



**PÂMELA RAFANELE FRANÇA PINTO**

**INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE TEMPORAL E  
ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO SOBRE O  
DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS PARA  
APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS**

**LAVRAS – MG  
2022**

**PÂMELA RAFANELE FRANÇA PINTO**

**INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DA  
PRECIPITAÇÃO SOBRE O DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS  
PARA APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

**Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi**  
**Orientador**

**MSc. Marina Neves Merlo**  
**Coorientadora**

**LAVRAS – MG**  
**2022**

**PÂMELA RAFANELE FRANÇA PINTO**

**INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DA  
PRECIPITAÇÃO SOBRE O DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS  
PARA APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS**

**INFLUENCE OF THE TEMPORAL AND SPATIAL VARIABILITY OF  
RAINFALL ON THE SIZING OF TANKS FOR RAINWATER HARVESTING**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 11 de março de 2022.

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi  
Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello  
Profa. Dra. Camila Silva Franco

UFLA  
UFLA  
UFLA

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi  
Orientador

MSc. Marina Neves Merlo  
Coorientadora

**LAVRAS – MG  
2022**

## AGRADECIMENTOS

Enfim chegou a tão esperada defesa do TCC! Um passo importante para finalizar a graduação.

Primeiramente, gostaria de agradecer à Deus, pelas oportunidades que tive na minha vida, sempre iluminando meu caminho, me dando força para passar pelos obstáculos, me protegendo e me guardando.

Aos meus pais, Eva da Cruz França Pinto e Alberto Antônio Pinto (que está lá no céu, olhando por nós), que sempre me incentivaram a buscar meus sonhos, que me deram educação e serem exemplo de dedicação, companheirismo. Vocês são uma fonte inesgotável de amor, força e fé.

À minha família, que apesar de eu não conseguir estar presente em todos os momentos, devido aos rumos da vida e às minhas escolhas, sempre me apoiaram, em especial aos meus avós Maria José Pinto e Ezequiel Alves Pinto, minha tia Teresinha de Jesus Silva (*in memoriam*) e ao pequeno Yuri França Costa (malinha véia) que trouxe esperança para a nossa família em momentos tão difíceis.

À Maria Montenegro Ramessés, Celso Leandro da Silva Júnior e Layne Campos Silva, pelas conversas, reflexões e pelo apoio durante esse tempo em Lavras. Sem vocês tudo seria mais difícil.

À Tássia Flávia Dias Castro e Emanuely Ramos Tameirão, por toda a amizade nos últimos anos e de fazerem o “Apt. Baballo” um lar, uma família. Vocês são incríveis.

Aos meus amigos de Martinho Campos, aos da Universidade Federal de Lavras e aos da Moradia Estudantil, em especial aos moradores e agregados dos apartamentos 307 e 308 do Bloco I, obrigada por tudo.

Ao Professor Doutor Michael Silveira Thebaldi, pela orientação, paciência durante estes anos, disponibilidade, incentivos, ensinamentos e por ser um exemplo.

À Marina Neves Merlo, que se tornou uma grande amiga, que sempre compartilha experiências comigo, escuta minhas conversas aleatórias e reflexões (também aleatórias) sobre o trabalho, e é a melhor *personal shopper*.

Ao Mateus Alexandre, que divide as atividades do Conselho Geral atualmente comigo, pelas conversas e por sanar minhas dúvidas sobre pontes.

Aos Professores que compõem a banca avaliadora que aceitaram fazer parte deste momento tão importante para mim.

À Ariane Neves Barros de Carvalho, Evane Aparecida Souza Rosa, Sara César Rodrigues, Simone França Silva e Telma Lourdes Barbosa, por serem uma rede de apoio à minha mãe enquanto eu não estou por perto.

Aos “hidroamigos” do NEHIDRO por tornarem as noites de quinta-feira mais leves e descontraídas.

À família Viana que me acolheu tão bem no período que passei em Santa Luzia para concluir o meu estágio.

À equipe da Gerência de Monitoramento Hidrometeorológico e Eventos Críticos (GMHEC), integrante do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), pela oportunidade do estágio e de estar junto com profissionais incríveis, pelo conhecimento, profissional e pessoal adquirido, por tornarem as minhas semanas na “cidade grande” mais leves e por me mostrarem que um ambiente de trabalho pode ser descontraído apesar de muitas demandas. Agradeço em especial a minha supervisora Luiza Ribas, e aos profissionais Fabrizia Araújo, Luísa Vieira, Paula Souza, André Camargo, Ederson Telesforo, Edson Pereira, Luiz Carlos e Micael Fraga com quem compartilhei o ambiente presencial nas primeiras semanas de janeiro de 2022.

À Universidade Federal de Lavras, bem como o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão das bolsas de iniciação científica.

Agradeço a todes que contribuíram com a minha caminhada até aqui.

À todes, o meu muito obrigada!

## RESUMO

Para a implantação de um sistema de aproveitamento de águas pluviais, é primordial o dimensionamento adequado do reservatório, visto que a precipitação é uma das variáveis cruciais para dimensionamento. Neste trabalho foi avaliado o efeito da variabilidade temporal e espacial da precipitação para o dimensionamento de reservatórios para o uso não potável de águas pluviais em edificações por meio de análises estatísticas multivariadas. Para isso, foram selecionados dois municípios de cada estado brasileiro, um do Distrito Federal e em cada uma das mesorregiões mineiras, todos com cinco anos ininterruptos de dados de precipitação. Foram calculadas variáveis estatísticas relacionadas à precipitação, além do volume e indicadores de suprimento de demanda para os pontos máximo e ótimo de dimensionamento por meio de dois algoritmos de balanço hídrico diário comportamental. Por meio da correlação de Pearson, da Análise de Componentes Principais e da Análise de Agrupamentos Hierárquicos, observou-se as correlações, influência e similaridades dos dados. Notou-se uma alta influência de maneira inversa do coeficiente de variação amostral da precipitação diária para o suprimento da demanda. Foram formados 3 grupos para o dendrograma. O grupo 1 engloba os municípios, em sua maioria, com as menores precipitações média em escala anual, mensal e diária, alto coeficiente de variação amostral da precipitação diária e elevada porcentagem de meses classificados como estiagem. O grupo 2 tem comportamento oposto e o grupo 3 possui comportamento intermediário entre os dois outros agrupamentos. Para o Grupo 1, o comportamento para os reservatórios demonstrou que não é vantajoso o aproveitamento de água pluvial para o uso não potável da edificação devido ao baixo suprimento da demanda dos municípios desse agrupamento. Já para os grupos 2 e 3, é vantajoso o aproveitamento das águas pluviais para o uso não potável, porém para o grupo 3, as dimensões do reservatório pode ser um fator limitante, visto que é o reservatório é a parte mais onerosa do sistema de aproveitamento de águas pluviais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise multivariada. Análise de Agrupamento Hierárquico. Análise de Componentes Principais. Hidrologia Urbana. Saneamento Descentralizado.

## ABSTRACT

Adequate tank sizing is key to the implementation of a rainwater-harvesting system since rainfall is one of the crucial variables for its design. This study evaluated the effect of temporal and spatial variations in rainfall on the sizing of tanks for non-potable use of rainwater in buildings through multivariate statistical analysis. Two municipalities were selected from each Brazilian state plus one from the Federal District and one from each mesoregion of the state of Minas Gerais, all with five years of uninterrupted rainfall data. Statistical variables related to rainfall were calculated, as were the volume and demand supply indicators to calculate the largest tank size and the optimal sizing points, using two daily behavioural water balance algorithms. The correlations, influence, and similarities of the data were tested through Pearson correlation, principal component analysis, and hierarchical cluster analysis. The coefficient of variation of daily rainfall had a strong and negative influence on demand-supply. Three groups were formed in the dendrogram. The municipalities in group 1 were mostly those with low mean daily, monthly, and annual rainfall, a high coefficient of variation, and high percentages of months classified as dry, while group 2 showed the opposite pattern. The municipalities in group 3 had intermediate values for these variables. In group 1 the water balance behaviour for the rainwater harvesting tanks shown that the use of rainwater for non-potable uses would not be advantageous due to the low demand-supply of the municipalities of this group. For the groups 2 and 3, it is advantageous to use rainwater for non-potable use, but for group 3, the dimensions of the tank may be a limiting factor.

**KEYWORDS:** Multivariate Analysis. Hierarchical Cluster Analysis. Principal Component Analysis. Urban Hydrology. Decentralized Sanitation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo hidrológico.....	15
Figura 2 – Processo de colisão-coalescência na formação da precipitação.....	16
Figura 3 – Principais processos geradores de chuvas: convectiva (A), orográfica (B) e frontal (C).....	17
Figura 4 – Representação esquemática da chuva convectiva.....	18
Figura 5 – Representação esquemática da chuva orográfica.....	19
Figura 6 – Processos ocasionados pela urbanização .....	21
Figura 7 – Relação entre impermeabilização e escoamento superficial.....	22
Figura 8 – Canalização do Córrego Estribo Ahú, no município de Curitiba – PR, obra de macrodrenagem urbana.....	23
Figura 9 – Representação de um sistema de microdrenagem urbana.....	23
Figura 10 – Elevação do nível de um rio provocada pelas chuvas.....	24
Figura 11 – Característica dos leitos do rio.....	25
Figura 12 – A evolução da urbanização e inundação.....	26
Figura 13 – Hidrograma de uma bacia rural e uma bacia urbana.....	27
Figura 14 – Comparação no hidrograma antes e depois do processo de urbanização.....	28
Figura 15 – Aumento da vazão de pico devido a porcentagem de urbanização e porcentagem da área com condutos.....	28
Figura 16 – Comparação entre o sistema tradicional de drenagem urbana e descentralizado.....	30
Figura 17 – Hidrograma e polutograma em uma área após um período seco.....	32
Figura 18 – Esquema do comportamento do sistema de aproveitamento de água pluvial com o algoritmo YAS.....	39
Figura 19 – Esquema do comportamento do sistema de aproveitamento de água pluvial com o algoritmo YBS.....	40
Figura 20 – Simulação de dimensionamento de reservatório de água pluvial para o município de Comodoro utilizando o algoritmo YAS.....	49
Figura 21 – Matriz de correlação de Pearson para o volume, coeficiente de eficiência de economia de água e confiabilidade plena nos pontos máximos e ótimos de dimensionamento para o YAS e YBS e as variáveis estatísticas relacionadas à precipitação.....	56

- Figura 22 – Círculo de correlação dos componentes principais (CP 1 e CP 2) para as variáveis estudadas na Análise de Componentes Principais (A). Dispersão dos municípios estudados para os componentes principais (CP 1 e CP 2) para a Análise de Componentes Principais de acordo com os grupamentos formados pelo dendrograma (B). .....61
- Figura 23 – Dendrograma para a Análise de Agrupamentos Hierárquicos para 63 municípios brasileiros em relação a 22 variáveis relacionadas ao dimensionamento de reservatórios de captação de águas pluviais e variáveis estatísticas relacionadas a precipitação. ....62
- Figura 24 – Mapa com a localização dos três clusters formados na Análise de Agrupamentos Hierárquicos.....63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação e porcentagem do período de estiagem dos municípios estudados.....	42
Tabela 2 – Classificação climática de Köppen e variáveis estatísticas relacionadas à precipitação de cada município estudado. ....	44
Tabela 3 – Volumes máximos e ótimos, o coeficiente de eficiência de economia de água e a confiabilidade plena para o volume máximo e ótimo de dimensionamento dos municípios para o YAS e o YBS. ....	51
Tabela 4 – Componentes principais (CP 1 e CP 2) da obtidas por meio da Análise de Componentes Principais e suas correlações com as variáveis.....	59

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivo Geral .....	13
1.1.2	Objetivos Específicos .....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	14
2.1	Ciclo Hidrológico .....	14
2.1.1	Precipitação.....	16
2.2	Água no Meio Urbano .....	20
2.3	Águas Pluviais .....	30
2.4	Sistemas Prediais de Reserva de Águas Pluviais.....	33
2.4.1	Métodos de dimensionamento .....	34
2.4.1.1	Método de Rippl .....	34
2.4.1.2	Método da Simulação .....	35
2.4.1.3	Método Azevedo Neto .....	35
2.4.1.4	Método Prático Alemão .....	36
2.4.1.5	Método Prático Inglês.....	36
2.4.1.6	Método Prático Australiano.....	37
2.4.1.7	Método Comportamental .....	38
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	41
3.1	Caracterização da área de estudo .....	41
3.2	Aquisição e tratamento dos dados .....	41
3.3	Simulação para dimensionamento do reservatório .....	47
3.4	Análise estatística .....	54
3.4.1	Matriz de correlação .....	54
3.4.2	Padronização das variáveis .....	54
3.4.3	Análise dos Componentes Principais (ACP) .....	55
3.4.4	Análise de Agrupamentos Hierárquicos (AAH).....	55
4	RESULTADOS .....	56
5	DISCUSSÃO .....	66
6	CONCLUSÃO.....	70
	REFERÊNCIAS .....	71

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a produção agrícola e industrial, junto ao processo de urbanização e ao uso irracional da água, colaboram para que se tenha um aumento na demanda por água de qualidade, o que leva ao estresse hídrico (ERCIN; HOEKSTRA, 2014; HAFIZI MD LANI; YUSOP; SYAFI UDDIN, 2018; SAMPAIO; ALVES, 2017; SOUZA et al., 2016; WWAP, 2020). Esse processo também resulta em maior quantidade de água destinada para o sistema de drenagem urbana, visto que a impermeabilização do solo aumenta o escoamento superficial direto e reduz a infiltração.

Assim, a utilização de técnicas descentralizadas de abastecimento são importantes para diminuir a demanda por água potável advinda das companhias de saneamento, sendo uma delas o aproveitamento de água pluvial para o uso não potável em edificações (ASSUNÇÃO et al., 2019; SAMPAIO; ALVES, 2017; SILVEIRA; ANDRADE; ARAÚJO, 2018).

Tal técnica reduz o volume de água que chega à rede de drenagem urbana, os picos de vazão, as inundações e os impactos financeiros gerados. Há também a redução da poluição difusa (BURNS et al., 2015; HAFIZI MD LANI; YUSOP; SYAFI UDDIN, 2018; KIM et al., 2015; ZAMRI; RAHMAT, 2021). Adicionalmente, pode contribuir para que haja uma redução na necessidade de obras de ampliação dos sistemas de drenagem urbana.

Segundo a versão atualizada NBR 15.527 (ABNT, 2019), para dimensionamento do reservatório de águas pluviais deve-se levar em consideração a área de captação, a demanda não potável da edificação e o regime pluviométrico local. Este último interfere diretamente no dimensionamento assertivo e na eficiência do reservatório, uma vez que constitui a entrada de água do sistema de aproveitamento e, pelo alto custo de implantação do reservatório, deve-se ter uma atenção especial para ele (RUPP; MUNARIM; GHISI, 2011; SILVA et al., 2019).

Devido à grande extensão territorial do Brasil, há diferentes classificações climáticas e elevada variabilidade espacial nos padrões de precipitação, desta forma, caso o regime pluviométrico seja desconsiderado, o dimensionamento proposto pode não ser representativo. Cabe mencionar que a utilização de dados diários apresenta vantagens quando comparado aos mensais ou anuais, pois é possível observar a variabilidade temporal e, conseqüentemente, resultar em um dimensionamento coerente com a

realidade local, evitando super ou subdimensionamentos (LIAW; TSAI, 2004; RUPP; MUNARIM; GHISI, 2011; SILVA et al., 2019).

O uso de análises estatísticas multivariadas, como a Análise de Agrupamentos Hierárquicos e a Análise de Componentes Principais, são técnicas úteis para a compreensão da variabilidade espacial e temporal da chuva, possibilitando o agrupamento de regiões que apresentam comportamento semelhante. Além disso, permite a verificação das variáveis que apresentam maiores influências no comportamento do dimensionamento, sendo uma ferramenta de apoio para as metodologias e tomadas de decisão. Desta forma, com este trabalho objetivou-se avaliar o efeito de variáveis referentes ao comportamento temporal e espacial da precipitação sobre o dimensionamento e eficiência de reservatórios para aproveitamento de águas pluviais em edificações, por meio de análises estatísticas multivariadas, para o território brasileiro.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar o efeito de variáveis e indicadores referentes à variabilidade temporal e espacial da precipitação sobre o dimensionamento de reservatórios para aproveitamento de águas pluviais em edificações no Brasil por meio de análises estatísticas multivariadas.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Verificar a correlação entre as variáveis relacionadas à precipitação em cada município e as variáveis relacionadas ao dimensionamento do sistema de aproveitamento de águas pluviais;
- Determinar, por meio análise de componentes principais, a interrelação entre as variáveis de projeto estudadas e sua influência sobre a classificação obtida dos municípios estudados; e
- Agrupar, por meio de dendrograma, os municípios em relação à similaridade do dimensionamento do sistema de aproveitamento de águas pluviais e das variáveis estatística relacionadas a precipitação.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Ciclo Hidrológico

A água é um recurso natural limitado de grande importância, por ser usada para diversas finalidades, como para o consumo humano, para manutenção do ecossistema e da vida, além de apresentar interesse social, político, econômico e ambiental (BALBINOT et al., 2008; CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012; TONELLO, 2005; VERIATO et al., 2015; WOLKMER; PIMMEL, 2013).

Assim, a hidrologia, é a ciência que estuda o comportamento da água, por meio dos fenômenos que ocorrem no tempo e no espaço, por meio da observação do comportamento desta, a sua distribuição, ocorrência e circulação, as interações que ocorrem com o meio e com a vida, além de sua qualidade e quantidade (NAGHETTINI; PINTO, 2007; TUCCI, 2001a). Deste modo, os fenômenos hidrológicos que ditam como será o armazenamento e o transporte de água no ciclo hidrológico (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

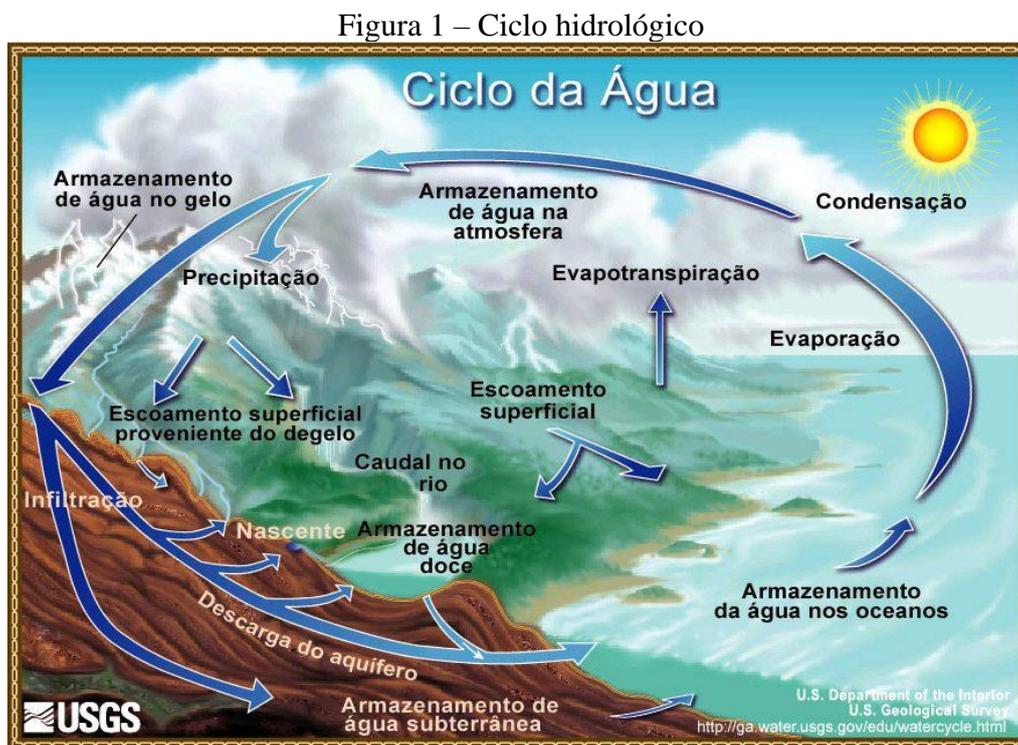
No ciclo hidrológico ocorre a circulação fechada da água em nível global abrangendo a movimentação desta que ocorre entre oceanos, continentes e atmosfera e os processos hidrológicos naturais atuantes nas bacias hidrográficas. A manutenção deste ciclo ocorre pela energia vinda do sol, juntamente com a gravitacional e a rotação terrestre (CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012; LIMA, 2008; MARINHO FILHO et al., 2012; NAGHETTINI; PINTO, 2007; SILVEIRA, 2001; VAREJÃO-SILVA, 2006).

Características de uma bacia hidrográfica como forma, relevo, área, drenagem e uso e ocupação do solo, dentre outros, ditam o comportamento hidrológico que ocorrerá, podendo alterar a infiltração, o deflúvio, a evapotranspiração, o escoamento superficial e subsuperficial, além de afetar também aspectos quantitativos e qualitativos da água. Desta forma, as ações antrópicas também interferem nos processos hidrológicos (LIMA, 2008; TONELLO, 2005).

A água pode ser encontrada nos estados líquido, sólido e gasoso em seu ciclo. Ao receber a energia solar passa para estado de vapor, sendo que, quando este processo se dá por meio de transpiração (plantas), evaporação e sublimação, ou seja, do sólido para o vapor (CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012; MARINHO FILHO et al., 2012; PINTO, 1976; SILVA, 2002; SILVEIRA, 2001).

Assim, quando as gotículas de água se condensam formando nuvens ocorre a precipitação, que é a maior fonte de entrada de água da atmosfera para a superfície (BALBINOT et al., 2008; CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012; LIMA, 2008; PINTO, 1976; SILVA, 2002; SILVEIRA, 2001).

Na Figura 1 tem a esquematização do Ciclo Hidrológico.



Fonte: Evans (2017).

A precipitação pode ter vários destinos. Uma parcela pode ser interceptada pelas plantas, outra ser evaporada e voltar para a atmosfera e outra parte atingir o solo. Esta última pode infiltrar quando está na superfície do solo, recarregar os aquíferos, ser absorvida pelas raízes de plantas e retornar à atmosfera pela evapotranspiração (BALBINOT et al., 2008; CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012; LIMA, 2008; PINTO, 1976; SILVA, 2002; SILVEIRA, 2001).

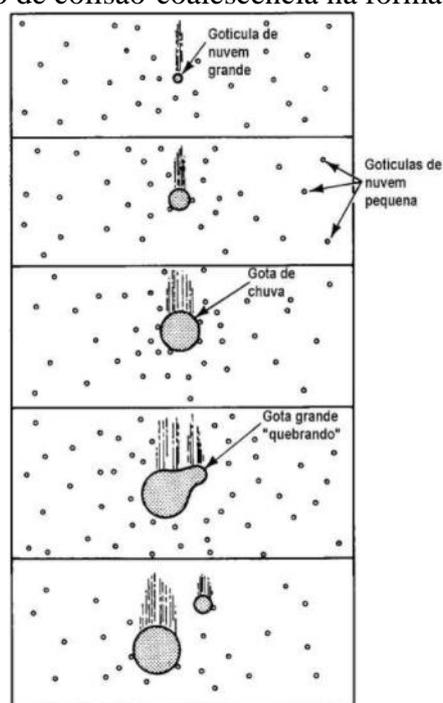
Vale ressaltar, contudo, que com o aumento da umidade do solo, há uma diminuição da capacidade de infiltração e quando está se torna menor que a intensidade de precipitação, inicia-se o escoamento sobre a superfície. Este se dá de um local com maior energia potencial para outro de menor energia potencial, contribuindo para a vazão dos corpos hídricos, até que cheguem aos oceanos (BALBINOT et al., 2008; CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012; PINTO, 1976; SILVA, 2002; SILVEIRA, 2001).

### 2.1.1 Precipitação

Na hidrologia, a precipitação é explicado como toda a água vinda da atmosfera que atinge a superfície terrestre, seja na forma de chuva, granizo, neblina, neve, orvalho ou geadas, sendo a mais corriqueira a chuva (BERTONI; TUCCI, 2001; SILVEIRA, 2001).

