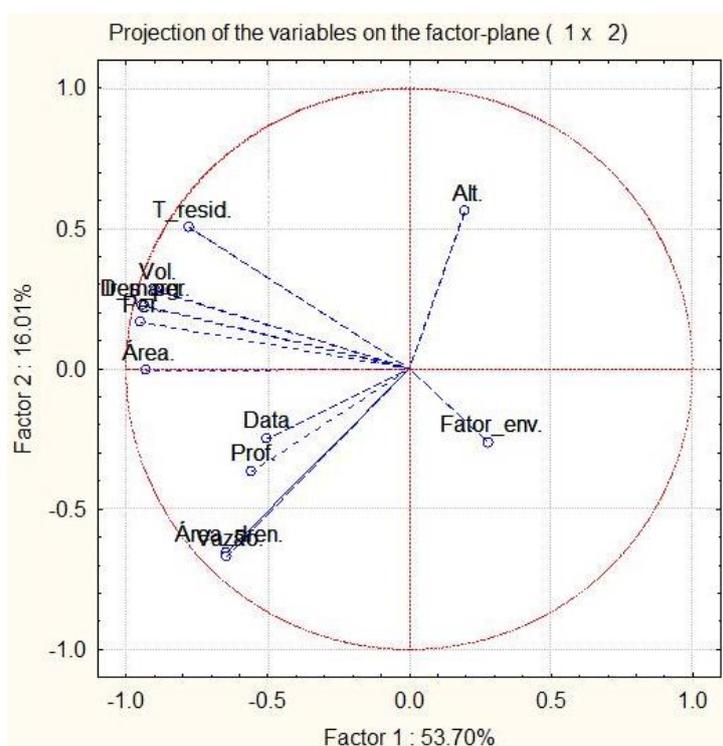


Figura 35: Distribuição dos dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais com dados morfométricos na primeira rodada

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela07: Valores dos fatores de Análise de Componentes Principais com dados morfométricos na primeira rodada

Parâmetro	Fator										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Profundidade	-0.557	-0.366	-0.099	-0.396	-0.548	0.296	0.026	0.027	-0.002	0.004	0.000
Área	-0.928	-0.006	-0.048	0.303	-0.071	-0.061	0.148	-0.113	-0.025	0.030	-0.026
Perímetro	-0.949	0.167	0.043	0.178	-0.085	-0.006	0.055	-0.139	-0.079	-0.032	0.019
Volume	-0.895	0.281	0.114	0.189	-0.059	-0.029	0.221	0.094	0.097	-0.007	0.012
Temp. residência	-0.775	0.505	0.222	-0.101	0.059	0.001	-0.036	0.275	-0.064	0.004	-0.007
Des. perímetro	-0.941	0.225	0.052	-0.060	0.052	0.046	-0.214	-0.076	0.035	0.004	-0.001
Irreg. margens	-0.941	0.225	0.052	-0.060	0.052	0.046	-0.214	-0.076	0.035	0.004	-0.001
Altitude	0.197	0.563	-0.581	-0.162	-0.295	-0.438	-0.031	-0.005	0.003	0.000	0.000
Área drenagem	-0.644	-0.655	-0.298	0.148	0.088	-0.162	-0.058	0.078	-0.017	0.032	0.023
Fator envolvimento	0.279	-0.263	0.758	0.233	-0.354	-0.293	-0.110	0.015	0.005	0.000	0.000
Vazão	-0.644	-0.670	-0.308	0.088	0.058	-0.135	-0.053	0.088	0.015	-0.040	-0.019
Data operação	-0.502	-0.248	0.348	-0.648	0.216	-0.279	0.125	-0.073	-0.001	0.001	0.000

Fonte: elaborado pela autora.

Retirando-se as variáveis menos explicativas, a confiabilidade do modelo aumentou significativamente, passando de 69,71% para 94,05%, conforme Figura 36. Todas as variáveis apresentaram valores superiores a 0,6 no primeiro eixo (Tabela 08) e área de drenagem e vazão média de longo período apresentaram valores altos também no segundo eixo. Sendo assim, as sete variáveis selecionadas para a segunda rodada da ACP (área, perímetro, volume, tempo de residência, desenvolvimento de perímetro, área de drenagem e vazão) foram utilizadas nas etapas seguintes para o processo de agrupamento de reservatórios.

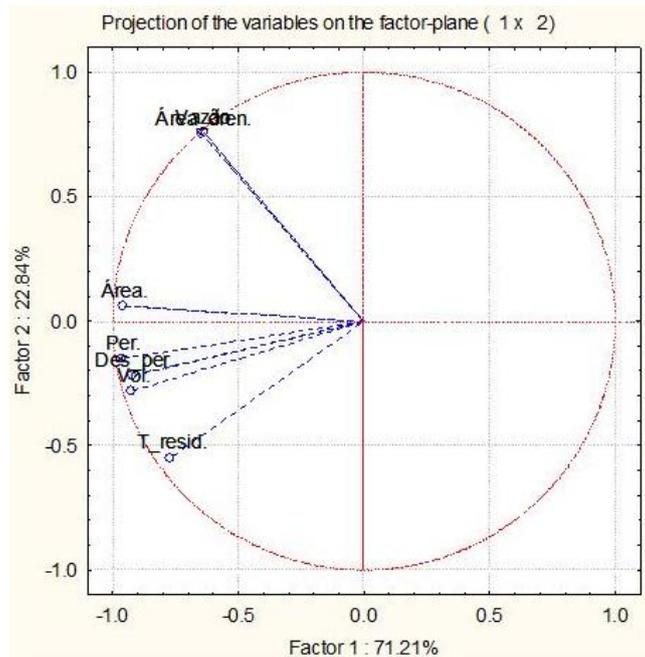


Figura 36: Distribuição dos dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais com dados morfométricos na segunda rodada
 Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 08: Valores dos fatores de Análise de Componentes Principais com dados morfométricos na segunda rodada

