



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL


MATHEUS VIDAL DO PRADO

DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA POR MEIO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 85, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): 
Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental/ Universidade Federal do Paraná

Membro(a) 1: 
Maurício Felga Gobbi
Departamento de Engenharia Ambiental/ Universidade Federal do Paraná

Membro(a) 2: 
Daniel Henrique Marco Detzel
Departamento de Hidráulica e Saneamento/ Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 12 de dezembro de 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS VIDAL DO PRADO

DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA
CHUVA POR MEIO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO

CURITIBA

2016

MATHEUS VIDAL DO PRADO

DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA
CHUVA POR MEIO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO

Trabalho apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental no curso de graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Michael Mannich

CURITIBA

2016

AGRADECIMENTOS

À Deus, que entre tantos me deu a oportunidade de chegar até aqui e caminhar pela estrada do conhecimento.

À minha família, em especial à minha mãe, que sempre me incentivou a correr atrás dos meus sonhos e lutar pelo que acredito. Obrigado pela paciência e por me conduzir pelo melhor caminho.

À Universidade Federal do Paraná, por me proporcionar os melhores anos da minha vida e me ofertar uma formação de qualidade. Mesmo com todas as dificuldades tenho muito orgulho de fazer parte desta instituição.

Ao Professor Dr. Michael Mannich, por me orientar e me guiar no andamento deste trabalho. Agradeço pela parceria, pelos incentivos e também pelas conversas.

Aos Professores Cynara Cunha e Ricardo Almeida, por terem participado do meu desenvolvimento acadêmico durante o período em que fui seu orientado.

Aos amigos, pelo apoio e por entender quando precisei focar nos estudos. Em especial agradeço ao Ramon Kowalski pelas ajudas com Python.

Ao Professor Dr Sidey Zanetti, da Universidade Federal de Viçosa, pela ajuda com a utilização do software CLIMA BR.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CICLO HIDROLÓGICO	13
FIGURA 2 - SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA.....	21
FIGURA 3 - ESTRUTURA DE UM MODELO NÃO PARAMÉTRICO.....	33
FIGURA 4 - ESTRUTURA DE MODELO PARAMÉTRICO	35
FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DOS DIAS CHUVOSOS DA SÉRIE HISTÓRICA.....	49
FIGURA 6 - DIAGRAMA DAS DISTRIBUIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DURANTE OS MESES DO ANO NA SÉRIE HISTÓRICA	50
FIGURA 7 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA PARA CADA ANO DA SÉRIE HISTÓRICA.....	51
FIGURA 8 - VOLUMES DO RESERVATÓRIO PARA DIVERSOS CENÁRIOS (EM ESCALA LOGARÍTMICA) NA SÉRIE HISTÓRICA.....	53
FIGURA 9 - COMPARAÇÃO ENTRE TRÊS DEMANDAS DIFERENTES E A RELAÇÃO ENTRE OS VOLUMES E COEFICIENTES DE RUNNOFF	56
FIGURA 10 - PROBABILIDADE DE FALHA EM RELAÇÃO AO DÉFICIT ACUMULADO PARA UMA DEMANDA DE 100 L.....	58
FIGURA 11 - PROBABILIDADE DE FALHA EM FUNÇÃO DA DEMANDA E VOLUME DO RESERVATÓRIO RELATIVOS A ÁREA DE CAPTAÇÃO PARA A SÉRIE HISTÓRICA.....	59
FIGURA 12 - PROBABILIDADE DE FALHA EM FUNÇÃO DA DEMANDA E VOLUME DO RESERVATÓRIO RELATIVOS A ÁREA DE CAPTAÇÃO EM ESCALA AMPLIADA PARA A SÉRIE HISTÓRICA.....	60
FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DOS DIAS CHUVOSOS DA SÉRIE SINTÉTICA.....	64
FIGURA 14 – DIAGRAMA DAS DISTRIBUIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DURANTE OS MESES DO ANO NA SÉRIE SINTÉTICA.....	64
FIGURA 15 - VOLUMES DO RESERVATÓRIO PARA DIVERSOS CENÁRIOS (EM ESCALA LOGARÍTMICA) NA SÉRIE SINTÉTICA	66
FIGURA 16 - PROBABILIDADE DO SISTEMA FALHAR EM RELAÇÃO AO VOLUME DO RESERVATÓRIO COMPARANDO AS SÉRIES HISTÓRICA E SINTÉTICA.....	67

FIGURA 17 - PROBABILIDADE DE FALHA EM FUNÇÃO DA DEMANDA E VOLUME DO RESERVATÓRIO RELATIVOS A ÁREA DE CAPTAÇÃO PARA A SÉRIE SINTÉTICA	68
FIGURA 18 - PROBABILIDADE DE FALHA EM FUNÇÃO DA DEMANDA E VOLUME DO RESERVATÓRIO RELATIVOS A ÁREA DE CAPTAÇÃO EM ESCALA AMPLIADA PARA A SÉRIE SINTÉTICA.....	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COEFICIENTE DE <i>RUNOFF</i> DAS ÁREAS DE COLETA DAS ÁGUAS PLUVIAIS.....	18
TABELA 2 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA PARA USOS RESTRITIVOS NÃO POTÁVEIS.....	20
TABELA 3 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE CURITIBA	42
TABELA 4 - ESQUEMA DO DIAGRAMA DE RIPPL.....	42
TABELA 5 - VALORES OBTIDOS DA SÉRIE HISTÓRICA	52
TABELA 6 - ÁREA E DEMANDAS OBTIDAS DA SÉRIE HISTÓRICA	52
TABELA 7- VOLUME MÁXIMO DO RESERVATÓRIO PARA CADA CENÁRIO	54
TABELA 8- RISCO HIDROLÓGICO ASSOCIADO ÀS PROBABILIDADES DE FALHA NO SISTEMA DE CAPTAÇÃO.....	61
TABELA 9 - PROBABILIDADE MENSAL DE OCORRÊNCIA DE CHUVAS BASEADO NA OCORRÊNCIA OU NÃO DE CHUVA NO DIA ANTERIOR	62
TABELA 10 - COMPARAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA COM A SÉRIE SINTÉTICA.....	63
TABELA 11 - ÁREAS E DEMANDAS OBTIDAS DA SÉRIE SINTÉTICA.....	65
TABELA 12 – VOLUMES OBTIDOS POR OUTROS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO.....	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVO GERAL.....	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	12
3.1.1	Ciclo Hidrológico.....	12
3.1.2	Precipitação.....	13
3.2	USO DA ÁGUA.....	14
3.3	PROBLEMA DA ESCASSEZ DE ÁGUA.....	14
3.4	CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA.....	15
3.4.1	Conceitos fundamentais e componentes de um sistema de captação	15
3.4.2	Coeficiente de <i>runoff</i>	17
3.4.3	Legislação aplicável.....	18
3.4.4	Qualidade das águas pluviais.....	19
3.4.5	Aplicações	20
3.4.6	Vantagens e desvantagens	21
3.4.7	Dimensionamento do reservatório	22
3.4.7.1	Método de Rippl	23
3.4.7.2	Método da simulação	24
3.4.7.3	Método Azevedo Neto (Prático Brasileiro).....	25
3.4.7.4	Método Prático Alemão	26
3.4.7.5	Método Prático Inglês	26
3.4.7.6	Método Prático Australiano.....	26
3.4.7.7	Método de Fendrich.....	27
3.4.8	Dimensionamento das tubulações e bombas	28
3.5	GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO.....	28
3.5.1	Método de Monte Carlo na Hidrologia	29
3.5.2	Geradores de séries sintéticas	30
3.5.3	Modelos em escala diária	31

3.5.3.1 Modelos semi-paramétricos.....	31
3.5.3.2 Modelos não paramétricos	32
3.5.3.3 Modelos paramétricos	34
3.5.4 Cálculo das alturas precipitadas.....	37
3.5.4.1 Gama de dois parâmetros	37
3.5.4.2 Distribuição exponencial.....	38
3.5.4.3 Estimação dos parâmetros	39
4 MÉTODO.....	41
4.1 DETERMINAÇÃO DO ANO HIDROLÓGICO	41
4.2 SÉRIE HISTÓRICA DE PRECIPITAÇÕES.....	41
4.3 DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO	42
4.3.1 Elaboração do método dos máximos déficits acumulados	43
4.3.2 Coeficiente de <i>runoff</i>	44
4.3.3 Estudo da série histórica.....	44
4.3.4 Probabilidades e risco.....	45
4.4 GERAÇÃO DAS SÉRIES SINTÉTICAS	45
4.4.1 Validação das séries sintéticas.....	48
5 RESULTADOS.....	49
5.1 ANÁLISE DA SÉRIE HISTÓRICA.....	49
5.2 RELAÇÃO ÁREA x DEMANDA	51
5.3 VOLUME DO RESERVATÓRIO PARA CADA CENÁRIO	52
5.4 PROBABILIDADE E RISCO	57
5.4.1 Probabilidade de ocorrência de chuva.....	61
5.5 GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO.....	62
5.5.1 Análise da Série Sintética	63
5.5.2 Relação Área x Demanda x Volume	65
5.5.3 Probabilidade e Risco	66
5.6 AVALIAÇÃO DE OUTROS MÉTODOS	70
5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6 CONCLUSÃO.....	72
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem se falado muito sobre a crise hídrica no Brasil. Principalmente a partir de 2014, noticiários nacionais e internacionais apresentam questões referentes à escassez de água nos reservatórios, à poluição dos mananciais e à falta de chuva em muitas cidades brasileiras. Aliado a tudo isto, a demanda populacional cresce, visto que o consumo de água é realizado de forma irracional e muitas vezes sem o conhecimento sobre o resultado que isso pode gerar (FIOCRUZ, 2015).

O aumento das temperaturas, a irregularidade nas estações do ano e a escassez de chuvas influenciam de forma drástica a crise, que não afeta apenas as grandes cidades, como tem se visto. Isso tem efeito direto na seca dos rios e no aumento do consumo de água, potável ou não (MARENGO, 2008).

Além disso, muitos outros fatores influenciam para que a crise tenha chegado à situação atual. O desmatamento das florestas ocasiona a redução da quantidade de água que penetra nos lençóis freáticos. A diminuição das áreas de mata ciliar pela atual legislação ambiental causa problemas na produção de água para abastecimento (MARENGO, 2008). A falta de investimento em infraestruturas e projetos de saneamento, o descaso com os sistemas que apresentam problemas e a inexistência de programas de racionamento são questões governamentais que exercem grande peso na condição hídrica em que o país se encontra hoje.

Baseando-se nisso, muitas alternativas surgem para amenizar a crise e os custos que ela gera. Soluções em grande e pequena escala têm se mostrado eficientes, mesmo que os resultados só possam ser percebidos em longo prazo. Investimentos na gestão de recursos hídricos e saneamento, mesmo que tardios, colaboram para a diminuição dos gastos indevidos no sistema hídrico; além da utilização de campanhas de conscientização sobre o uso da água e da energia, que também é uma forma de amenizar o problema.

Seguindo a mesma linha, há diversas opções para economizar e reutilizar água em domicílios. Medidas simples incluem colocar baldes no banho e jogar nas descargas no vaso sanitário, usar da água da máquina de lavar roupas na limpeza de calçadas, entre outras medidas. E entre todas as

escolhas, uma das mais custosas talvez seja captar água da chuva (TOMAZ, 2009).

Possuir um sistema de captação de águas pluviais em casa é uma ótima forma de economizar água e enfrentar a crise. Não é barato, pois necessita de caixas d'água para armazenamento, calhas, filtros, e dependendo do formato, até mesmo bombas de recalque. Contudo, se o dimensionamento for realizado corretamente, o sistema será muito eficiente e o retorno financeiro e ambiental não será tardio (TOMAZ, 2009).

É necessário se utilizar da legislação vigente que estabelece princípios para a construção e manutenção destes sistemas. Algumas normas impõem procedimentos e referências sobre a qualidade da água que é captada; outras sobre onde pode ser utilizada; e as principais tratam sobre a concepção e as formas de dimensionamento (TOMAZ, 2009).

Logo, para a estruturação de um sistema de captação, vários fatores devem ser considerados. Visto que o sistema depende diretamente da quantidade de chuva, deve-se criar alguma forma de dimensionar o reservatório de captação levando em conta períodos extraordinários de escassez e excesso de precipitação.

Para calcular o tamanho do reservatório de captação, utilizam-se séries de precipitação de estações meteorológicas (MIRANDA e FILL, 2009). Com isso, uma ótima forma de realizar a estruturação do sistema de forma eficiente, levando em conta períodos esporádicos de muita ou pouca chuva, é a geração de séries sintéticas de precipitação.

Esta geração de séries sintéticas lida com séries históricas e ajusta os dados usando modelos estatísticos. Existem diversos modelos e deve-se utilizar aquele que mais se adequa às necessidades do projeto. A adoção de critérios probabilísticos e amostrais e a maneira como as equações são gerenciadas pode criar cenários distintos do histórico para as precipitações (DETZEL, 2009).

Portanto, o presente estudo visa dimensionar um reservatório de captação de águas pluviais para determinados cenários de precipitação e de consumo. Para tornar mais eficiente o dimensionamento, serão utilizadas séries sintéticas de precipitação geradas a partir de dados históricos de

Curitiba. Por fim, serão apresentados resultados que permitirão a análise de viabilidade para elaborar um sistema de captação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Para determinados cenários de precipitação e consumo, dimensionar um reservatório de captação de água da chuva para uma residência em Curitiba, utilizando de séries sintéticas de precipitação geradas a partir de dados históricos da estação pluviométrica da cidade.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Com diversos valores de demanda e área de captação do telhado, dimensionar o volume de um reservatório de captação de água da chuva para cada cenário;
- Relacionar, através de gráficos, os volumes dos reservatórios com as demandas e as áreas de captação;
- Através de métodos estatísticos, gerar séries sintéticas de precipitação a partir de dados históricos;
- Comparar os resultados de dimensionamento obtidos apenas dos dados históricos com os dados da série sintética, a partir de tabelas ou gráficos;
- Após realizar o dimensionamento, fazer uma análise das vantagens em ter um sistema como este através de informações quantitativas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

3.1.1 Ciclo Hidrológico

Na Terra existe uma camada chamada de *hidrosfera*, que se estende de 15 km acima na atmosfera até cerca de 1 km abaixo do solo. A água circula por essa região através de caminhos que caracterizam o ciclo hidrológico (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1994).

O ciclo hidrológico é o foco central da hidrologia, e não há como estabelecer onde se inicia e termina, pois os processos acontecem de forma contínua (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1994). Representa o movimento da água presente nos oceanos, rios, lagos, atmosfera e continente (superfície, solo e rochas). Esse movimento é alimentado pela força da gravidade e pela energia do Sol, que provocam a evaporação da água. (MMA, 2015).

Chow, Maidment e Mays (1994) citam que o ciclo hidrológico consiste basicamente no caminho que a água percorre nos mais diversos estados. A água dos rios e lagos evapora, e na atmosfera há a formação de nuvens. Por consequência ocorre a precipitação nas mais diversas formas, como chuva, neve, e orvalho. Ao atingir a superfície da Terra a água infiltra no solo e escoar para os corpos d'água. Além disso, é relevante citar que no processo de degelo nas geleiras também há formação de água na forma líquida que escoar para outros locais.

A Figura 1 ilustra basicamente como é o ciclo. É claramente visível as diversas trocas realizadas entre os meios, e é possível notar que após a ocorrência da precipitação, em alguns locais a água fica armazenada. Esta retenção se dá tanto em corpos d'água, por escoamentos e pelas próprias precipitações, quanto no solo, aonde a água chega através de processos de infiltração.