A formação da precipitação pluvial, se inicia na atmosfera, quando a massa de ar úmida sobe e é resfriada adiabaticamente, ou seja, há redução da temperatura sem que haja troca de calor significativa com o meio, chegando ao ponto de saturação e atingindo a temperatura do ponto de orvalho. A água, no estado de vapor, se condensa gerando nuvens - caso haja núcleos de condensação (poeiras, partículas, gelos) -, as microgotículas de água vão se coalescendo (aglutinação das gotículas) e crescendo. Quando as gotas atingem um volume o qual seu peso é maior que as forças que as mantêm suspensas, há um desequilíbrio entre a força gravitacional e as correntes ascendentes, fazendo com que elas precipitem. Na queda, as gotas aglutinam-se com as gotículas que encontram no caminho, formando assim, gotas maiores que chegam à superfície na forma de chuva (BERTONI; TUCCI, 2001; HOLTZ, 1976; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; SILVEIRA, 2001). como é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Processo de colisão-coalescência na formação da precipitação.

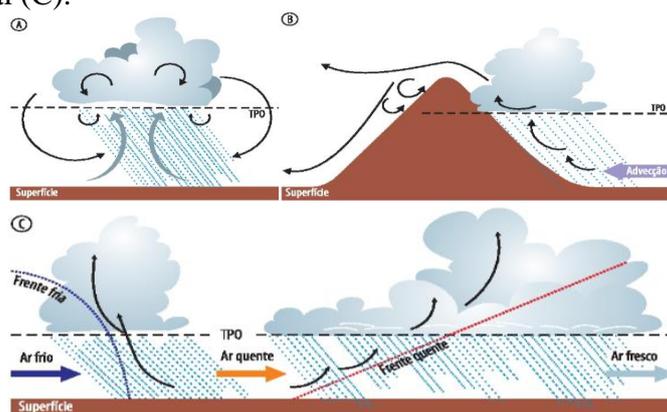


Fonte: Grim (20XX).

As chuvas são classificadas segundo a sua formação, que se encontra relacionada com a elevação das massas de ar que geram as nuvens, podendo ser chuvas com origens: térmicas ou convectivas, orográficas ou de relevo, e frontal ou ciclônica (BERTONI; TUCCI, 2001; HOLTZ, 1976; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; OLIVEIRA; FALEIROS; SANTOS, 2012; SANTOS et al., 2018; SILVEIRA, 2001; STEINKE, 2012).

A primeira classificação ocorre quando há a convecção térmica, assim, o ar úmido é aquecido, expandindo e se eleva, e resfria adiabaticamente em níveis superiores da Troposfera, chegando ao ponto de saturação, condensando e formando nuvens, ocasionando chuvas intensas e rápidas (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; OLIVEIRA; FALEIROS; SANTOS, 2012; STEINKE, 2012) como se pode ver nas Figura 3A e Figura 4.

Figura 3 – Principais processos geradores de chuvas: convectiva (A), orográfica (B) e frontal (C).



Fonte: Mendonça; Danni-Oliveira (2007)

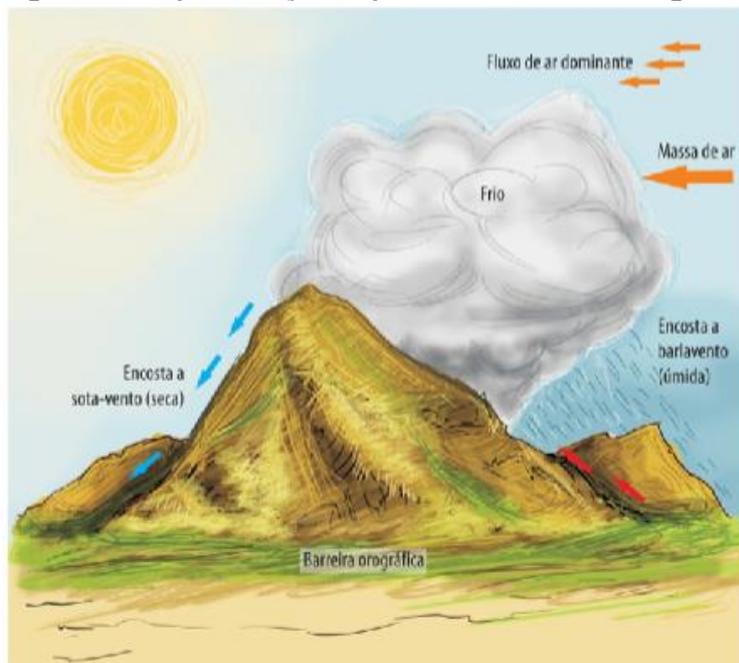
Figura 4 – Representação esquemática da chuva convectiva.



Fonte: Steinke (2012)

Já a chuva orográfica (Figura 3B e Figura 5) ocorre quando há uma barreira topográfica, que se torna um obstáculo para as massas de ar úmidas e quentes, que ascendem para transpô-la, e acabam se resfriando adiabaticamente, causando o aumento da umidade relativa do ar e, quando atinge a saturação, há a formação de nuvens, ocasionando chuvas de intensidade média e de longa duração (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; OLIVEIRA; FALEIROS; SANTOS, 2012; STEINKE, 2012). Assim, o lado da montanha em que chove mais são conhecidas como barlaventos e a encosta menos chuvosa, sotaventos.

Figura 5 – Representação esquemática da chuva orográfica



Fonte: Steinke (2012)

As chuvas frontais ocorrem quando há interações de massas de ar, assim, há elevação do ar úmido ao longo das frentes de características diferentes, formando nuvens (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; STEINKE, 2012), como mostrado na Figura 3C.

A precipitação pluvial, no globo, apresenta um padrão de distribuição, que se relaciona com as correntes marítimas, com as zonas de temperatura, os ventos oceânicos e com a dinâmica da baixa atmosfera, apresentando variabilidade de acordo com o espaço e tempo (BELLADONA; VARGAS, 2017; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; NERY; MACHADO, 2018; SILVA et al., 2011).

A zona que tem mais chuvas no planeta é ao longo da linha do Equador, em que a evaporação é maior e há formação de movimentos convectivos (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Assim, para uma melhor qualidade dos projetos hidráulicos e hidrológicos é necessário entender como ocorre essa variabilidade dos padrões de chuva (BELLADONA; VARGAS, 2017).

Ao observar o ciclo hidrológico em ambientes urbanizados ou que está passando pelo processo de urbanização, é visto que ele se modifica, devido a impermeabilização, alteração da topografia, retirada das árvores, canalização dos cursos d'água, sendo distinto do ciclo que ocorre em ambientes naturais; além disso, este processo, quando não se tem planejamento correto traz problemas como contaminação de água, inundações,

escassez de água, entre outros (CARVALHO, 2016; FRITZEN; BINDA, 2011; SANTOS JÚNIOR; SANTOS, 2013; SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012; TUCCI, 2008).

## 2.2 Água no Meio Urbano

Segundo Tucci (2008) “o sistema de abastecimento de água e esgotos sanitários, a drenagem urbana, inundação ribeirinha, a gestão dos sólidos totais”, são componentes do sistema de águas no meio urbano.

O desenvolvimento das águas urbanas apresenta fases, que são: pré-higienista, higienista, corretiva e desenvolvimento sustentável (TUCCI, 2007). A primeira fase apresenta como característica a água captada em poços ou rios mais próximos e o esgoto lançado em fossas, sem a coleta correta e ambos sem tratamento, assim, há a tendência de ocorrência de doenças e epidemias, além de inundações.

Já na segunda, há a canalização do efluente e este passa a ser transportado para longe da população, ocasionando assim, a redução de doenças; as águas ainda são contaminadas e há a ocorrência de inundação, onde todo o impacto entre infiltração e escoamento superficial causado pela urbanização é propagado para jusante. Na fase corretiva, o efluente passa a ser tratado e há a preocupação de realizar o amortecimento do escoamento, resultando assim na recuperação dos corpos d’água. Na última fase, busca se o tratamento da água das chuvas e dos efluentes a fim de retirar nutrientes, além de buscar a conservação dos locais onde o escoamento ocorria de modo natural, trazendo assim, a decréscimo nas inundações e melhoria na qualidade de vida da população (TUCCI, 2007).

A urbanização, principalmente quando não planejada, impacta de maneira negativa o ambiente e devido as ações antrópicas, há uma modificação no ciclo hidrológico e a hidrologia urbana é a vertente da hidrologia que estuda os processos hidrológicos na zona urbana, sendo estes distintos dos que ocorrem em zonas naturais e apresentam uma maior complexidade (CARVALHO, 2016; FRITZEN; BINDA, 2011; LIMA, 2010; PORTO et al., 2001; REZENDE DE SOUZA et al., 2021; ZANANDREA, 2016).

A água para o abastecimento urbano, geralmente, é captada de outras bacias ou na mesma bacia à montante da área urbana, não sendo somente a precipitação a entrada de água na bacia, e nas tubulações de distribuições pode acontecer perdas devido a

vazamentos que contribuem para a infiltração e após o uso, essas águas de abastecimento são transformadas em esgoto (CARVALHO, 2016; ZANANDREA, 2016).

Devido ao aumento da urbanização, com a retirada da vegetação, impermeabilização e compactação do solo, canalização e ocupação das regiões ribeirinhas, há alteração no destino das águas da chuva (CENSI; ZANANDREA; MICHEL, 2017; FAXINA et al., 2012; FELIPPE; MAGALHÃES JUNIOR, 2009; GONÇALVES; BAPTISTA; RIBEIRO, 2016; SILVA JUNIOR; SILVA, 2016; TUCCI, 2005), como esquematizado na Figura 6.

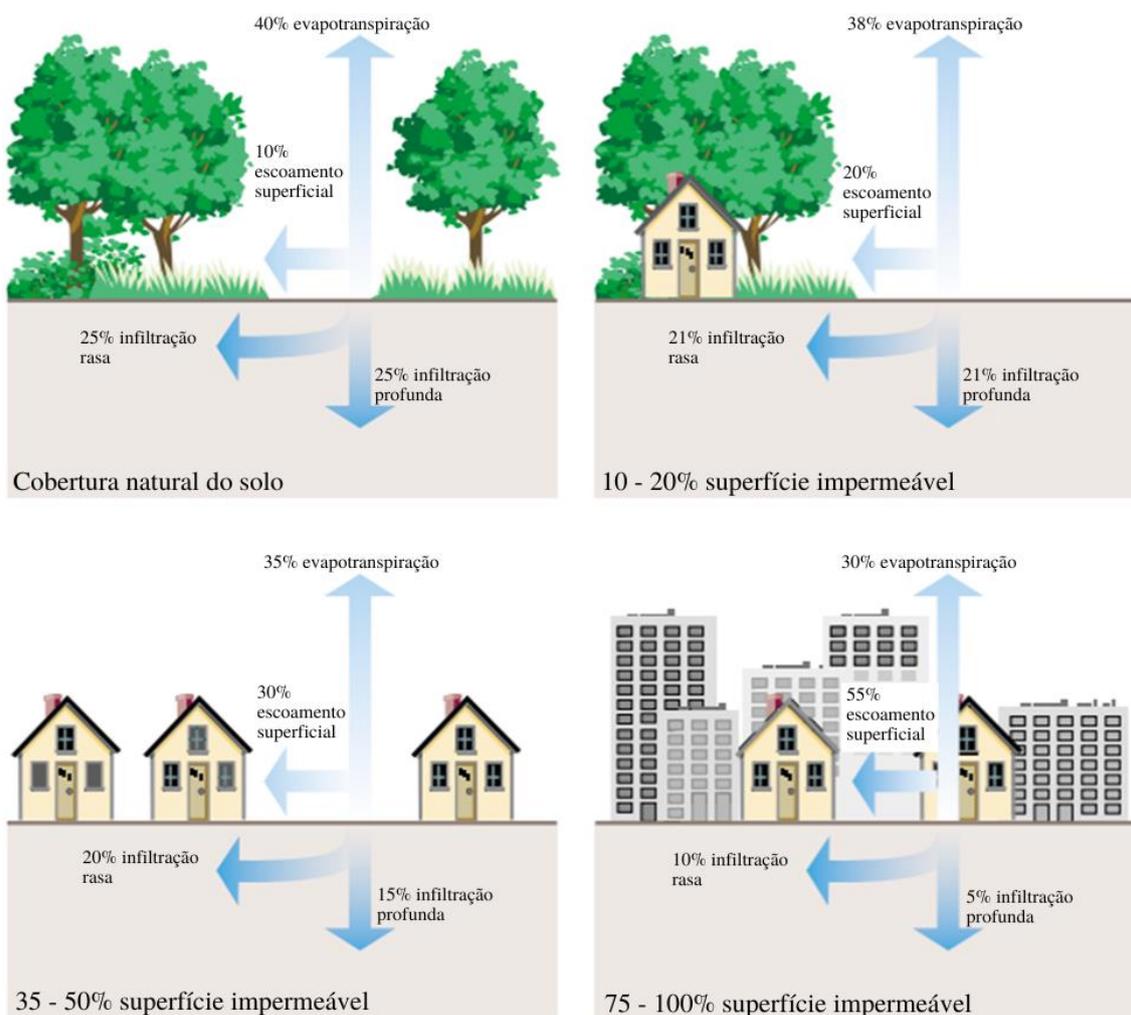
Figura 6 – Processos ocasionados pela urbanização



Fonte: Silva (2015).

Desta maneira, há um decréscimo da capacidade de infiltração, diminuindo o abastecimento do lençol subterrâneo que, conseqüentemente, diminuirá a quantidade de água em rios. Além disso, causa o aumento o volume do escoamento superficial e, devido à rugosidade inferior de pavimentos, há um incremento na velocidade desse escoamento (ALMEIDA, 2016; CENSI; ZANANDREA; MICHEL, 2017; FELIPPE; MAGALHÃES JUNIOR, 2009; LIMA, 2010), como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Relação entre impermeabilização e escoamento superficial.



Fonte: Adaptado de FISRWG (2001).

A drenagem urbana, de maneira tradicional, buscava passar a água da chuva para a jusante, assim também os problemas ocasionados por ela (CHRISTOFIDIS; ASSUMPCÃO; KLIGERMAN, 2019; SOUZA; MORAES; BORJA, 2013). A drenagem urbana contempla as medidas que visam minimizar os riscos e prejuízos que as inundações podem ocasionar, realizando o manejo da água da chuva, bem como auxiliar no desenvolvimento urbano de modo sustentável e é formada pela macrodrenagem e pela microdrenagem (CHRISTOFIDIS; ASSUMPCÃO; KLIGERMAN, 2019; PORTO et al., 2001; SOUZA; MORAES; BORJA, 2013).

As obras de macrodrenagem tem por objetivo evitar enchentes, assim, são responsáveis por reunir e escoar a água pluvial da área urbana para os fundos de vales, através de cursos de água perenes ou canais construídos (para atender um período de retorno de 10 a 100 anos) ou até reservatórios de detenção (DIOGO; SCIAMMARELLA,

2008; PINTO; PINHEIRO, 2006; PORTO et al., 2001; TUCCI, 2007). Na Figura 8 é possível observar um canal de macrodrenagem no município de Curitiba.

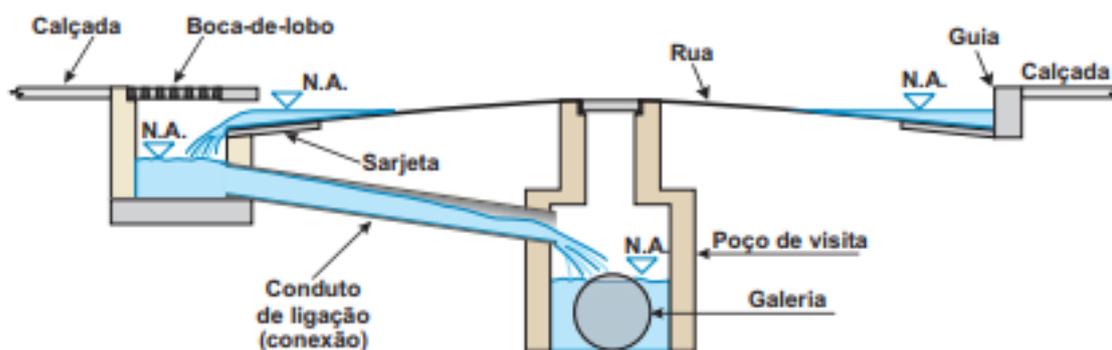
Figura 8 – Canalização do Córrego Estribo Ahú, no município de Curitiba – PR, obra de macrodrenagem urbana.



Fonte: Bressan (2016).

Já, a microdrenagem, refere-se aos dispositivos que coletam as águas pluviais e as encaminham para o sistema de macrodrenagem, seguindo a ocupação que o solo tem e é formada pelos poços de visita, bocas de lobo (vertedores verticais), redes coletoras e sarjetas, que são geralmente dimensionados para um período de retorno de 2 a 10 anos (DIOGO; SCIAMMARELLA, 2008; PINTO; PINHEIRO, 2006; PORTO et al., 2001). Na Figura 9 é possível observar o esquema simplificado de um sistema de microdrenagem.

Figura 9 – Representação de um sistema de microdrenagem urbana.



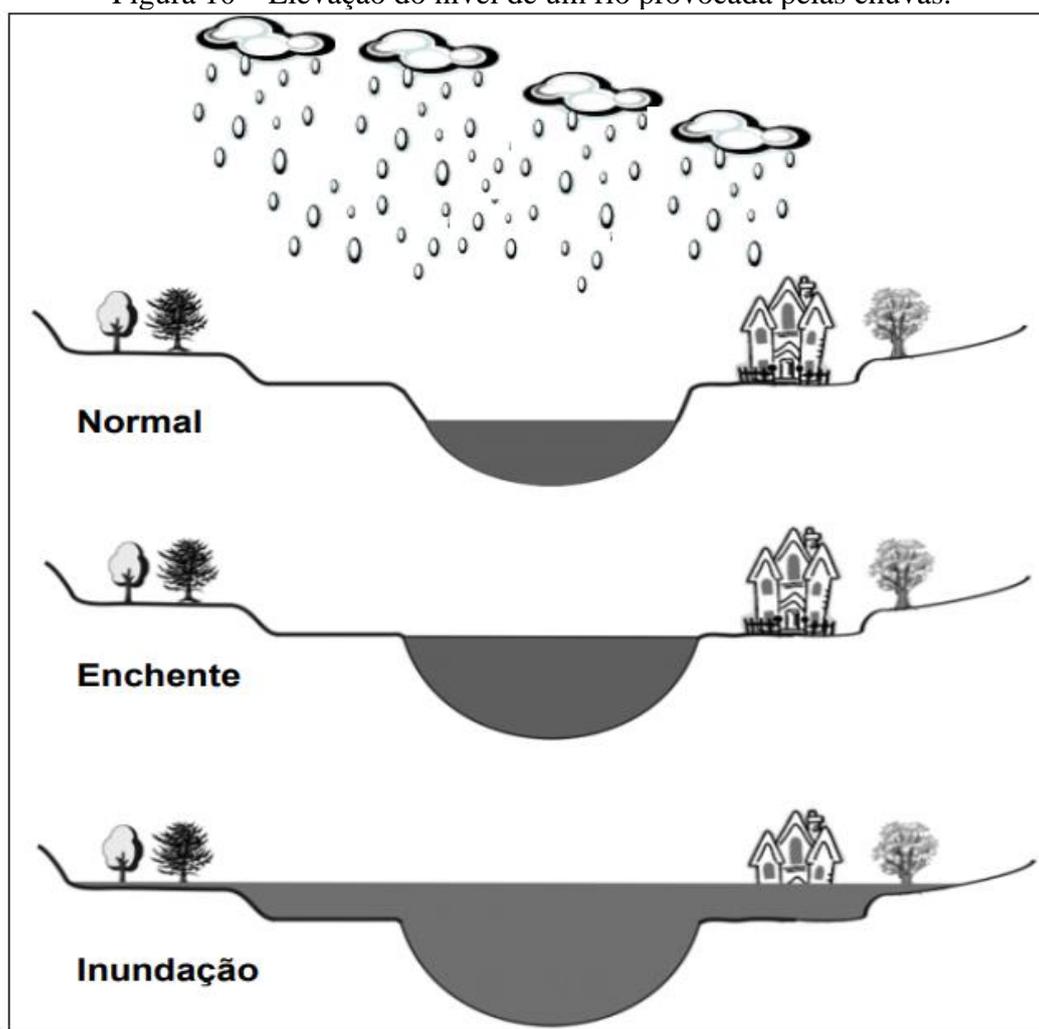
Fonte: Diogo e Sciammarella (2008)

A macrodrenagem e a microdrenagem operam de maneira conjunta, assim, quando subdimensionadas, as águas pluviais não conseguem escoar, ocasionando então os alagamentos (BRAGA; GOUVEIA, 2020; RIGHETTO, 2009; SILVA et al., 2020)

Desta forma, com o aumento da impermeabilização, somada a outras alterações antrópicas, há uma redução da infiltração e do amortecimento de enchentes, assim, o escoamento superficial pode ocasionar enchentes e inundações, e acabar influenciando na qualidade do curso d'água por meio de poluição difusa, devido ao carreamento de sedimentos (COSTA, 2013; FRITZEN; BINDA, 2011; RIGHETTO; GOMES; FREITAS, 2017; ZANANDREA, 2016).

A enchente ocorre quando há a elevação do nível do curso d'água sem extravasamento e quando há, ocorre a inundação (GOERL; KOBIYAMA, 2005), como pode ser observado na Figura 10.

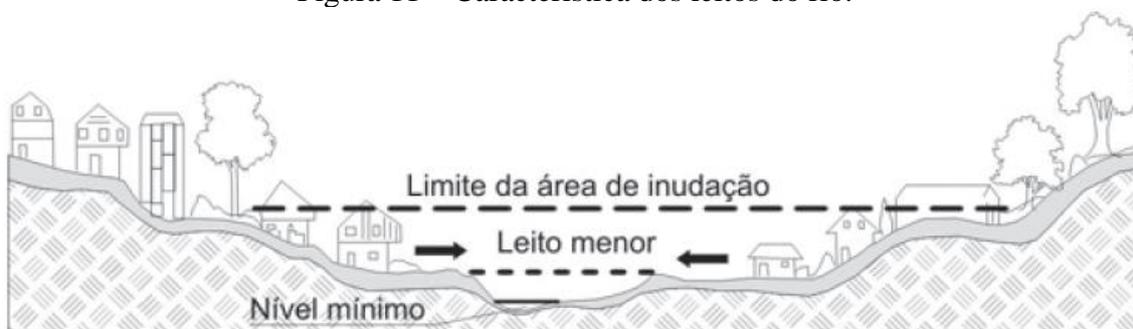
Figura 10 – Elevação do nível de um rio provocada pelas chuvas.



Fonte: Goerl e Kobiyama (2005)

Segundo Tucci (2008) as inundações, em bacias urbanas, são classificadas como inundações de áreas ribeirinhas e inundações em razão da urbanização. A primeira se refere as ocorrências naturais de inundação no leito maior do rio, e estas são causadas pelas variabilidades na precipitação e do escoamento na bacia; já a segunda se refere à que ocorre por causa da impermeabilização do solo, canalização e obstrução do escoamento, ocorrendo na drenagem urbana (TUCCI, 2008). Estas trazem impactos de ordem social, econômica, ambiental e sanitária (ARAÚJO, 2016; GURGEL, 2016) principalmente quando há ocupação inadequada do leito dos rios, como é possível ver Figura 11.

Figura 11 – Característica dos leitos do rio.