Parâmetro	Fator						
	1	2	3	4	5	6	7
Área	-0.962	0.061	0.259	0.025	0.028	-0.035	-0.028
Perímetro	-0.967	-0.149	0.147	0.121	0.065	0.043	0.020
Volume	-0.925	-0.283	0.155	-0.179	-0.090	0.005	0.012
Tempo de residência	-0.771	-0.549	-0.272	-0.161	0.062	-0.003	-0.007
Desenvolvimento de perímetro	-0.921	-0.218	-0.218	0.229	-0.063	-0.015	-0.002
Área drenagem	-0.648	0.754	-0.083	-0.049	0.024	-0.044	0.023
Vazão	-0.638	0.758	-0.111	-0.048	-0.020	0.051	-0.018

Fonte: elaborado pela autora.

4.3 Grupos de reservatórios

4.3.1 Qualidade das águas

A Figura 37 apresenta o resultado da análise de agrupamento por similaridade (*cluster*) utilizando variáveis de qualidade das águas. O reservatório de Salto Morais se distanciou dos demais, não pertencendo a nenhum grupo. Em uma distância de ligação em torno de 4,2, Três Marias também se isolou. A distância próxima de 4 separou os reservatórios Igarapava, Miranda, Nova Ponte e Volta Grande em um grupo. Na sequência, o reservatório de Piau ficou isolado, e na distância aproximada de 2,5, três grupos se dividiram: um formado por Bom Jesus do Galho, Gafanhoto, Sumidouro, Rio de Pedras, Santa Luzia, Poquim e Sá Carvalho; outro por Cajuru, Peti, São Simão e Emborcação e o terceiro constituído por Camargos, Itutinga, Tronqueiras, Poço Fundo, Salto Grande, Paraúna, Santa Marta, Dona Rita, São Bernardo e Xicão.

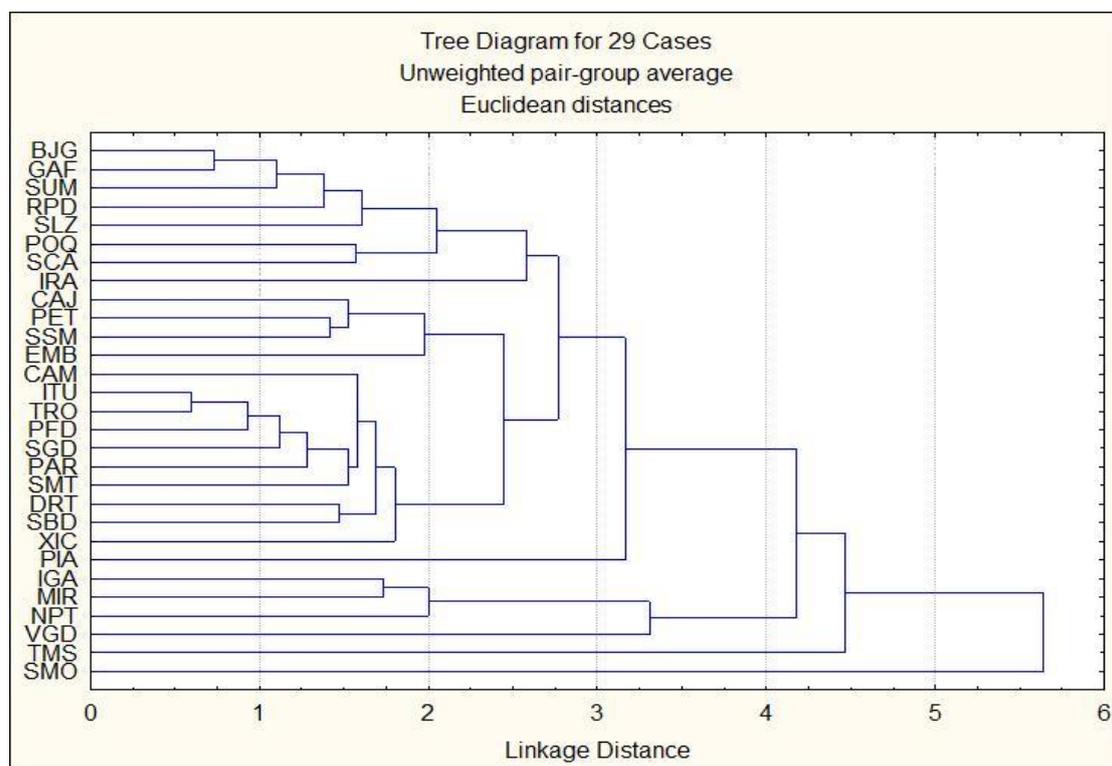


Figura 37: Análise de agrupamento (*cluster*) de reservatórios utilizando variáveis de qualidade das águas.

Fonte; elaborado pela autora.

O Quadro 10 apresenta os quatro agrupamentos de reservatórios formados a partir da análise de *cluster* e os quatro reservatórios que se isolaram dos demais e não formaram nenhum grupo. A Figura 38 apresenta a localização desses grupos formados de reservatórios em Minas Gerais.