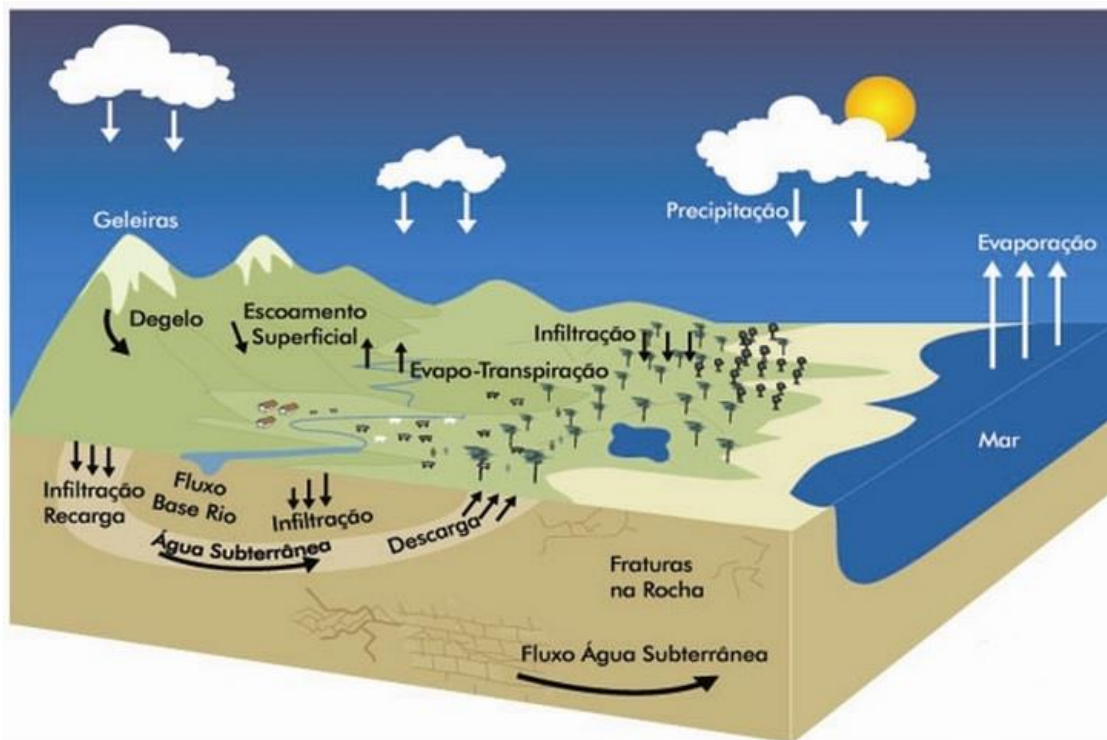


FIGURA 1 - CICLO HIDROLÓGICO
 FONTE: MMA (2015)

Tomaz (2003) comenta que a evaporação ocorre em todas as etapas do ciclo, e que este processo associado à transpiração da vegetação é chamado de evapotranspiração. Paz (2004) aponta que cerca de 383.000 km³ de água evaporam por ano dos oceanos, e desse total evaporado, estima-se que 75% retornem diretamente aos oceanos sob a forma de precipitação, enquanto os 25% restantes precipitam sobre os continentes.

Com as interferências antrópicas no meio urbano, através dos usos múltiplos da água, constitui-se um subsistema denominado ciclo urbano da água. Este processo consiste em aproveitar a água para atender a algumas demandas públicas. Dentro deste ciclo ocorre a captação das águas pluviais urbanas, que são recolhidas pelo sistema de drenagem urbana e conduzidas para o escoamento em corpos d'água receptores (GIACCHINI, 2010).

3.1.2 Precipitação

Zanetti (2003) apresenta o conceito de precipitação como toda água na forma líquida ou sólida, oriunda da atmosfera, que cai na superfície terrestre. Os principais tipos de precipitação são a chuva, a garoa, a neve e o granizo.

Para os estudos hidrológicos realizados no Brasil a chuva é o tipo de precipitação que tem a maior importância.

O conhecimento das precipitações que ocorrem em uma região, assim como sua distribuição (espacial e temporal), sua intensidade e duração, são elementos de caráter técnico decisivos para o sucesso ou o fracasso de empreendimentos agrícolas e de obras hidráulicas, tais como vertedores de barragens, sistemas de irrigação, sistemas de drenagem de estradas, entre outros (ZANETTI, 2003).

3.2 USO DA ÁGUA

Os setores que utilizam água são diversos, e dependendo do uso há a necessidade de utilizá-la como fonte de consumo (uso consuntivo), retornando somente parte da água aos corpos d'água. Outros usos são considerados não consuntivos, como por exemplo, a navegação, pois não alteram a quantidade deste recurso na natureza (PAZ, 2004).

Paz (2004) ainda lista os usos da água explicitando algumas características. Dentre os usos apontados, alguns merecem atenção especial, pois podem utilizar água da chuva em substituição à água da rede. Para as regiões urbanas os usos são basicamente domésticos e comerciais, sendo que as águas pluviais podem ser utilizadas em bacias sanitárias, calçadas e jardins como alternativa para diminuir gastos.

No abastecimento industrial as águas pluviais seriam de grande valia nos sanitários e em processos que necessitam de água não potável, como por exemplo, refrigeração. Na agricultura, a água da chuva pode ser empregada para irrigar algumas culturas e até mesmo para dessedentação de animais.

3.3 PROBLEMA DA ESCASSEZ DE ÁGUA

Antes de se realizar estudos nesta área, predominava-se a ideia de abundância da água na natureza, o que não gerava preocupação quanto à quantidade de água consumida ou desperdiçada. Entretanto, após

comprovações científicas, tem-se tentado tornar cada vez mais consensual a noção de escassez de água, em virtude da crescente demanda por esse recurso (PAZ, 2004).

Paz (2004) aponta dois tipos de escassez; a quantitativa e a qualitativa. A quantitativa se refere à falta de água em quantidade suficiente para seus usos pretendidos. A qualitativa decorre da falta de qualidade da água para atender aos usos pretendidos, e é gerada principalmente pelo lançamento de esgoto não tratado de várias origens em cursos d'água.

Pode-se, então, citar a Lei Federal nº 9433/97 (Lei das Águas), que considera a água um recurso escasso e, por isso, esta possui valor econômico. Devido a esse fato, além da gestão da oferta de água, tem-se ressaltado a necessidade do controle da demanda pela água. Diversos instrumentos estão previstos nesta lei para proporcionar um uso consciente desse recurso, entre eles a outorga e a cobrança pela água.

3.4 CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA

3.4.1 Conceitos fundamentais e componentes de um sistema de captação

Em primeiro lugar, é importante apontar que a água da chuva é a água coletada durante eventos de precipitação pluviométrica em telhados inclinados ou lajes onde não haja passagem de veículos ou de pessoas. As águas de chuva que caem nos pisos residenciais, comerciais ou industriais não estão incluídas num sistema de captação (TOMAZ, 2009).

De acordo com Tomaz (2009) as águas pluviais são consideradas não potáveis. Entende-se por não potável aquela que não atende à Portaria nº. 2914/2011 do Ministério da Saúde. Segundo a NBR 15527/2007 esta água pode ser utilizada em descargas de bacias sanitárias, irrigação de gramados e plantas ornamentais, lavagem de veículos, limpeza de calçadas e ruas, limpeza de pátios, espelhos d'água e usos industriais (ver item 3.4.3).

Analisando as características da água, é relevante entender quais são os componentes de um sistema de captação de águas pluviais. Ao cair, a água da chuva atinge a chamada superfície de captação. Podem ser utilizados

telhados, pátios e outras áreas impermeáveis. O tamanho desta está diretamente relacionado ao potencial de água de chuva possível de ser aproveitada, pois depende da quantidade precipitada e da área de captação. Enquanto isso, o material da qual é formada influenciará na qualidade da água captada e nas perdas por evaporação, absorção e principalmente por *runoff*. Os telhados são mais utilizados para captação devido à melhor qualidade da água que este fornece (COHIM, GARCIA e KIPERSTOK, 2008).

Componentes importantes do sistema, as calhas e tubulações são utilizadas para transportar a chuva coletada. Podem ser encontradas em diversos materiais, porém os mais utilizados são em PVC (policloreto de vinila) e metálicos (alumínio e aço galvanizado). Toda a tubulação que fizer parte desse sistema deve estar destacada com cor diferente e avisos de que esta conduz água de chuva; isto para evitar conexões cruzadas com a rede de água potável (COHIM, GARCIA e KIPERSTOK, 2008).

Um conceito essencial que deve ser citado é o *By Pass* ou *First Flush*, que é simplesmente determinado volume da primeira chuva, que contém muita sujeira dos telhados. Esta água pode ser desviada do reservatório através de dispositivos automáticos de autolimpeza (TOMAZ, 2003). Segundo Miranda e Fill (2009), este descarte é cerca de 1 mm de precipitação.

O principal item de um sistema de captação de águas pluviais é o reservatório, que é o local onde é armazenada a água para ser utilizada. Se esta for clorada, deverá ter tempo mínimo de contato de cerca de 15 min dentro do reservatório (TOMAZ, 2009). Este pode ser enterrado, apoiado ou elevado. Diversos materiais podem ser utilizados na fabricação dos reservatórios, sendo, portanto, necessário analisar em cada caso aspectos como capacidade, estrutura necessária, viabilidade técnica, custo e disponibilidade de chuvas no local (COHIM, GARCIA e KIPERSTOK, 2008).

Quando o reservatório está situado abaixo do ponto de distribuição devem ser instaladas bombas, que são dispositivos que utilizarão energia elétrica para elevar o nível d'água. Porém, vale ressaltar que durante a concepção do sistema de aproveitamento de água pluvial, deve-se buscar o uso de reservatórios elevados e o encaminhamento da água coletada diretamente para este; evitando, assim, o bombeamento, e aumentando a eficiência energética do sistema (COHIM, GARCIA e KIPERSTOK, 2008).

Para dimensionar um reservatório de captação também é de extrema importância saber a demanda cujo sistema terá que suprir. A demanda, ou consumo de água, é calculada com base na quantidade anual, mensal ou diária, a ser utilizada para fins não potáveis num determinado tempo (TOMAZ, 2009).

3.4.2 Coeficiente de *runoff*

Um fator importante no dimensionamento de reservatórios de captação de águas pluviais é o coeficiente de *runoff*. Por definição, é a razão entre o volume total de escoamento superficial e o volume total precipitado em determinado evento (TOMAZ, 2012).

De acordo com Tomaz (2012), o valor do coeficiente depende de alguns fatores, como superfície de captação, intensidade e duração da chuva, entre outros. Alguns pesquisadores determinaram valores do coeficiente baseados nas condições de determinadas localidades. No estudo realizado por Mierzwa (2007), o autor avaliou o potencial do aproveitamento das águas pluviais para utilização no processo em uma indústria no ABCD paulista, e o valor adotado para o coeficiente de *runoff* foi de 0,7.

Já Andersen, Carissimi e Sanagiotto (2011), que realizaram seu trabalho no Aeroporto Salgado Filho em Porto Alegre (RS), adotaram 0,8 como valor para o coeficiente. Para utilizar este valor foram levadas em conta as perdas por evaporação e as perdas do anteriormente mencionado *first flush*. Este valor foi aplicado no cálculo final do volume de armazenamento. Os autores ainda ressaltam que para o caso do cálculo da vazão de projeto adota-se o coeficiente igual a 1, significando que toda a água que precipita sobre a cobertura vai para o sistema de coleta de águas pluviais.

Outro trabalho que utiliza o valor do coeficiente igual a 0,8 é o de Vieira e Mendonça (2011), que aponta que este é o valor mais utilizado para realizar captação de águas pluviais. Na mesma linha de pesquisa, Fendrich (2002) afirma que, para o dimensionamento dos reservatórios de armazenamento e utilização das águas pluviais, o volume máximo médio anual das águas que poderá ser aproveitado não será o mesmo que o volume precipitado total. A

partir disso, tem-se a Tabela 1, onde são apresentados os coeficientes de *runoff* das áreas de coleta das águas pluviais comumente utilizados.

TABELA 1 – COEFICIENTE DE *RUNOFF* DAS ÁREAS DE COLETA DAS ÁGUAS PLUVIAIS

Áreas de coleta das águas pluviais	Coeficiente de <i>runoff</i> C
Telhas cerâmicas	0,8 a 0,9
Telhas, lajotas e ladrilhos vitrificados	0,9 a 0,95
Telhas de cimento – amianto	0,7 a 0,85
Telhas metálicas corrugadas	0,8 a 0,95
Lajotas e blocos de concreto	0,7 a 0,8
Lajotas e blocos de granito	0,9 a 0,95
Pavimentos de concreto	0,8 a 0,95
Pavimentos asfálticos	0,7 a 0,9

FONTE: FENDRICH (2002)

3.4.3 Legislação aplicável

Por se tratar de um projeto com características e aplicações próprias, é necessária uma legislação específica para regulamentar a construção e a manutenção deste. Portanto, municípios, estados e Federação estabeleceram diversas normas e leis responsáveis por essa regulamentação, algumas das quais são citadas a seguir:

ABNT NBR 15527/2007: *Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis*. É a principal norma utilizada neste trabalho, pois fornece condições para o aproveitamento de água da chuva. A Norma se aplica a usos não potáveis, em que as águas pluviais podem ser utilizadas após tratamento adequado, como, por exemplo descargas em bacias sanitárias, irrigação de gramados e plantas ornamentais, lavagem de veículos, limpeza de calçadas e ruas, limpeza de pátios, espelhos d'água e usos industriais. Para a aplicação desta norma, os documentos a seguir são indispensáveis:

ABNT NBR 5628/1998: *Instalação predial de água fria*

ABNT NBR 10844/1989: *Instalações prediais de águas pluviais*

ABNT NBR 12213/1992: *Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público*

ABNT NBR 12214/1992: *Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público*

ABNT NBR 12217/1994: *Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público*

As cinco ABNT NBRs, indispensáveis à aplicação da NBR 15527/2007, não foram utilizadas no presente estudo, visto que, num primeiro momento, não se pretende aplicá-la, mas sim utilizar seus conceitos como referência.

Na escala federal, pode-se citar a Lei nº 9433/97, que instituiu no país a Política Nacional de Recursos Hídricos, e define que a água constitui um recurso natural limitado, dotado de valor econômico (FENDRICH e OLYINIK, 2002). Por isso é importante que haja uma conscientização quanto ao seu uso.

Na mesma linha, a Portaria 518, de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Deve-se ressaltar que essa portaria foi revogada pela Portaria 2914/2011, também do Ministério da Saúde.

Também há algumas normativas em Curitiba que devem ser citadas. A Lei nº 10785, de 18 de setembro de 2003, cria o Programa de Conservação e Uso Racional da Água nas Edificações (PURA), e institui medidas que induzam o uso racional, a conservação e a utilização de fontes alternativas para captação de água nas edificações.

Há ainda o Decreto Municipal nº 791, que dispõe sobre os critérios para implantação de mecanismos de contenção de cheias. O Decreto define reservatórios de retenção e acumulação como mecanismos para conter cheias. Os de retenção são dispositivos que retêm e acumulam parte das águas pluviais, e prevê que os reservatórios de acumulação podem ser impermeáveis. Além disso, o Decreto apresenta quais as características que estes reservatórios devem atender.

3.4.4 Qualidade das águas pluviais

A qualidade das águas pluviais varia em relação ao grau de poluição do ambiente, e geralmente os poluentes se incorporam à água da chuva durante a precipitação atmosférica. Os principais fatores que determinam a qualidade das águas pluviais são a localização geográfica, a proximidade do oceano, a

proximidade de áreas com vegetação, áreas mineradas e indústrias e também as condições meteorológicas e as estações do ano (GIACCHINI, 2010).

Conforme Giacchini (2010), os requisitos de qualidade e segurança sanitária das águas pluviais dependem do fim para os quais se destinam; e a superfície de coleta pode influenciar, seja pelo material de que é feita, seja pelas substâncias presentes em tais superfícies, que ocasionam a contaminação tanto por compostos químicos como por agentes patogênicos.

O tipo e a necessidade de tratamento das águas pluviais dependerão da qualidade da água coletada e do seu destino final. As concentrações de poluentes, galhos e outras impurezas nas águas pluviais são maiores nos primeiros milímetros da chuva, assim recomenda-se seu descarte (COHIM, GARCIA e KIPERSTOK, 2008).