Fonte: Tucci (2008)

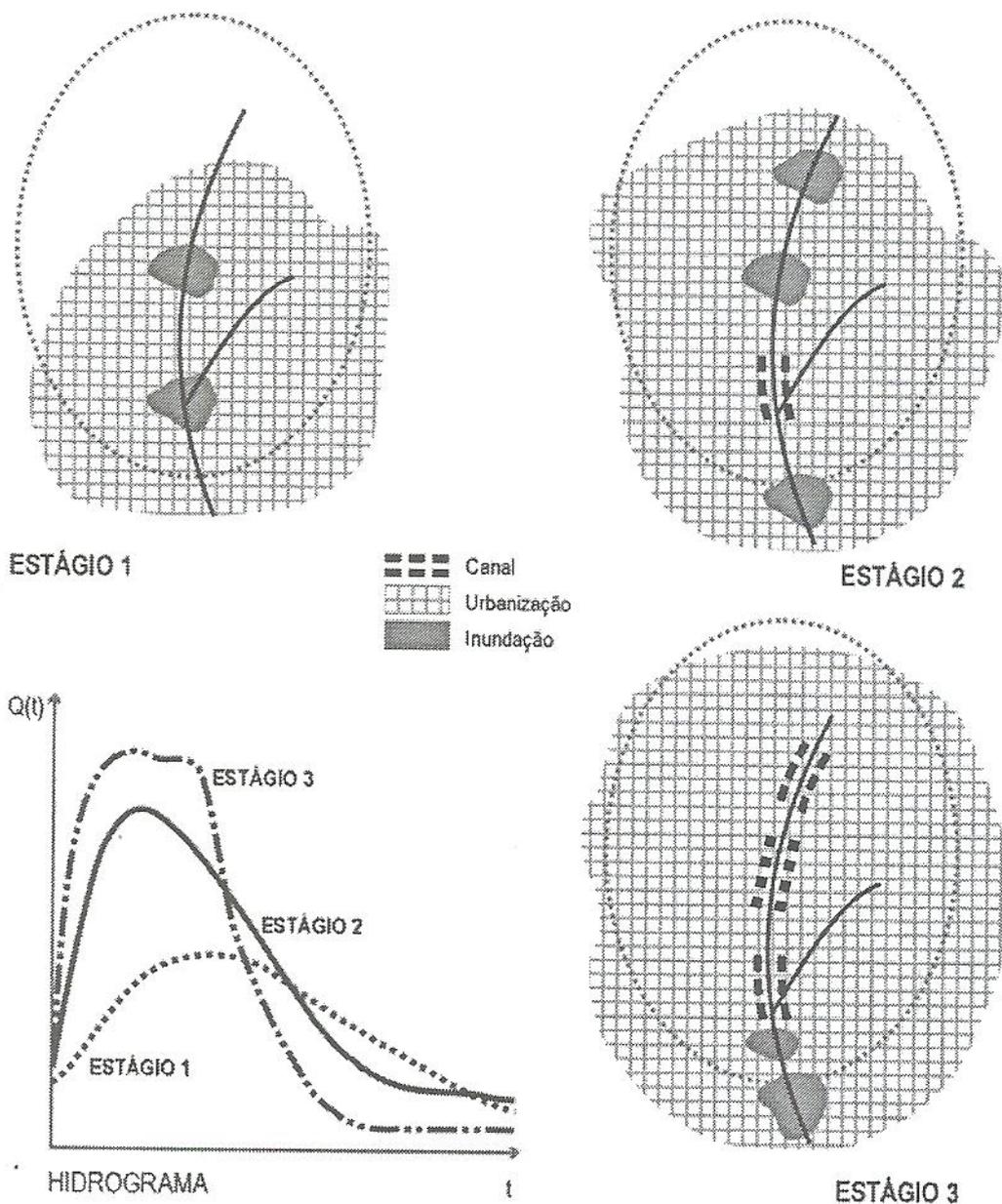
Existem medidas para controlar os riscos e impactos da inundação e elas podem ser divididas em dois tipos: não-estruturais, que tem caráter de prevenção e busca melhorar o convívio da população que será afetada com a inundação, como: o zoneamento de áreas inundáveis, sistema de alerta e previsão, seguros, proteção individual, planejamento do uso do solo; e estruturais, em que se interfere no meio por meio de obras de engenharia, que modificam o curso d'água e são mais onerosas que as não estruturais (AZEVEDO; NETO, 2016; BRAGANÇA; FONSECA; HORA, 2016; DECINA; BRANDÃO, 2016; DIOGO; SCIAMMARELLA, 2008; PEIXOTO; RODRIGUES; ALBUQUERQUE, 2019; SOUSA; GONÇALVES, 2018; TUCCI, 2001b, 2007). É muito importante o uso das ambas medidas, de maneira conjunta, para que assim, o impacto que as inundações causam, sejam minimizados (ABATTI; TSCHÖKE, 2018).

As medidas estruturais podem ser extensivas e intensivas. As extensivas atuam diretamente na bacia, distribuída, alterando a relação entre a chuva e a vazão dos corpos hídricos, atrasando o pico, auxiliando principalmente nas inundações que ocorrem com uma maior periodicidade, podendo ser realizadas por meio de reflorestamento e por

práticas de conservação do solo (ABATTI; TSCHÖKE, 2018; TUCCI, 2001b, 2007). Já as intensivas atuam de forma direta sobre o curso hídrico e segundo Simons et al. (1977) *apud* Tucci (2007), indicam ainda que podem ser divididas em três tipos: (i) acelera o escoamento, como a canalização, alteração da declividade; (ii) desvio de escoamento e (iii) amortece e retarda o escoamento, como reservatórios e bacias amortecimento que retardam os picos a jusante (ABATTI; TSCHÖKE, 2018; TUCCI, 2001b, 2007).

Conforme Tucci (2007), a urbanização e alterações da bacia hidrográfica geradas por ela apresentam 3 estágios, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – A evolução da urbanização e inundação.

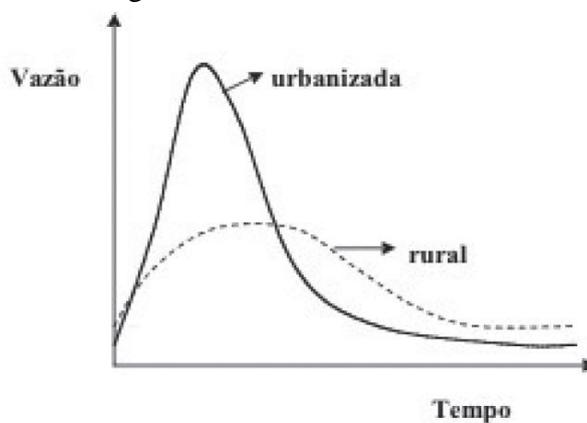


Fonte: Tucci (2007)

No estágio 1, a bacia apresenta urbanização e as inundações ocorrem em função morfologia do canal; a cidade aumenta o processo de urbanização e há uma construção de um canal no trecho, aumentando assim os pontos de inundação e a vazão a jusante, como pode ser notado no estágio 2; com o aumento da urbanização da bacia e assim, sendo construído mais canais para evitar inundação, há um aumento na vazão na saída da bacia e das inundações; passando o problema da inundação da bacia para jusante do local, não solucionando esse problema (TUCCI, 2007).

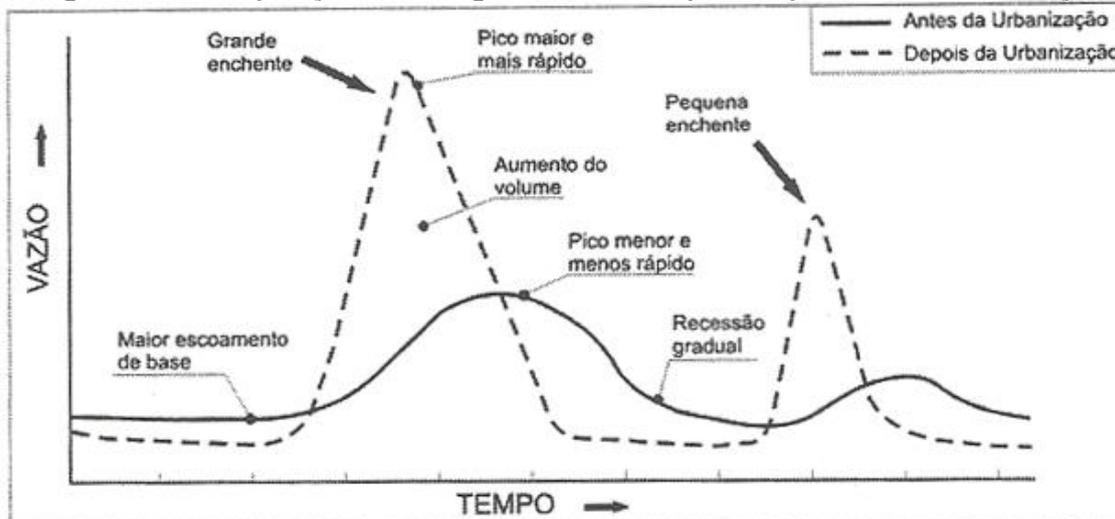
Assim, o processo de urbanização traz diversos impactos, de caráter qualitativo e quantitativo para os recursos hídricos, ocorre o aumento da vazão máxima, como pode ser observado na Figura 13 e na Figura 14, diminuição da qualidade das águas, tanto de superfície quando as subterrâneas, aumento da produção de sedimentos, e depois desse processo a ocorrência de vazões maiores aumenta (SANTOS JÚNIOR; SANTOS, 2013; SILVA JUNIOR; SILVA, 2016; TUCCI, 2008; TUCCI; COLLISCHONN, 1998; ZANANDREA, 2016). Além disso, essas mudanças que ocorrem afetam a bacia além da cidade (TUCCI, 2007).

Figura 13 – Hidrograma de uma bacia rural e uma bacia urbana



Fonte: Tucci (2008).

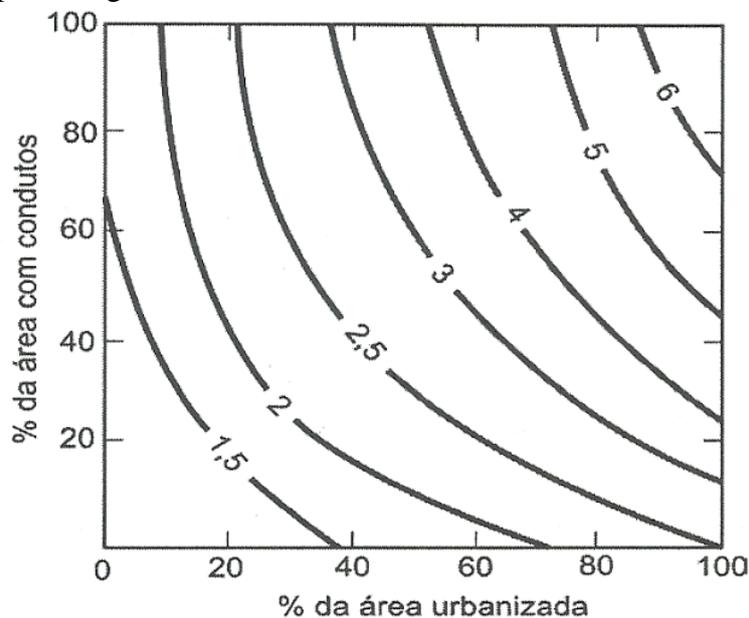
Figura 14 – Comparação no hidrograma antes e depois do processo de urbanização



Fonte: Schueler (1987) apud Tucci (2007).

Segundo Leopold (1968) citado por Tucci e Collischonn (1998) ocorre um aumento de vazão em até aproximadamente 7 vezes, isso ocorre devido a impermeabilização e do aumento de condutos, como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Aumento da vazão de pico devido a porcentagem de urbanização e porcentagem da área com condutos.



Fonte: Leopold (1968) apud Tucci (2007).

De acordo com Porto et al. (2001), as redes de drenagem, lixo e redes de esgoto deficientes, têm como efeitos, respectivamente: maiores picos e vazões a jusante, entupimento de bueiros e galerias, degradações da qualidade da água, e no último, quando

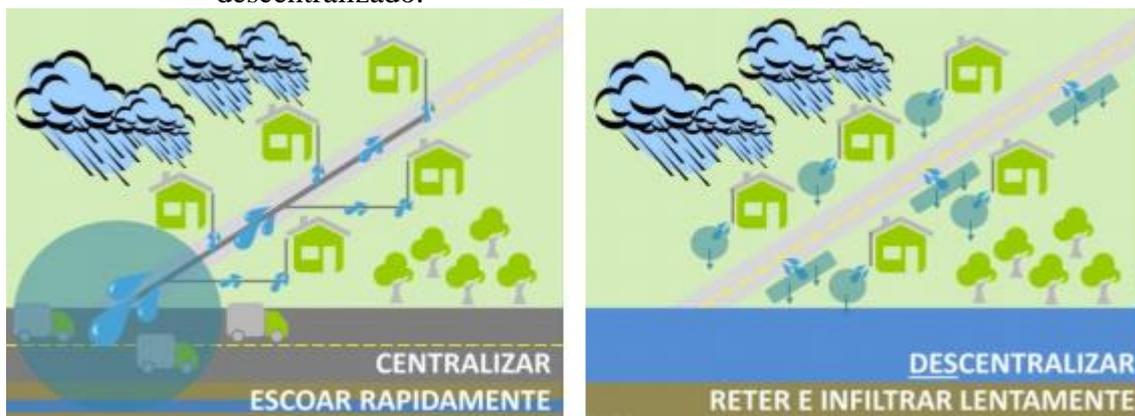
ocorre inundações, os impactos são bem maiores. Já devido a impermeabilização, há um diminuição na infiltração, um incremento no volume do escoamento superficial, nas vazões de pico e uma redução no tempo de concentração, assim, pequenos eventos que acontecem com uma maior frequência apresentam seus efeitos potencializados (NAVARRO, 2013; PORTO et al., 2001; TUCCI, 2007).

Assim, em virtude do processo de urbanização há mudanças no tempo de concentração e no clima da bacia. Em relação ao tempo de concentração, a impermeabilização e construção de canais, ocasiona a sua redução, ou seja, a um decréscimo no tempo em que a água no local mais longe da bacia até o exutório, aumentando a velocidade de transporte da água (TUCCI, 2001c, 2007).

A urbanização faz com que cada vez mais as superfícies sejam impermeabilizadas e com menos vegetação, modificando as relações que antes aconteciam, diminuindo a evaporação, influenciando no clima, sendo o ambiente urbano somado com o industrialização, e suas interações um modificador do clima local; assim há formação de ilhas de calor e os asfaltos absorvem mais energia, aumenta a emissão de radiação térmica, gerando aumento da temperatura onde as superfícies que apresentam cobertura por este material e está temperatura maior pode ocasionar o aumento das chuvas, acentuando as problemas de inundação (SANTOS, 2016; TUCCI, 2007).

Pelas obras de drenagem urbana serem onerosas, aumentar seus canais torna-se inviável, assim, para diminuir a sobrecarga causada na rede de drenagem urbana devido a urbanização, surgem as técnicas compensatórias em que ocorre a descentralização de soluções, como pode ser observado na Figura 16, diminuindo assim o escoamento superficial, além da vazão que chegará a jusante do trecho, por meio de técnicas que permitem a infiltração ou a retenção da água, sendo exemplos, os jardins de chuvas, os poços de infiltração, pavimentos permeáveis, reservatórios de detenção e retenção (ABATTI; TSCHÖKE, 2018; AGOSTINHO; POLETO, 2012; DRUMMOND; REGO, 2015; LUCAS et al., 2015; MELO et al., 2014; REIS; ILHA, 2019; SANTOS et al., 2016; TUCCI, 2007).

Figura 16 – Comparação entre o sistema tradicional de drenagem urbana e descentralizado.



Fonte: Santos et al. (2016)

Com o crescimento da urbanização, houve o aumento demanda por água para abastecimento de casas, indústrias, estabelecimentos, entre outros; junto com a contaminação dos mananciais, esse excesso de demanda acaba ocasionando o estresse e escassez hídrica, acontecendo de um modo mais acentuado em localidades que há baixa ocorrência de precipitação (SAMPAIO; ALVES, 2017; SILVEIRA; ANDRADE; ARAÚJO, 2018; TESTON et al., 2018; TUCCI, 2007; WWAP, 2020).

Assim, faz necessário o uso desse recurso com consciência e o reúso de água pode auxiliar na minimização desse problema, um exemplo é a utilização para fins não potáveis da água da chuva, que diminui o consumo de água potável e também podem reduzir a ocorrência das inundações (SILVA et al., 2019; SILVEIRA; ANDRADE; ARAÚJO, 2018; WWAP, 2020).

### 2.3 Águas Pluviais

O crescimento populacional atrelado com a modificação do padrão de consumo auxilia para que haja um incremento de aproximadamente 1% no consumo mundial de água e, segundo a Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico, ANA, tem-se a projeção que, até o ano de 2030, no Brasil, a demanda por água aumente em 24% para usos consuntivos (ANA, 2019; WWAP, 2020).

A Lei nº 13.501, de 30 de outubro de 2017 adiciona à Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, o objetivo de “*incentivar e promover a captação, a preservação e o aproveitamento de águas pluviais*” (BRASIL, 1997; BRASIL, 2017). Neste sentido, o sistema de aproveitamento da água pluvial é um

método não convencional de conservação de água, sendo um sistema descentralizado e alternativo de abastecimento, que auxilia na redução do consumo da água potável, diminuindo a demanda nas companhias de abastecimento (GONÇALVES, 2006; REZENDE; TECEDOR, 2017; SAMPAIO; ALVES, 2017).

Com isso, a captação e o aproveitamento de água da chuva apresenta grandes ganhos para a sociedade, como: a redução de investimento para captação de água, tratamento e transporte, bem como a energia gasta nesse processo, ocasionando um incremento na segurança hídrica, decréscimo do escoamento superficial e possibilitando também a diminuição da erosão ocasionada por ele, além de aumentar a economia de água potável, preservando os mananciais; auxilia também na melhoria do sistema de drenagem, que não sofre a sobrecarga de eventos extremos, minimizando os gastos que ampliação de galerias ou custos ocasionados pela inundação (FERREIRA; MENDES, 2017; GONÇALVES, 2006; JABUR; BENETTI; SILIPRANDI, 2011; LIMA et al., 2011; MAY, 2004; SILVA et al., 2019; SOUZA et al., 2016; VIOLA, 2008).

Segundo Gonçalves (2006) e Gonçalves (2009), do total de água consumido em uma residência, aproximadamente 40% é para usos não potáveis, assim o uso da água pluvial pode ser uma alternativa para tal demanda, podendo aproveitada para a irrigação de jardins, descarga sanitária, lavagem de carros, roupas, calçadas e carros (GONÇALVES, 2006, 2009; SILVA et al., 2019).

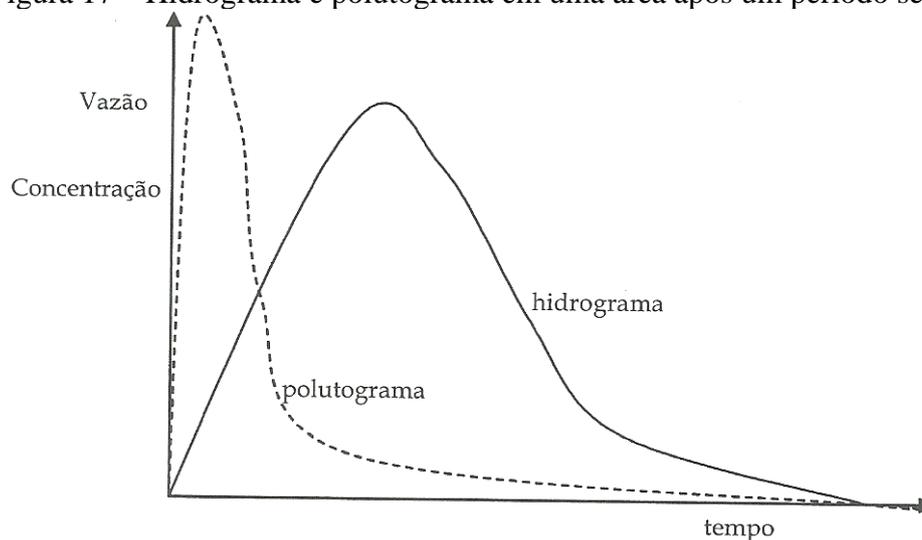
De acordo com a NBR 15527 (ABNT, 2019) “Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis – Requisitos”, os usos previstos por esta norma são (ABNT, 2019):

- (i) o sistema de resfriamento;
- (ii) descarga sanitárias;
- (iii) lavagem de veículos;
- (iv) lavagem de pisos;
- (v) reserva de incêndio;
- (vi) uso em fontes, chafarizes; e
- (vii) irrigação paisagística.

Em relação a outros usos, deve ser observada a qualidade da água e qual o tratamento necessário (ABNT, 2019). Essa qualidade depende de diversas condições, podendo citar o local de ocorrência da chuva, bem como sua distribuição no tempo e espaço, e a qualidade do ar, como pode ser observado na Figura 17, que demonstra que,

após um período seco, a precipitação lava a atmosfera, reduzindo os poluentes no ar, sendo esses carregados pela chuva (ANNECCHINI, 2005; FERREIRA; MENDES, 2017; GONÇALVES, 2006; TUCCI, 2007).

Figura 17 – Hidrograma e polutograma em uma área após um período seco.



Fonte: Tucci (2007).

Assim, para um sistema de captação e aproveitamento de águas pluviais, além de levar em consideração a condição citada acerca da qualidade das águas da chuva, deve-se ater a outros pontos que também interferem na qualidade da água, como a superfície de captação, onde pode conter excrementos de pequenos animais, além de folhas e galhos, e o local de reservação da água, que deve apresentar uma série de cuidados para que ela não seja contaminada (FERREIRA; MENDES, 2017; GONÇALVES, 2006).

Desta forma, como preconizado na NBR 15527 (ABNT, 2019), o reservatório deve adotar meios que não possibilite a entrada de insetos, roedores e outros animais, deve evitar a entrada de luz, ser fechado e o turbilhonamento da entrada da água deve ser mínimo, evitando assim a ressuspensão ou arraste de partículas, além de possuir dispositivo de inspeção, ventilação e esgotamento, e extravasor.

Segundo a mesma norma, aconselha-se a utilização de grades e telas para remoção de sólidos, bem como descarte da lâmina inicial de precipitação (ABNT, 2019). Esse descarte da primeira água é de extrema importância, devido a essa apresentar uma maior quantidade de poluentes devido a lavagem da atmosfera e da superfície de captação, diminuindo a contaminação (ANNECCHINI, 2005; FREITAS; SOLCI, 2009; GONÇALVES, 2006; MARTINSON; THOMAS, 2009).

Anneccchini (2005), que em seu estudo analisou a possibilidade do uso de água pluvial na cidade de Vitória, no estado do Espírito Santo, bem como a caracterizou ao longo do sistema de captação, verificou que para distintos descartes da primeira lâmina (sem descarte, 0,5, 1,0 e 1,5 mm), os descartes a partir de 1,0 mm com remoção de folhas e galhos, a água pluvial apresentou qualidade para ser utilizada para fins não potáveis (ANNECCHINI, 2005).

O sistema de captação e aproveitamento de águas pluviais é composto normalmente pela captação, grades, calhas, tubulações para transporte da água até o armazenamento e o reservatório; onde esse último pode ser enterrado, apoiado ou elevado (ANNECCHINI, 2005; REZENDE; TECEDOR, 2017; SILVEIRA; ANDRADE; ARAÚJO, 2018).

## **2.4 Sistemas Prediais de Reserva de Águas Pluviais**

Os reservatórios de armazenamento de água pluvial são a parte mais cara do sistema, sendo o seu correto dimensionamento essencial para sua viabilidade econômica. O seu superdimensionamento ocasionará um alto valor do projeto sem crescente eficiência no aproveitamento de água, enquanto o subdimensionamento provocará o não atendimento da demanda (REZENDE; TECEDOR, 2017; RUPP; MUNARIM; GHISI, 2011; SILVA et al., 2019; SOUZA et al., 2016).

Assim, faz-se necessário conhecer alguns métodos de dimensionamento e suas vantagens. A NBR 15527 (ABNT, 2007), com sua primeira edição datada do ano de 2007, traz em seu anexo a apresentação e proposição de métodos para o dimensionamento destes, sendo:

- (i) o método de Rippl;
- (ii) o método da simulação;
- (iii) o método Azevedo Neto;
- (iv) o método prático alemão;
- (v) o método prático inglês; e
- (vi) o método prático australiano.

Já, na versão mais atualizada desta norma (ABNT, 2019), para o dimensionamento do reservatório, deve-se utilizar método que considere a área de captação, bem como o regime pluviométrico e a demanda não potável a ser atendida, o que não era exigência da

antiga. Além disso, apresenta que devem ser levados em conta princípios técnicos, econômicos e ambientais. Assim, os modelos comportamentais, como proposto por Jenkins et al. (1978), são passíveis de serem utilizados para dimensionar reservatórios de aproveitamento de águas pluviais.

## 2.4.1 Métodos de dimensionamento

### 2.4.1.1 Método de Rippl

Também conhecido como “Método do Diagrama de Massas”, possibilita o cálculo do volume de acordo com a precipitação e a área de captação, com a pressuposição de que a precipitação não será armazenada em totalidade, além de correlacionar seu volume com o demandado, sendo utilizado tanto para séries históricas mensais e diárias (AMORIM; PEREIRA, 2008; BRANDÃO; MARCON, 2018; RUPP; MUNARIM; GHISI, 2011; SILVA et al., 2019).