Variável	Grupo				
	GI.1	GI.2	GI.3	GI.4	Individuais
Reservatório	Bom Jesus do Galho, Gafanhoto, Irapé, Sumidouro, Rio de Pedras, Santa Luzia, Poquim e Sá Carvalho (8).	Cajuru, Peti, São Simão, Emborcação (4).	Camargos, Itutinga, Tronqueiras, Poço Fundo, Salto Grande, Paraúna, Santa Marta, Dona Rita, São Bernardo e Xicão (10).	Igarapava, Miranda, Nova Ponte (3).	Piau, Volta Grande, Três Marias, e Salto Morais (4).
Turbidez mín/máx média (UNT)	10,28-19,43 15,37	1,58-9,15 5,17	5,08-13,84 8,178	1,38-5,87 2,90	1,25-20,34
Condutividade mín/máx média (μ S/cm)	32,68-51,22 41,39	32,46-39,97 41,37	10,42-27,81 19,09	19,31-35,33 24,42	32,48-66,59
pH mín/máx média	6,46-7,43 7,02	7,18-7,33 1,26	6,45-7,31 6,90	5,99-7 6,65	5,04-7,65
Transparência mín/máx média (m)	0,53-1,74 1,12	1,58-2,45 2,18	0,9-2,53 1,48	1,23-3,5 2,95	0,79-4,42
DBO mín/máx média (mg/L)	1,58-3,05 2,57	1,49-2,94 3,39	2,24-3,46 2,59	0,61-2 1,18	0,01-5,31
SDT mín/máx média (mg/L)	20,81-47,35 36,2	23,52-28,71 30,24	15,11-31,63 23,19	6,43-23,66 16,15	29,67-106,4

Quadro 10: Grupo de reservatórios quanto à qualidade das águas.

Fonte: elaborado pela autora

O Quadro 10 mostra que os reservatórios do grupo 1 apresentam, em média, maiores valores para turbidez e sólidos dissolvidos totais e menor transparência, parâmetros com alta correlação conforme item 4.1.1. O grupo 2 apresenta em média maior valor de pH e valores intermediários para as demais variáveis. O grupo 3 tem o valor médio mais baixo para temperatura e condutividade (a condutividade é dependente da temperatura –item 2.6.2) e o valor mais alto para DBO. O 4º grupo tem, na média, os menores valores de turbidez, pH e SDT e maior de transparência.

De acordo com a Tabela 01 (item 4.1.1) dos resultados dos parâmetros para cada reservatório, aqueles que se isolaram, de forma geral, apresentam valores extremos para todos os parâmetros considerados na análise de *cluster*, o que pode explicar a falta de similaridade desses ambientes com os demais.

Observando o mapa da Figura 38, nota-se que há uma tendência de proximidade entre os reservatórios do tipo 3: quatro se concentram na ecorregião Alto Paraná (AP) e quatro na Mata Atlântica Sudeste (MS) e São Francisco (SF), embora Santa Marta esteja mais distante na Mata Atlântica Leste (ML). Essa situação ocorre com o grupo 4, uma vez que os únicos representantes desse tipo estão próximos na Ecorregião AP. Reservatórios próximos e pertencentes ao mesmo curso de água, como no caso de Sumidouro e Bom Jesus do Galho, Camargos e Itutinga, Nova Ponte e Miranda tendem a pertencer ao mesmo grupo, podendo ser reflexo de uma mesma dinâmica de uso do solo e cobertura vegetal. O mesmo não ocorre entre Cajuru e Gafanhoto, ambos próximos e localizados no rio Pará, que pode ser explicado pela presença de uma cidade desenvolvida entre os reservatórios, Divinópolis, que pode influenciar na qualidade das águas.

Avaliando os resultados do agrupamento do Quadro 10 e a distribuição espacial dos grupos de reservatórios, pode-se considerar que o agrupamento deve ser influenciado pelo uso e ocupação do solo da bacia de contribuição dos reservatórios, e para os grupos 3 e 4 há uma coincidência espacial dos ambientes, sendo que características regionais do local de ocorrência dos corpos de água como tipo de solo, geologia, clima podem colaborar para a distribuição geográfica dos agrupamentos.

4.3.2 Morfometria

No agrupamento com variáveis morfométricas, o reservatório São Simão se isolou dos demais ambientes na distância de ligação próxima de 7. Na sequência, um grupo foi formado reunindo Emborcação, Nova Ponte, Irapé e Três Marias, e na distância de aproximadamente 4,7 Três Marias se isolou. Na distância próxima a 3, Igarapava e Volta Grande se isolaram. Até a distância 3, formou-se um grande grupo (1) com 22 reservatórios, um segundo grupo com três ambientes, o grupo 3 com dois e São Simão e Três Marias se isolaram e não formaram nenhum agrupamento (Figura 39).