A NBR 15527/2007 (ver item 3.4.3) apresenta a seguinte Tabela 2, referente à qualidade da água da chuva:

TABELA 2 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA PARA USOS RESTRITIVOS NÃO POTÁVEIS

Parâmetro	Análise	Valor
Coliformes totais	Semestral	Ausência em 100 mL
Coliformes termotolerantes	Semestral	Ausência em 100 mL
Cloro residual livre	Mensal	0,5 a 3,0 mg/L
Turbidez	Mensal	< 2,0 uT, para usos menos restritivos < 5,0 uT
Cor aparente (caso não seja utilizado nenhum corante, ou antes de sua utilização)	Mensal	< 15,0 Uh
Deve prever ajuste de pH para proteção das redes de distribuição, caso necessário	Mensal	pH de 6,0 a 8,0 no caso de tubulação de aço carbono ou galvanizado

FONTE: NBR 15527/2007

Conforme a Norma, os critérios de qualidade são definidos pelo projetista de acordo com a utilização prevista, e se houver necessidade de desinfecção, pode-se utilizar derivado clorado, raios ultravioleta, ozônio e outros. Em aplicações onde é necessário um residual desinfetante, deve ser usado derivado clorado.

3.4.5 Aplicações

Um sistema de captação de água da chuva consiste basicamente de componentes como calhas e tubulações que devem ser destacadas com cores diferentes, o reservatório, filtros e bombas (em alguns casos). Para exemplificar o processo, a Figura 2 ilustra basicamente como funciona o sistema:

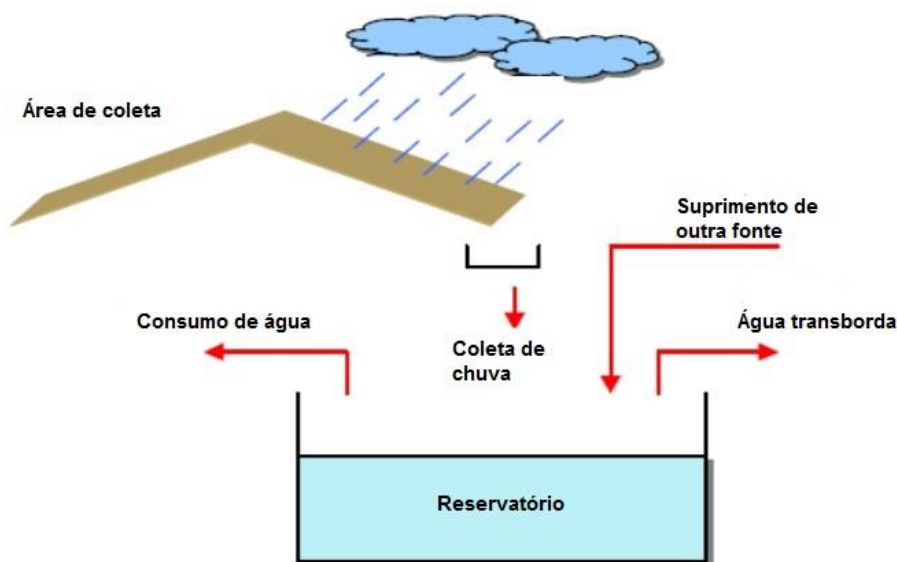


FIGURA 2 - SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA
 FONTE: ADAPTADO DE TOMAZ (2009)

Segundo Tomaz (2003), a economia estimada da água pública é de cerca de 30% quando se utiliza água da chuva. Este também afirma que modelos de aproveitamento de águas pluviais devem ser aplicados para telhados de áreas residenciais, comerciais e industriais. Através de informações históricas referentes ao tema, o autor sugere que cada residência possua seu próprio sistema de reaproveitamento de água.

No Brasil, em locais onde não existe rede pública de água, é viável o uso da água da chuva. Mesmo em áreas urbanizadas, é interessante a instalação de sistemas como esse, desde as pequenas residências até grandes prédios (TOMAZ, 2003). Contudo, é claro que a viabilidade e o retorno de cada sistema serão diferentes entre si.

3.4.6 Vantagens e desvantagens

De acordo com Carvalho (2010), existem muitos pontos positivos em utilizar um sistema de captação de água da chuva, pois reduz o consumo de

água potável, diminuindo os custos da água fornecida pelas companhias de abastecimento, minimiza riscos de enchentes e preserva o meio ambiente reduzindo a escassez de recursos hídricos.

Carvalho (2010) ainda trata sobre outras vantagens; baixo impacto ambiental, utilização de estruturas existentes na edificação, água com qualidade aceitável para fins com pouco ou nenhum tratamento, complementa o sistema convencional, reserva água para situações de emergência, baixos custos, e facilidade de operação e manutenção, tecnologias disponíveis e de fácil acesso.

Todavia, há desvantagens consideráveis. O custo inicial é de médio a alto; o suprimento é limitado, pois depende das características da edificação e de precipitação; não atrai políticas públicas; e pela qualidade da água, esta não pode ser utilizada para qualquer fim (CARVALHO, 2010).

É importante citar que, segundo Dias, Martinez e Libânio (2010), o consumo de água é diretamente proporcional à renda da população. Logo, dimensionar o reservatório para várias demandas e áreas objetiva atender, no futuro, a vários cenários sociais e econômicos.

Devido a isso, ao elaborar um sistema de captação, é importante a análise das vantagens e desvantagens econômicas e ambientais, levando em conta os investimentos iniciais e o tempo de retorno financeiro; sendo que nesta análise será considerado o dimensionamento do reservatório.

3.4.7 Dimensionamento do reservatório

Segundo Cohim, Garcia e Kiperstok (2008), o reservatório é o componente mais caro de um sistema de captação de água da chuva e, portanto, deve ser dimensionado de maneira bem fundamentada. Segundo estes, os custos do reservatório podem variar de 50% a 80% do valor total do projeto e o tamanho dependerá de diversos fatores.

Dentre esses fatores, pode-se citar o regime pluviométrico do local. A distribuição das chuvas durante o ano e suas mudanças entre as estações serão decisivas no dimensionamento. Por exemplo, altos índices pluviométricos e regularidade na distribuição permitem que sejam utilizados reservatórios menores.

Cohim, Garcia e Kiperstok (2008) ainda afirmam que a área de captação e a demanda também influenciam no tamanho do reservatório. A quantidade que pode ser captada é função da área, e é um parâmetro essencial no cálculo. O consumo de água também é fundamental e depende de diversos fatores, como quantidade de pessoas que reside no local, hábitos de consumo e tipos de uso aos quais será destinada a água pluvial.

De acordo com Cohim, Garcia e Kiperstok (2008) há mais um fator que influencia no dimensionamento do reservatório, nomeado como “nível de risco aceitável”. O tipo de consumo a que a água será destinada e a existência de outras fontes para suprimento deste acarretará no risco aceitável de esvaziamento completo do reservatório, influenciando no cálculo de suas dimensões. Por exemplo, se instalado em uma área urbana, onde há outras fontes de água, o risco do reservatório esvaziar será muito menor do que se for instalado em um local onde a chuva é a única fonte de água disponível, como em áreas rurais (COHIM, GARCIA e KIPERSTOK, 2008).

Há na literatura vários modelos e metodologias para calcular o tamanho do reservatório de águas pluviais. Mas basicamente, todos eles realizam um balanço entre o volume que é captado e o que é consumido, e no geral os modelos usam como critérios a área de captação do telhado, a precipitação e a demanda.

A NBR 15527/2007 dispõe sobre alguns métodos de dimensionamento de reservatórios. São eles chamados de Rippl, Simulação, Azevedo Neto, Alemão, Inglês e Americano. Além disso, há o Método de Fendrich, apresentado em Fendrich (2002), que não está presente na NBR, mas é utilizado em projetos de dimensionamento.

3.4.7.1 Método de Rippl

O Método de Rippl consiste em um balanço de massa e pode ser usado em qualquer escala e em qualquer tipo de série hidrológica, mas no caso do dimensionamento de reservatório para captar água da chuva, utilizam-se escalas mensais ou diárias de precipitação. Consequentemente, se o

dimensionamento for realizado utilizando séries mensais o reservatório será menor. O método é descrito pelas equações

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

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

Em que $V = \sum S_{(t)}$ (somente quando $S_{(t)} < 0$) e $\sum D_{(t)} < \sum Q_{(t)}$. As variáveis envolvidas são volume do reservatório no período t ($S_{(t)}$); volume de chuva captada no período t ($Q_{(t)}$); demanda no período t ($D_{(t)}$); volume do reservatório (V), todos estes em L; e o coeficiente de *runoff* (C), que é adimensional.

Para avaliar o volume de regularização adota-se o método do máximo déficit acumulado. Esse método determina em cada intervalo de tempo o déficit, que é igual à demanda menos o volume precipitado, acumulando o mesmo ao longo do tempo, enquanto positivo. Se o valor acumulado resultar negativo, o déficit acumulado é igualado a zero. O maior valor do déficit acumulado dentro do horizonte de planejamento, denominado “máximo déficit acumulado”, é igual ao volume útil necessário para regularizar a demanda (MIRANDA e FILL, 2009).

Segundo Miranda e Fill (2009), este método pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} D_{(0)} &= 0 \\ D_{(t)} &= \text{máx.} [D_{(t-1)} + C - P_{(t)}; 0] \quad t = 1, 2, \dots, T \\ D_{\text{máx}} &= \text{máx.} [D_{(1)}, D_{(2)}, \dots, D_{(T)}] \end{aligned} \quad (3)$$

Onde t é o tempo (em dias); $D_{(t)}$ é o déficit acumulado (em mm), no período t; $P_{(t)}$ é a precipitação diária no período t (em mm); C é o consumo (em mm); e $D_{\text{máx}}$ é o máximo déficit acumulado do período T (em mm).

3.4.7.2 Método da simulação

Assim como no Método de Rippl, neste método a evaporação da água pode ser desconsiderada. Para um determinado mês, aplica-se a equação da continuidade a um reservatório finito, descrita por

$$S_{(t)} = Q_{(t)} + S_{(t-1)} - D_{(t)} \quad (4)$$

$$Q_{(t)} = C \cdot P_{(t)} \cdot A \quad (5)$$

Esta deve atender à condição de que $0 \leq S_{(t)} \leq V$; onde $S_{(t)}$ é o volume do reservatório no tempo t ; $S_{(t-1)}$ é o volume do reservatório no tempo $t - 1$; $Q_{(t)}$ é o volume de chuva captada no tempo t ; $D_{(t)}$ é a demanda no tempo t ; V é o volume do reservatório e C é o coeficiente de *runoff* (adimensional).

Para este método duas hipóteses devem ser feitas: O reservatório está cheio no início do tempo “ t ”, e os dados históricos são representativos para as condições futuras. Cohim, Garcia e Kiperstok (2008) mostram que o Método da simulação é muito utilizado como modelo computacional, pois faz o balanço hídrico a partir de volumes pré-definidos de reservatórios. Estes podem ser escolhidos pelo usuário ou sugeridos pelo modelo, dando como resposta os indicadores: confiabilidade, satisfação e eficiência. Os autores afirmam também que a utilização de séries históricas apresenta vantagens tais como incorporar períodos críticos de seca e características sazonais.

3.4.7.3 Método Azevedo Neto (Prático Brasileiro)

Segundo a BR 15527/2007, o volume de chuva é obtido pela equação

$$V = 0,042 \cdot P \cdot A \cdot T \quad (6)$$

Em que P é a precipitação média anual (em mm); T é o número de meses de pouca chuva ou seca; A é a área de coleta em projeção (em m^2); V é o volume de água no reservatório (em L). Portanto, neste método desconsidera-se a vazão de demanda, considerando-se apenas o volume captado e o período de estiagem.

3.4.7.4 Método Prático Alemão

Apresentado na NBR 15527/2007, trata-se de um método empírico onde se utiliza o menor valor do volume do reservatório; 6% do volume anual de consumo ou 6% da precipitação aproveitável (considera-se inutilizável o *first flush*). $V_{adotado}$ é o mínimo entre o volume anual precipitado aproveitável e o volume anual de consumo multiplicado por 0,06. Isto pode ser visto pela equação

$$V_{adotado} = \min(V; D) \cdot 0,06 \quad (7)$$

Sendo que V é volume aproveitável de água da chuva anual (em L); D é a demanda anual de água não potável (em L) e $V_{adotado}$ é o volume de água do reservatório (em L).

3.4.7.5 Método Prático Inglês

Conforme a NBR 15527/2007, o volume de chuva V é obtido pela equação

$$V = 0,05 \cdot P \cdot A \quad (8)$$

Na qual P é a precipitação média anual (em mm); A é a área de coleta em projeção (em m²); e V é o volume de água aproveitável ou o volume de água da cisterna (em L). Neste método também não é considerada a demanda.

3.4.7.6 Método Prático Australiano

De acordo com a NBR 15527/2007, o volume de chuva Q é obtido por

$$Q = A \cdot C \cdot (P - I) \quad (9)$$

Sendo C o coeficiente de *runoff* (normalmente 0,8 segundo a NBR15527/07); P a precipitação média mensal; I a interceptação da água que

molha a superfície e perdas por evaporação (normalmente 2,0 mm segundo a Norma); A a área de coleta; e Q o volume mensal produzido pela chuva.

O cálculo do volume do reservatório é realizado por tentativas, até que sejam utilizados valores otimizados de confiança e volume do reservatório, através da função

$$V_{(t)} = V_{(t-1)} + Q_{(t)} - D_{(t)} \quad (10)$$

Onde $D_{(t)}$ é a demanda mensal; $Q_{(t)}$ é o volume mensal produzido pela chuva no mês t; $V_{(t)}$ é o volume de água que está no tanque no fim do mês; $V_{(t-1)}$ é o volume de água que está no tanque no início do mês.

Para o primeiro mês considera-se o reservatório vazio (quando $(V_{(t-1)} + Q_{(t)} - D_{(t)}) < 0$; $V_{(t)} = 0$), e o volume do tanque escolhido será T.

O cálculo da confiança parte da determinação da probabilidade de falha

$$P_r = N_r / N \quad (11)$$

Sendo que P_r é a probabilidade de falha; N_r é o número de meses que o reservatório não atendeu à demanda, isto é, quando $V_{(t)} = 0$; e N é o número de meses considerado, preferencialmente maior do que 12. Onde o nível de confiança é dado por $(1 - P_r)$, recomenda-se que os níveis estejam entre 90% e 99%.

3.4.7.7 Método de Fendrich

Apresentados os métodos descritos na NBR 15527/2007, podemos analisar também o Método de Fendrich para dimensionamento de reservatórios. Coutinho et.al. (2011) faz uma comparação entre este e os métodos citados no anexo A da Norma. A seguir há uma breve explicação sobre em que consiste o método.

Fendrich (2002) desenvolveu um estudo sobre a aplicabilidade da coleta, utilização e detenção das águas pluviais na bacia hidrográfica do Rio Belém, em Curitiba. O objetivo principal do trabalho era o controle de enchentes

urbanas através do retardamento do escoamento superficial, dentro do contexto da retenção distribuída das águas pluviais.

No estudo foi determinado o coeficiente de *runoff* regional (C_r) de Curitiba para reservatórios de retenção distribuída, obtido com o valor de 20,5 L/m² de telhado.

Segundo Fendrich (2002) o volume dos reservatórios de retenção distribuída das águas pluviais em Curitiba deve ser feito por meio da equação

$$V = C_r \cdot A_c \quad (12)$$

Sendo V a capacidade do reservatório de retenção (em L); C_r o coeficiente de *runoff* regional de Curitiba (20,5 L/m² calculado pelo autor) e A_c a área de coleta da água da chuva (m²).

Como o método apresentado por Fendrich (2002) diz respeito ao reservatório de retenção, deve-se citar que este é diferente de um reservatório de armazenamento, e logo não acumula água suficiente para ser aproveitada por muito tempo.

3.4.8 Dimensionamento das tubulações e bombas

O projeto de dimensionamento das tubulações deve atender a alguns requisitos da normativa ABNT/NBR 10844/1989 (Instalações prediais de águas pluviais). Como dito anteriormente, as tubulações de água da chuva devem ser destacadas, com cor diferente da tubulação da água da rede pública.

Já o projeto de bombeamento das águas pluviais de baseia basicamente na ABNT/NBR 12214/1992 (Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público). Estas são necessárias quando o reservatório de água está localizado abaixo do nível de distribuição. Podem encarecer o projeto e o retorno financeiro demora mais tempo, visto que utilizando uma bomba aumentam os custos de energia elétrica e manutenção.