O dimensionamento é feito pelas Equação 1, Equação 2 e Equação 3, e deve atender o critério estabelecido pela equação 4 (ABNT, 2007).

$$S_{(t)} = D_{(t)} - Q_{(t)} \quad (1)$$

$$Q_{(t)} = C \times P_{(t)} \times A \quad (2)$$

$$V = \sum S_{(t)}, \text{ para } S_{(t)} > 0 \quad (3)$$

$$\sum D_{(t)} < \sum Q_{(t)} \quad (4)$$

Onde  $S_{(t)}$  é o volume de água pluvial no reservatório no tempo  $t$  ( $m^3$ );  $D_{(t)}$  é a demanda de água pluvial no tempo  $t$  ( $m^3$ );  $Q_{(t)}$  é o volume de água pluvial no tempo  $t$  ( $m^3$ );  $C$  é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional);  $P_{(t)}$  a precipitação diária ou mensal (m);  $A$  a área de captação do projeto ( $m^2$ ); e  $V$  o Volume do reservatório ( $m^3$ ).

A sua vantagem encontra-se na fácil utilização desse método, porém pode superdimensionar o reservatório devido a seu algoritmo ser baseado no somatórios dos excedentes (SOUZA et al., 2016).

### 2.4.1.2 Método da Simulação

Este método também é conhecido como o “Método de Análise de Simulação de um Reservatório com Capacidade Suposta”, compreende a realização de um balanço hídrico em que, com um volume fixado, se analisa a porcentagem de atendimento do consumo (AMORIM; PEREIRA, 2008; BRANDÃO; MARCON, 2018). Pode ser utilizado dados mensais ou diários de precipitação (REZENDE; TECEDOR, 2017).

Segundo ABNT (2007), não deve ser considerada a evaporação da água, além de preestabelecer a hipótese que inicialmente o reservatório encontra-se cheio no tempo “t” e os dados de precipitação são representativos para condições futuras, sendo assim, o dimensionamento calculado pelas Equação 5 e Equação 6, atendendo a condição estabelecida pela Equação 7 para o período de dimensionamento, se encontrará o volume do reservatório (ABNT, 2007).

$$S_{(t)} = Q_{(t)} + S_{(t-1)} - D_{(t)} \quad (5)$$

$$Q_{(t)} = C \times P_{(t)} \times A \quad (6)$$

$$0 \leq S_{(t)} \leq V \quad (7)$$

Onde  $S_{(t)}$  é o volume de água pluvial no reservatório no tempo t ( $m^3$ );  $S_{(t-1)}$  é o volume de água pluvial no reservatório no tempo t - 1 ( $m^3$ );  $D_{(t)}$  é a demanda de água pluvial no tempo t ( $m^3$ );  $Q_{(t)}$  é o volume de água pluvial no tempo t ( $m^3$ ); C é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional);  $P_{(t)}$  é o precipitação diária ou mensal (m); A a área de captação do projeto ( $m^2$ ); e V o Volume do reservatório ( $m^3$ ).

### 2.4.1.3 Método Azevedo Neto

Também chamado de “Método Prático Brasileiro”, este método considera os períodos de estiagem para o seu cálculo, porém a ABNT (2007) não estabelece diretriz para determinação destes meses (RUPP; MUNARIM; GHISI, 2011; SILVEIRA; ANDRADE; ARAÚJO, 2018). Dessa forma, conforme a NBR15527 (ABNT, 2007), o volume pode ser obtido por meio da Equação (8).

$$V = 0,042 \times P \times A \times T \quad (8)$$

Onde P é a precipitação média anual (mm); T são os meses com pouca chuva ou seca; A a área de captação em projeção (m<sup>2</sup>); e V é o volume de água aproveitável e o volume de água do reservatório (L).

Como, este método não possui entrada de demanda, quando ocorre o seu aumento, aumenta-se a chance de não haver suprimento dela em totalidade (BRANDÃO; MARCON, 2018).

#### 2.4.1.4 Método Prático Alemão

Segundo a ABNT (2007), o volume adotado é 6% do demanda anual ou do precipitação total aproveitável, porém a norma não estabelece o equacionamento para o cálculo desse volume de precipitação (ABNT, 2007; RUPP; MUNARIM; GHISI, 2011).

Conforme o descrito na NBR 15527 (ABNT, 2007), o dimensionamento pode ser obtido pela Equação 9.

$$V_{\text{adotado}} = \text{mínimo} \begin{cases} V \times 0,06 \\ D \times 0,06 \end{cases} \quad (9)$$

Onde V é o volume anual aproveitável de água pluvial (L); D a demanda não potável de água anual (L); e  $V_{\text{adotado}}$  é o volume de água do reservatório (L).

Há um incremento no volume dos reservatórios dimensionados por meio desse método quando a demanda é menor que o volume de água pluvial, porém, quando o cenário é inverso, ou seja, a demanda é maior que o volume aproveitável, com o aumento da demanda, há um decréscimo da confiabilidade do sistema (BRANDÃO; MARCON, 2018), por não haver aumento no reservatório.

#### 2.4.1.5 Método Prático Inglês

Segundo a NBR 15527 (ABNT, 2007), esse método empírico dimensiona o reservatório pelo produto entre a precipitação média anual pela área de captação projetada e pelo coeficiente 0,05, sendo calculado por meio da Equação 10.

$$V = 0,05 \times P \times A \quad (10)$$

Onde P é a precipitação anual (mm); A a área de coleta em projeção (m<sup>2</sup>); e V é o volume de água aproveitável e o volume de água do reservatório (L).

Esse método apresenta, para diferentes demandas, o mesmo volume dimensionado; o mesmo acontece para o Método Prático Brasileiro, isto devido a ambos métodos não considerarem a demanda no equacionamento dos dimensionamentos, assim para acréscimos de demanda, ocorre o oposto com o seu atendimento (BRANDÃO; MARCON, 2018; SILVA et al., 2019), podendo resultar um dimensionamento distinto do desejado para o cenário de demanda.

#### 2.4.1.6 Método Prático Australiano

Este método leva em consideração a interceptação de água que molha as superfícies e também as perdas que podem acontecer por evaporação, em que, de acordo com a NBR 15527 (ABNT, 2007), o dimensionamento do volume do reservatório calculado pelas Equação 11 e Equação 12, sendo dimensionado por meio de tentativas, até se encontrar o valor ótimo, considerando que no primeiro mês, inicia-se com o reservatório vazio e, quando se atende o critério apresentado na Equação 13, seu volume será igual a zero e, por meio da Equação 14 e Equação 15, pode-se calcular, respectivamente, a falha e a confiança do dimensionamento.

$$Q = A \times C \times (P - I) \quad (11)$$

$$V_t = V_{t-1} + Q_t - D_t \quad (12)$$

$$V_{t-1} + Q_t - D_t < 0 \Rightarrow V_t = 0 \quad (13)$$

$$P_r = \frac{N_t}{N} \quad (14)$$

$$\text{Confiança} = 1 - P_r \quad (15)$$

Onde C é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional); P a precipitação média mensal (mm); I é a interceptação e perda por evaporação (mm); A a área de coleta (m<sup>2</sup>); Q<sub>t</sub> é o volume mensal produzido pela água pluvial no mês t (L); V<sub>t</sub> é o volume de água que está no tanque no final do mês t (L); V<sub>t-1</sub> é o volume de água que está no tanque no início do mês t (L); D<sub>t</sub> a demanda mensal no mês t (L); P<sub>r</sub> é a falha; N<sub>r</sub> os meses em que o reservatório não atendeu a demanda; N meses no período de cálculo.

Para este método, se a demanda de água for menor que volume, para todos os meses, é impossível realizar o dimensionamento (RUPP; MUNARIM; GHISI, 2011). Dos métodos presentes na norma, que se tem balanço hídrico, este é o que, segundo Brandão e Marcon (2018), possui a menor confiabilidade, devido a utilização de precipitação média mensal (BRANDÃO; MARCON, 2018).

A NBR 15527 (ABNT, 2007), preconiza que a confiança esteja entre 90 a 99%, assim, sua falha se encontrará entre 1 a 10%, assim, reservatórios com tais níveis de confiabilidade podem apresentar grandes dimensões, não sendo tão viáveis economicamente (SAMPAIO; ALVES, 2017).

#### **2.4.1.7 Método Comportamental**

Um dos tipos de modelo de dimensionamento comportamental, foi definido por McMahan e Mein (1978) *apud* Fewkes e Butler (2000), e descreve o comportamento do reservatório no tempo, demonstrando a situação real de funcionamento a partir de algoritmos de balanço de massa, possibilitando estimar seu desempenho. Além disso, são modelos flexíveis, que apresentam fácil interpretação, sendo possível por meio deles incorporar sazonalidades (FEWKES, 2000; FEWKES; BUTLER, 2000; JENKINS et al., 1978; LIAW; TSAI, 2004; SOUSA; ANDRADE NETO; MAIA, 2017).

Os dados de precipitação, variáveis de entrada no modelo, podem ser horários, diários ou mensais, mas o aumento do detalhamento dos dados aumentaria o esforço para tratá-los e também, seria necessário requisitos computacionais mais potentes (FEWKES; BUTLER, 2000; JENKINS et al., 1978; MITCHELL, 2007).

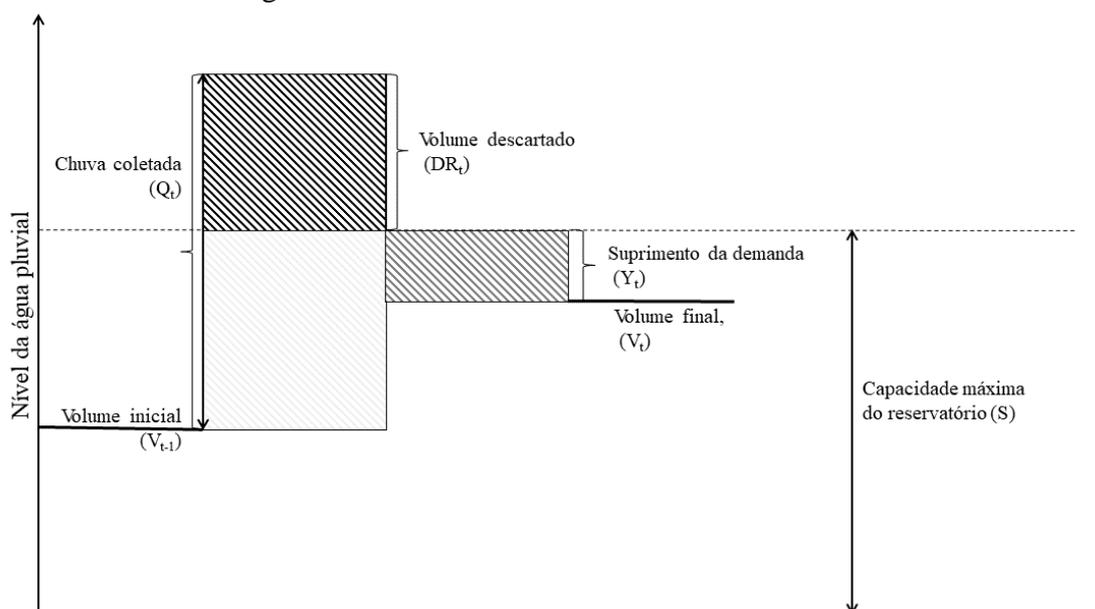
Fewkes (1999), que estudou a sensibilidade de um modelo comportamental, apresenta que o uso de séries diárias ou horárias não apresentou diferença significativa. Já no estudo de Liaw e Tsai (2004), houve a conclusão de que dados com menor variação temporal são essenciais para obtenção de menores reservatórios.

O correto dimensionamento é necessário para o bom funcionamento do sistema, assim Jenkins et al. (1978) descreve que a diferença entre o que acontece durante o dimensionamento e o sistema real, é o intervalo de funcionamento, visto que, a entrada e saída de água do sistema acontece em tempos maiores nas simulações do que na realidade, assim, desenvolveram dois algoritmos para o modelo comportamental, que possibilita entender a operação, sendo eles o *Yield After Spill* (YAS) e o *Yield Before Spill*

(YBS), representando, respectivamente, a produção depois do extravasamento e a produção antes do extravasamento.

O YAS determina que a solicitação da demanda será atendida depois do reservatório encher e extravasar com a água pluvial, sendo a demanda retirada do tempo anterior; assim, no final do intervalo analisado, o reservatório dimensionado por tal método não apresentará sua capacidade máxima. Fazendo uma analogia para dimensionamentos utilizando dados diários, haverá apenas um bombeamento por dia, por esta lógica, é considerado um dimensionamento mais preciso e conservador, além de ser o mais usual, como é exemplificado na Figura 18 (FEWKES; BUTLER, 2000; MITCHELL, 2007; RAIMONDI; BECCIU, 2014; SAMPAIO, 2013; SOUSA; ANDRADE NETO; MAIA, 2017).

Figura 18 – Esquema do comportamento do sistema de aproveitamento de água pluvial com o algoritmo YAS.

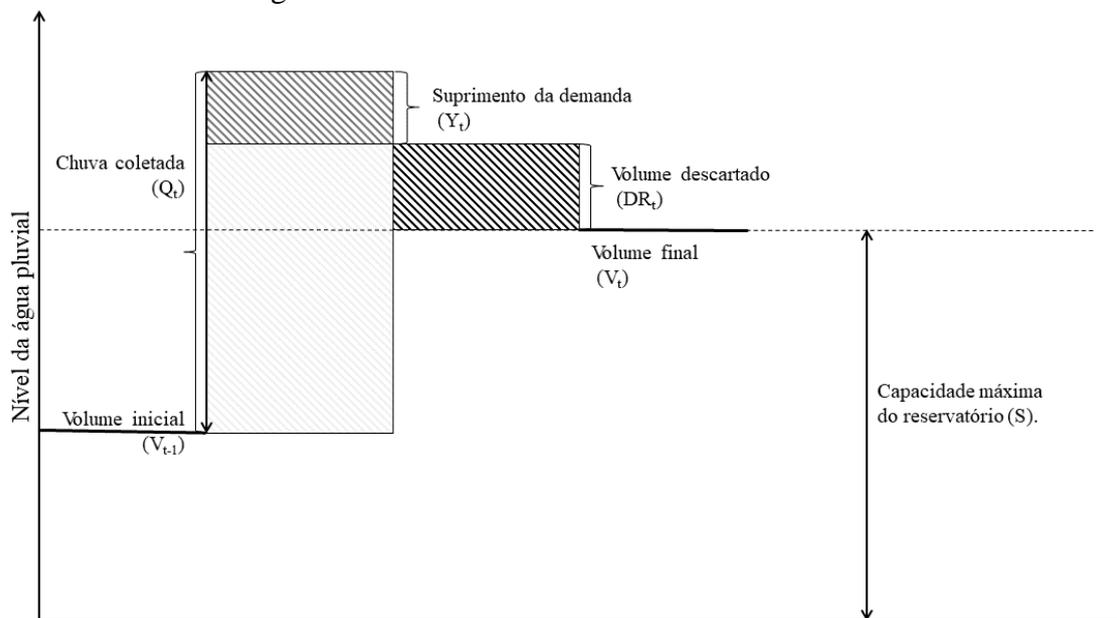


Fonte: Adaptado de Mitchell (2007).

Já o algoritmo YBS considera que a solicitação de demanda será atendida antes do extravasamento do reservatório, ou seja, a água pode ser captada e utilizada no mesmo instante, possibilitando, assim, no final do tempo estipulado sua capacidade pode chegar à máxima. A água excedente será extravasada somente após o atendimento da demanda, funcionando o mais próximo ao sistema com bombeamento automático da água, já que prevê mais bombeamentos durante o intervalo, porém, isso pode levar a um volume

menor de dimensionamento (MITCHELL, 2007; RAIMONDI; BECCIU, 2014; SAMPAIO, 2013; SOUSA; ANDRADE NETO; MAIA, 2017).

Figura 19 – Esquema do comportamento do sistema de aproveitamento de água pluvial com o algoritmo YBS.



Fonte: Adaptado de Mitchell (2007).

No estudo de Fewkes e Butler (2000), utilizou-se a regra do YAS, por este algoritmo ser mais conservador, enquanto no estudo de Sampaio e Alves (2017), optou-se por utilizar o YBS, devido a ser mais próxima de sistema de bombeamento automático.

Assim, encontrar o volume ótimo é imprescindível, visto que a eficiência e a confiabilidade dos SAAP estão relacionados com o reservatório, assim, gerando um arranjo entre a demanda a ser suprida e o volume a ser reservado, resultará em eficiência com menos custos, evitando super ou subdimensionamentos (GONÇALVES, 2006).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O Brasil ocupa uma área territorial de 8.510.345,538 km<sup>2</sup> e possui uma população estimada de 211.755.692 habitantes para o ano de 2020, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020a). O país possui 5.570 municípios, além do Distrito Estadual de Fernando de Noronha, sendo dividido em 27 unidades federativas, definidas em 26 estados e um Distrito Federal (IBGE, 2020a).

O estado de Minas Gerais possui um território correspondente a 6,89% do país, com uma população estimada de 21.292.666 pessoas (IBGE, 2020b) e é dividido em 12 mesorregiões, sendo elas: Noroeste de Minas, Norte de Minas, Jequitinhonha, Vale do Mucuri, Vale do Rio Doce, Metropolitana de Belo Horizonte, Central Mineira, Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Campo das Vertentes, Zona da Mata, Oeste de Minas e Sul/Sudoeste de Minas.

#### 3.2 Aquisição e tratamento dos dados

Os dados pluviométricos foram adquiridos no banco de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia e no Portal Hidroweb do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), gerido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Foram obtidas séries históricas de precipitação com intervalos variados de 2010 a 2019, com cinco anos ininterruptos para dois municípios em cada estado e um município para o Distrito Federal, além de um município de cada mesorregiões do estado de Minas Gerais.

De posse dos dados de precipitação pluvial diária foi realizado o cálculo das variáveis estatísticas relacionadas à precipitação para todas as estações selecionadas, sendo elas: precipitação anual média ( $P_{A,m}$ ), precipitação mensal média ( $P_{M,m}$ ), precipitação diária média ( $P_{D,m}$ ), precipitação diária média do período chuvoso ( $P_{DC,m}$ ), precipitação diária média do período de estiagem ( $P_{DE,m}$ ), precipitação média diária para o primeiro ( $P_{D1°,m}$ ), segundo ( $P_{D2°,m}$ ), terceiro ( $P_{D3°,m}$ ), e quarto trimestre ( $P_{D4°,m}$ ). Além disso, foi calculado o coeficiente de variação amostral da precipitação diária (CV).

Para o cálculo da precipitação anual média, foi feita a divisão entre somatório da precipitação no período de estudo e o número de anos correspondente. Já para a precipitação mensal média, calculou-se a razão entre a precipitação acumulada pelos meses do período de estudo. E para a precipitação diária média, dividiu-se a precipitação acumulada pelo total de dias do período analisado.

A fim de observar a sazonalidade da precipitação em cada município, foi calculada a precipitação diária média do período chuvoso e a precipitação média do período de estiagem. Para tal, estabeleceu-se o período de estiagem como os meses com precipitação acumulada inferior a 60 mm (KÖPPEN, 1936). Assim, realizou-se a razão entre a precipitação acumulada mensal para o período seco pela quantidade de dias do mês. O mesmo raciocínio foi realizado para o período chuvoso. Na Tabela 1 está apresentada a porcentagem de meses classificados como período de estiagem para cada município.

Tabela 1 – Classificação e porcentagem do período de estiagem dos municípios estudados (continua).

Municípios	%
Rio Branco - AC	25,0%
Tarauacá - AC	13,3%
Jacuípe - AL	43,3%
Palmeira dos Índios - AL	51,7%
Calçoene - AP	16,7%
Macapá - AP	25,0%
Lábrea - AM	18,3%
Manaus - AM	25,0%
Salvador - BA	21,7%
Vitória da Conquista - BA	73,3%
Fortaleza - CE	46,7%
Sobral - CE	63,3%
Muniz Freire - ES	48,3%
Vitória - ES	40,0%
Formosa - GO	48,3%
Jataí - GO	38,3%
Chapadinha - MA	50,0%
São Luís - MA	40,0%
Comodoro - MT	30,0%
Sinop - MT	38,3%
Campo Grande - MS	26,7%
Ponta Porã - MS	23,3%
Belém - PA	6,7%
Conceição do Araguaia - PA	45,0%
João Pessoa - PB	43,3%
Sousa - PB	66,7%
Curitiba - PR	20,0%
Maringá - PR	18,3%
Petrolina - PE	88,3%
Surubim - PE	75,0%
Florianópolis - PI	51,7%
Piripiri - PI	56,7%
Itaperuna - RJ	43,3%

Tabela 1 – Classificação e porcentagem do período de estiagem dos municípios estudados (conclusão).

Municípios	%
Rio de Janeiro - RJ	41,7%
Apodi - RN	78,3%
Natal - RN	33,3%
Porto Alegre - RS	10,0%
Santa Maria - RS	8,3%
Alta Floresta d'Oeste - RO	33,3%
Cabixi - RO	36,7%
Boa Vista - RR	55,0%
Rorainópolis - RR	13,3%
Florianópolis - SC	6,7%
Lages - SC	8,3%
Franca - SP	31,7%
São Paulo - SP	28,3%
Itabaianinha - SE	48,3%
Propriá - SE	56,7%
Araguaína - TO	38,3%
Palmas - TO	40,0%
Brasília - DF	45,0%
São João Del Rei - MG	41,7%
Abaeté - MG	48,3%
Araçuaí - MG	70,0%
Belo Horizonte - MG	41,7%
Unaí - MG	51,7%
Salinas - MG	68,3%
Bambuí - MG	40,0%
São Lourenço - MG	40,0%
Araxá - MG	38,3%
Nanuque - MG	70,0%
Caratinga - MG	50,0%
Viçosa - MG	48,3%

Fonte: Dos autores (2022).

Em relação às precipitações médias diárias trimestrais, calculou-se o total precipitado em cada trimestre e dividiu-se pelo número de dias deste, sendo o primeiro composto pelos meses de janeiro, fevereiro e março, o segundo por abril, maio e junho, e assim sucessivamente.

A classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013; MARTINS et al., 2018; MEDEIROS, CAVALCANTI; DUARTE, 2020), as variáveis hidrológicas relacionadas à precipitação pluvial e o coeficiente de variação da precipitação diária para os municípios estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação climática de Köppen e variáveis estatísticas relacionadas à precipitação de cada município estudado (continua).