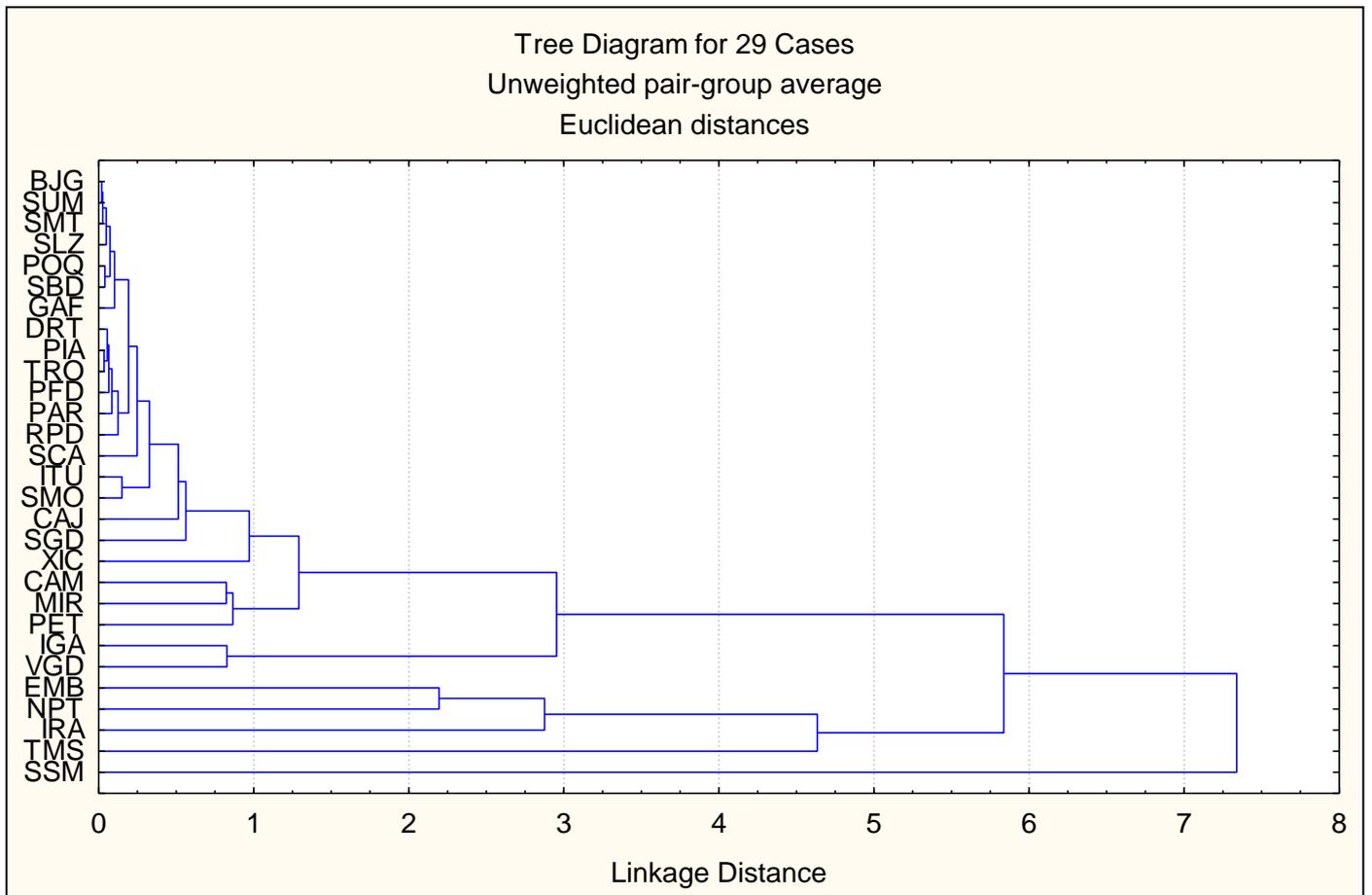


Figura 39: Análise de agrupamento (*cluster*) de reservatórios utilizando variáveis morfométricas.

Fonte: elaborado pela autora.

Variável	Grupo			
	GII.1	GII.2	GII.3	Individuais
	Bom Jesus do Galho, Sumidouro, Santa Marta, Santa Luzia, Poquim, São Bernardo, Gafanhoto, Dona Rita, Piau, Tronqueiras, Poço Fundo, Paraúna, Rio de Pedras, Sá Carvalho, Itutinga, Salto Morais, Cajuru, Salto Grande, Xicão, Camargos, Miranda e Peti(22.)	Emborcação, Nova Ponte, Irapé (3).	Igarapava, Volta Grande (2).	São Simão, Três Marias (2).
Área mín/máx média (km ²)	0,01-73,35 7,88	143-480 357,33	50,23-206 128,12	703-1104
Perímetro mín/máx média (km)	0,34-59,32 33,87	664-1540 1041	121-3252 236,5	1088-2522
Volume mín/máx média (hm ³)	0,01-671,85 47,03	3692-13055 9042,33	14,61-249 131,8	5540-15272
T residência mín/máx média (dia)	0,01-107,25 12,16	280,4-400,97 330,19	0,15-2,48 1,32	26,67-256,63
D. perímetro mín/máx média	0,77-7,94 2,85	11,84-20,5 16,01	4,84-6,93 5,89	11,57-21,42
Área dren. mín/máx média (km ²)	28-17300 2709,82	15338-29178 20238,67	64700-68000 66350	50600-172268
Vazão mín/máx média (m ³ /s)	0,54-329,96 50,28	149,11-471,44 303,78	1078-1130 66350	681,02-2306

Quadro 11: Grupo de reservatórios quanto à morfometria.

Fonte: elaborado pela autora.

Analisando o Quadro 11 e a figura 40, o primeiro grupo é composto pela maior parte dos reservatórios (76%) e tem ambientes em todas as ecorregiões, possuindo, na média, menores dimensões (volume, área, perímetro) e baixos valores de desenvolvimento de perímetro e vazão. O grupo 2 engloba grandes reservatórios (3), com valores altos de tempo de residência e desenvolvimento de perímetro. O terceiro grupo corresponde a apenas 2 reservatórios, com dimensões intermediárias e valores altos, em média, de área de drenagem e vazão. Três Marias se destaca pelos maiores volume, perímetro, desenvolvimento de perímetro e área e São Simão pelos maiores valores de área de drenagem e vazão média de longo período. Esses valores extremos levaram a separação desses ambientes dos demais, isolando-os dos grupos. A ecorregião Alto Paraná possui ambientes de todos os grupos, inclusive São Simão que não teve semelhança com nenhum dos três conjuntos.