3.5 GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO

Segundo Detzel (2009), o estudo das precipitações sobre uma determinada região possui uma grande importância sobre diversas atividades. Dentre essas se podem citar o dimensionamento e operação de reservatórios, operação de sistemas hidrelétricos, geração de cenários de mudanças climáticas, entre outros. Na maior parte dos casos, essas análises encontram limitações associadas ao tamanho das séries históricas disponíveis. Em sua maioria, estas não são representativas dos processos envolvidos.

Neste contexto, a geração de séries sintéticas de precipitações apresenta-se como uma solução acessível que vem sendo aplicada por estudiosos da área. Além disso, o uso recorrente do chamado Método de Monte Carlo (ver item 3.5.1) para determinar as estatísticas de variáveis hidrológicas, atribui ainda mais importância para o procedimento. Entretanto, essa escolha ainda provoca discussões, devido à complexidade envolvida no processo de precipitação (DETZEL, 2009).

Detzel (2009) descreveu alguns procedimentos para geração de séries sintéticas de precipitação em escalas anuais, mensais e diárias. Modelos que trabalham com escalas anuais possuem uma aplicação indireta, sendo utilizados para gerar dados em escalas mensais. Por sua vez, modelos que lidam com escalas mensais têm aplicações mais diretas (DETZEL, 2009).

De acordo com Detzel (2009), que lida com a geração de séries sintéticas em escalas diárias, modelos diários apresentam uma maior gama de utilidades, porém possuem maiores dificuldades ao se aplicar a técnica de geração. Cita-se como característica da utilização de dados diários a presença de muitos “zeros” na série, representando os dias sem chuva. Isto faz com que seja necessária a definição dos eventos de precipitações antes de calcular as alturas precipitadas e gerar as séries sintéticas.

3.5.1 Método de Monte Carlo na Hidrologia

A teoria da avaliação de Monte Carlo tem relação com o fato de que as equações da dinâmica estocástica podem ser analisadas como um conjunto infinito de equações determinísticas. Em cada elemento deste conjunto, a entrada do sistema é uma função amostral do processo de entrada, e a saída

do sistema é a correspondente função da amostra da resposta do procedimento (SANTOS et al., 2001).

Segundo Campos e Studart (1991) o Método de Monte Carlo consiste simplesmente na geração de séries sintéticas que reproduzem certo fenômeno chamado de variável aleatória, e na simulação do sistema para avaliar suas respostas em diferentes técnicas de operação. É um método muito útil para se tomar decisões sob um cenário de incertezas, como é o caso das precipitações.

3.5.2 Geradores de séries sintéticas

Dados pluviométricos disponíveis e confiáveis são importantíssimos para realizar simulações eficientes de eventos impactantes ao meio ambiente. Muitas vezes, as informações meteorológicas apresentam erros que podem impossibilitar sua aplicação nas simulações hidrológicas. Assim, é importante que esses dados simulados passem por teste para analisar sua confiabilidade e a representatividade das condições reais do local (ZANETTI, 2003).

A combinação de séries de dados reais com números pseudoaleatórios produzidos por algoritmos computacionais, a fim de gerar sequências de números pseudoaleatórios que se aproximam dos dados meteorológicos reais, resulta nas séries sintéticas. No Brasil, o emprego destas técnicas mostra um grande potencial, sendo que a extensão das séries históricas disponíveis normalmente é reduzida, principalmente quando se trata de dados de chuvas (ZANETTI, 2003).

De acordo com Zanetti (2003), outro benefício das séries sintéticas é a possibilidade de sua aplicação na simulação do número, magnitude e distribuição dos eventos que poderão acontecer em certo tempo futuro. Esse fato permite sua utilização em mecanismos de previsão, que usam dados para representar uma projeção futura do comportamento climático da localidade de interesse, ao invés de utilizar dados observados.

Zanetti (2003) ainda afirma que a geração de séries sintéticas de elementos climáticos, como a precipitação, é proporcionada pela aplicação de modelos computacionais desenvolvidos justamente para este fim. Estes, em sua maioria são probabilísticos ou estocásticos. Isto é, utilizam variáveis

aleatórias que têm distribuições estatísticas específicas. Tais modelos têm resultados diferentes cada vez que são aplicados; visto que, em cada simulação, são utilizados números gerados aleatoriamente, para reproduzir as variações dos fenômenos naturais.

Dentre as deficiências desses modelos computacionais, Zanetti (2003) descreve que elementos climáticos gerados para diferentes localidades não reproduzem a alta correlação espacial que é observada nos elementos climáticos reais. Pela relevância destas correlações, cuidados têm sido tomados para aprimorar o desempenho das variações espaciais e temporais destas séries, principalmente para a precipitação.

Fica evidente que a preocupação com as limitações dos modelos matemáticos é coerente, já que nenhum é capaz de reproduzir os fenômenos naturais na forma real. Turbulência, sensibilidade, condições iniciais e de contorno, e as influências de outros fenômenos naturais são barreiras dificilmente superadas por esses modelos (DETZEL, 2009).

Detzel (2009) afirma que, mesmo com limitações, a geração de séries sintéticas é tida como uma boa alternativa para diversos problemas, e o responsável pelo estudo deve escolher apropriadamente a ferramenta, através do estudo prévio de seu funcionamento e do intuito no qual ela será utilizada.

3.5.3 Modelos em escala diária

Existem muitas classificações para modelos desse tipo, sempre de acordo com o processo utilizado para suas elaborações. Detzel (2009) baseia-se em algumas referências para justificar a classificação adotada e apresenta que os modelos, conhecidos como geradores de clima, se diferenciam em três tipos. São eles semi-paramétricos (ou empíricos), não paramétricos e paramétricos.

3.5.3.1 Modelos semi-paramétricos

Modelos ditos semiparamétricos ou empíricos são os que simulam os eventos e a quantidade de chuvas através de histogramas adaptados aos dados. Em resumo, o processo utiliza-se de parâmetros estatísticos e requer

calibrações para poder ser aplicado. Informações adquiridas da região de estudo são utilizadas para essa calibração (DETZEL, 2009).

Detzel (2009) apresenta um exemplo de modelo semi-paramétrico, em que as simulações são determinadas através de uma distribuição semi-empírica. O histograma possui intervalos definidos e é construído a partir das propriedades da local de interesse, e as variáveis aleatórias são determinadas pela seleção de valores presentes nesse intervalo. Os dados de cada intervalo são considerados igualmente distribuídos.

Sobre o mesmo modelo, deve-se destacar que esse processo assegura certa versatilidade, contudo é necessária uma grande variedade de parâmetros. Mesmo assim, tem a vantagem de ser bastante flexível para poder ser aplicado a regiões com climas diferentes. Também é relevante apontar que o processo para selecionar os intervalos do histograma leva em consideração a magnitude dos eventos (DETZEL, 2009).

Detzel (2009) ainda apresenta outro modelo muito semelhante a este primeiro, que trabalha diretamente com precipitações diárias. Como conclusão sobre as características de cada um, é exposto que os modelos semi-paramétricos funcionam como uma boa ferramenta para estudos relacionados a cheias e abastecimento de água.

3.5.3.2 Modelos não paramétricos

Os modelos não paramétricos são conhecidos por não possuírem estrutura definida e, por isso, dependem somente das informações disponíveis para desenvolver as estimativas. Pesquisadores interessados em estudar esse tipo de modelo focam muito na reprodução das influências do mecanismo físico envolvido na precipitação. Reproduzir fenômenos hidrológicos é algo muito difícil, e isto acaba se refletindo complexidade dos modelos não paramétricos (DETZEL, 2009).

Estes modelos são também bastante aplicados em métodos conhecidos como reamostragem de dados (ou *bootstrapping*). Trata-se de uma técnica estatística utilizada quando há obstáculos na determinação de informações sobre a amostra, como média, coeficientes de correlação e até mesmo a distribuição estatística que a governa. Essa estimativa é realizada replicando-

se os dados disponíveis; a intenção é aproximar-se dos valores reais, partindo de um número crescente de amostras (DETZEL, 2009).

Segundo Detzel (2009), certos autores se perguntam sobre a incoerência de alguns modelos que se adaptam bem a algumas regiões e falham em outras. Estes autores desenvolveram estudos muitíssimo detalhados, procurando incorporar todos os fatores relevantes no mecanismo de precipitação. Além de não atribuírem condições iniciais para o modelo, os pesquisadores criaram uma estrutura probabilística mais ampla, que possibilitou um aumento na dependência entre os períodos molhados e secos. A Figura 3 representa esta estrutura.

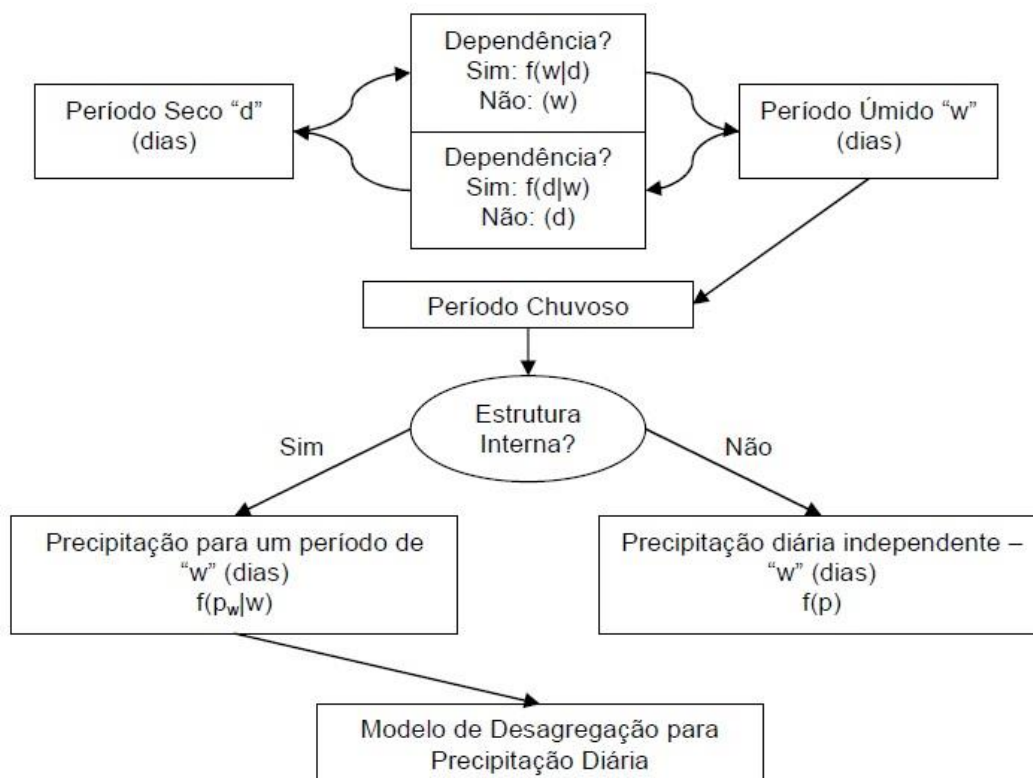


FIGURA 3 - ESTRUTURA DE UM MODELO NÃO PARAMÉTRICO
 FONTE: DETZEL (2009)

As probabilidades mostradas na Figura 3 dizem respeito ao comprimento do período úmido $f(w)$; comprimento do período seco $f(d)$; quantidade de chuva em um dia úmido $f(p)$; quantidade de chuva em um determinado período úmido $f(p_w)$; comprimento de um período úmido, dado o comprimento de um período seco $f(w|d)$; e comprimento de um período seco, dado o comprimento de um período úmido $f(d|w)$ (DETZEL, 2009).

O autor ainda conclui que o modelo apresenta resultados muito satisfatórios, mas ressalta que são necessárias séries de dados e grupos de parâmetros muito extensos para se conseguir estruturar e aplicar o modelo.

3.5.3.3 Modelos paramétricos

Ainda utilizando do mesmo estudo, Detzel (2009) atesta que os modelos paramétricos são os mais conhecidos e utilizados pelos pesquisadores. Este tipo de modelo não traz o mesmo grau de detalhamento do que os outros anteriormente expostos; todavia propicia maior versatilidade e facilidade de adaptação. Em sua maioria, os processos paramétricos de geração de chuvas dividem-se em duas etapas: ocorrência, geralmente aplicando-se processos estocásticos de alternância de eventos ou processos markovianos; e quantidade (ou alturas de precipitação), na qual são utilizadas distribuições estatísticas.

Na Figura 4 nota-se que, além dos processos estocásticos e distribuições estatísticas, modelos paramétricos empregam os chamados números pseudoaleatórios. Este artifício faz-se presente não somente na fase de determinação das ocorrências, mas também na determinação das alturas precipitadas. O importante é que esta técnica não está presa a modelos paramétricos; outros tipos de modelo também fazem uso de números pseudoaleatórios. (DETZEL, 2009).

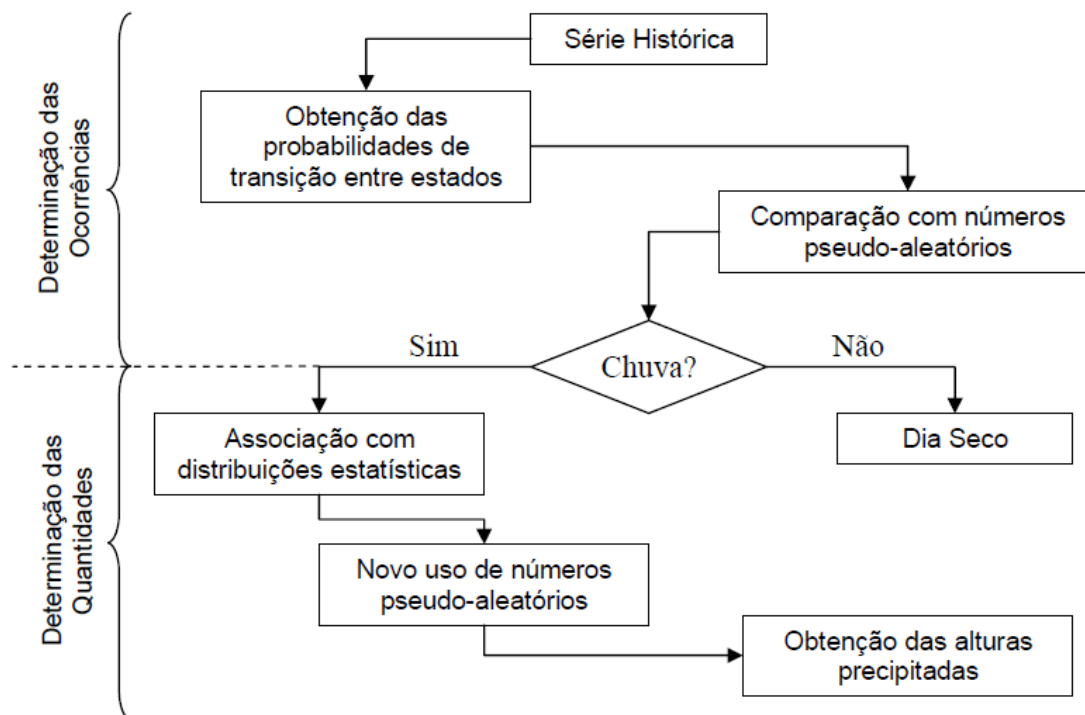


FIGURA 4 - ESTRUTURA DE MODELO PARAMÉTRICO
 FONTE: DETZEL (2009)

Segundo Detzel (2009), a maioria dos estudiosos que realizam pesquisas sobre a geração estocástica de chuvas diárias faz uso de Cadeias de Markov para a determinação das ocorrências das precipitações. De acordo com Oliveira (2003) estas descrevem bem a tendência dos dias secos e chuvosos, que dependem da probabilidade de ocorrência ou não de chuva no dia anterior.

As Cadeias de Markov são basicamente processos estocásticos aplicados a parâmetros discretos de tempo. A propriedade essencial de um processo estocástico markoviano é que a evolução futura do sistema depende apenas do atual estado e nunca dos estados passados. Em resumo, o sistema não utiliza informações referentes ao seu comportamento atual (DETZEL, 2009).