Municípios	Classificação Köppen	Referência	P <sub>A, m</sub> (mm)	P <sub>M, m</sub> (mm)	P <sub>D, m</sub> (mm)	P <sub>D1°, m</sub> (mm)	P <sub>D2°, m</sub> (mm)	P <sub>D3°, m</sub> (mm)	P <sub>D4°, m</sub> (mm)	P <sub>DC, m</sub> (mm)	P <sub>DE, m</sub> (mm)	CV (%)
Rio Branco - AC	Am	Alvares et al. (2013)	2104,36	175,36	5,76	10,72	3,63	2,03	6,74	7,35	1,03	231,55%
Tarauacá - AC	Af	Alvares et al. (2013)	2289,76	190,81	6,27	10,03	4,87	2,77	7,47	7,04	1,32	205,78%
Jacuípe - AL	Am	Alvares et al. (2013)	1498,78	124,90	4,10	3,85	7,13	4,51	0,96	6,47	1,00	243,16%
Palmeira dos Índios - AL	As	Alvares et al. (2013)	792,66	66,06	2,17	0,89	3,71	2,97	1,11	3,78	0,65	269,57%
Calçoene - AP	Am	Alvares et al. (2013)	3625,66	302,14	9,93	17,16	14,70	3,39	4,66	11,78	0,64	142,76%
Macapá - AP	Am	Alvares et al. (2013)	3156,12	263,01	8,64	14,05	13,23	3,53	3,92	11,32	0,63	126,64%
Lábrea - AM	Am	Alvares et al. (2013)	2338,16	194,85	6,40	9,91	5,18	2,33	8,25	7,61	1,05	218,21%
Manaus - AM	Af	Alvares et al. (2013)	2142,00	178,50	5,87	10,18	6,60	2,17	4,60	7,42	1,28	181,58%
Salvador - BA	Af	Alvares et al. (2013)	1536,54	128,05	4,21	3,09	7,99	3,65	2,13	5,09	1,02	247,39%
Vitória da Conquista - BA	Cfa	Alvares et al. (2013)	650,94	54,25	1,78	2,18	1,11	0,84	3,00	4,16	0,93	364,27%
Fortaleza - CE	As	Alvares et al. (2013)	1838,84	153,24	5,04	10,50	7,75	1,22	0,82	9,05	0,47	270,57%
Sobral - CE	As	Alvares et al. (2013)	827,80	68,98	2,27	5,77	2,82	0,14	0,41	5,72	0,30	313,39%
Muniz Freire - ES	Cfa	Alvares et al. (2013)	1162,22	96,85	3,18	3,95	2,23	0,76	5,79	5,43	0,78	323,78%
Vitória - ES	Am	Alvares et al. (2013)	1224,88	102,07	3,35	3,11	2,62	1,95	5,72	4,89	1,03	335,40%
Formosa - GO	Aw	Alvares et al. (2013)	1238,40	103,20	3,39	6,53	1,28	0,20	5,59	6,24	0,38	273,46%
Jataí - GO	Aw	Alvares et al. (2013)	1622,58	135,22	4,44	8,73	2,35	0,59	6,16	6,94	0,47	263,37%
Chapadinha - MA	Aw	Alvares et al. (2013)	1353,72	112,81	3,71	7,88	5,74	0,42	0,88	6,93	0,52	285,65%
São Luís - MA	Aw	Alvares et al. (2013)	1968,66	164,06	5,39	9,04	10,08	1,11	1,44	8,71	0,48	258,72%
Comodoro - MT	Am	Alvares et al. (2013)	2261,10	188,43	6,19	10,70	3,66	1,17	9,31	8,62	0,59	212,41%
Sinop - MT	Am	Alvares et al. (2013)	1699,84	141,65	4,65	9,06	1,77	0,89	6,95	7,30	0,43	264,89%
Campo Grande - MS	Am	Alvares et al. (2013)	1433,08	119,42	3,92	6,15	2,73	1,68	5,16	5,06	0,81	252,76%
Ponta Porã - MS	Cfa	Alvares et al. (2013)	1900,56	158,38	5,20	7,30	4,36	2,45	6,74	6,53	0,88	248,92%
Belém - PA	Am	Alvares et al. (2013)	3627,50	302,29	9,93	17,40	11,41	4,09	6,99	10,54	1,40	151,97%
Conceição do Araguaia - PA	Aw	Alvares et al. (2013)	1620,24	135,02	4,44	9,01	2,57	0,48	5,76	7,66	0,54	260,92%
João Pessoa - PB	As	Alvares et al. (2013)	1793,94	149,50	4,91	3,43	9,18	5,93	1,13	7,77	1,16	281,99%
Sousa - PB	As	Alvares et al. (2013)	784,84	65,40	2,15	5,67	2,24	0,36	0,40	5,66	0,41	429,11%
Curitiba - PR	Cfb	Alvares et al. (2013)	1594,04	132,84	4,36	6,44	3,54	2,48	5,03	5,22	0,99	236,91%
Maringá - PR	Cfa	Alvares et al. (2013)	2015,54	167,96	5,52	7,79	3,67	3,48	7,15	6,57	0,87	245,36%
Petrolina - PE	BSh	Alvares et al. (2013)	296,24	24,69	0,81	1,83	0,72	0,10	0,61	4,38	0,35	598,49%
Surubim - PE	As	Alvares et al. (2013)	487,34	40,61	1,33	0,95	2,42	1,45	0,52	3,28	0,69	356,34%

Tabela 2 – Classificação climática de Köppen e variáveis estatísticas relacionadas à precipitação de cada município estudado (continua).

Municípios	Classificação Köppen	Referência	P <sub>A, m</sub> (mm)	P <sub>M, m</sub> (mm)	P <sub>D, m</sub> (mm)	P <sub>D1°, m</sub> (mm)	P <sub>D2°, m</sub> (mm)	P <sub>D3°, m</sub> (mm)	P <sub>D4°, m</sub> (mm)	P <sub>DC, m</sub> (mm)	P <sub>DE, m</sub> (mm)	CV (%)
Florianópolis - PI	Aw	Medeiros, Cavalcanti e Duarte (2020)	965,20	80,43	2,64	5,94	1,50	0,24	2,95	4,96	0,48	345,79%
Piripiri - PI	As	Medeiros, Cavalcanti e Duarte (2020)	1237,58	103,13	3,39	8,01	4,33	0,39	0,92	7,11	0,58	294,09%
Itaperuna - RJ	Aw	Alvares et al. (2013)	1024,60	85,38	2,81	4,19	1,53	0,99	4,53	4,36	0,81	309,40%
Rio de Janeiro - RJ	Am	Alvares et al. (2013)	1175,88	97,99	3,22	6,26	2,56	1,20	2,92	4,74	1,10	327,33%
Apodi - RN	As	Alvares et al. (2013)	490,24	40,85	1,34	2,71	2,26	0,17	0,26	4,77	0,41	520,66%
Natal - RN	As	Alvares et al. (2013)	1557,52	129,79	4,26	4,76	7,60	3,82	0,92	6,01	0,80	265,38%
Porto Alegre - RS	Cfa	Alvares et al. (2013)	1641,86	136,82	4,50	4,28	4,49	4,43	4,78	4,87	1,06	250,88%
Santa Maria - RS	Cfa	Alvares et al. (2013)	1907,06	158,92	5,22	5,16	4,38	4,35	6,99	5,60	1,10	263,58%
Alta Floresta d'Oeste - RO	Am	Alvares et al. (2013)	1995,64	166,30	5,46	9,55	3,45	1,14	7,77	7,76	0,88	223,85%
Cabixi - RO	Am	Alvares et al. (2013)	1718,20	143,18	4,70	9,67	2,33	0,56	6,34	7,17	0,49	241,18%
Boa Vista - RR	Am	Alvares et al. (2013)	1207,42	100,62	3,31	0,62	6,11	5,65	0,82	6,59	0,60	299,67%
Rorainópolis - RR	Af	Alvares et al. (2013)	2292,68	191,06	6,28	5,14	10,09	5,74	4,16	7,07	1,18	208,22%
Florianópolis - SC	Cfa	Alvares et al. (2013)	1819,88	151,66	4,98	6,76	4,06	3,96	5,18	5,25	1,31	235,85%
Lages - SC	Cfb	Alvares et al. (2013)	1861,16	155,10	5,09	5,66	4,26	5,09	5,36	5,47	0,92	235,72%
Franca - SP	Cwb	Alvares et al. (2013)	1696,34	141,36	4,64	8,42	2,05	1,10	7,06	6,56	0,55	246,17%
São Paulo - SP	Cfb	Alvares et al. (2013)	1618,64	134,89	4,43	8,09	2,61	1,88	5,20	5,88	0,80	264,46%
Itabaianinha - SE	As	Alvares et al. (2013)	1057,20	88,10	2,89	2,05	5,26	3,12	1,15	4,72	0,94	278,75%
Propriá - SE	As	Alvares et al. (2013)	756,56	63,05	2,07	1,26	3,22	2,69	1,11	3,65	0,85	282,52%
Araguaína - TO	Aw	Alvares et al. (2013)	1543,42	128,62	4,23	9,06	2,74	0,61	4,57	6,48	0,64	258,46%
Palmas - TO	Aw	Alvares et al. (2013)	1558,08	129,84	4,27	7,93	2,74	0,48	5,97	7,01	0,19	253,76%
Brasília - DF	Aw	Alvares et al. (2013)	1435,44	119,62	3,93	6,83	1,87	0,42	6,63	6,83	0,41	257,49%
São João Del Rei - MG	Cwb	Alvares et al. (2013)	1378,08	114,84	3,77	6,18	1,21	0,99	6,73	6,01	0,67	274,66%
Abaeté - MG	Aw	Alvares et al. (2013)	933,62	77,80	2,56	4,14	0,91	0,54	4,64	4,45	0,53	318,78%
Araçuaí - MG	As	Alvares et al. (2013)	590,42	49,20	1,62	2,91	0,29	0,11	3,17	4,68	0,31	434,12%
Belo Horizonte - MG	Aw	Martins et al. (2018)	1279,48	106,62	3,50	6,20	1,20	0,60	6,04	5,63	0,55	281,98%
Unaí - MG	Aw	Martins et al. (2018)	1173,94	97,83	3,21	5,10	1,29	0,34	6,14	6,16	0,49	327,87%
Salinas - MG	Aw	Martins et al. (2018)	686,46	57,21	1,88	3,39	0,55	0,24	3,35	4,87	0,51	393,15%
Bambuí - MG	Cwa	Martins et al. (2018)	1331,74	110,98	3,65	5,84	1,70	0,64	6,43	5,71	0,58	267,89%
São Lourenço - MG	Cwa	Martins et al. (2018)	1332,62	111,05	3,65	6,31	1,56	1,41	5,33	5,47	0,94	250,38%
Araxá - MG	Aw	Martins et al. (2018)	1553,18	129,43	4,25	7,33	1,74	0,75	7,22	6,61	0,51	262,46%
Nanuque - MG	Aw	Alvares et al. (2013)	708,72	59,06	1,94	2,53	1,05	0,77	3,41	4,61	0,80	402,66%

Tabela 2 – Classificação climática de Köppen e variáveis estatísticas relacionadas à precipitação de cada município estudado (conclusão).

Municípios	Classificação Köppen	Referência	P <sub>A,m</sub> (mm)	P <sub>M,m</sub> (mm)	P <sub>D,m</sub> (mm)	P <sub>D1°,m</sub> (mm)	P <sub>D2°,m</sub> (mm)	P <sub>D3°,m</sub> (mm)	P <sub>D4°,m</sub> (mm)	P <sub>DC,m</sub> (mm)	P <sub>DE,m</sub> (mm)	CV (%)
Caratinga - MG	Aw	Martins et al. (2018)	971,20	80,93	2,66	4,16	1,45	0,37	4,66	4,81	0,53	343,23%
Viçosa - MG	Cwa	Martins et al. (2018)	1207,76	100,65	3,31	5,19	1,44	0,58	6,03	5,77	0,68	295,96%

Af: Clima tropical úmido sem estação seca; Am: Clima tropical de monção; As: Clima tropical úmido com verão seco; Aw: Clima tropical úmido com inverno seco; BSh: Clima seco semiárido de baixa latitude e altitude; Cfa: clima subtropical úmido sem estação seca com verão quente; Cfb: clima subtropical úmido com verão temperado; Cwa: clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente; Cwb: clima subtropical úmido com inverno seco e verão ameno; P<sub>A,m</sub>: Precipitação Anual Média; P<sub>M,m</sub>: Precipitação Mensal Média; P<sub>D,m</sub>: Precipitação Diária Média; P<sub>D1°,m</sub>: Precipitação Média Diária para o primeiro trimestre; P<sub>D2°,m</sub>: Precipitação Média Diária para o segundo trimestre; P<sub>D3°,m</sub>: Precipitação Média Diária para o terceiro trimestre; P<sub>D4°,m</sub>: Precipitação Média Diária para o quarto trimestre; P<sub>DC,m</sub>: Precipitação Diária Média do período chuvoso; P<sub>DE,m</sub>: Precipitação Diária Média do período de estiagem; e CV: Coeficiente de Variação da precipitação diária.

Fonte: Dos autores (2022).

### 3.3 Simulação para dimensionamento do reservatório

Estabeleceu-se uma demanda única padronizada a fim de comparar a influência da variabilidade espacial sobre o dimensionamento do sistema de aproveitamento de águas pluviais (SAAP). Assim, definiu-se como critérios: demanda diária de água potável de 200 litros *per capita*; edificação residencial ocupada por três moradores; área de captação de 100 m<sup>2</sup>; coeficiente de escoamento superficial da cobertura (C) de 0,80; lâmina de descarte de 1 mm; e porcentagem de substituição de água potável por água pluvial de 40%.

A partir destes critérios, foi obtida uma demanda diária de água pluvial total de 240 litros. A simulação para dimensionamento dos reservatórios para armazenamento de águas pluviais foi realizada segundo uma metodologia comportamental, descrita por Jenkins et al. (1978).

Para estas simulações foram utilizadas séries históricas de precipitação, em que os dados de entrada utilizados foram os de precipitação diária dos 5 anos estudados. Assim, foram obtidas como respostas o potencial de captação de água pluvial para uso não potável e os volumes máximo e ótimos do reservatório, utilizando-se dois algoritmos distintos de operação do reservatório, sendo eles: *Yield After Spill* (YAS) e *Yield Before Spill* (YBS). O volume máximo é aquele que a economia de água é máxima e o ótimo é aquele onde o incremento do volume não gera ganho proporcional na economia de água.

Para aplicação dos métodos, o volume captado foi calculado pela Equação 16 (SAMPAIO; ALVES, 2017). Já o volume necessário para suprir a demanda e o volume do reservatório pelo método YAS podem ser calculados pela Equação 17 e 18. Já o volume necessário para suprir a demanda e o volume do reservatório pelo método YBS podem ser estimados pela Equação 19 e 20 (JENKINS et al., 1978), enquanto o descarte de água pela Equação 21 (SAMPAIO; ALVES, 2017).

$$Q_t = (P_t \times C \times A) - DT_t \quad (16)$$

$$Y_t = \min \left\{ \begin{array}{l} D_t \\ V_{t-1} \end{array} \right. \quad (17)$$

$$V_t = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{t-1} + Q_t - Y_t \\ S - Y_t \end{array} \right. \quad (18)$$

$$Y_t = \min \left\{ \begin{array}{l} D_t \\ V_{t-1} + Q_t \end{array} \right. \quad (19)$$

$$V_t = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{t-1} + Q_t - Y_t \\ S \end{array} \right. \quad (20)$$

$$DR_t = \max \left\{ \begin{array}{l} \text{zero} \\ V_{t-1} + Q_t - Y_t - V_{\text{máx}} \end{array} \right. \quad (21)$$

Sendo  $Q_t$  o volume de água pluvial captada no intervalo de tempo  $t$  ( $m^3$ );  $P_t$  a precipitação no tempo  $t$  ( $m$ );  $C$  o coeficiente de escoamento superficial (adimensional);  $A$  a área da superfície de coleta de água da chuva ( $m^2$ );  $DT_t$  o Descarte de água para limpeza “*First-flush*” no tempo  $t$  ( $m^3$ ), caso tenha precipitado em um dos três dias anteriores, seu valor é igual a zero;  $Y_t$  a água para suprir a demanda no tempo  $t$  ( $m^3$ );  $D_t$  a demanda no tempo  $t$  ( $m^3$ );  $V_t$  o Volume útil no reservatório no tempo  $t$  ( $m^3$ );  $DR_t$  o Volume de água descartado do reservatório no tempo  $t$  ( $m^3$ ); e  $S$  a Capacidade máxima do reservatório ( $m^3$ ).

Para analisar a viabilidade técnica do dimensionamento foram utilizados dois indicadores de suprimento da demanda da edificação, em que o primeiro é o coeficiente de eficiência de economia de água definido por Jenkins et al. (1978), o qual é apresentado na Equação 22, e o outro é a confiabilidade plena que é dada pela Equação 23.

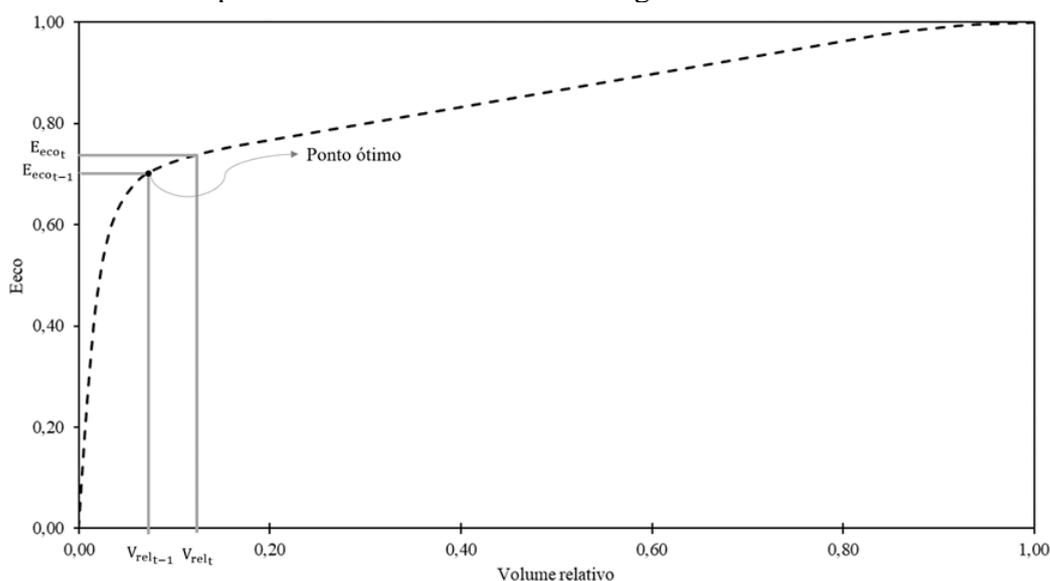
$$E_{\text{eco}} = \frac{\sum Y_t}{\sum D_t} \quad (22)$$

$$C_{\text{onf}} = \left( \frac{N_D}{N} \right) \times 100\% \quad (23)$$

Em que  $N$  é número de dias da série;  $N_D$  é número de dias em que a demanda foi suprida totalmente; e  $C_{\text{onf}}$  a Confiabilidade plena.

Por meio das equações supracitadas e utilizando-se um software de planilha eletrônica, foram calculados o volume máximo e volume ótimo para o dimensionamento do reservatório, além do coeficiente de economia de água e confiabilidade plena, para cada volume e algoritmo. O volume máximo foi obtido utilizando método de solução numérica por meio de iterações, enquanto o volume ótimo por meio de critério de parada e ele é esquematizado na Figura 20.

Figura 20 – Simulação de dimensionamento de reservatório de água pluvial para o município de Comodoro utilizando o algoritmo YAS.



Fonte: Dos autores (2022).

De posse do volume máximo, foi calculado o critério de parada para escolha do volume ótimo para dimensionamento do reservatório, utilizando as Equação 24 e 25 com o objetivo de atender ao critério da Equação 26.

$$V_{rel_t} = \frac{V_t}{V_{máx}} \quad (24)$$

$$\frac{E_{eco_t} - E_{eco_{t-1}}}{V_{rel_t} - V_{rel_{t-1}}} \quad (25)$$

$$\frac{E_{eco_t} - E_{eco_{t-1}}}{V_{rel_t} - V_{rel_{t-1}}} \leq \text{tg } 45^\circ, V_{ót.} = V_{t-1} \quad (26)$$

Sendo  $V_{rel_t}$  o volume relativo no tempo  $t$  (adimensional);  $V_{rel_{t-1}}$  o volume relativo no tempo “ $t-1$ ” (adimensional);  $E_{eco_t}$  coeficiente de eficiência econômica no tempo  $t$  (adimensional); e  $E_{eco_{t-1}}$  o coeficiente de eficiência econômica no tempo “ $t-1$ ” (adimensional).

Assim, com a Equação 24 foi calculado o volume adimensional, de forma que a análise do volume que leva ao dimensionamento ótimo fosse realizada para valores em um intervalo de 0 a 1, assim como ocorre para a eficiência de economia de água. Pela

Equação 26 tem-se que o incremento do volume não traz um ganho de eficiência em igual proporção, sendo a Equação 25 a tangente formada pelo ângulo entre o ponto “t” e “t-1” no gráfico, assim, quando essa tangente apresenta valor abaixo de 1, atingiu-se o critério de parada e encontrou-se o volume ótimo.

Na Tabela 3 estão apresentados os volumes máximos e ótimos, o coeficiente de eficiência de economia de água e a confiabilidade plena para o volume máximo e ótimo de dimensionamento dos municípios para o YAS e o YBS, respectivamente.

Tabela 3 – Volumes máximos e ótimos, o coeficiente de eficiência de economia de água e a confiabilidade plena para o volume máximo e ótimo de dimensionamento dos municípios para o YAS e o YBS (continua).

Municípios	Yield After Spill						Yield Before Spill					
	Ponto máximo			Ponto ótimo			Ponto máximo			Ponto ótimo		
	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	C <sub>conf</sub>	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	C <sub>conf</sub>	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	C <sub>conf</sub>	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	C <sub>conf</sub>
Rio Branco – AC	27,58	0,999	99,78%	2,78	0,776	75,68%	27,10	0,999	99,84%	2,30	0,777	75,79%
Tarauacá – AC	16,50	0,999	99,89%	2,39	0,840	81,87%	16,02	1,000	99,89%	1,89	0,838	81,71%
Jacuípe – AL	45,94	0,959	95,51%	3,87	0,690	65,55%	45,46	0,959	95,51%	3,39	0,691	65,61%
Palmeira dos Índios – AL	38,58	0,704	68,95%	4,24	0,537	51,15%	38,10	0,704	68,95%	3,76	0,537	51,15%
Calçoene - AP	26,90	0,999	99,95%	1,59	0,799	77,16%	26,42	1,000	100,00%	1,11	0,799	77,22%
Macapá - AP	32,69	0,999	99,95%	2,08	0,728	71,63%	32,21	1,000	99,95%	1,60	0,729	71,69%
Lábrea – AM	19,21	0,999	99,95%	2,16	0,805	79,57%	18,73	1,000	100,00%	1,66	0,803	78,70%
Manaus – AM	28,00	0,999	99,95%	2,86	0,808	77,88%	27,52	1,000	100,00%	2,38	0,809	78,04%
Salvador - BA	30,23	0,991	98,63%	3,96	0,783	75,14%	29,75	0,991	98,63%	3,48	0,783	75,19%
Vitória da Conquista – BA	19,88	0,554	50,82%	1,97	0,360	29,85%	19,40	0,554	50,88%	1,49	0,359	29,79%
Fortaleza – CE	46,62	0,993	99,23%	3,50	0,564	54,44%	46,14	0,993	99,29%	3,12	0,566	54,82%
Sobral – CE	43,84	0,738	73,38%	3,10	0,386	37,08%	43,36	0,738	73,44%	2,38	0,381	36,53%
Muniz Freire – ES	35,14	0,863	85,71%	4,70	0,617	59,47%	34,66	0,864	85,76%	4,22	0,617	59,53%
Vitória – ES	72,03	0,991	99,01%	9,63	0,784	76,18%	71,55	0,992	99,07%	9,15	0,78434	76,23%
Formosa – GO	55,29	0,996	99,56%	5,06	0,556	54,76%	54,81	0,997	99,67%	4,58	0,557	54,82%
Jataí – GO	41,87	0,998	99,78%	3,15	0,628	61,61%	41,39	0,999	99,84%	2,66	0,628	61,66%
Chapadinha – MA	47,61	0,992	99,07%	3,21	0,538	51,92%	47,13	0,993	99,12%	2,73	0,539	51,97%
São Luís – MA	46,77	0,997	99,67%	2,80	0,609	59,58%	46,29	0,998	99,73%	2,46	0,612	60,02%
Comodoro -MT	28,52	0,999	99,95%	2,08	0,703	68,73%	28,04	1,000	100,00%	1,68	0,704	69,11%
Sinop – MT	37,99	0,999	99,84%	2,86	0,631	61,88%	37,51	0,999	99,95%	2,43	0,632	62,16%
Campo Grande – MS	35,66	0,997	99,67%	4,51	0,757	74,26%	35,18	0,998	99,73%	4,03	0,757	74,32%
Ponta Porã – MS	26,64	0,999	99,78%	3,26	0,788	77,05%	26,16	0,999	99,84%	2,78	0,789	77,11%
Belém – PA	10,96	0,999	99,89%	1,38	0,874	84,67%	10,48	1,000	99,95%	0,90	0,871	84,39%
Conceição do Araguaia – PA	41,52	0,996	99,51%	3,06	0,600	58,65%	41,04	0,997	99,62%	2,58	0,601	58,71%
João Pessoa – PB	34,90	0,961	95,62%	3,07	0,699	65,88%	34,42	0,962	95,73%	2,59	0,699	66,00%
Sousa - PB	37,15	0,702	69,55%	3,85	0,394	37,79%	36,67	0,702	69,55%	3,42	0,395	38,01%
Curitiba - PR	24,93	0,999	99,89%	3,84	0,836	81,65%	24,45	0,999	99,95%	3,36	0,836	81,43%
Maringá – PR	23,30	0,999	99,89%	3,91	0,807	79,63%	22,82	1,000	99,95%	3,18	0,795	78,42%
Petrolina – PB	17,50	0,257	23,99%	0,93	0,116	8,82%	17,02	0,257	23,99%	0,62	0,121	9,58%
Surubim – PB	9,78	0,427	38,99%	1,11	0,279	21,74%	9,30	0,427	38,99%	0,62	0,273	21,03%
Florianópolis – PI	41,09	0,824	81,49%	4,27	0,535	51,86%	40,61	0,825	81,49%	3,84	0,536	51,92%

Tabela 3 – Volumes máximos e ótimos, o coeficiente de eficiência de economia de água e a confiabilidade plena para o volume máximo e ótimo de dimensionamento dos municípios para o YAS e o YBS (continua).