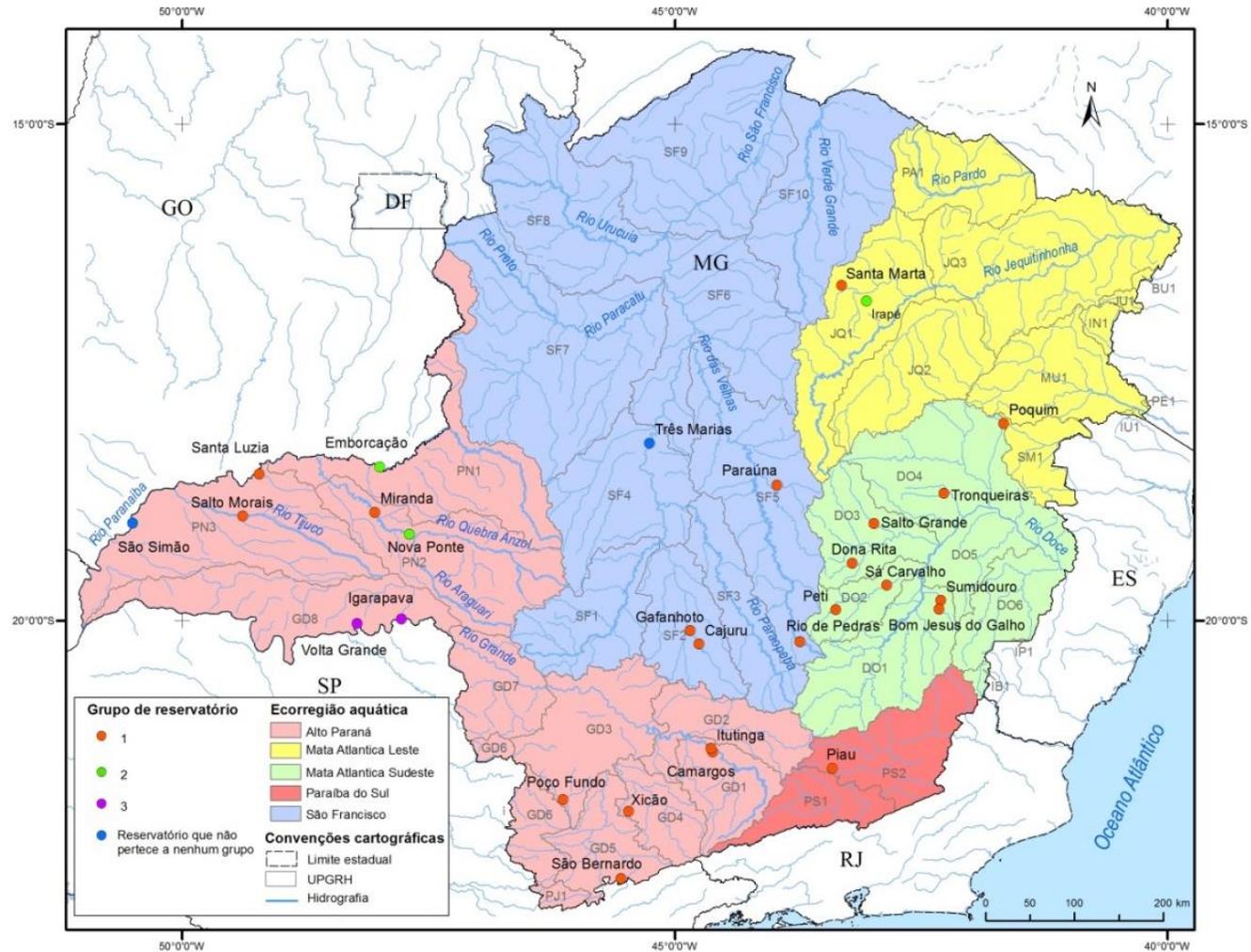


Figura 40: Localização dos grupos de reservatórios quanto às variáveis morfométricas em Minas Gerais.

Fonte: elaborado pela autora.

4.4 Comparação de resultados

Comparando os agrupamentos gerados pelas variáveis de qualidade das águas (I) e morfométricas(II), o primeiro gerou um maior número de agrupamentos (4) e quatro ambientes que não se assimilaram com os demais grupos, e no segundo formaram-se três grupos e dois reservatórios isolados. Três Marias se distanciou do conjunto em ambas as análises, se diferenciando de todos os ambientes. Igarapava e Nova Ponte estiveram no mesmo grupo nas duas situações. Os corpos de água do GI.1 e GI.3 (de qualidade das águas) estão contidos no GII.1 (de morfometria), exceto por Irapé, que tem maiores dimensões do que os representantes do GII.1.

A figura 41 representa o dendograma utilizando as variáveis de qualidade das águas e morfometria selecionadas pela Análise de Componentes Principais. Os agrupamentos gerados pelas duas naturezas de informação geraram um resultado similar com os grupos gerados separadamente, destacando o isolamento de São Simão e Três Marias, os maiores reservatórios em área do conjunto analisado e a formação de grupo dos reservatórios de menor dimensão.