Detzel (2009) apresentou uma estruturação comum de um processo markoviano de primeira ordem e dois estados; isto é, que só leva em conta o que foi observado no instante de tempo anterior e as condições de secos ou molhados. A equação a seguir descreve a estrutura apresentada pelo autor, sendo que X representa a observação e n representa os estados.

$$P_r\{X_{n+1} = x_{n+1} | X_0 = x_0, X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n\} = P_r\{X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n\} \quad (13)$$

A aplicação das Cadeias de Markov para eventos pluviométricos tem relação com a ocorrência ou não de chuva, no local k , dia t , tal que:

$$X_t(k) = \begin{cases} 0, & \text{para dia } t \text{ seco no local } k \\ 1, & \text{para dia } t \text{ molhado no local } k \end{cases} \quad (14)$$

A construção da Cadeia de Markov inicia-se com as probabilidades de transição:

$$P_r\{X_t(k) = 1 | X_{t-1}(k) = 0\} = p_{01}(k); \quad (15)$$

$$P_r\{X_t(k) = 1 | X_{t-1}(k) = 1\} = p_{11}(k) \quad (16)$$

A representação pode ser entendida como $p_{01}(k)$ para indicar um dia seco seguido de um dia molhado e $p_{11}(k)$ para indicar um dia molhado seguido de outro também molhado. Conclui-se o procedimento utilizando as probabilidades de transição condicionais complementares

$$p_{00}(k) = 1 - p_{01}(k); \quad (17)$$

$$p_{10}(k) = 1 - p_{11}(k); \quad (18)$$

Desta forma, a matriz de transição do processo de Markov é definida como

$$P_r = p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Além de Cadeias de Markov, a ocorrência das precipitações pode ser determinada também pela técnica de alternância de eventos. Nesta, os dados diários de chuva são considerados como uma alternância de sequências de dias secos e úmidos, com tamanhos variáveis. Também é habitual associar distribuições estatísticas a estas sequências, muitas vezes diferentes para períodos secos e molhados. Com isso, os resultados são satisfatórios, porém o

método de alternância de eventos exige mais tempo computacional para realizar os cálculos, tornando-a menos atrativa economicamente (DETZEL, 2009).

3.5.4 Cálculo das alturas precipitadas

Após a determinação da ocorrência das chuvas devem-se determinar as alturas precipitadas. Detzel (2009) afirma que, para os dias com chuva, há diversas maneiras de determinar as alturas (ou quantidades) precipitadas aplicando distribuições probabilísticas. Pode-se citar como as mais utilizadas a gama de dois parâmetros, exponencial simples (um parâmetro), exponencial de dois parâmetros e exponencial mista de três parâmetros. Segundo o autor, as mais aplicadas nos estudos são a gama de dois parâmetros e a exponencial mista, e devido a isso serão detalhadas mais a fundo.

3.5.4.1 Gama de dois parâmetros

De acordo com Detzel (2009), a distribuição Gama é utilizável nas distribuições de variáveis com desempenho assimétrico, como no caso das precipitações. A função de densidade de probabilidades da distribuição Gama é dada pela equação

$$f_X(x) = \frac{\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right)}{\beta \Gamma(\alpha)}, \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (20)$$

Onde x é a variável aleatória, α e β são respectivamente os parâmetros de forma e escala e Γ é a função gama, definida por

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{z-1} dx \quad (21)$$

De acordo com o autor, quando o parâmetro de forma α é menor que 1, a distribuição tem um comportamento particularmente interessante para modelos de geração de chuvas.

3.5.4.2 Distribuição exponencial

Em seu estudo, Detzel (2009) apresenta que alguns pesquisadores assumem que as precipitações seguem uma distribuição exponencial, visto que esta é fácil de manipular, além de se assemelhar muito da distribuição empírica. Segundo o autor, o formato mais geral desta distribuição tem a função de densidade de probabilidade expressa por:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\frac{(x - \theta)}{\sigma}\right], \quad x > \theta; \sigma > 0 \quad (22)$$

Onde x é o valor assumido pela variável aleatória e θ e σ são os parâmetros. Quando θ é zero, a distribuição se torna uma exponencial simples.

O mesmo autor ainda afirma que uma particularidade importante da distribuição exponencial simples é a chamada “falta de memória”. É uma propriedade, que pode ser demonstrada a partir da definição de variáveis aleatórias “sem memória”:

$$\begin{cases} P_r[X > s + t | X > t] = P_r[X > s] \\ P_r[X > s + t] = P_r[X > s]P_r[X > t] \end{cases} \quad \text{para } s, t \geq 0 \quad (23)$$

Onde s e t são valores adotados pelas variáveis aleatórias. Detzel (2009) salienta que, como exemplo dessa propriedade, X é o tempo de vida de um dispositivo qualquer. A probabilidade de esse dispositivo trabalhar por $s + t$ horas, dado que já se passaram t horas, é igual à probabilidade de ele funcionar s horas. Em resumo, o dispositivo “esquece” que já foi utilizado por t horas. Todavia, deve-se saber que essa propriedade não implica na independência entre as variáveis aleatórias.

Conforme Detzel (2009), distribuições mistas também apresentam boas respostas, ainda mais em geração de séries sintéticas em escala diária. Estas distribuições são aplicadas para resolver problemas mais complexos, por

apresentarem maior flexibilidade, quando comparadas aos modelos mais comuns. Cita-se ainda que os eventos de precipitações em escala diária são resultado da relação de vários mecanismos; logo, além das principais ocorrências de chuva, identificam-se eventos secundários associados aos primeiros. Uma forma de representar esses eventos é por meio de probabilidades condicionais, aplicando-se pesos diferentes aos diversos eventos.

Exposto isso, para definir um modelo probabilístico misto, Detzel (2009) apresenta a equação

$$f_x(x, w, \theta) = \sum_{j=1}^K w_j p(x|\theta) \quad (24)$$

Sendo que $w_j, j = 1, 2, \dots, K$ são pesos (não negativos cuja soma representa a unidade), $f_x(x, w, \theta)$ é a distribuição probabilística (exponencial) e θ representa o respectivo parâmetro.

Assim, as distribuições mistas podem ser relacionadas a uma soma de distribuições, cada uma com pesos associados às suas respectivas funções. Segundo Detzel (2009), o modelo probabilístico exponencial misto tem como função densidade de probabilidade a equação

$$f_x(x) = \alpha \exp(-\lambda_1 x) + (1 - \alpha) \exp(-\lambda_2 x) \quad (25)$$

Composta por duas exponenciais simples e um parâmetro complementar (peso), onde x é o valor assumido pela variável aleatória e λ_1, λ_2 e α são os parâmetros.

3.5.4.3 Estimação dos parâmetros

A determinação dos parâmetros de uma distribuição de probabilidades é uma etapa fundamental para possibilitar qualquer modelagem estatística, segundo Detzel (2009). Na literatura são apresentados vários métodos para realizar este estágio, contudo. O autor afirma que o Método da Máxima

Verossimilhança é o mais empregado em casos de séries com mais de 100 elementos, como é o caso das séries hidrológicas consideradas no trabalho.

Seja L a função de verossimilhança de uma amostra de n valores,

$$L(x_1, \dots, x_n; \alpha) = f(x_1; \alpha) \dots f(x_n; \alpha) \quad (26)$$

Conforme Detzel (2009), o método tem como fundamento buscar valores para os parâmetros envolvidos na distribuição, de modo que a função atinja o maior valor possível. Para isso, calcula-se o máximo da função de verossimilhança. Utilizando como técnica a aplicação de logaritmos:

$$\frac{\partial \log L}{\partial \alpha} = 0 \quad (27)$$

De acordo com Detzel (2009), esta é uma fórmula geral, pois nesse caso, α representa um conjunto de valores. Este ainda afirma que qualquer solução para a equação 27 é entendida como a máxima verossimilhança dos parâmetros α , e que a utilização do logaritmo é somente para facilitar o cálculo da derivada. O método pode ser expandido para os parâmetros θ e λ , quando a distribuição probabilística os possui, com as equações:

$$L(x_1, \dots, x_n; \theta, \lambda) = \prod f(x_i, \theta, \lambda) \quad (28)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \log L}{\partial \theta} = 0 \\ \frac{\partial \log L}{\partial \lambda} = 0 \end{cases} \quad (29)$$

Em algumas distribuições, a aplicação do Método é extremamente trabalhosa, sendo necessário utilizar métodos numéricos computacionais para encontrar a solução de suas equações (DETZEL, 2009).

4 MÉTODO

4.1 DETERMINAÇÃO DO ANO HIDROLÓGICO

Simon, Pickbrenner e Marcuzzo (2013) estabelecem que a determinação do ano hidrológico pela precipitação baseia-se na distinção entre dois períodos: o ano começa no início do período chuvoso, terminando no final do período seco, contabilizando um período fixo de 12 meses.

Avaliando que Curitiba não possui uma sazonalidade bem definida, pode-se supor que há certa dificuldade na definição do ano hidrológico pela precipitação. Esta irregularidade não permite definir quais os meses mais chuvosos e quais os mais secos. Com a quantidade de dados da série histórica pode-se encontrar um padrão de épocas mais secas e mais chuvosas, todavia, essa diferença não é tão significativa a ponto de se definir quando se inicia cada período.

Portanto, para este trabalho, o ano hidrológico será considerado como um ano normal, iniciando em 1º de janeiro e terminando no dia 12 de dezembro.

4.2 SÉRIE HISTÓRICA DE PRECIPITAÇÕES

Os dados de precipitação foram obtidos no sítio Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo que as séries dessa base são produto de dados medidos.

A estação pluviométrica da qual foram obtidos os dados históricos corresponde à estação da cidade de Curitiba, localizada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná. As informações referentes à estação estão descritas na Tabela 3.

TABELA 3 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE CURITIBA

ESTAÇÃO	Curitiba – PR
CÓDIGO ANA	2549006
LONGITUDE (°)	-25:26:00
LATITUDE (°)	-49:16:00
ALTITUDE (m)	924,00
INÍCIO DA OPERAÇÃO	01/01/1889

FONTE: ADAPTADO DE HIDROWEB (2015)

Pode-se notar que a estação iniciou sua operação em 1889; contudo, até o ano de 1922 havia muitas falhas na série. Portanto, neste estudo optou-se trabalhar com a série no período de 1922 a 2015.

Mesmo com 97 anos de dados diários ainda havia algumas lacunas a serem preenchidas, de eventuais dias que não possuíam registro. Então se fez necessário um preenchimento de falhas, onde a chuva nos dias que não havia registro foi estimada pela média entre o dia anterior e o dia seguinte. Em todo o período, esse preenchimento de falhas só foi necessário em 31 dias.

Com isso, a série histórica consiste em 34.333 registros diários iniciando em 1º de janeiro de 1922 e terminando em 31 de dezembro de 2015.

4.3 DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO

Para dimensionar o reservatório, foi utilizado o Método de Rippl juntamente ao método dos máximos déficits acumulados. Como dito anteriormente, o método de Rippl consiste em elaborar um diagrama que relacione as precipitações, a área de captação e a demanda utilizada. Para melhorar o diagrama de forma visual, elaborou-se uma planilha da forma mostrada na Tabela 4.

TABELA 4 - ESQUEMA DO DIAGRAMA DE RIPPL

Precipitação (p)	Área de captação (A)	Demanda (dem)	Volume = p.A.C*	(Demanda – Volume)	Diferenças acumuladas
mm	m ²	L	L	L	L

*Coeficiente de *runoff*

Na primeira coluna tem-se a série de precipitações, seja ela histórica ou a sintética. Cada linha desta planilha irá corresponder ao registro de um dia de

precipitação, logo, a demanda e o volume também são diários. Na segunda e na terceira colunas são adicionadas a área de captação e a demanda, que são valores definidos por quem está realizando os cálculos.

A quarta coluna corresponde ao volume, que nada mais é do que a multiplicação da precipitação pela área e pelo coeficiente de *runoff* (ver item 4.3.2), visto que o volume disponível depende diretamente da quantidade de chuva no dia e do tamanho da área de captação. A quinta coluna representa a diferença entre a demanda diária e o volume diário disponível, e isto irá gerar o que é chamado de diferenças acumuladas.

Segundo o método dos máximos déficits acumulados, quando o valor do déficit entre demanda e volume é maior do que zero, deve-se somar este valor ao déficit do tempo anterior. Caso seja menor, considera-se o déficit igual a zero.

Portanto, o máximo déficit acumulado será o maior valor na sexta coluna dentre todas as datas. Este valor será avaliado no Capítulo 5. Resultados, visto que sua origem pode ser de várias formas. Pode ser uma chuva com muita intensidade, podem ser chuvas por um longo período de tempo, ou até mesmo uma soma desses fatores.

4.3.1 Elaboração do método dos máximos déficits acumulados

Para avaliar e dimensionar o reservatório em vários cenários com áreas e demandas diferentes criou-se um algoritmo simples no ambiente de programação *Python*. A intenção é avaliar o tamanho do reservatório de águas pluviais para diversas áreas, pequenas e grandes, e diversas demandas. Áreas e demandas menores irão gerar déficits pequenos, conseqüentemente, o tamanho do reservatório será menor. O mesmo raciocínio vale para áreas e demandas maiores.

Então, no algoritmo desenvolvido, utilizou-se a série histórica e buscou-se realizar os cálculos dos déficits através de simulações. As áreas de captação variam entre 0 e 100 m² com passos de 5 m². Já as demandas variam entre 5L e um “máximo valor de demanda” com passos de 1L. Este “máximo valor de demanda” pode ser definido como a máxima demanda que a média diária de precipitações da série histórica pode atender.

Exemplificando, a série histórica possui 34.333 dados, sendo 17.104 dias sem chuva e 17.229 dias chuvosos. Logo, fazendo-se a média das precipitações, incluindo dias secos, obteve-se o valor de 3,49 mm. Cada área de captação, associada a esta precipitação e ao coeficiente de *runoff*, retorna um valor de demanda que é a máxima que poderá ser suprida. Logo, o maior valor no *loop* da demanda será este.

Por fim, para cada relação entre área e volume, a série de dados aplicada ao algoritmo irá gerar diferentes volumes do reservatório de captação, e baseando-se nessas informações que as análises serão realizadas.

4.3.2 Coeficiente de *runoff*

Como apresentado anteriormente por Fendrich (2002), o coeficiente de *runoff*, pode variar de 0,7 a 0,95, dependendo do tipo de material do telhado. Isto significa que entre 5 a 30% de chuva é perdida na área de captação por escoamento superficial. Por esse motivo é que se leva em conta o valor do coeficiente no cálculo do volume disponível.

Ao montar o algoritmo para a série histórica utilizou-se o valor do coeficiente de 0,95. Porém realizar-se-á uma análise da influência do coeficiente de *runoff* no dimensionamento. Isto significa que na mesma rotina de programação será adicionado outro *loop*, do coeficiente, variando entre os valores apresentados por Fendrich (2002).

A intenção é comparar os valores, através dos tamanhos dos reservatórios calculados, para saber a influência do coeficiente no volume. Será utilizada como base a Tabela 1 e os resultados serão avaliados a partir de gráficos.

4.3.3 Estudo da série histórica

Como apontado anteriormente, primeiramente será feito um estudo da série histórica. A partir do programa serão realizados cálculos em alguns cenários para posteriormente serem comparados com a série sintética.

Os cálculos dos volumes dos reservatórios de captação serão feitos da forma como já apresentado. Serão gerados gráficos para avaliar a relação entre áreas e demandas, além dos gráficos comparando os coeficientes.

Portanto, ao fim da avaliação da série histórica, têm-se resultados que permitirão analisar a relação da precipitação, da área e da demanda com o tamanho do reservatório. Além disso, alguns valores estatísticos darão suporte à comparação com a série sintética de precipitações.

4.3.4 Probabilidades e risco

Dentre os valores estatísticos citados anteriormente, os principais são a média e as probabilidades de ocorrência e falha. Com estas informações será possível definir critérios e equações de risco de falha. Por exemplo, para que o leitor deste possa utilizá-lo posteriormente em aplicações práticas, é importante que seja definido um nível de risco de colapso do sistema de captação.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), o risco hidrológico pode ser definido como

$$R = 1 - P_f^N \quad (30)$$

Sendo que R é o risco do sistema colapsar; P_f é a probabilidade de falha; onde $P_f = 1 - P_s$, sendo que P_s é a probabilidade de sucesso; e N é o número de anos, definido pelo usuário.