Municípios	Yield After Spill						Yield Before Spill					
	Ponto máximo			Ponto ótimo			Ponto máximo			Ponto ótimo		
	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	Conf	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	Conf	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	Conf	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	Conf
Piripiri – PI	45,26	0,915	90,80%	3,22	0,483	45,84%	44,78	0,916	90,85%	2,74	0,484	45,95%
Itaperuna – RJ	40,14	0,855	84,67%	4,36	0,615	59,20%	39,66	0,856	84,72%	3,72	0,611	58,87%
Rio de Janeiro – RJ	28,58	0,918	90,74%	4,43	0,685	65,17%	28,10	0,919	90,80%	3,95	0,685	65,17%
Apodi – RN	21,60	0,431	41,73%	1,99	0,242	21,08%	21,12	0,431	41,73%	1,52	0,240	20,97%
Natal - RN	31,06	0,979	97,81%	3,29	0,680	65,12%	30,58	0,979	97,86%	2,81	0,680	65,12%
Porto Alegre – RS	12,34	0,994	99,23%	2,74	0,800	77,11%	11,86	0,995	99,29%	2,24	0,799	76,83%
Santa Maria -RS	12,68	0,999	99,84%	2,94	0,830	80,89%	12,20	0,999	99,89%	2,46	0,830	80,89%
Alta Floresta d'Oeste – RO	29,33	0,999	99,95%	2,14	0,701	67,96%	28,85	1,000	100,00%	1,73	0,703	68,07%
Cabixi – RO	39,75	0,998	99,84%	2,54	0,639	61,56%	39,27	0,999	99,89%	2,06	0,640	61,61%
Boa Vista – RR	49,69	0,739	72,73%	4,20	0,509	48,80%	49,21	0,739	72,73%	3,77	0,510	48,80%
Rorainópolis – RR	21,23	0,995	99,40%	2,69	0,843	82,69%	20,75	0,995	99,51%	2,15	0,841	82,15%
Florianópolis – SC	15,73	0,999	99,95%	2,96	0,849	81,98%	15,25	1,000	99,95%	2,45	0,847	81,93%
Lages - SC	11,75	0,994	99,23%	2,74	0,840	81,50%	11,27	0,994	99,34%	2,22	0,837	81,44%
Franca – SP	34,52	0,991	99,01%	3,86	0,677	66,37%	34,04	0,992	99,07%	3,38	0,678	66,43%
São Paulo – SP	30,08	0,997	99,67%	4,21	0,751	73,49%	29,60	0,997	99,67%	3,73	0,752	73,55%
Itabaianinha -SE	40,55	0,896	88,99%	4,35	0,632	60,51%	40,07	0,897	89,10%	3,87	0,632	60,51%
Propriá – SE	20,98	0,671	64,64%	2,52	0,475	43,40%	20,50	0,671	64,64%	2,13	0,479	43,68%
Araguaína – TO	40,94	0,993	99,29%	2,98	0,627	60,90%	40,46	0,994	99,29%	2,50	0,627	60,90%
Palmas – TO	42,49	0,999	99,95%	3,14	0,596	58,43%	42,01	1,000	100,00%	2,70	0,597	58,71%
Brasília – DF	43,45	0,990	98,96%	3,52	0,569	55,31%	42,97	0,991	99,07%	3,05	0,570	55,48%
São João Del Rei – MG	35,50	0,995	99,40%	4,09	0,646	63,14%	35,02	0,995	99,45%	3,61	0,647	63,20%
Abaeté – MG	34,42	0,782	77,55%	3,91	0,522	50,66%	33,94	0,783	77,60%	3,43	0,523	50,71%
Araçuaí – MG	26,34	0,508	49,73%	2,92	0,296	27,38%	25,86	0,509	49,78%	2,44	0,296	27,49%
Belo Horizonte -MG	39,93	0,988	98,69%	4,38	0,593	58,11%	39,45	0,988	98,74%	3,80	0,591	57,83%
Unaí – MG	49,61	0,938	93,43%	5,42	0,548	53,83%	49,13	0,938	93,48%	4,94	0,549	53,94%
Salinas - MG	37,67	0,609	59,91%	4,06	0,376	35,49%	37,19	0,609	59,97%	3,58	0,376	35,49%
Bambuí – MG	55,77	0,987	98,52%	5,97	0,659	64,84%	55,29	0,987	98,58%	5,49	0,659	64,90%
São Lourenço – MG	32,58	0,962	96,06%	3,44	0,659	63,91%	32,10	0,963	96,11%	2,96	0,659	63,96%
Araxá- MG	39,53	0,986	98,52%	4,12	0,630	61,88%	39,05	0,987	98,52%	3,63	0,630	61,83%
Nanuque -MG	18,66	0,590	55,70%	1,82	0,351	30,12%	18,18	0,591	55,75%	1,33	0,349	30,07%
Caratinga -MG	57,53	0,828	82,31%	6,21	0,560	54,16%	57,05	0,828	82,37%	5,73	0,560	54,22%

Tabela 3 – Volumes máximos e ótimos, o coeficiente de eficiência de economia de água e a confiabilidade plena para o volume máximo e ótimo de dimensionamento dos municípios para o YAS e o YBS (conclusão).

Municípios	Yield After Spill						Yield Before Spill					
	Ponto máximo			Ponto ótimo			Ponto máximo			Ponto ótimo		
	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	C <sub>onf</sub>	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	C <sub>onf</sub>	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	C <sub>onf</sub>	V (m <sup>3</sup> )	E <sub>eco</sub>	C <sub>onf</sub>
Viçosa - MG	47,75	0,960	95,89%	4,84	0,604	58,38%	47,27	0,961	95,95%	4,36	0,604	58,43%

Em que: V: Volume; E<sub>eco</sub>: Coeficiente de eficiência de economia de água; C<sub>onf</sub>: Confiabilidade Plena.

Fonte: Dos autores (2022).

### 3.4 Análise estatística

#### 3.4.1 Matriz de correlação

Para analisar a dependência linear entre as variáveis em estudo, foi realizada análise de correlação por meio de uma matriz de correlação linear de Pearson, em que o coeficiente de correlação de Pearson ( $r_{xy}$ ) entre as variáveis X e Y é calculado pela Equação 27, (LOESCH; HIELTGEBAUM, 2012), considerando uma significância de  $\alpha$  igual a 5% de probabilidade.

$$r_{x,y} = \frac{\sum_j x_j y_j}{\sqrt{\sum_j x_j^2} \sqrt{\sum_j y_j^2}}, \text{ onde } \begin{cases} x_j = X_j - \bar{X} \\ y_j = Y_j - \bar{Y} \end{cases} \quad (27)$$

Sendo  $\bar{X}$  a média aritmética amostral da variável X e  $\bar{Y}$  a média aritmética amostral da variável Y.

O coeficiente de correlação ( $r_{xy}$ ) pode ser classificado como pequeno ou nulo ( $0 > r_{xy} \geq 0,25$ ), fraco ( $0,25 > r_{xy} \geq 0,50$ ), moderado ( $0,50 > r_{xy} \geq 0,75$ ), forte ( $0,75 > r_{xy} > 1,00$ ) e perfeito ( $r_{xy} = 1,00$ ). Valores menores que 0 representam uma correlação inversa e os maiores, direta (VIEIRA, 2018).

#### 3.4.2 Padronização das variáveis

A padronização das variáveis em escores Z foi realizada utilizando-se a Equação 28, cuja média nula e variância unitária atuam de forma a minimizar quaisquer interferências que as grandezas das variáveis poderiam causar nas análises (HAIR JÚNIOR et al., 2009; SINGH et al., 2004; VICINI et al., 2018).

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (28)$$

Sendo  $Z_{ij}$  a variável padronizada de  $X_{ij}$ ;  $X_{ij}$  a variável de atributo j e objeto i;  $\bar{X}_j$  a média aritmética das variáveis j; e  $S_j$  o desvio padrão amostral das variáveis j.

### 3.4.3 Análise dos Componentes Principais (ACP)

Por meio da Análise dos Componentes Principais (ACP) avaliou-se quais as variáveis apresentam maior relevância no conjunto de dados analisados, reduzindo a dimensão destes, mantendo o máximo de informação possível e desprezando aqueles que não contribuem de maneira significativa (ALVES et al., 2018; BERTOSSI et al., 2013; HAIR JÚNIOR et al., 2009; SINGH et al., 2004). Os valores dos CPs para cada um dos municípios foram obtidos por meio da combinação linear entre os autovetores e as variáveis originais padronizadas.

### 3.4.4 Análise de Agrupamentos Hierárquicos (AAH)

Foram agrupados 63 municípios em 22 variáveis, por meio da Distância Euclidiana (Equação 29) entre os indivíduos  $i$  e  $i'$  (HAIR JÚNIOR et al., 2009).

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum (Z_{ij} - Z_{i'j})^2} \quad (29)$$

Em quem  $d_{ii'}$  é distância euclidiana entre as variáveis padronizadas  $Z_{ij}$  e  $Z_{i'j}$ .

Já para o processo aglomerativo de ligação foi utilizado o método Ward (WARD, 1963). O corte para a formação dos grupos foi feito de forma que estes apresentassem maior similaridade interna, pois com o aumento da distância de ligação, esta semelhança diminui e a distância para a formação de novos grupos aumenta.



e positivamente com a precipitação diária média. Desta forma, possuem um comportamento semelhante para o dimensionamento dos reservatórios de aproveitamento de águas pluviais e para os seus indicadores.

As correlações do CV com as demais variáveis estatísticas relacionadas à precipitação mostraram-se significativas e negativas, apresentando correlação moderada ( $0,50 > r_{xy} \geq 0,75$ ) com  $P_{DC,m}$ ,  $P_{D1^\circ,m}$  e  $P_{D2^\circ,m}$  e fraca ( $0,25 > r_{xy} \geq 0,50$ ) com  $P_{DE,m}$ ,  $P_{D3^\circ,m}$  e  $P_{D4^\circ,m}$ . Por outro lado, o CV apresentou associação forte ( $0,75 > r_{xy} > 1,00$ ) e negativa com os indicadores de suprimento de demanda da edificação para ambos os algoritmos e volumes. Para os volumes máximo e ótimo, não houve correlação significativa com o CV (Figura 21).

Pelo comportamento das variáveis do período chuvoso em relação às precipitações trimestrais e ao período de estiagem, observa-se que apenas a  $P_{D3^\circ,m}$  e a  $P_{DE,m}$  não apresentaram correlação significativa. Além disso, o período chuvoso apresentou maior correlação com a  $P_{D1^\circ,m}$  (0,87), cuja associação foi forte e positiva, seguida pela  $P_{D2^\circ,m}$  (0,71), com correlação moderada e positiva, e pela  $P_{D4^\circ,m}$  (0,28), fraca e positiva. Desta forma, o primeiro trimestre apresenta uma maior tendência a ser chuvoso, em relação aos demais e, não houve significância estatística entre a precipitação média diária do período chuvoso e o período de estiagem (Figura 21). A correlação formada entre a  $P_{DE,m}$  e as precipitações trimestrais foi positiva e moderada com a  $P_{D3^\circ,m}$  e positiva e fraca com a  $P_{D2^\circ,m}$  (Figura 21). Deste modo, o terceiro trimestre apresenta uma maior tendência a ser seco, em relação aos demais.

Para o volume máximo dos algoritmos YAS e YBS não houve correlação significativa com os indicadores relacionados à eficiência do dimensionamento, e sim com os volumes ótimos, sendo esta moderada e positiva (0,75). Para as correlações entre o volume máximo e as variáveis estatísticas relacionadas à precipitação, observou-se que somente para  $P_{D3^\circ,m}$  e  $P_{DE,m}$  foi verificado significância (-0,39 e -0,49, correlações negativas e fracas), como pode ser visto na Figura 21.

Para o  $E_{ecoAm}$ , observa-se que se correlaciona de maneira positiva com  $E_{ecoAo}$  (0,86) e com o  $C_{onfAo}$  e  $C_{onfBo}$  (0,88), indicando uma tendência forte. Já a correlação entre  $E_{ecoAm}$  com o  $V_{Ao}$  e  $V_{Bo}$  apresentaram uma tendência fraca (0,26) e pequena (0,25), respectivamente (Figura 21). O  $E_{ecoBm}$  apresentou o mesmo comportamento descrito que o  $E_{ecoAm}$ .

As correlações entre o  $E_{ecoAm}$  e as variáveis estatísticas relacionadas à precipitação foram todas significativas, sendo a maior delas o CV, cuja associação foi forte e negativa (-0,84); com a  $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$  e  $P_{D,m}$ , o  $E_{ecoAm}$  apresentou uma correlação moderada e positiva (0,69). A mesma classificação foi observada nas correlações entre o  $E_{ecoAm}$  e  $P_{D1^\circ,m}$  (0,60),  $P_{D4^\circ,m}$  (0,57) e  $P_{DC,m}$  (0,54). Este comportamento também foi observado para o  $E_{ecoBm}$  (Figura 21).

Entre as correlações fracas e positivas com o  $E_{ecoAm}$  e o  $E_{ecoBm}$ , estão a  $P_{D3^{\circ},m}$  (0,28),  $P_{DE^{\circ},m}$  (0,31) e a  $P_{D2^{\circ},m}$  (0,36). A  $Conf_{Am}$  e a  $Conf_{Bm}$  também apresentaram comportamento semelhante aos apresentados pelo  $E_{ecoAm}$  e o  $E_{ecoBm}$ . A classificação das correlações quando se compara o  $E_{ecoAm}$  e o  $E_{ecoBm}$  com o  $Conf_{Am}$  e a  $Conf_{Bm}$  diferiu apenas da correlação com o volume ótimo, em que se tem uma associação fraca para os dois algoritmos (Figura 21).

Dentre correlações do volume ótimo,  $V_{Ao}$  e  $V_{Bo}$ , com as variáveis estatísticas relacionadas à precipitação, não foram significativas estatisticamente a  $P_{D3^{\circ},m}$ ,  $P_{D4^{\circ},m}$ ,  $P_{DE,m}$  e o CV. Para as demais, a maior correlação foi com  $P_{D2^{\circ},m}$ , seguida pela  $P_{DC,m}$ ,  $P_{D1^{\circ},m}$  e pelas  $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$  e  $P_{D,m}$ , as quais apresentaram correlação fraca e negativa (Figura 21). O  $E_{ecoAo}$  apresentou tendência forte e positiva com  $E_{ecoAm}$ ,  $E_{ecoBm}$ ,  $Conf_{Am}$  e  $Conf_{Bm}$  (0,86). O mesmo comportamento foi observado entre o  $E_{ecoBo}$  e tais indicadores (Figura 21).

Todas as correlações entre  $E_{ecoAo}$  e as variáveis estatísticas relacionadas à precipitação foram significativas estatisticamente. A maior correlação observada foi com o CV (-0,84), que indicou uma associação forte e negativa. Em sequência, têm-se  $P_{A,m}$ ,  $P_{D,m}$  e  $P_{M,m}$  com correlações forte e positivas;  $P_{DE,m}$  (0,66),  $P_{D3^{\circ},m}$  (0,59),  $P_{D4^{\circ},m}$  (0,57),  $P_{D1^{\circ},m}$  (0,51), com correlações moderadas e positivas; e  $P_{D2^{\circ},m}$  (0,47),  $P_{DC,m}$  (0,43), com associações positivas e fracas (Figura 21). O comportamento do  $E_{ecoBo}$  foi semelhante, apresentando a mesma classificação, contudo com valores distintos de  $r$  para as correlações (Figura 21).

O  $Conf_{Ao}$  e  $Conf_{Bo}$  apresentaram comportamento próximo ao do  $E_{ecoAo}$  e do  $E_{ecoBo}$  com correlação igual a unidade, sendo classificada como perfeita e positiva. Para os indicadores associados ao volume ótimo de dimensionamento, a correlação com os volumes não apresenta significância estatística ao nível de  $\alpha = 5,00\%$  de probabilidade.

Para avaliar a relevância das variáveis estudadas e agregar seus significados analíticos em um menor número de variáveis, foi realizada a Análise de Componentes Principais, em que os dois primeiros componentes (CP1 e CP2, nesta ordem) explicaram cerca de 76,92% da variância (Tabela 4).

Tabela 4 – Componentes principais (CP 1 e CP 2) da obtidas por meio da Análise de Componentes Principais e suas correlações com as variáveis.

	CP 1	CP 2
Autovalor	12,42	4,51
Variância explicada (%)	56,44	20,48
Variância explicada acumulada (%)	56,44	76,92
	Correlações	
$V_{Am}$	0,082 <sup>ns</sup>	<b>0,877</b>
$Eeco_{Am}$	<b>-0,900</b>	0,364
$Conf_{Am}$	<b>-0,899</b>	0,368
$V_{Ao}$	0,008 <sup>ns</sup>	<b>0,918</b>
$Eeco_{Ao}$	<b>-0,943</b>	0,078 <sup>ns</sup>
$Conf_{Ao}$	<b>-0,947</b>	0,109 <sup>ns</sup>
$V_{Bm}$	0,082 <sup>ns</sup>	<b>0,877</b>
$Eeco_{Bm}$	<b>-0,900</b>	0,364
$Conf_{Bm}$	<b>-0,899</b>	0,368
$V_{Bo}$	0,015 <sup>ns</sup>	<b>0,920</b>
$Eeco_{Bo}$	<b>-0,944</b>	0,081 <sup>ns</sup>
$Conf_{Bo}$	<b>-0,948</b>	0,112 <sup>ns</sup>
$P_{A,m}$	<b>-0,917</b>	-0,275
$P_{M,m}$	<b>-0,917</b>	-0,275
$P_{D,m}$	<b>-0,917</b>	-0,275
$P_{D1^{\circ},m}$	-0,728	-0,174 <sup>ns</sup>
$P_{D2^{\circ},m}$	-0,608	-0,399
$P_{D3^{\circ},m}$	-0,514	-0,357
$P_{D4^{\circ},m}$	-0,566	0,175 <sup>ns</sup>
$P_{DC,m}$	-0,692	-0,197 <sup>ns</sup>
$P_{DE,m}$	-0,519	-0,299
CV	<b>0,914</b>	0,009 <sup>ns</sup>

Em que:  $V_{Am}$ ,  $Eeco_{Am}$ ,  $Conf_{Am}$ ,  $V_{Ao}$ ,  $Eeco_{Ao}$ ,  $Conf_{Ao}$ : Volume, coeficiente de eficiência de economia de água e confiabilidade plena para o YAS nos pontos máximos e ótimos;  $V_{Bm}$ ,  $Eeco_{Bm}$ ,  $Conf_{Bm}$ ,  $V_{Bo}$ ,  $Eeco_{Bo}$ ,  $Conf_{Bo}$ : Volume, coeficiente de eficiência de economia de água e confiabilidade plena para o YAS nos pontos máximos e ótimos;  $P_{A,m}$ : Precipitação Anual Média;  $P_{M,m}$ : Precipitação Anual Média;  $P_{D,m}$ : Precipitação Diária Média;  $P_{D1^{\circ},m}$ : Precipitação Média Diária para o primeiro trimestre;  $P_{D2^{\circ},m}$ : Precipitação Média Diária para o segundo trimestre;  $P_{D3^{\circ},m}$ : Precipitação Média Diária para o terceiro trimestre;  $P_{D4^{\circ},m}$ : Precipitação Média Diária para o quarto trimestre;  $P_{DC,m}$ : Precipitação Diária Média do Período Chuvoso;  $P_{DE,m}$ : Precipitação Diária Média do Período de Estiagem; e CV: Coeficiente de Variação da Precipitação Diária; CP: Componente Principal; <sup>ns</sup>: não significativo a 5%; Valores em negrito indicam correlação forte segundo Vieira (2018).

Fonte: Dos autores (2022).

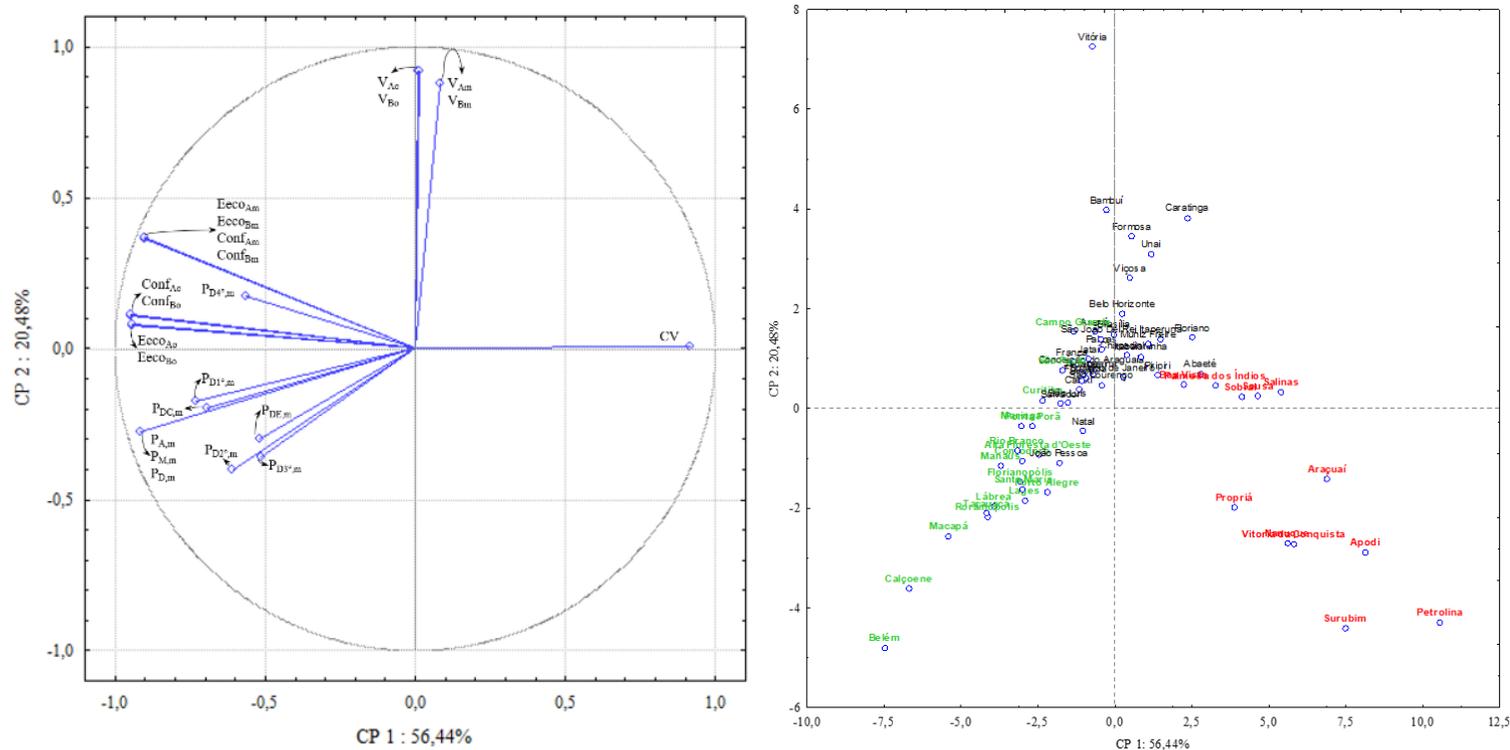
Segundo o critério de Kaiser (1958), deveriam ser analisados os quatro primeiros componentes principais, uma vez que seus autovalores foram de 12,42, 4,51, 2,36 e 1,49 (maiores que a unidade). Porém, devido ao valor superior dos dois primeiros componentes comparando-os com os demais, juntamente com a maior quantidade de informação explicadas por eles e, finalmente, por não terem sido verificadas correlações fortes com as variáveis relacionadas à precipitação para os dois últimos componentes principais, analisou-se apenas os

dois primeiros, visto que, sozinhos, apresentam uma excelente explicação das variáveis estudadas.

O CP1 tem uma variância de aproximadamente 12,42 das variáveis originais, explicando 56,44% da variância (Tabela 4). Observou-se ainda que não houve uma correlação significativa a 5% de probabilidade com os volumes. Por outro lado, o CP1 apresentou uma correlação forte com os indicadores de suprimento de demanda para todos os algoritmos e com  $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$ ,  $P_{D,m}$  e CV. Para o último, a correlação foi positiva, enquanto para os demais, negativa. O CP1 também se correlaciona de maneira moderada e negativa com o restante das variáveis estatísticas relacionadas à precipitação.

O CP2 agrega uma variância 4,51 das variáveis originais, explicando 20,48% da variância (Tabela 4). Possui correlações positivas e fortes com os volumes máximo e ótimo para o YAS e o YBS. Não tem correlação com o CV,  $Eeco_{Ao}$ ,  $Conf_{Ao}$ ,  $Eeco_{Bo}$  e  $Conf_{Bo}$ ,  $P_{D^4,m}$  e  $P_{DC,m}$ . As demais variáveis estatísticas relacionadas à precipitação apresentaram correlações negativas e fracas com o CP2. Para os indicadores de suprimento de demanda associados ao volume máximo também foi observada classificação fraca, porém positiva. Na Figura 22 é apresentado o círculo de correlação e o gráfico de dispersão.