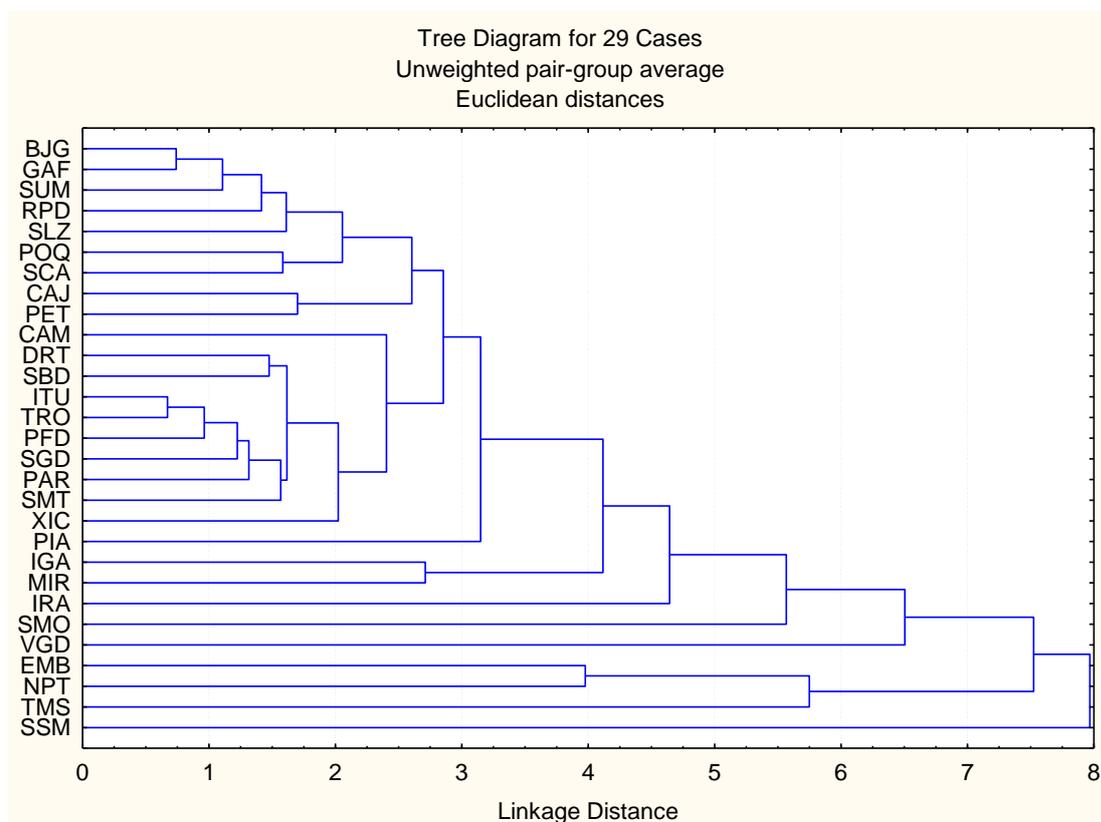


Figura 41: Análise de agrupamento (cluster) de reservatórios utilizando variáveis de qualidade das águas e morfométricas.

Fonte: elaborado pela autora.

A distribuição geográfica dos grupos tem maior relação com a análise I, uma vez que a qualidade das águas reflete as condições do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição do reservatório e características ambientais. Ambientes próximos tendem a ter atividades similares, e conseqüentemente parâmetros físico-químicos semelhantes. Já os parâmetros morfométricos selecionados pela análise de componentes principais (item 4.2.2) não apresentaram dependência espacial.

5 Conclusão

Minas Gerais, bem como o Brasil, são dependentes da energia proveniente de usinas hidrelétricas. As águas represadas dessas usinas, além do papel de gerar energia, permitem usos múltiplos, o que demonstra a importância da gestão desses ambientes. De maneira geral, especialmente em trabalhos internacionais, existem mais estudos sobre lagos naturais do que ambientes artificialmente represados. Dados de monitoramento de qualidade das águas, que são dispendiosos e geram muitas informações são por muitas vezes subutilizados, representando um desperdício de custos, tempo e recursos. Conforme citado na literatura, a análise morfométrica de ambientes aquáticos permite a avaliação limnológica dos corpos de água, uma vez que influencia as dinâmicas física, química e biológica do sistema. Partindo-se dessa consideração, a morfometria, que é menos onerosa e de mais fácil obtenção, é uma alternativa para auxiliar na gestão e prever, por exemplo, quais ambientes são mais susceptíveis a situações recorrentes aos reservatórios, como eutrofização e contaminação.

O presente trabalho teve como propósito avaliar se as variáveis morfométricas respondem à qualidade das águas. Os dados utilizados foram disponíveis livremente e calculados via sensoriamento remoto. O uso de ferramentas estatísticas foi imprescindível para a interpretação dos dados, devido ao grande volume de informações e tratamentos necessários.

Esperava-se inicialmente um número de corpos de água superior ao utilizado nas análises, uma vez que o número de ambientes foi reduzido pela falta de informação dos dados de monitoramento. O número de ambientes analisados foi vinte e nove, que tiveram variáveis mais relevantes selecionadas dentro da amostra (qualidade das águas: turbidez, condutividade, pH, transparência, DBO, sólidos dissolvidos totais e morfométricas: área, perímetro, volume, tempo de residência, desenvolvimento de perímetro, área de drenagem e vazão média de longo período). O resultado do agrupamento mostrou satisfatório para os ambientes de menor dimensão, que juntaram de forma similar nas análises de qualidade das águas e de morfometria.