Portanto, pretende-se apresentar situações para diferentes períodos e conseqüentemente para probabilidades distintas, indicando possíveis riscos associados a determinados sistemas.

4.4 GERAÇÃO DAS SÉRIES SINTÉTICAS

O modelo utilizado para geração da série sintética será baseado no modelo desenvolvido por Oliveira (2003), denominado CLIMA BR, que gera séries sintéticas de dados climáticos. O software simula as precipitações totais diárias (em mm), suas respectivas durações (em horas) e intensidades; além

de temperatura, velocidade do vento e radiação. Para este estudo a única variável a ser empregada será a precipitação diária.

A partir da série histórica, o programa calcula os valores mensais da média, do desvio padrão e do coeficiente de assimetria do total precipitado diário, e os valores mensais da probabilidade de ocorrência ou não de chuva, condicionado à ocorrência ou não de chuva no dia anterior.

Para o cálculo dos três primeiros parâmetros, os dados de precipitação são primeiramente divididos em 12 grupos mensais, onde são considerados apenas dias em que houve chuva. O valor do coeficiente de assimetria é calculado pela Equação 31, apresentada por Zanetti (2003).

$$g_j = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}_j}{s_j} \right)^3 \quad (31)$$

Onde g_j é o coeficiente de assimetria, n é o número de dados da série, \bar{x}_j é a média e s_j é o desvio padrão.

A determinação dos dias secos ou chuvosos é realizada pelo modelo utilizando um processo markoviano, no qual são empregadas Cadeias de Markov de primeira ordem e dois estados. As probabilidades de ocorrência de precipitação são condicionadas à ocorrência ou não de chuva no dia anterior e também são calculadas mensalmente, através das Equações 32 e 33.

$$P(C|C)_j = \frac{\sum_{i=1}^n DCC_i}{\sum_{i=1}^n DC_i} \quad (32)$$

$$P(C|S)_j = \frac{\sum_{i=1}^n DCS_i}{\sum_{i=1}^n DS_i} \quad (33)$$

Sendo que $P(C|C)_j$ é a probabilidade (em formato decimal), obtida para cada mês, de ocorrência de um dia chuvoso, sendo o dia anterior chuvoso; DCC_i representa o dia chuvoso, sendo o dia anterior também chuvoso; DC_i representa o dia chuvoso; $P(C|S)_j$ é a probabilidade (em formato decimal), obtida para cada mês, de ocorrência de um dia chuvoso, sendo o dia anterior

seco; DCS_i representa o dia chuvoso, sendo o dia anterior seco; e DS_i representa o dia seco.

Para os dias chuvosos, a precipitação total diária é determinada no modelo pela aplicação da distribuição Gama e o método é apropriado quando mantém as características originais da série histórica. O cálculo é realizado através da Equação 34.

$$P = \bar{x}_j + \frac{2s_j}{g_j} \left\{ \left[\frac{g_j}{6} \left(x' - \frac{g_j}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1 \right\} \quad (34)$$

Sendo P a precipitação total diária em mm; e x' é uma variável adimensional aleatória padronizada.

Após a geração da precipitação total diária para todos os dias chuvosos dos anos simulados, o programa corrige os valores da média e do desvio padrão mensais a fim de ajustar a série sintética em relação à série histórica. As correlações são realizadas por um ajuste proporcional em todos os valores diários de precipitação. A correção da média é obtida pela Equação 35.

$$P' = \frac{\bar{x}_j}{\bar{x}_{jc}} P \quad (35)$$

Onde P' é a precipitação total diária corrigida (em mm); e \bar{x}_{jc} é a média da precipitação total diária mensal calculada a partir dos valores de precipitação obtidos pela Equação 34.

A correção do desvio padrão, sem alterar a média é feita pela Equação 36.

$$P_c = (P' - \bar{x}_j) \frac{s_j}{s_{jc}} + \bar{x}_j \quad (36)$$

Sendo que P_c é a precipitação total diária corrigida (em mm); s_{jc} é o desvio padrão da precipitação total diária mensal calculada a partir dos valores de precipitação obtidos pela Equação 35.

Segundo Oliveira (2003), a aplicação do modelo se inicia com a leitura dos dados diários de precipitação adicionados, e com a definição do ano inicial

e do período total de anos a serem simulados; ao abrir o ambiente do programa, é solicitado ao usuário que coloque estes valores.

4.4.1 Validação das séries sintéticas

Como dito anteriormente, uma forma de comparar a série sintética com a histórica é através do cálculo de estatísticas. Além das mais comuns, como média, mediana, variância, desvio padrão, correlação, pode-se fazer uma análise a partir da própria série sintética. Isto é, pode-se comparar a quantidade de dias secos e chuvosos provenientes da Cadeia de Markov com os valores da série histórica.

Também há o coeficiente de correlação cruzada, que irá comparar uma série com a outra. É desejável que as séries sejam indistinguíveis entre si; logo, é ideal que este coeficiente seja o mais próximo de zero possível, caracterizando a independência entre as séries.

Outra forma de avaliar a série sintética de forma bem clara é a utilização de gráficos. Com isso, serão produzidos gráficos de ambas as séries de forma que seja visivelmente identificável a relação ou não entre as duas. Sendo assim, pode-se afirmar que através destas técnicas será possível validar os dados das séries sintéticas de forma bem fundamentada.

5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DA SÉRIE HISTÓRICA

Antes de qualquer análise sobre os resultados gerados, é importante entender os aspectos da série histórica. Para exemplificar como se dá a distribuição dos registros de precipitação tem-se a Figura 5, que apresenta a frequência de dias em que houve precipitação. Visto que aproximadamente metade dos dados são dias secos, estes não foram descritos na Figura.

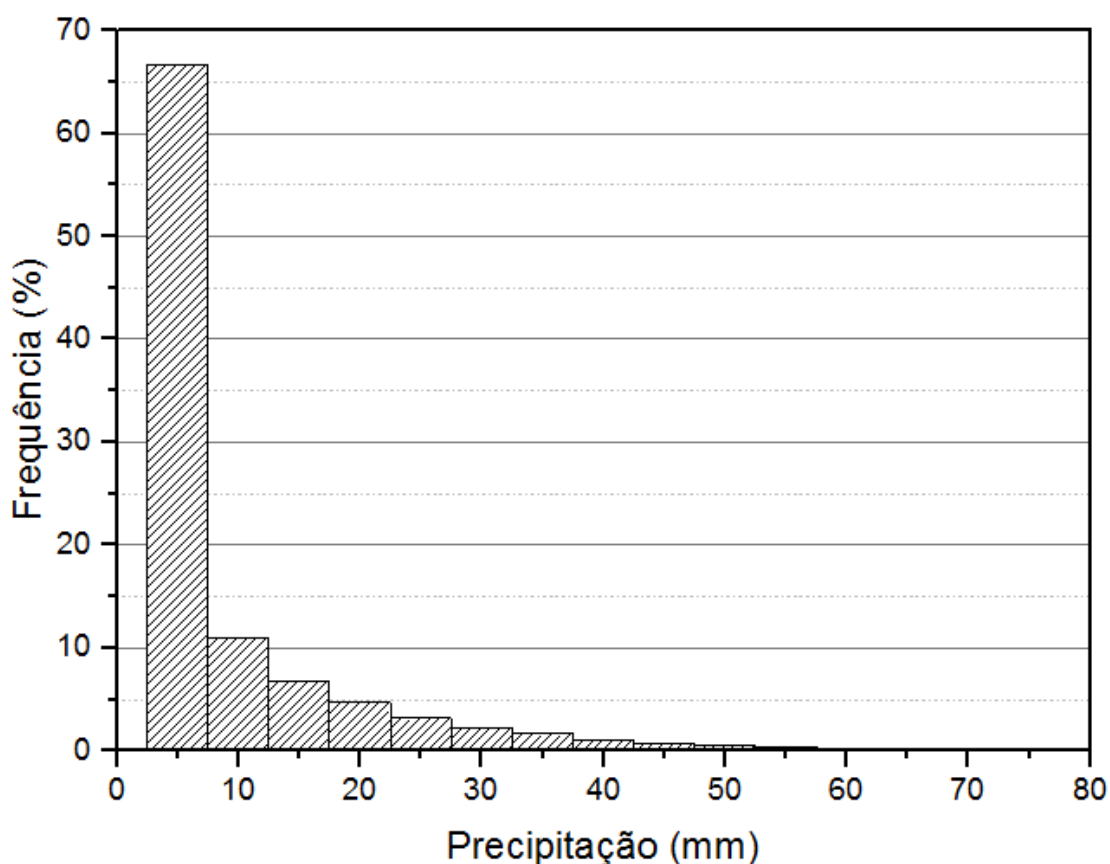


FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DOS DIAS CHUVOSOS DA SÉRIE HISTÓRICA

Percebe-se que as precipitações maiores que 60 mm se caracterizam como os eventos mais extremos. Foram 50 eventos com precipitação maior que 60 mm em uma série de 34.333 dados. Também se identifica que as precipitações mais frequentes estão abaixo de 5 mm, já que Curitiba é um local de precipitações frequentes e altura pluviométrica baixa.

Além disso, se decidiu avaliar como se dava a distribuição das precipitações em cada ano e analisar com isso quais seriam os períodos seco e chuvoso. Na Figura 6 é representado em Box Plot das alturas precipitadas acumuladas em cada mês, onde os valores utilizados para gerar são os acumulados mensais de cada ano.

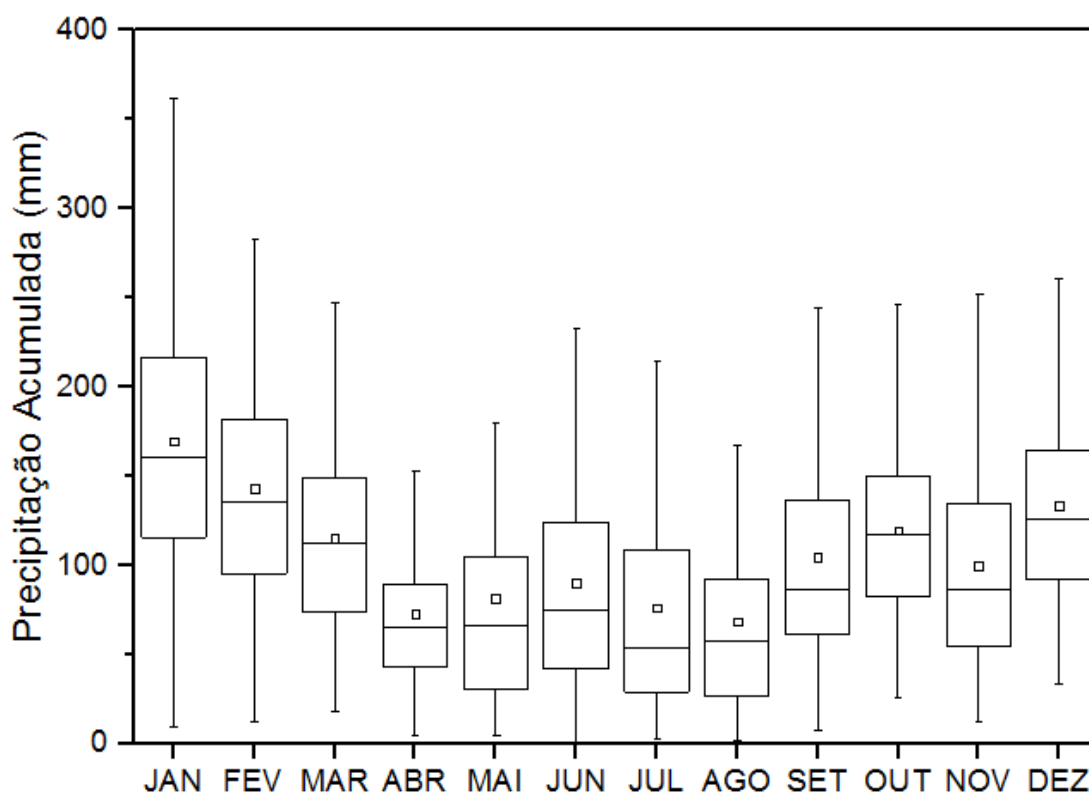


FIGURA 6 - DIAGRAMA DAS DISTRIBUIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DURANTE OS MESES DO ANO NA SÉRIE HISTÓRICA. OS LIMITES SUPERIOR E INFERIOR REPRESENTAM MÁXIMOS E MÍNIMOS, RESPECTIVAMENTE; OS QUARTIS SUPERIOR E INFERIOR REPRESENTAM 75% E 25% DOS DADOS; A LINHA NO MEIO REPRESENTA A MEDIANA E O QUADRADO REPRESENTA A MÉDIA.

É observado que o período seco corresponde ao intervalo entre os meses de Abril a Agosto, e o período chuvoso entre Setembro e Março. Apesar de Junho constar como um mês irregular, aparentemente chuvoso, o período continua sendo seco em relação ao ano. Logo, confirma-se a natureza pluviométrica da cidade de Curitiba, em que nos meses mais frios chove menos e nos meses mais quentes a precipitação é maior.

Já a Figura 7 apresenta a distribuição das precipitações acumuladas para cada ano da série histórica. Percebe-se que há anos bastante secos e

anos muito úmidos, e que também não há um padrão com relação às precipitações acumuladas.

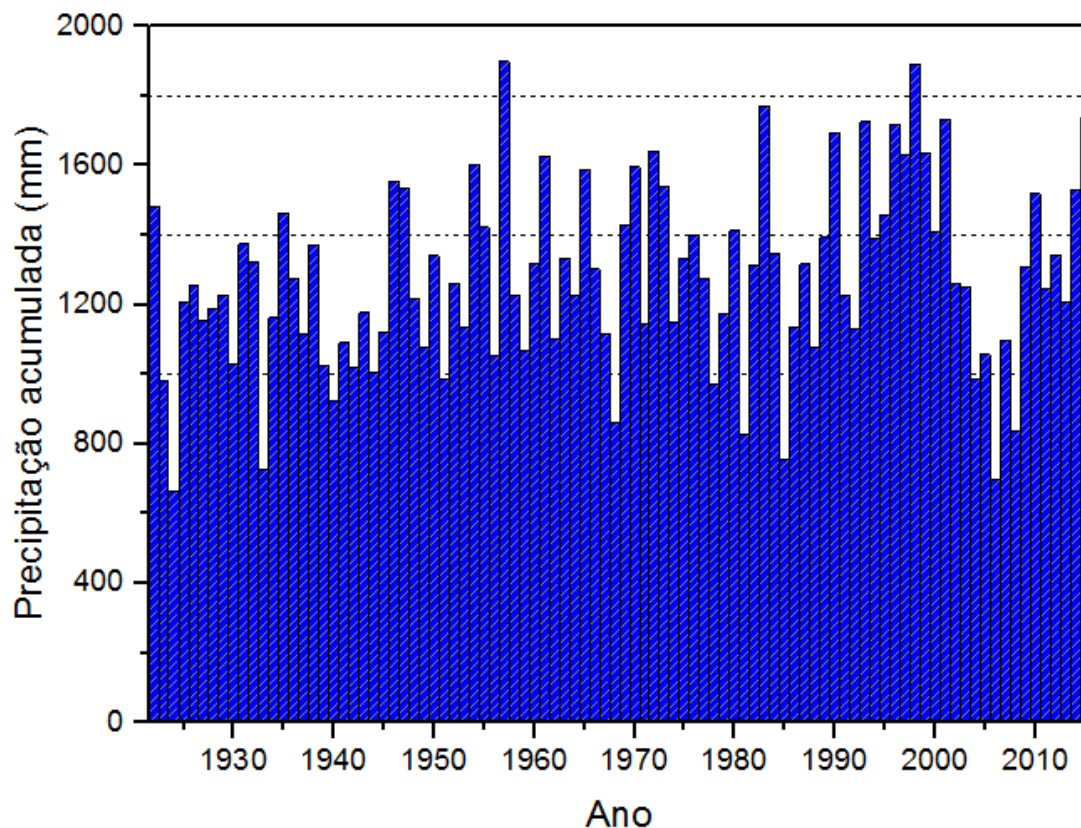


FIGURA 7 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA PARA CADA ANO DA SÉRIE HISTÓRICA

5.2 RELAÇÃO ÁREA x DEMANDA

Como apresentado no item 4.3.1, criou-se uma rotina de programação para gerar valores de tamanhos de reservatórios para diferentes cenários. O arquivo de entrada possui 34.333 registros da estação pluviométrica, contemplando dias secos e chuvosos.