Figura 22 – Círculo de correlação dos componentes principais (CP 1 e CP 2) para as variáveis estudadas na Análise de Componentes Principais (A). Dispersão dos municípios estudados para os componentes principais (CP 1 e CP 2) para a Análise de Componentes Principais de acordo com os agrupamentos formados pelo dendrograma (B).



Em que:  $V_{Am}$ ,  $Eeco_{Am}$ ,  $Conf_{Am}$ ,  $V_{Ao}$ ,  $Eeco_{Ao}$ ,  $Conf_{Ao}$ : Volume, coeficiente de eficiência de economia de água e confiabilidade plena para o YAS nos pontos máximos e ótimos;  $V_{Bm}$ ,  $Eeco_{Bm}$ ,  $Conf_{Bm}$ ,  $V_{Bo}$ ,  $Eeco_{Bo}$ ,  $Conf_{Bo}$ : Volume, coeficiente de eficiência de economia de água e confiabilidade plena para o YAS nos pontos máximos e ótimos;  $P_{A,m}$ : Precipitação Anual Média;  $P_{M,m}$ : Precipitação Anual Média;  $P_{D,m}$ : Precipitação Diária Média;  $P_{D1^{\circ},m}$ : Precipitação Média Diária para o primeiro trimestre;  $P_{D2^{\circ},m}$ : Precipitação Média Diária para o segundo trimestre;  $P_{D3^{\circ},m}$ : Precipitação Média Diária para o terceiro trimestre;  $P_{D4^{\circ},m}$ : Precipitação Média Diária para o quarto trimestre;  $P_{DC,m}$ : Precipitação Diária Média do Período Chuvoso;  $P_{DE,m}$ : Precipitação Diária Média do Período de Estiagem; e CV: Coeficiente de Variação da Precipitação Diária; CP: Componente Principal; os municípios em vermelho são representantes do Grupo 1; os em verde, do Grupo 2; e os em preto, do Grupo 3.

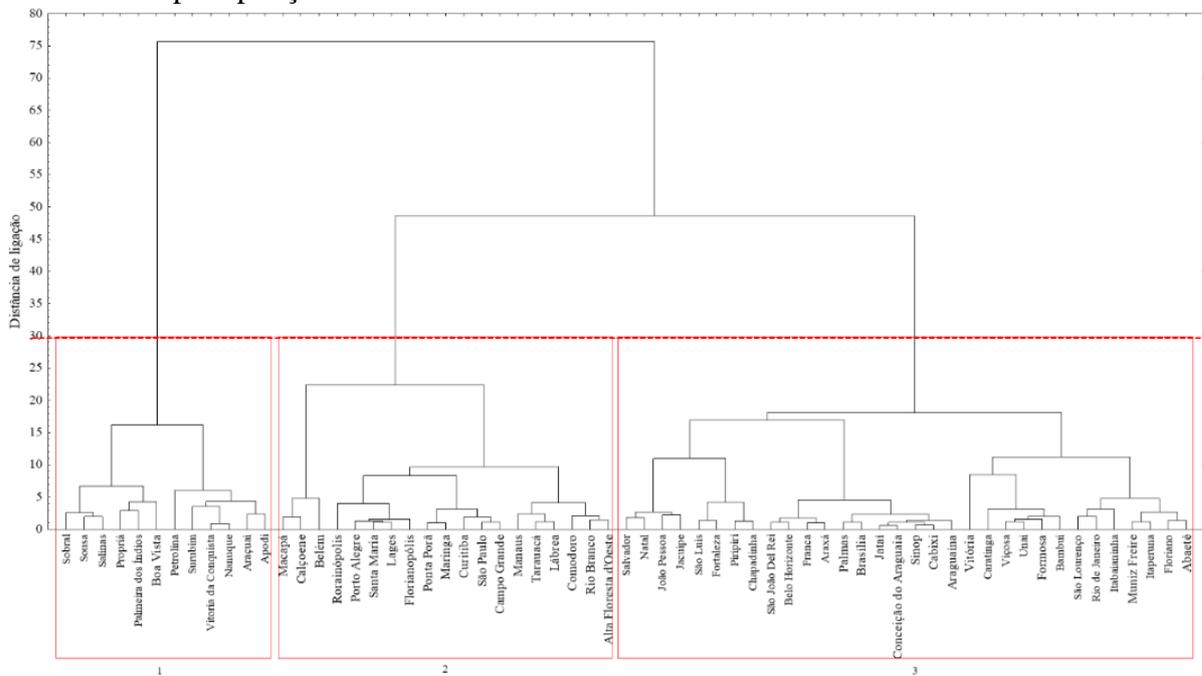
Fonte: Dos autores (2022).

Pelo círculo de correlação (Figura 22A) pode ser observado um comportamento distinto de CV em relação às demais variáveis estudadas. Além disso, todos os volumes calculados apresentaram um comportamento próximo entre si, diferindo do restante das variáveis.

Com o gráfico de dispersão (Figura 22B), é possível observar o comportamento dos autovetores, tendo o município de Vitória apresentado um comportamento com pouca semelhança aos demais municípios, o que leva a este ter o maior CP2. Ao comparar sua posição na Figura 22B com a Figura 22A, observa-se que para este município foram obtidos maiores volumes em relação aos demais. Já Surubim, Petrolina, Apodi, Vitória da Conquista, Nanuque, Propriá e Araçuaí estão entre os municípios com maiores valores para o CP1 e menores para o CP2.

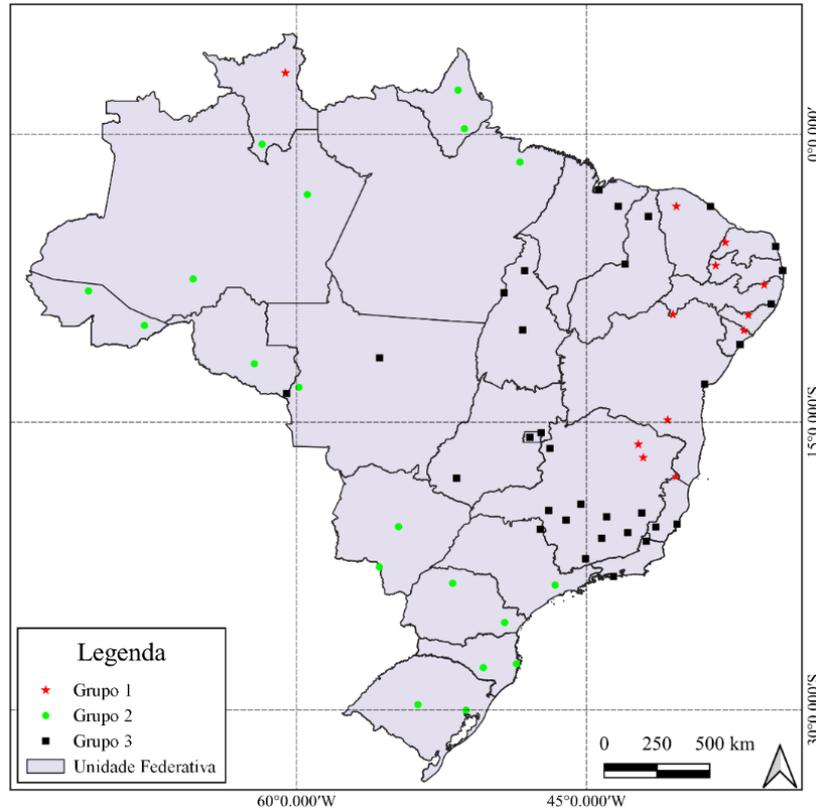
O dendrograma gerado da análise de agrupamentos hierárquicos (Figura 23), foi cortado originando grupos similares para os 63 municípios. Este corte foi realizado na distância de ligação com valor igual a 30 resultando em 3 agrupamentos e, na Figura 24, é apresentado o mapa com a localização dos municípios de cada um dos grupos.

Figura 23 – Dendrograma para a Análise de Agrupamentos Hierárquicos para 63 municípios brasileiros em relação a 22 variáveis relacionadas ao dimensionamento de reservatórios de captação de águas pluviais e variáveis estatísticas relacionadas a precipitação.



Fonte: Dos autores (2022).

Figura 24 – Mapa com a localização dos três clusters formados na Análise de Agrupamentos Hierárquicos.



Fonte: Dos autores (2022).

O Grupo 1 do dendrograma formado pelos municípios de Petrolina, Surubim, Apodi, Vitória da Conquista, Propriá, Sousa, Palmeira dos Índios, Sobral, Boa Vista, Salinas, Nanuque e Araçuai, representa 19,04% dos municípios estudados (Figura 23). Dentre eles, somente Boa Vista, Salinas, Araçuai e Nanuque, não estão localizados na região Nordeste do Brasil. Boa Vista encontra-se na região Norte enquanto os demais, estão localizados no estado de Minas Gerais (região Sudeste). Salinas, Araçuai e Nanuque fazem parte das mesorregiões Norte de Minas, Jequitinhonha e Vale do Mucuri, respectivamente, em que a mesorregião do Jequitinhonha é vizinha das mesorregiões supracitadas. Com exceção dos municípios de Boa Vista, Nanuque, Petrolina e Vitória da Conquista, que têm classificação climática de Köppen Am, Aw, BSh e Cfa, respectivamente, os demais possuem classificação As (ALVARES et al., 2013).

Os municípios desse agrupamento têm os menores valores de  $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$  e  $P_{D,m}$ , com exceção de Boa Vista. Para a  $P_{D3^{\circ},m}$ , os municípios de Boa Vista, Surubim, Propriá, Petrolina, Vitória da Conquista, Nanuque, Apodi e Araçuai estão entre os dez municípios com os menores valores. Para o CV, os municípios de Petrolina, Apodi, Araçuai, Sousa, Nanuque, Salinas, Vitória da Conquista e Surubim possuem os valores mais elevados em comparação com os

demais municípios estudados, sendo Palmeira dos Índios tem o menor CV. Os doze municípios desse grupo estão entre os que possuem a maior porcentagem de meses considerados como de estiagem (Tabela 1). Tal comportamento, resultou em reservatórios com os menores  $Eeco_{Am}$ ,  $Conf_{Am}$ ,  $Eeco_{Bm}$  e  $Conf_{Bm}$ . Além disso, para o  $Eeco_{Ao}$ , a  $Conf_{Ao}$ , o  $Eeco_{Bo}$  e o  $Conf_{Bo}$ , os municípios do Grupo 1 estão entre os com dez que têm os menores valores, com exceção à Boa Vista e Palmeira dos Índios, que estão entre os quinze menores.

O Grupo 2 do dendrograma, formado pelos municípios de Tarauacá, Manaus, Rorainópolis, Belém, Macapá, Calçoene, Rio Branco, Lábrea, Alta Floresta d'Oeste, Comodoro, Campo Grande, Ponta Porã, Maringá, Porto Alegre, Santa Maria, Florianópolis, Curitiba, Lages e São Paulo, engloba 30,16% dos municípios estudados (Figura 23). Os nove primeiros encontram-se na região Norte; Comodoro, e Campo Grande e Ponta Porã na região Centro-Oeste; São Paulo na Região Sudeste; e os demais na região Sul. Os três primeiros municípios têm classificação climática de Köppen Af, os oito seguintes Am, os três últimos Cfb e o restante são classificados como Cfa (ALVARES et al., 2013).

Os municípios de Belém, Calçoene, Macapá, Lábrea, Rorainópolis, Tarauacá, Comodoro, Manaus, Rio Branco, Maringá, Alta Floresta d'Oeste, Santa Maria, Ponta Porã e Lages estão entre os 15 municípios com as maiores  $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$  e  $P_{D,m}$ . Em relação esse agrupamento, os que apresentaram menores precipitações foram Campo Grande, Curitiba e São Paulo. Quanto a  $P_{D1^{\circ},m}$ , os municípios de Belém, Calçoene, Macapá, Rio Branco, Comodoro, Manaus, Tarauacá e Lábrea têm os maiores valores para essa variável. Para  $P_{D2^{\circ},m}$ , Calçoene, Macapá, Belém e Rorainópolis possuem os maiores valores. Em contrapartida, em relação ao Grupo 2, as menores  $P_{D2^{\circ},m}$  foram observadas para São Paulo e Campo Grande.

Alta Floresta d'Oeste, Comodoro, Lábrea, Tarauacá, Maringá, Belém, Santa Maria, Rio Branco e Ponta Porã estão entre os doze municípios com as maiores  $P_{D4^{\circ},m}$ . Para  $P_{DC,m}$ , os municípios de Belém, Calçoene e Macapá têm os maiores valores. Já para o  $P_{DE,m}$ , Belém, Tarauacá, Florianópolis, Manaus, Rorainópolis, Santa Maria, Porto Alegre, Lábrea e Rio Branco têm os menores valores. Quanto ao CV para Macapá, Calçoene, Belém, Manaus, Tarauacá, Rorainópolis, Comodoro, Lábrea, Alta Floresta d'Oeste, Rio Branco, Lages, Florianópolis e Curitiba foram os menores valores encontrados nesse estudo. Além disso, os municípios do Grupo 2 estão entre os 21 municípios que têm as menores porcentagens de meses classificados como de estiagem (Tabela 1).

Os menores CV's e as maiores precipitações médias em escala anual, mensal e diária ( $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$  e  $P_{D,m}$ ) levaram ao dimensionamento de reservatórios com elevados indicadores de suprimento relacionados ao volume máximo de dimensionamento. Em relação aos indicadores

de suprimento da demanda da edificação ligados ao volume ótimo, os municípios desse agrupamento juntamente com Vitória e Salvador (Grupo 3), têm os maiores valores para o  $E_{CO_{A0}}$  e  $E_{CO_{B0}}$  (superiores a 0,7), e para a  $Conf_{A0}$  e  $Conf_{B0}$  (superiores a 68%).

Os municípios de Belém, Calçoene, Macapá e Comodoro apresentam os menores volumes ótimos do Grupo 2. Têm-se alguns municípios do Grupo 1 que apresentam  $V_{B0}$  e  $V_{A0}$  inferiores aos dos municípios supracitados, porém apresentam baixos  $E_{CO_{A0}}$ ,  $E_{CO_{B0}}$ ,  $Conf_{A0}$  e  $Conf_{B0}$ .

O Grupo 3 do dendrograma contempla 50,79% dos municípios estudados, sendo Araguaína, Palmas, Conceição do Araguaia e Cabixi, localizados na Região Norte do país; os Jacuípe, Salvador, Fortaleza, São Luís, Chapadinha, João Pessoa, Floriano, Piri-piri, Natal e Itabaianinha na Região Nordeste; São João Del Rei, Abaeté, Belo Horizonte, Unaí, Bambuí, São Lourenço, Araxá, Caratinga, Viçosa, Muniz Freire, Vitória, Rio de Janeiro, Itaperuna e Franca na Região Sudeste; e Sinop, Jataí, Formosa e Brasília, na Região Centro-Oeste (Figura 23). Os municípios deste agrupamento têm, segundo Köppen, as seguintes classificações climáticas Am, As, Aw, Cfa, Cwa e Cwb (ALVARES et al., 2013).

Diferente do Grupo 1, que concentra maior parte dos municípios com menores  $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$  e  $P_{D,m}$ , e do Grupo 2, em que boa parte dos municípios estão entre os que possuem os maiores valores para as variáveis supracitadas, foi observado para o Grupo 3 os valores intermediários para as precipitações anual, mensal e diária média e CV. Além disso, a maior parte dos municípios deste grupo têm porcentagens intermediárias variando de 21,70 a 56,70% de meses classificados como estiagem (Tabela 1)

Observou-se que os municípios do Grupo 3 estão entre aqueles com os maiores volumes máximo dimensionados para os reservatórios para ambos os algoritmos. Comparando-se este grupo com o Grupo 2, pode-se perceber que municípios do Grupo 3 que apresentaram volumes máximo inferiores ao do Grupo 2 possuem indicadores menores de atendimento de demanda associados ao dimensionamento.

Já em relação aos indicadores de suprimento de demanda associados ao volume máximo, o município de Palmas, junto com os municípios de Lábrea, Calçoene, Manaus, Comodoro e Alta Floresta d'Oeste (Grupo 2) apresentaram os maiores valores. Para o Grupo 3, os valores de  $E_{CO_{Am}}$  e  $E_{CO_{Bm}}$  são superiores a 0,780 e para a  $Conf_{Am}$  e  $Conf_{Bm}$ , a 77,5%.

Já para o volume ótimo, o Grupo 2 e os municípios de Salvador e Vitória (Grupo 3), são os que têm os maiores indicadores, sendo a  $Conf_{A0}$  e  $Conf_{B0}$  superior a 67,9%. Já Floriano, Abaeté e Piri-piri (Grupo 3) e os municípios do Grupo 1, possuem menores indicadores com  $Conf_{A0}$  e  $Conf_{B0}$  inferior à 51,15%.

## 5 DISCUSSÃO

A tendência comportamental de volume, eficiência e confiabilidade para os dois algoritmos foi semelhante, apresentando valores de correlação iguais à unidade, assim, uma correlação perfeita. A associação moderada e positiva que há entre os volumes máximo e ótimo, demonstra que eles apresentam uma tendência semelhante de crescimento. Assim, quanto maior o volume máximo, maior será o ótimo, visto que, para obtê-lo é necessário conhecer o volume máximo (Figura 21).

Os volumes, tanto o máximo, quanto o ótimo, não se correlacionaram significativamente com o CV. Isto ocorreu devido à aleatoriedade da precipitação diária que foi utilizada para o dimensionamento. Além disso, não foi possível observar dependência forte entre os volumes e variáveis estatísticas relacionadas à precipitação.

As correlações das variáveis estatísticas relacionadas à precipitação com o volume máximo apresentaram uma maior dependência do período de estiagem, que se deu de maneira inversa, ou seja, quanto menor a  $P_{DE,m}$ , maior será o reservatório dimensionado. Em relação ao volume ótimo, é possível observar que existe uma maior correlação deste com as variáveis relacionadas ao período chuvoso, assim, quanto maior  $P_{DC,m}$ , menor serão os reservatórios (Figura 21).

Para os indicadores de atendimento da demanda da edificação, a maior correlação foi com o CV. Assim, a maior variabilidade da precipitação diária, leva à redução desses indicadores devido às incertezas relacionadas ao suprimento da demanda da edificação (Figura 21). Shiguang e Yu (2021) analisaram a influência da variabilidade espacial e das condições climáticas na economia de água e no desempenho financeiro de um sistema de aproveitamento de águas pluviais em quatro cidades chinesas com climas e demandas distintas e verificaram que o local com maior precipitação anual não foi aquele que necessariamente apresentou o maior atendimento da demanda. Já Imteaz et al. (2015) analisaram que o suprimento da demanda depende da própria demanda, da área de captação e da distribuição da precipitação. Desta forma, têm-se que a variabilidade temporal da precipitação é de extrema importância.

Com a ACP, pôde-se perceber que o CPI é fortemente correlacionado com os indicadores de suprimento de demanda para ambos algoritmos e com as variáveis relacionadas à precipitação  $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$ ,  $P_{D,m}$  e CV. Ressalta-se ainda que, por meio das correlações e do círculo de correlações (Figura 22A e Tabela 4), foi possível observar que a contribuição das variáveis relacionadas à precipitação supracitadas foram negativas e a do CV, positiva. Verifica-se então que as distribuições temporal e espacial da lâmina precipitada influenciam

para um maior atendimento da demanda, quanto menor o CV e maiores as precipitações médias em escala anual, mensal e diária.

O CP2 é explicado pelos volumes máximo e ótimo de dimensionamento para ambos os algoritmos, além de apresentarem maiores correlações (Tabela 4). O município de Vitória possui os volumes dimensionados mais elevados e encontra-se com o maior valor de CP2 (Figura 22B). Juntamente ao resultado da ACP com a matriz de correlação de Pearson, observou-se que os volumes não se correlacionaram fortemente com os indicadores, assim, não influenciam proporcionalmente no atendimento da demanda.

Em relação a AAH para o Grupo 1, as menores  $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$ ,  $P_{D,m}$  e  $P_{D1^{\circ},m}$  que têm uma correlação positiva com os indicadores de suprimento de demanda e maiores CV (correlação negativa) para alguns municípios deste agrupamento, além disto, a maior porcentagem de meses classificados como estiagem, verificou-se reservatórios com atendimento da demanda da edificação reduzidos. Assim, para este grupo, do ponto de vista hidrológico, não é vantajoso o uso de sistema de aproveitamento de águas pluviais devido ao baixo suprimento da demanda (Figura 23, Tabela 1 e Tabela 4).

Pela ACP, nota-se que todos os municípios do Grupo 1 estão à direita do eixo do CP2, assim, quanto maior o CP1, menor o suprimento da demanda da edificação (Figura 22B). Além disso, notou-se que Surubim, Petrolina, Apodi, Vitória da Conquista, Nanuque, Propriá e Araçuaí, encontram-se abaixo do eixo do CP1, com baixo atendimento à demanda e reservatórios menores.

Rashidi Mehrabadi, Saghafian e Haghghi Fashi (2013), avaliaram a aplicabilidade e o desempenho do sistema de aproveitamento de águas pluviais para usos não-potáveis, em três cidades com climas distintos (clima mediterrâneo, úmido e árido) do Irã, com precipitações anuais médias de 288, 1355 e 150 mm, respectivamente, com distintas áreas de captação e demandas. Os autores observaram que na região com menor precipitação, o sistema não consegue atender à demanda e para a cidade com clima mediterrâneo, foi verificado que com o aumento da área de captação houve uma maior confiabilidade do sistema.

Imteaz, Ahsan e Abdalla (2013) estudaram a variabilidade regional da confiabilidade de reservatórios de águas pluviais em quatro regiões na cidade de Melbourne, Austrália, por meio de um modelo de balanço hídrico, para três condições distintas de clima (ano seco, médio e úmido), com precipitações anuais variando entre 374 e 1081 mm; área de captação de 100 e 200 m<sup>2</sup>; demanda de 150 L/dia.per capita; 2 e 4 moradores por edificação; e reservatórios com volume de 1000 a 10000 litros. Os autores observaram que para a área de captação de 100 m<sup>2</sup>, a quantidade de água captada não era suficiente para atender a demanda da edificação. Assim,

mesmo com incremento no volume não foi observada uma resposta na confiabilidade do sistema e pôde-se observar que esta é limitada pelas condições climáticas.

Neste trabalho analisou-se apenas uma área de telhado e ao aumentá-la seriam obtidos diferentes resultados de economia de água potável para todos os municípios estudados. Entretanto, para o Grupo 1, as condições climáticas locais ainda seriam um fator limitante devido às menores  $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$ , e  $P_{D,m}$  e ao elevado CV, os quais influenciam no atendimento da demanda da edificação.

Os municípios do Grupo 2 estão entre aqueles com os maiores indicadores de suprimento de demanda para o YAS e o YBS, associados ao volume máximo e ótimo de dimensionamento. Isto ocorreu devido aos baixos CV (correlação forte e inversa com todos os indicadores de suprimento de demanda da edificação) e altas  $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$  e  $P_{D,m}$  (correlação forte e direta com os indicadores de suprimento da demanda da edificação associados ao volume ótimo, e moderada com os indicadores associados ao volume máximo), além das porcentagens mais baixas de meses classificados como de estiagem, influenciando no atendimento da demanda (Tabela 1 e Figura 22B).

A maior parte dos municípios do Grupo 2 estão abaixo do eixo do CP1 e a esquerda do CP2 (Figura 23), o que denota que estão entre os que têm os maiores valores para os indicadores de suprimento de demanda e os menores volumes. Aqueles que estão acima do eixo do CP1, como o Campo Grande, Curitiba e São Paulo, possuem bons indicadores suprimento de demanda e maior volume.

Para o Grupo 2 é benéfico o aproveitamento de águas pluviais para o uso na edificação, já que este proporcionará uma redução da água advinda da companhia de abastecimento e, conseqüentemente, na tarifa de água (HAFIZI MD LANI; YUSOP; SYAFI UDDIN, 2018).

O estudo de Tavares et al. (2021) avaliou o potencial socioeconômico de 24 municípios no Rio Grande do Sul, estado localizado na região Sul do Brasil, com distintas áreas de captação, demandas e volumes de reservatórios. Os autores consideraram como sistema implementável aquele que possui economia mínima de 80% de água, além de outros critérios como diminuição no valor da conta de água. Neste contexto, o Grupo 2 obteve para o  $Eeco_{Am}$  e  $Eeco_{Bm}$  valores superiores a 80%, assim o sistema pode ser implementado segundo critério adotado por Tavares et al. (2021); já o  $Eeco_{Ao}$  e  $Eeco_{Bo}$ , com valores acima de 0,70, não se mostraram tão interessantes do ponto de vista de economia de água da edificação quanto o ponto máximo.