Para novas pesquisas, recomenda-se a incorporação de dados de uso do solo e cobertura vegetal da bacia de contribuição e do entorno dos reservatórios, uma vez que essa informação tem grande influência na qualidade e quantidade das águas. É relevante que se valide o resultado dos agrupamentos com organismos biológicos, pois as mesmas comunidades tendem a se instalarem em ambientes com

características semelhantes. Outra questão é o estudo do comportamento dos dados nos períodos seco e chuvoso de forma distinta, uma vez que qualidade das águas varia nessas épocas.

Quanto ao gerenciamento, sugere-se ao órgão gestor das águas do Estado agregar ao monitoramento(além dos cursos de água e águas subterrâneas) os reservatórios. Com isso, reservatórios além dos pertencentes à Cemig seriam analisados, unificando a disponibilidade de informações à população.

Referências

ABELL, R. et al. Freshwater ecoregions of the world. A new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *BioScience*, v. 58, n. 5, p. 403-414, 2008.

ANA - Agência Nacional das Águas. Indicadores de qualidade. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>>. Acesso em: 28 nov. 2016.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Matriz de energia elétrica. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas da energia elétrica do Brasil – Capítulo 3: Energia hidráulica. 2005. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2016.

ARRUDA, N. M. B. Avaliação de variáveis de qualidade de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Foz do Areia, Segredo e Caxias, como instrumento de gestão de bacias hidrográficas. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias.

ABRADEE - Associação Brasileira de Distribuidores de Energia elétrica. Visão Geral do setor. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>>. Acesso em: 15 set. 2016.

NETO, J. F. B. e COELHO, R. M. P. A morfometria e o estado trófico de um reservatório urbano: lagoa do Nado, Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais. *Acta Scientiarum*, v. 24(2), n. pp. 285-290, 2002. TONELLO, K. ANÁLISE HIDROAMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DA CACHOEIRA DAS POMBAS. 2005. Universidade Federal de Viçosa, 2005.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) e Agência Nacional das Águas (ANA). Resolução Conjunta nº 03 de 10 de agosto de 2010. Estabelecer as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos

hidrelétricos, e dar outras providências. Disponível em:<http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/ResolucaoConjunta_n_003-2010.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2017.

BRASIL. Decreto nº 5.407 de 27 de dezembro de 1904. Regula o aproveitamento da força hidráulica para transformação em energia elétrica aplicada a serviços federais. Disponível em:<<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1900-1909/decreto-5407-27-dezembro-1904-527509-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 02 set. 2016.

_____.Decreto nº 20.395 de 15 de setembro de 1931. Suspende, até ulterior deliberação, todos os atos de alienação, oneração, promessa ou começo de alienação ou transferência de qualquer curso perene ou queda de água, e dá outras providências. Disponível em:<<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-20395-15-setembro-1931-519312-republicacao-83770-pe.html>>. Acesso em: 02 set. 2016.

_____.Decreto 24.643 e 10 de julho de 1934. Decreta o Código das Águas. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643.htm>. Acesso em: 05 jan. 2017.

BRASIL. Lei nº 5.899, de 05 de julho de 1973. Dispõe sobre a aquisição dos serviços de eletricidade da ITAIPU e dá outras providências. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L5899.htm>. Acesso em: 20 dez. 2016.

_____.Constituição da República Federativa do Brasil. 1988. Senado Federal, Brasília: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

_____.Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9427cons.htm>. Acesso em: 20 dez. 2016.

_____.Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 05 jan. 2017.

BRASIL. Lei nº 9.984 de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=371>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

_____. Conselho Nacional de Meio Ambiente – Conama. Resolução nº 302 de 20 de março de 2002. Dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=298>>. Acesso em: 16 nov. 2016.

_____. Lei nº 10.847 de 15 de março de 2004. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.847.htm>. Acesso em: 10 set. 2016.

_____. Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nos 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.848.htm>. Acesso em: 10 set. 2016.

_____. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2017.

_____. Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de

setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm>. Acesso em 17 fev. 2017.

CAMPAGNOLI, F.; DINIZ, N.C. Gestão de Reservatórios de Hidrelétricas. São Paulo: Oficina dos textos, 2012.

CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B. Bacia hidrográfica. 2006. Disponível em: <<http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap3-BH.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2016.

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. História. 2016. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/main.asp?Team={F109DB32-433B-4906-9E0A-554419CA6A4}>>>. Acesso em: 03 out. 2016.

MEMÓRIA DA ELETRICIDADE - Centro da Memória da Eletricidade no Brasil . Linha do tempo. 2016. Disponível em: <<http://memoriadaeletricidade.com.br/default.asp?pag=3&pagina=destaqueslinha/1879-1896&menu=375&iEmpresa=Menu>>. Acesso em: 03 out. 2016.

CIT - Centro de Inovação e Tecnologia - SENAI FIEMG/ISTMA. Utilização de Índice de Integridade Ecológica para classificar a qualidade de ambientes aquáticos de Minas Gerais. Relatório final. Belo Horizonte: CIT SENAI FIEMG/ISTMA, 2016.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. 2009. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/32/2013/11/variaveis.pdf>>; Acesso em: 20 dez. 2016.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. Manual de procedimentos de coleta e metodologias de análise de águas, 2009. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/ambientais/Biodiversidade/Documents/SISAGUA.pdf>. Acesso em 02 fev. 2016.

_____.Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2006. 304p.

CONTI, F. A distribuição normal. Universidade Federal do Pará. 2011. Disponível em: <<http://www.ufpa.br/dicas/biome/bionor.htm>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

DQA – Directiva Quadro da Água - DQA. 2000. Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de outubro de 2000. Jornal Oficial das Comunidades Europeias. L 327, 22.12.2000, 72pp.