Utilizou-se o valor do coeficiente de *runoff* igual a 0,95, as áreas variaram entre 5 e 100 m² com incrementos de 5m² e a demanda variou entre 5 L ao chamado “máximo valor de demanda” (Ver item 4.3.1) com incrementos de 1L. Como explicado em 4.3.1, esse valor máximo da demanda depende diretamente da área. Logo, para cada área ter-se-á uma demanda máxima.

Então, quanto menor a área, menor a demanda máxima e menor a quantidade de iterações. Para exemplificar, as Tabelas 5 e 6 apresentam

alguns valores obtidos. Na Tabela 5 são apresentados os valores tirados da própria série histórica, como a precipitação máxima e a média. Já na Tabela 6 são descritas as demandas máximas para cada área de captação.

TABELA 5 - VALORES OBTIDOS DA SÉRIE HISTÓRICA

Total de Registros	Precipitação máxima (mm)	Precipitação média diária (mm)
34.333	146,20	3,49

TABELA 6 - ÁREA E DEMANDAS OBTIDAS DA SÉRIE HISTÓRICA

Área (m²)	Demanda máxima (L)
5	17,0
25	83,0
50	166,0
75	249,0
100	332,0

Na Tabela 5, a precipitação máxima é a maior ocorrência diária dentre todos os registros históricos, e a precipitação média é a média aritmética de destes, incluindo dias secos. Após rodar o programa com aqueles valores definidos, a saída consistiu em um arquivo com 3.573 volumes de reservatório, um para cada área e demanda. Já na Tabela 6 vale citar que os valores de demanda são todos inteiros e arredondados para cima.

Nota-se que há um padrão entre a área e o valor da demanda máxima, o que aparenta haver um vínculo entre as duas variáveis. Com isso, o item 5.3 apresenta a relação entre elas e o volume.

5.3 VOLUME DO RESERVATÓRIO PARA CADA CENÁRIO

No mesmo contexto, foram gerados vários tamanhos de reservatório para cada cenário entre área e demanda. Para demonstrar esses valores, tem-se a Figura 8, que relaciona as duas variáveis e o valor do volume do reservatório para cada situação.

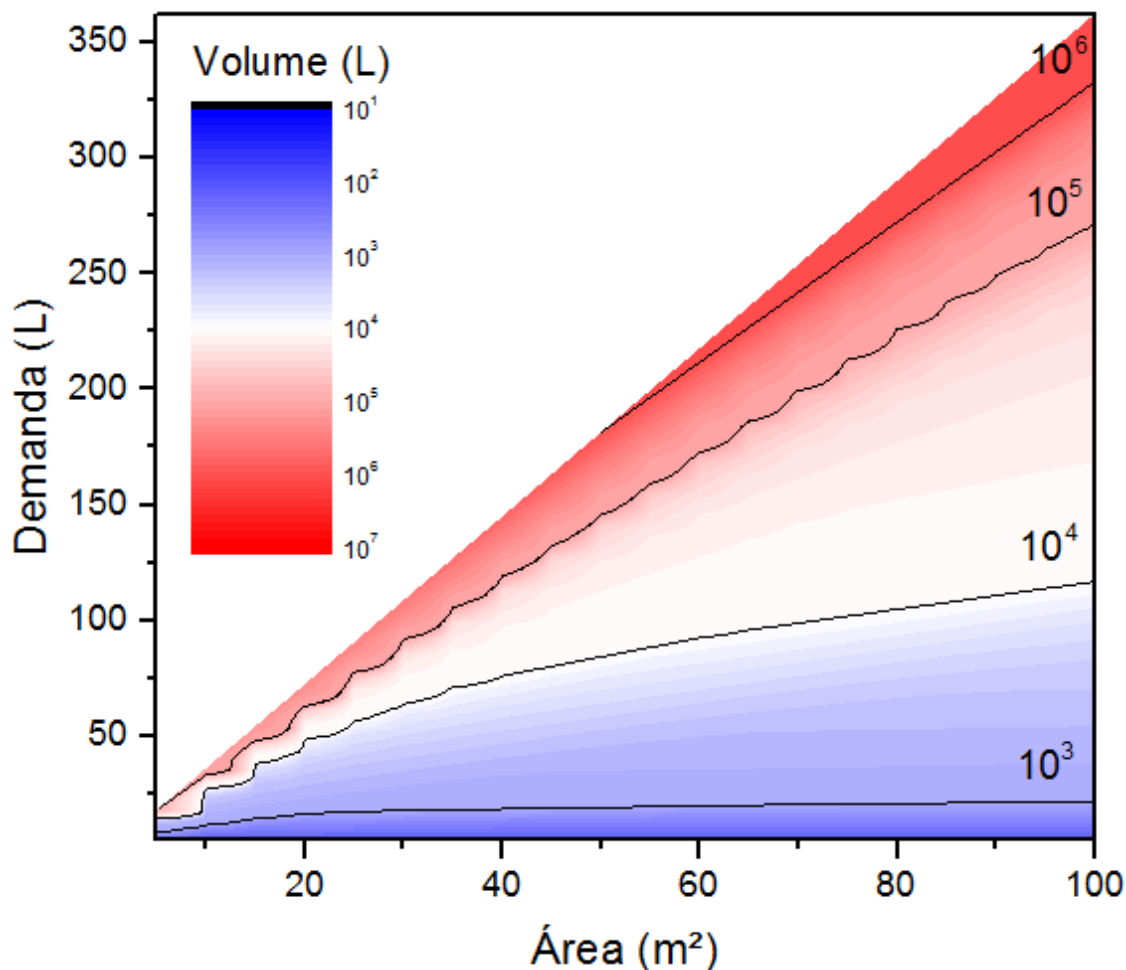


FIGURA 8 - VOLUMES DO RESERVATÓRIO PARA DIVERSOS CENÁRIOS (EM ESCALA LOGARÍTMICA) NA SÉRIE HISTÓRICA

Na Figura 8, o eixo ordenado representa as demandas e o eixo das abcissas representa a área de captação. Já o volume está representado pela barra de cores e linhas no gráfico em escala logarítmica. Cada uma das linhas pretas descreve os volumes de 10^1 L, 10^2 L, 10^3 L, e assim sucessivamente até o valor de 10^7 L, enquanto as cores apresentam as faixas de valores dos volumes.

Observa-se que a demanda máxima é proporcional à área de captação, pois à medida que a área aumenta a demanda também aumenta; sendo que seu valor máximo depende da precipitação média como se pode observar.

Como o volume depende da área e da demanda, pode-se entender que quanto maior a área e a demanda de utilização, este será maior. Na Tabela 7 estão descritos os volumes máximos para cada cenário.

TABELA 7- VOLUME MÁXIMO DO RESERVATÓRIO PARA CADA CENÁRIO

Área (m ²)	Demanda Máxima por dia (L)	Volume do reservatório (L)
5	17	1.194,5
10	33	1.711,5
15	50	2.782,5
20	66	3.790,5
25	83	5.718,5
30	99	6.786,0
35	116	9.563,0
40	133	12.538,0
45	149	15.338,0
50	166	18.833,0
55	182	22.561,0
60	199	26.522,0
65	216	32.769,0
70	232	32.410,0
75	249	40.937,0
80	265	49.860,0
85	282	60.934,0
90	298	89.924,0
95	315	124.110,0
100	332	216.378,0

Portanto, tanto pelo gráfico quanto pela tabela, percebe-se que quando a demanda de água é muito alta o volume do reservatório é extremamente grande, o que torna impossível de viabilizar o sistema para qualquer edificação com até 100 m² de telhado. A área de captação também influencia, mas não é determinante, nota-se que a variação na demanda interfere muito mais no tamanho do reservatório.

Pela Figura 8 nota-se que apenas quando a demanda é pequena é que se tem um volume viável para um reservatório residencial; logo, devem ser realizadas análises para identificar os motivos para estes resultados e apresentar soluções para isto.

Um dos fatores que influencia diretamente no volume do reservatório é o coeficiente de *runoff*. Neste caso foi adotado o valor de 0,95, significando que 5% da chuva que cai sobre o telhado é perdida pela ação do escoamento. Se o coeficiente de *runoff* diminuir, o volume do reservatório aumenta, em virtude do aumento das perdas por escoamento. Para exemplificar esta situação a Figura

9 apresenta como se dá a interferência do coeficiente de *runoff* no volume do reservatório.

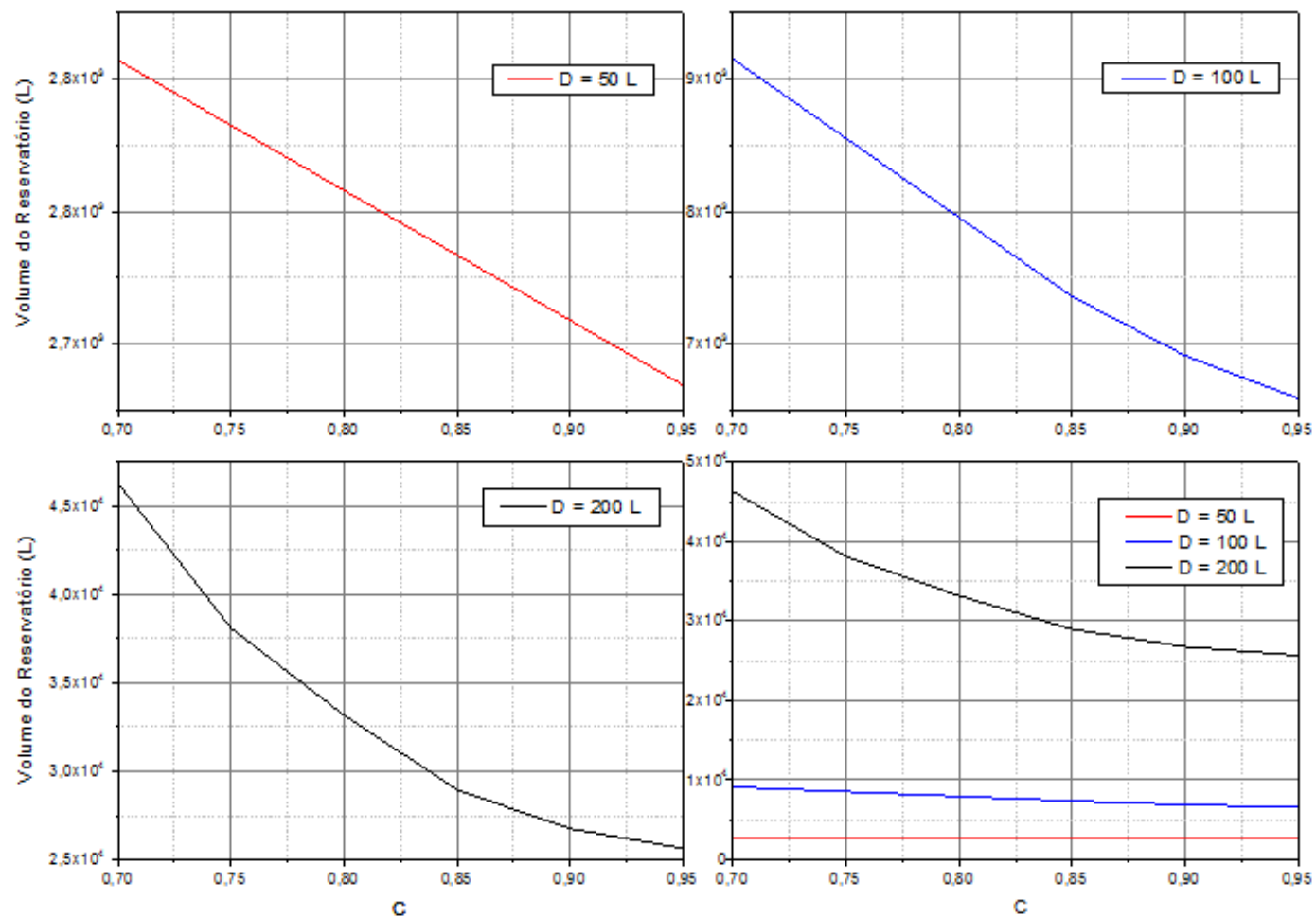


FIGURA 9 - COMPARAÇÃO ENTRE TRÊS DEMANDAS DIFERENTES E A RELAÇÃO ENTRE OS VOLUMES E COEFICIENTES DE RUNNOFF

Nota-se uma grande variação quando se modificam as demandas. Percebe-se que, ao utilizar uma demanda menor, no caso da Figura 9 igual a 50 L, a relação entre a variação do coeficiente de *runnoff* e o volume do reservatório é visivelmente linear. Contudo, quando a demanda é maior, no caso 200 L, já não se pode fazer esta afirmação. Além disto, para a demanda menor, a variação do volume do reservatório é muito pequena se comparada à variação para uma demanda maior. Na Figura 9, quando a demanda é de 50 L o volume varia aproximadamente 1000 L, enquanto com uma demanda de 200 L, o volume varia cerca de 2.000 L

5.4 PROBABILIDADE E RISCO

Foi realizada uma análise da probabilidade do sistema falhar com base nos valores obtidos pelo método do Máximo Déficit Acumulado aplicado à série histórica. Calcularam-se quais os maiores déficits em cada ano, com uma demanda diária de 100 L, e estes foram dispostos em ordem crescente. Com isso obteve-se a probabilidade de ocorrência daquele valor, gerando assim probabilidades de falha do sistema de captação, apresentado na Figura 10.

Identifica-se claramente na Figura uma função distribuição de probabilidade, onde no eixo das ordenadas se tem a probabilidade de falha do sistema e no eixo das abcissas se tem o Máximo Déficit Acumulado, que representa o volume necessário do reservatório pra suprir a demanda do sistema quando não há precipitações.

Quando há muitos dias secos, é fundamental que haja água no reservatório para que a demanda na edificação seja atendida. Logo, quando o volume do reservatório é maior significa que houve um período com muitos dias sem chuva, dentre todos os registros históricos. Com isso, além da demanda e da área é fundamental levar em consideração o regime de chuvas no dimensionamento.