O Grupo 3 abrange a maior parte dos municípios estudados, e estão entre os que possuem os maiores volumes máximo e ótimo dimensionados (Figura 23). Na Figura 22B, os

municípios, com exceção à Natal e João Pessoa, estão acima do eixo horizontal e demonstram tendência a terem um maior volume. Além disso, este fato confirma o que foi observado no dendrograma.

Devido ao valor do atendimento das demandas dos municípios do Grupo 3, do ponto de vista hidrológico, o aproveitamento de águas pluviais para o uso não potável da edificação é interessante e vantajoso. Em contrapartida, grandes reservatórios podem apresentar inviabilidade técnica-econômica para o projeto, visto que é a parte mais onerosa do sistema de captação e aproveitamento de águas pluviais (AMORIM; PEREIRA, 2008; RODRIGUES et al., 2020; SILVA et al., 2019).

Além disso, foi observado no estudo de Tavares et al. (2021) e de Rodrigues et al. (2020) que a viabilidade de implantação depende também do benefício econômico, e este está atrelado à redução do valor pago pela água à concessionária. Desta forma, o retorno econômico do investimento para implantação do sistema depende do valor da tarifa de água e da demanda de águas pluviais pela edificação.

A gestão dos recursos hídricos em um país com grande variabilidade climática espacial como o Brasil é difícil. As mudanças no regime pluvial local podem interferir no atendimento da demanda do sistema de aproveitamento de água pluvial (TESTON et al., 2018; ZHANG et al., 2018), alterando o retorno econômico de instalação do sistema.

Por fim, para um cenário de crise hídrica, em que não há precipitação ou esta apresenta uma distribuição temporal bastante irregular, a implantação do sistema de aproveitamento de águas pluviais pode não apresentar uma finalidade satisfatória.

## 6 CONCLUSÃO

Quanto menor o coeficiente de variação da precipitação diária ou quanto maior a precipitação média em escala anual, mensal e diária ( $P_{A,m}$ ,  $P_{M,m}$  e  $P_{D,m}$ ), haverá uma redução nas incertezas associadas ao abastecimento por águas pluviais, assim, mais elevado será o suprimento da demanda da edificação. Além disso, quando há maior porcentagem de meses de estiagem, menor será o atendimento da demanda. Notou-se também, que os volumes calculados para os reservatórios, nos pontos máximos e ótimos para os dois algoritmos, não apresentam dependência forte com nenhuma das variáveis estatísticas relacionadas à precipitação.

O primeiro componente principal associou-se aos indicadores de atendimento de demanda da edificação e às variáveis estatísticas relacionadas à precipitação, enquanto o segundo componente principal relacionou-se aos volumes máximo e ótimo para os dois algoritmos, denotando que não há uma associação forte entre o volume e os indicadores.

Pela Análise de Agrupamentos Hierárquicos para os municípios estudados, observou-se a formação de três agrupamentos. Os municípios do Grupo 1 são, em sua maioria, aqueles que têm baixas precipitações médias diária, mensal e anual, alto coeficiente de variação e elevadas porcentagens de meses classificados como estiagem, enquanto o Grupo 2 possui comportamento antagônico. No Grupo 3 os municípios estudados possuem valores intermediários para essas variáveis.

Verificou-se que, do ponto de vista hidrológico, o sistema de aproveitamento de águas pluviais não é vantajoso para o Grupo 1, sendo esta interessante para os Grupos 2 e 3. Porém, neste último, a dimensão do reservatório pode ser um fator que inviabilize economicamente a adoção do sistema.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527**: Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos. Rio de Janeiro, 2007.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527**: Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis – Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.
- ABATTI, B. H.; TSCHÖKE, G. V. INTEGRAÇÃO DE MEDIDAS PONTUAIS E DISTRIBUÍDAS NO CONTROLE DE CHEIAS NA BACIA DO RIO ITAJAÍ DO SUL. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, p. 232, 15 ago. 2018.
- AGOSTINHO, M. D. S. P.; POLETO, C. Sistemas Sustentáveis De Drenagem Urbana: Dispositivos. **Holos Environment**, v. 12, n. 2, p. 121, 2012.
- ALMEIDA, A. J. P. **Implicações da urbanização no comportamento hidrológico da Bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, Maceió/AL**. Dissertação (Mestrado em Geografia)—Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2016.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ALVES, J. DO P. H. et al. Monitoring water quality of the Sergipe River basin: an evaluation using multivariate data analysis. **RBRH**, v. 23, 10 jul. 2018.
- AMORIM, S. V. DE; PEREIRA, D. J. DE A. Estudo comparativo dos métodos de dimensionamento para reservatórios utilizados em aproveitamento de água pluvial. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 2, p. 53–66, 2008.
- ANA. **Manual dos Usos Consuntivos de Água do Brasil**. Brasília, DF: Agência Nacional das Águas, 2019.
- ANNECCHINI, K. P. V. **Aproveitamento da água da chuva para fins não potáveis na cidade de Vitória (ES)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)—Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2005.
- ARAÚJO, G. M. **Análise e Modelagem Integrada Da Qualidade Da Água Em Um Sistema Urbano Canal-Reservatório Eutrofizado, localizado em Fortaleza/CE**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2016.
- ASSUNÇÃO, L. V. et al. Pontal das Brisas Residencial: Study of the benefits generated by the use of rainwater for non-potable purposes. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 5, p. 3501–3509, 2019.
- AZEVEDO, R.; NETO, A. Identificação Das Áreas De Risco a Inundações E Enchentes Na Cidade De Sobral-Ce. **Revista Equador**, v. 5, n. 4, p. 02–22, 2016.
- BALBINOT, R. et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, v. 4, n. 1, p. 131–149, 2008.

BELLADONA, R.; VARGAS, T. DE. Distribuição espaço-temporal das precipitações e a relevância da orografia do município de Caxias do Sul (RS). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 3, n. 69, p. 607–620, 2017.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (ORG. . (Ed.). . **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ ABRH, 2001. p. 943.

BERTOSSI, A. P. A. et al. Seleção e agrupamento de indicadores da qualidade de águas utilizando Estatística Multivariada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 5, p. 2025, 17 out. 2013.

BRAGA, N. T. D. S.; GOUVEIA, M. D. S. Dialética da ocupação de áreas de várzea em Belém e propostas de drenagem compreensiva. **Novos Cadernos NAEA**, v. 23, n. 1, p. 243–260, 2020.

BRAGANÇA, L. DE S.; FONSECA, P. L. DA; HORA, M. DE A. G. M. DA. Integração entre medidas de controle de enchentes e o aproveitamento social do espaço urbano na bacia do rio Jacaré – município do Rio de Janeiro. **Labor e Engenho**, v. 10, n. 4, p. 357, 31 dez. 2016.

BRANDÃO, J. L. B.; MARCON, P. Análise dos métodos de dimensionamento de reservatórios de águas pluviais sugeridos pela NBR 15527/07 com base na simulação diária. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 6, p. 1031–1041, dez. 2018.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 9 jan 1997.

BRASIL. Lei nº 13.501, de 30 de outubro de 2017. Altera o art. 2º da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, para incluir o aproveitamento de águas pluviais como um de seus objetivos. Brasília, 30 out. 2017.

BURNS, M. J. et al. The performance of rainwater tanks for stormwater retention and water supply at the household scale: an empirical study. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 1, p. 152–160, 1 jan. 2015.

CARVALHO, A. P. V.; BRUMATTI, D. V.; DIAS, H. C. T. Impôrtancia do manejo da bacia hidrográfica e da determinação de processos hidrológicos. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, v. 2, p. 148–156, 2012.

CARVALHO, J. W. L. T. DE. **Configuração urbana e balanço hídrico com aplicação do modelo Aquacycle na Bacia Hidrográfica do Rio Belém - Curitiba/PR**. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016.

CENSI, G.; ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P. **Impactos da Urbanização sobre o Sistema de drenagem de uma bacia urbana em Ibirama, SC**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPCÃO, R. DOS S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. A evolução

histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde em Debate**, v. 43, n. 3, p. 94–108, 2019.

COSTA, A. H. A. **Simulação Dos Impactos Da Urbanização Sobre As Inundações Urbanas Na Bacia Hidrográfica Do Rio Cuiá (PB)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental)—João Pessoa: Universidade Federal do Paraíba, 2013.

DECINA, T. G. T.; BRANDÃO, J. L. B. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 207–217, mar. 2016.

DIOGO, F. J. D'ALMEIDA; SCIAMMARELLA, J. C. **Manual de Pavimentação Urbana**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2008.

DRUMMOND, R. B. G.; REGO, A. Q. DA S. F. URBAN DESIGN IN HISTORIC SITE COMBINED WITH COMPENSATORY TECHNIQUES IN URBAN DRAINAGE, . **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 3, n. 16, p. 190–206, 2015.

ERCIN, A. E.; HOEKSTRA, A. Y. Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. **Environment International**, v. 64, p. 71–82, mar. 2014.

EVANS, J. M. O Ciclo d'água. United States Geological Survey (USGS), 2017. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/o-ciclo-d-gua-water-cycle-portuguese>. Acesso em: 03 fev. 2021.

FAXINA, R. R. DE C. et al. Urbanização e alterações morfométricas e hidrológicas na bacia hidrográfica do Córrego dos Pires, Jaú, São Paulo. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 3, n. 2, p. 57–72, 2012.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. **Consequências da ocupação urbana na dinâmica das nascentes em Belo Horizonte MG**. VI Encontro Nacional Sobre Migrações. **Anais...Belo Horizonte: UFMG**, 2009

FERREIRA, V. D. O.; MENDES, P. G. J. Potencial de aproveitamento de água pluvial em escolas estaduais de Uberlândia-MG. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 50, p. 516, 3 ago. 2017.

FEWKES, A. The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. **Building and Environment**, v. 34, n. 6, p. 765–772, nov. 1999.

FEWKES, A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. **Urban Water**, v. 1, n. 4, p. 323–333, dez. 2000.

FEWKES, A.; BUTLER, D. Simulating the performance of rainwater collection and reuse systems using behavioural models. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 21, n. 2, p. 99–106, 2000.

FISRWG. **Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices**. Edição revisada. USA: FISRWG - Federal Interagency Stream Corridor Restoration Working Group, 2001.

FREITAS, A. DE M.; SOLCI, M. C. Caracterização do MP10 e MP2,5 e distribuição por

tamanho de cloreto, nitrato e sulfato em atmosfera urbana e rural de Londrina. **Química Nova**, v. 32, n. 7, p. 1750–1754, 2009.

FRITZEN, M.; BINDA, A. L. ALTERAÇÕES NO CICLO HIDROLÓGICO EM ÁREAS URBANAS: cidade, hidrologia e impactos no ambiente. **Ateliê Geográfico**, v. 5, n. 3, p. 239–254, 2011.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. **Considerações sobre as inundações no Brasil**. XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2005. Disponível em: <[http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005\\_inundacoes.pdf](http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inundacoes.pdf)>

GONÇALVES, L. M.; BAPTISTA, L. F. DA S.; RIBEIRO, R. A. O Uso De Técnicas Compensatórias De Drenagem Para Controle Dos Impactos Da Urbanização. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, n. 1, p. 92–106, 2016.

GONÇALVES, R. F. **Uso Racional da Água em Edificações**. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

GONÇALVES, R. F. **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

GURGEL, G. M. **Crescimento urbano e seus impactos no sistema de drenagem de uma bacia em Natal, RN**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

HAFIZI MD LANI, N.; YUSOP, Z.; SYAFI UDDIN, A. A Review of Rainwater Harvesting in Malaysia: Prospects and Challenges. **Water**, v. 10, n. 4, p. 506, 19 abr. 2018.

HAIR JÚNIOR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HOLTZ, A. C. T. Precipitação. In: PINTO, N. L. DE S. et al. (Eds.). **Hidrologia Básica**. São Paulo: Blücher, 1976. p. 305.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados: Brasil**. 2020a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>. Acesso em: 16 jun 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados: Minas Gerais**. 2020b. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg.html>. Acesso em: 16 jun 2021.

IMTEAZ, M. A. et al. Climatic and spatial variability of potential rainwater savings for a large coastal city. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 143–147, dez. 2015.

IMTEAZ, M. A.; AHSAN, A.; ABDALLA, E. M. H. Reliability analysis of rainwater tanks using daily water balance model: Variations within a large city. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 77, p. 37–43, 2013.

JABUR, A. S.; BENETTI, H. P.; SILIPRANDI, E. M. **Aproveitamento da água pluvial para fins não potáveis**. VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão. **Anais...** 2011

JENKINS, D. et al. **Feasibility of Rainwater Collection Systems in California**. Oakland: California Water Resources Center, 1978.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p. 187–200, set. 1958.

KIM, Y. et al. Design method for determining rainwater tank retention volumes to control runoff from building rooftops. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 6, p. 1585–1590, 3 set. 2015.

KÖPPEN, W. Das geographischa System der Klimate. Gebr, Borntraeger, p. 1-44, 1936.

LEOPOLD, L. T. **Hydrology for urban planning - A guide book on the Hydrologic effects of urban land use**. Washington: USGS circ. 544, 1968.

LIAN, C.-H.; TSAI, Y.-L. OPTIMUM STORAGE VOLUME OF ROOFTOP RAIN WATER HARVESTING SYSTEMS FOR DOMESTIC USE. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 4, p. 901–912, ago. 2004.

LIMA, J. A. DE et al. Potencial da economia de água potável pelo uso de água pluvial: análise de 40 cidades da Amazônia. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 291–298, set. 2011.

LIMA, J. P. DE. **Hidrologia urbana: conceitos básicos**. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (Universidade de Coimbra), 2010.

LIMA, W. DE P. **Hidrologia Florestal aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas**. 2. ed. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2008.

LOESCH, C.; HIELTGEBAUM, M. **Métodos Estatísticos Multivariados**. São Paulo: Saraiva, 2012.

LOPES, F. B. et al. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. suppl, p. 13–19, 2014.

LUCAS, A. H. et al. Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 17–28, mar. 2015.

MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos Hidrológicos: Conceitos E Aplicabilidades. **Modelos Hidrológicos: Conceitos E Aplicabilidades**, v. 6, n. 2, p. 35–47, 2012.

MARTINSON, D. B.; THOMAS, T. H. **Quantifying the First-Flush Phenomenon: Effects of First-Flush on Water Yield and Quality**. INTERNATIONAL RAINWATER CATCHMENT SYSTEMS CONFERENCE. **Anais...**Kuala Lumpur: 2009

MARTINS, F. B. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornwaite para Minas Gerais: Cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, p. 129–156, 2018.

MAY, S. **Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2004.

MEDEIROS, R. M. de; CAVALCANTI, E. P.; DUARTE, J. F. de M. Classificação Climática de Köppen para o estado do Piauí – Brasil. **Revista Equador**, v. 9, n. 6, p. 82 – 99, 2020.

MELO, T. DOS A. T. DE et al. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 147–165, 2014.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: Noções Básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MITCHELL, V. G. How important is the selection of computational analysis method to the accuracy of rainwater tank behaviour modelling? **Hydrological Processes**, v. 21, n. 21, p. 2850–2861, 15 out. 2007.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. DE A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NAVARRO, E. C. **Influência da urbanização na vazão máxima da microbacia hidrográfica do córrego da cachoeirinha, Lençóis Paulista, SP**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) — Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2013.

NERY, F. H.; MACHADO, M. M. M. Análise multifractal da variabilidade espacial pluviométrica no estado de Minas Gerais. **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 45, p. 233–249, 2018.

OLIVEIRA, L. A.; FALEIROS, F. E.; SANTOS, J. A. S. DOS. Análise do condicionamento da altitude nas variáveis climáticas de temperatura e precipitação na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. **Revista Geonorte**, v. 1, n. 5, p. 325–335, 2012.

PEIXOTO, F. DA S.; RODRIGUES, J. P. B.; ALBUQUERQUE, P. I. DE M. Gestão integrada dos recursos hídricos e a problemática das inundações urbanas. **GEOGRAFIA (Londrina)**, v. 28, n. 1, p. 187, 5 fev. 2019.

PINTO, L. H.; PINHEIRO, S. A. **Orientações Básicas para Drenagem Urbana**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2006.

PINTO, N. L. DE S. Introdução. In: PINTO, N. L. DE S. et al. (Eds.). **Hidrologia Básica**. São Paulo: Blücher, 1976. p. 305.

PORTO, R. et al. Drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ ABRH, 2001. p. 942.

RAIMONDI, A.; BECCIU, G. Probabilistic Modeling of Rainwater Tanks. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 1493–1499, 2014.

RASHIDI MEHRABADI, M. H.; SAGHAFIAN, B.; HAGHIGHI FASHI, F. Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 86–93, abr. 2013.

REIS, R. P. A.; ILHA, M. S. DE O. Influência das condições de instalação do sistema predial de água pluvial nas soluções de drenagem na fonte. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 129–141, 2019.

REZENDE DE SOUZA, G. et al. Regional flood frequency analysis and uncertainties: Maximum streamflow estimates in ungauged basins in the region of Lavras, MG, Brazil. **Catena**, v. 197, n. 2020, p. 1–10, 2021.

REZENDE, J. H.; TECEDOR, N. Aproveitamento de água de chuva de cobertura em edificações: dimensionamento do reservatório pelos métodos descritos na NBR 15527. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 12, n. 6, p. 1040, 2017.

RIGHETTO, A. M. **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

RIGHETTO, A. M.; GOMES, K. M.; FREITAS, F. R. S. Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 1109–1120, 2017.

RODRIGUES, L. V. et al. Viabilidade do aproveitamento domiciliar de águas pluviais em municípios de regimes pluviométricos distintos. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 17, p. 1575–1592, 2020.

RUPP, R. F.; MUNARIM, U.; GHISI, E. Comparação de métodos para dimensionamento de reservatórios de água pluvial. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 47–64, dez. 2011.

SAMPAIO, F. E. DE O. V. **ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO E PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL EM CENTROS URBANOS**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) — Brasília/DF: Universidade de Brasília, 2013.

SAMPAIO, F. E. DE O. V.; ALVES, C. DE M. A. A procedure to analyze the viability of rainwater harvesting systems in urban areas based on pre-defined diagrams. **RBRH**, v. 22, 9 nov. 2017.

SANTOS, B. F. **Urbanização e clima urbano do bairro Atalaia na cidade de Aracaju/SE**. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal de Sergipe, 2016.

SANTOS, B. C. DOS et al. Análise do efeito orográfico por meio da interpolação de índices climáticos. **Revista de Geografia - PPGEIO - UFJF**, v. 8, n. 2, p. 114–132, 2018.

SANTOS JÚNIOR, V. J. DOS; SANTOS, C. O. A evolução da urbanização e os processos de produção de inundações urbanas. **Estação Científica (UNIFAP)**, v. 3, n. 1, p. 19–30, 2013.

SANTOS, M. F. N. et al. **Descentralizando o manejo das águas pluviais: Como promover a participação da comunidade?** Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável. **Anais...**Maceió: 2016

SCHUELER, T. **Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs**. Washington, D.C.: Washington Metropolitan Water Resources Planning Board, 1987.

SHIGUANG, C.; YU, Z. Water saving potential and economic viability assessment of rainwater harvesting system for four different climatic regions in China. **Water Supply**, v. 21, n. 1, p. 386–400, 1 fev. 2021.

- SILVA, C. R. DA et al. Análise técnica e econômica da captação e uso de águas pluviais em uma edificação com diferentes tipos de coberturas. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 6, n. 14, p. 911–930, 2019.
- SILVA, J. M. A. DA. **Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas: desenvolvimento e aplicação**. Tese (Doctor Scientiae)—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- SILVA, V. P. R. DA et al. Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 131–138, 2011.
- SILVA JUNIOR, M. A. B. DA; SILVA, S. R. DA. Impactos da urbanização e das alterações climáticas no sistema de drenagem do Recife/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 06, p. 2034–2053, 2016.
- SILVA, K. C. **Análise socioambiental e econômica de inundações: vulnerabilidade humana e natural**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental)—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2015.
- SILVA, P. V. S. R. et al. A DRENAGEM URBANA DE ÁGUAS PLUVIAIS NO MUNICÍPIO DE SANTO ESTEVÃO – BA/URBAN RAINWATER DRAINAGE IN THE MUNICIPALITY OF SANTO ESTEVÃO - BA. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 102934–102946, 2020.
- SILVEIRA, A. DA; ANDRADE, E. G.; ARAÚJO, T. F. DIMENSIONAMENTO DE UM RESERVATÓRIO PARA APROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA EM UM GINÁSIO POLIESPORTIVO NA CIDADE DE NATAL-RN. **Carpe Diem**, v. 16, n. 2, p. 131–150, 2018.
- SILVEIRA, A. L. L. DA. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ ABRH, 2001. p. 943.
- SINGH, K. P. et al. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)—a case study. **Water Research**, v. 38, n. 18, p. 3980–3992, nov. 2004.
- SOUSA, A. B. DE; ANDRADE NETO, C. O. DE; MAIA, A. G. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE CISTERNAS COM BASE NA AVALIAÇÃO DE VOLUMES CALCULADOS PARA ZONAS PLUVIAIS HOMOGÊNEAS DISTINTAS. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 5, n. 2, p. 147, 25 set. 2017.
- SOUSA, R. E. DOS S.; GONÇALVES, G. F. G. UM ESTUDO SOBRE OS IMPACTOS DECORRENTES DE INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 591, 3 out. 2018.
- SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 9–18, 2012.
- SOUZA, V. C. B. DE; MORAES, L. R. S.; BORJA, P. C. Déficit na Drenagem Urbana:

buscando o entendimento e contribuindo para a definição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 2, p. 162–175, 2013.

SOUZA, J. F. et al. Aproveitamento de água de chuva para usos não potáveis na Universidade Severino Sombra. **Revista Eletrônica TECCEN**, v. 9, n. 1, p. 35, 3 out. 2016.

STEINKE, E. T. **Climatologia fácil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

TAVARES, L. C. et al. Socioeconomic potential for rainwater harvesting systems in southern Brazilian municipalities. **Water Supply**, 1 set. 2021.

TESTON, A. et al. Rainwater harvesting in buildings in Brazil: A literature review. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 4, 2018.

TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. Dissertação (Mestrado)—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). . **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ ABRH, 2001a. p. 943.

TUCCI, C. E. M. Controle de Enchentes. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). . **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ ABRH, 2001b. p. 943.

TUCCI, C. E. M. Escoamento Superficial. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). . **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ ABRH, 2001c. p. 943.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas - Saneamento para Todos**. Brasília: Ministério das Cidades – Global Water Partnership - World Bank – Unesco, 2005. v. 4º

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007.

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. **Estudos Avancados**, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.

TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. **Drenagem urbana e Controle de Erosão**. VI Simpósio nacional de controle da erosão. **Anais...**1998

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: Versão Digital, 2006.

VERIATO, M. K. L. et al. Água: Escassez, crise e perspectivas para 2050. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 5, p. 17–22, 2015.

VICINI, L. et al. **Técnicas multivariadas exploratórias: teorias e aplicações no Software Statistica**. Santa Maria, RS: ED. UFSM, 2018.

VIEIRA, S. **Estatística básica**. 2. ed. São Paulo: Cengage, 2018.

VIOLA, H. **Gestão de águas pluviais em áreas urbanas - o estudo de caso da cidade do samba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio

de Janeiro, 2008.

WARD, J. H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236–244, mar. 1963.

WOLKMER, M. D. F.; PIMMEL, N. F. Política Nacional de Recursos Hídricos: governança da água e cidadania ambiental. **Sequência: Estudos Jurídicos e Políticos**, v. 34, n. 67, p. 165–198, 2013.

WWAP. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2020: Água e Mudança Climática, Resumo Executivo**. [s.l.] UNESCO World Water Assessment Programme, 2020.

ZAMRI, S. A. M.; RAHMAT, S. N. NoSelf-Reliant Rainwater Harvesting System Guidelines (RWHS) for Non-Potable Water Usages. **Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment**, v. 1, n. 2, p. 665–672, 2021.

ZANANDREA, F. **Avaliação de Técnicas de Baixo Impacto no controle de Impactos hidrológicos em uma bacia urbana em consolidação**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

ZHANG, S. et al. Water saving efficiency and reliability of rainwater harvesting systems in the context of climate change. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 1341–1355, set. 2018.