DONI, M. V. Análise de cluster: métodos hierárquicos e de particionamento. São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://meusite.mackenzie.com.br/rogerio/tgi/2004Cluster.PDF>>. Acesso em: 13 set. 2015.

FUENTE D. A.; SABANDO G. M. C. e PÉREZ Q. J. Clasificación de cuerpos de agua: informe final. Santiago: Universidad de Chile, 2010. Disponível em: <http://www.sinia.cl/1292.articles-48828_recurso_1.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2013.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS. Brasília: Funasa, 2014. 112 p.

FURNAS. Usina hidrelétrica. 2016. Disponível em <http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemaFurnas/usina_hidr_funciona.asp>. Acesso em: 12 out. 2016.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. 2009. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/index.php?option=com_content&task=view&id=89&Itemid=146%29>. Acesso em 20jan. 2015.

INAG - Instituto da Água. Tipologia de rios em Portugal continental no âmbito da implementação da Directiva Quadro da Água: I – caracterização abiótica. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Instituto da Água, I.P: 2008.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. História – Petróleo. Disponível em:<http://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=2321catid=28&Itemid=23>. Acesso em: 15 set. 2016.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. 2012. Indicadores de Qualidade. Disponível em: <<http://comites.igam.mg.gov.br/boletim-qualidade-das-aguas/1650-indicadores-de-qualidade>>. Acesso em: 07 ago. 2016.

_____. 2016. Enquadramento dos corpos de água em classes, segundo seus usos preponderantes. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/gestao-das-aguas/enquadramento>>. Acesso em: 07 ago. 2016.

_____. Institucional. 2017a. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/instituicao>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

_____. Monitoramento da qualidade das águas. 2017b. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/component/content/article/3302-nova-categoria/1523-monitoramento-da-qualidade-das-aguas>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

ITAIPU. Nossa história. 2016. Disponível em: <www.itaipu.gov.br/nossahistoria>. Acesso em: 20 dez. 2016.

LAMPARELLI, M. C. Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. 2004. 238 p. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LAURETO, M.S. Tratamento e análise de dados e informações. USP, 2015. Disponível em: <http://www.each.usp.br/laureto/ACH0021_2015/aula06.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2017.

LEOTTI, V.B.; BIRCK, A. R. e RIBOLDI, J. Comparação dos testes de aderência à normalidade Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Cramer-Von Mises e Shapiro-Wilk por simulação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/Testes_de_Hipoteses/Testes_aderencia.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2017.

MINAS GERAIS. Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos (SEMAD) e Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Resolução Conjunta nº 2.237 de 05 de dezembro de 2014. Estabelece procedimentos a serem observados pelos usuários de recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais visando ao envio dos dados de monitoramento pluviométrico, limnimétrico e fluviométrico associados a reservatórios para aproveitamento hidrelétrico e para abastecimento público, e dá outras providências. 2014a. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2015_ARQUIVOS/MONITORA_RESERVATORIO/RESOLU%C3%87%C3%83O_CONJUNTA_SEMAD_E_IGAM_N%C2%BA_2237_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2016.

_____. Decreto nº 46.636 de 28 de outubro de 2014. 2014b. Contém o Regulamento do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM e altera o Decreto nº 41.578 de 08 de março de 2001. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/DECRETO/decreto-46636-2014.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2016.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. Ecorregiões Aquáticas. Disponível em:<http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/eco_srhu_mma_72.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2016.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Ecorregiões aquáticas. 2009 Disponível em <http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/eco_srhu_mma_72.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2017.

PARK, Y.; KWON, Y. ; HWANG, S. e PARK, S.Characterizing effects of landscape and morphometric factors on water quality of reservoirs using a self-organizing map.Elsevier, 2014. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815214000413>>. Acesso em: 03 ago. 2015.

PNQA - Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas. 2016. Indicadores de qualidade – Qualidade de água em reservatórios. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-qualidade-agua.aspx>>. Acesso em: 03 dez. 2016.

SISÁGUA - Sistema de Informação de Qualidade da Água dos Reservatórios da Cemig. *Download* de dados. Disponível em <<http://www2.cemig.com.br/sag/Controles/ColetasGrid.aspx>>. Acesso em: 03 jan. 2016.

SPERLING, E. Morfologia de lagos e represas. Belo Horizonte, DESA – Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.

SPERLING, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; vol. 1). Belo Horizonte: DESA-UFMG, 452p. 2005.

TUNDISI, J. G. Reservatórios como sistemas complexos. In: HENRY, Raoul. Ecologia de reservatórios. São Paulo, Fapesp Fundibio, 1999. 21-27.

UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Parâmetros hidrológicos. Disponível em:<<http://www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/hid.htm>>. Acesso em: 10ago. 2015.

USGS – Serviço Geológico dos Estados Unidos. Lagos e reservatórios. Disponível em<<http://water.usgs.gov/edu/earthlakes.html>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

VARELLA, C. A. A. Análise de agrupamento. UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Disponível em <www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/.../analise%20de%20agrupamento.pptx>. Acesso em: 02 fev. 2017.

_____. Análise de componentes principais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/multivariada%20aplicada%20as%20ciencias%20agrarias/Aulas/analise%20de%20componentes%20principais.pdf>>. Acesso em 20 out. 2015.

VIALI, I. Análise de agrupamento. UCS- Universidade de Caxias do Sul. Disponível em: <http://www.pucrs.br/famat/viali/especializa/realizadas/ceea/multivariada/laminas/CEEAA_04.pdf>. Acesso em 02 fev. 2017.