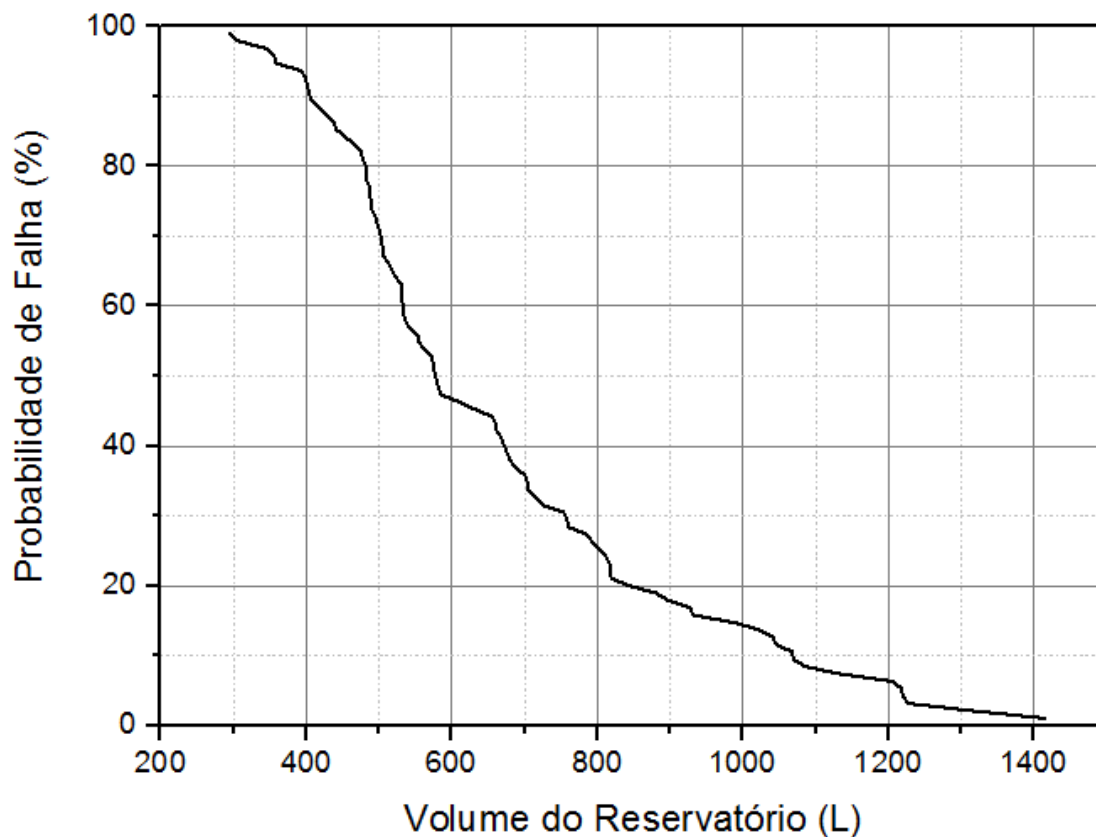


FIGURA 10 - PROBABILIDADE DE FALHA EM RELAÇÃO AO DÉFICIT ACUMULADO PARA UMA DEMANDA DE 100 L

Também se pode afirmar que, como o volume e a demanda dependem da área, que essa pode ter um valor fixado e apenas as outras duas variáveis mudar. Com isso atrelado ao conceito de probabilidade de falha, se tem uma relação entre área, demanda, volume e risco.

Com os valores obtidos da saída do modelo, estabeleceu-se dois novos valores, a demanda em relação a área (Dem/A) e o volume em relação a área (V/A). Portanto, fixou-se um valor para a área igual a 100 m^2 e foram gerados volumes para diferentes demandas. Baseando-se no mesmo conceito de falhas para os máximos déficits acumulados, calculou-se a probabilidade de risco em cada um dos cenários, e o resultado é apresentado na Figura 11.

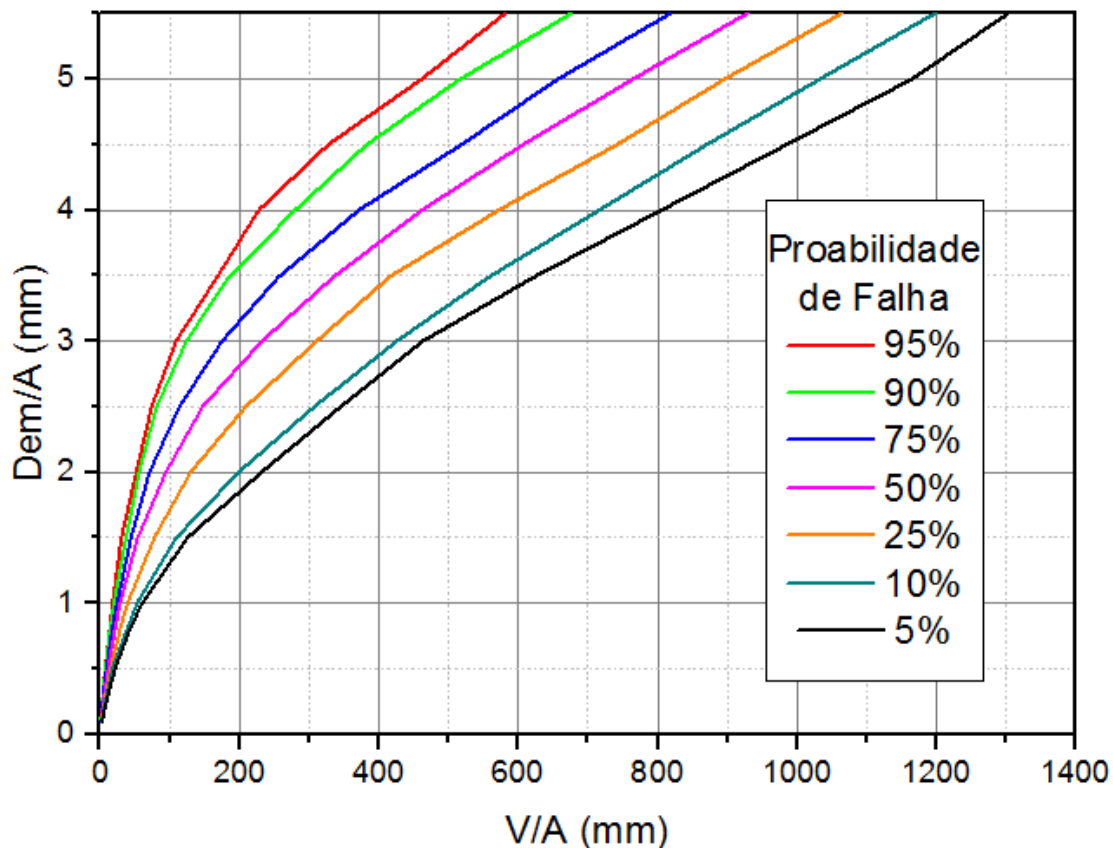


FIGURA 11 - PROBABILIDADE DE FALHA EM FUNÇÃO DA DEMANDA E VOLUME DO RESERVATÓRIO RELATIVOS A ÁREA DE CAPTAÇÃO PARA A SÉRIE HISTÓRICA

Cada linha no gráfico representa uma probabilidade de falha, sendo que cada uma delas foi gerada a partir das razões entre demanda e área (Dem/A) e volume e área (V/A). Na Figura percebe-se que independente da área que o usuário tenha é possível encontrar o volume do reservatório necessário. Adota-se um risco de ficar sem água e a demanda que se precisa atender, fazendo a razão desta pela área de captação obtém-se o volume.

Ao optar por um alto risco e uma demanda alta o volume do reservatório será muito maior, contudo, se o usuário preferir mais estabilidade do sistema é preferível adotar um risco ou uma demanda menor. Percebe-se também que em demandas muito pequenas o risco não é representativo, e nestes casos o volume necessário também é menor.

É possível ainda realizar uma análise semelhante a esta, porém em escala ampliada, para que os valores possam ser visualizados da melhor maneira, e utilizados na definição do volume do reservatório. O gráfico é apresentado na Figura 12.

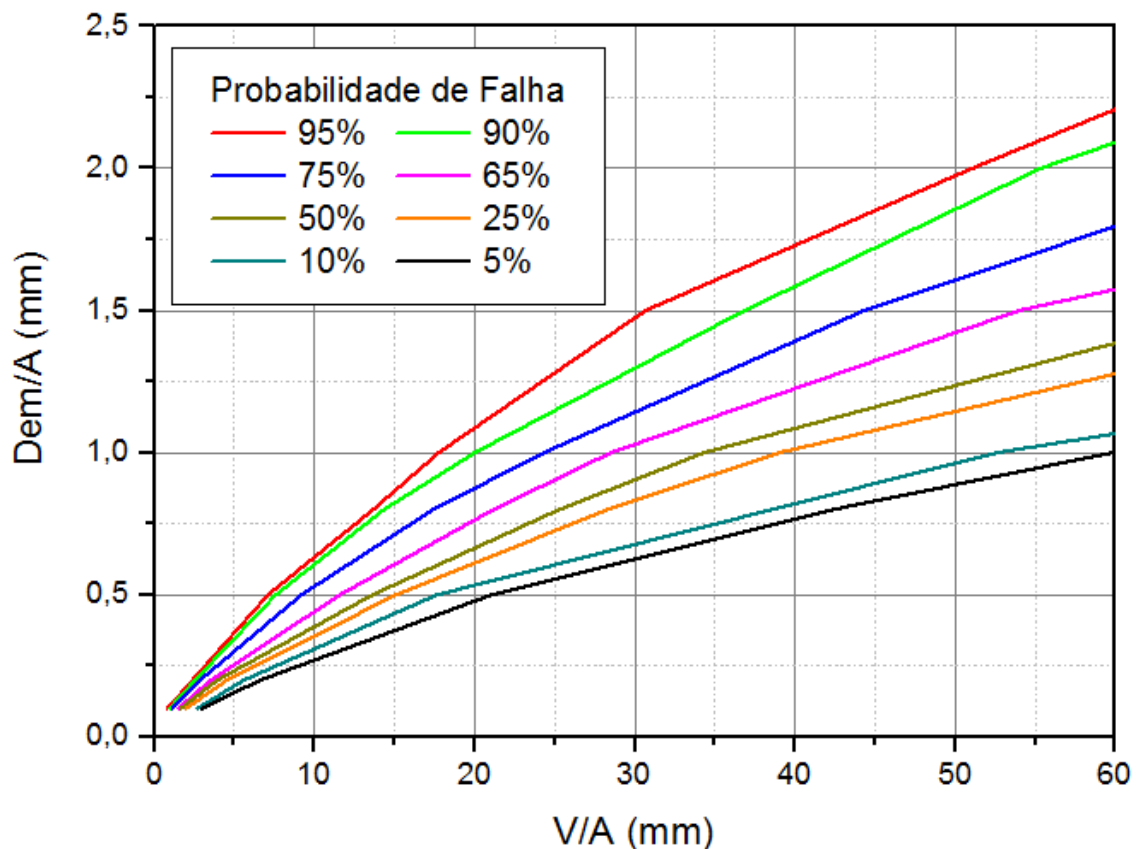


FIGURA 12 - PROBABILIDADE DE FALHA EM FUNÇÃO DA DEMANDA E VOLUME DO RESERVATÓRIO RELATIVOS A ÁREA DE CAPTAÇÃO EM ESCALA AMPLIADA PARA A SÉRIE HISTÓRICA

Nota-se o mesmo padrão da Figura 11, contudo, as razões de V/A são bastante menores e são facilmente identificáveis, então a escolha de um volume para o reservatório se torna mais adequada. Por exemplo, como a área é fixada em 100 m^2 , para uma demanda de 100L por dia e atribuindo uma probabilidade de falha de 25% , o volume do reservatório necessário para o usuário não ficar sem água é de cerca de 4000L . Além disso, há mais probabilidades associadas, facilitando a escolha do nível de risco.

Como explicado no item 4.3.4, o risco depende da probabilidade de falha e de um período definido, logo, a relação entre as probabilidades de falha apresentadas nas Figuras 11 e 12 e o risco hidrológico tem-se a seguinte situação apresentada na Tabela 8.

TABELA 8- RISCO HIDROLÓGICO ASSOCIADO ÀS PROBABILIDADES DE FALHA NO SISTEMA DE CAPTAÇÃO

Probabilidade de falha	Número de anos					
	1	2	5	10	15	20
0,05	5,00%	9,75%	22,62%	40,13%	53,67%	64,15%
0,1	10,00%	19,00%	40,95%	65,13%	79,41%	87,84%
0,25	25,00%	43,75%	76,27%	94,37%	98,66%	99,68%
0,5	50,00%	75,00%	96,88%	99,90%	100,00%	100,00%
0,65	65,00%	87,75%	99,47%	100,00%	100,00%	100,00%
0,75	75,00%	93,75%	99,90%	100,00%	100,00%	100,00%
0,9	90,00%	99,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
0,95	95,00%	99,75%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Com a Tabela 8 é possível definir o risco hidrológico associado à utilização de determinada probabilidade. Percebe-se que à medida que a probabilidade de falha aumenta, o risco diminui. Isto provém da Equação 30, que diz que o risco depende desta probabilidade e do número de anos que se pretende avaliar.

5.4.1 Probabilidade de ocorrência de chuva

Como o modelo para geração das séries sintéticas utiliza as informações de ocorrência de chuva em um dia condicionado à ocorrência de chuva ou não no dia anterior (ver item 4.4), viu-se a necessidade de apresentar estas informações. A partir da série histórica, o modelo calcula estas probabilidades mensalmente para gerar os dias em que há precipitação.

Logo, na Tabela 9 são apresentadas as probabilidades mensais de ocorrência de chuva no dia com chuva no dia anterior ($P(C|C)$) e com dia anterior seco ($P(C|S)$), e de ocorrência de dia seco com chuva no dia anterior ($P(S|C)$) e com dia anterior seco ($P(S|S)$).

É possível notar que as probabilidades mensais mantêm o mesmo padrão, e independente do mês, as probabilidades $P(C|C)$ e $P(S|S)$ são as maiores.

TABELA 9 - PROBABILIDADE MENSAL DE OCORRÊNCIA DE CHUVAS BASEADO NA OCORRÊNCIA OU NÃO DE CHUVA NO DIA ANTERIOR

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
P(C C)	0,722	0,786	0,666	0,635	0,621	0,632
P(S C)	0,278	0,311	0,334	0,399	0,379	0,401
P(C S)	0,484	0,486	0,451	0,419	0,393	0,341
P(S S)	0,516	0,612	0,549	0,614	0,607	0,692
	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
P(C C)	0,602	0,521	0,612	0,588	0,615	0,655
P(S C)	0,398	0,479	0,421	0,412	0,418	0,345
P(C S)	0,297	0,267	0,354	0,374	0,365	0,411
P(S S)	0,703	0,733	0,679	0,626	0,668	0,589

5.5 GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO

Como dito anteriormente, para gerar as séries sintéticas foi utilizado o software CLIMA BR, desenvolvido por Oliveira (2003), e como este utiliza de uma série de dados histórica obtida de bancos de dados hidrológicos diversos, empregou-se a série já utilizada para realizar as análises de dimensionamento do reservatório.

A estação pluviométrica é a 2549006, localizada na cidade de Curitiba – PR, e suas informações foram obtidas do sítio Hidroweb (ANA). A série histórica utilizada possui 94 anos de dados diários de precipitação, contudo, o modelo permite que a série sintética tenha um tamanho qualquer. Ela apenas terá características semelhantes à série original.

Portanto definiu-se para a série sintética um horizonte de 1000 anos, e após o programa rodar obteve-se um arquivo de saída com 365.242 dados sintéticos de precipitação, que apesar de conter informações diferentes em cada dia, possuem as mesmas estatísticas da série histórica. As estatísticas da série sintética comparada com a série histórica estão descritas na Tabela 10.

Nota-se que a média, o desvio padrão e a variância de ambas as séries possuem valores muito semelhantes, mantendo um erro proporcional menor que 10%. Além disso, a precipitação máxima e a quantidade de dias secos e chuvosos da série sintética também se aproximam destes valores da série histórica.

TABELA 10 - COMPARAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA COM A SÉRIE SINTÉTICA

	Série Histórica	Série Sintética
Média (mm)	3,49	3,76
Desvio Padrão (mm)	9,17	9,32
Variância (mm)	84,02	86,89
Precipitação Máxima (mm)	146,20	154,00
Proporção de Dias Secos (%)	49,80%	51,00%
Proporção de Dias Chuvosos (%)	50,20%	49,00%

Apesar disto, os registros diários são bastante diferentes dos dados diários sintéticos. Portanto, a série sintética gerada pelo programa CLIMA BR condiz com seu objetivo, pois representa a série histórica com informações diferentes das originais e mantém os parâmetros estatísticos semelhantes.

5.5.1 Análise da Série Sintética

Assim como realizada na série histórica, é importante fazer uma análise dos dados da série sintética, como se dá sua distribuição e se ela mantém as mesmas características da série histórica.

Alguns parâmetros estatísticos se perpetuam, como apresentado na Tabela 9; contudo, é interessante avaliar se a série como um todo condiz com a série histórica. Portanto, fez-se como no item 5.1 e verificou-se a frequência dos valores de precipitação, apresentada na Figura 13. Já a distribuição das precipitações acumuladas durante o ano é mostrada na Figura 14.

Percebe-se na Figura 13, que, da mesma maneira que na série histórica, a distribuição de frequências de precipitações da série sintética é semelhante, pois a maioria dos registros diários está abaixo de 5 mm e à medida que aumentam as precipitações, a quantidade de dados diminui. Assim como na série histórica, acima de 80 mm a quantidade de registros é pouquíssima representativa, e, portanto, não se viu a necessidade de apresentar as informações.

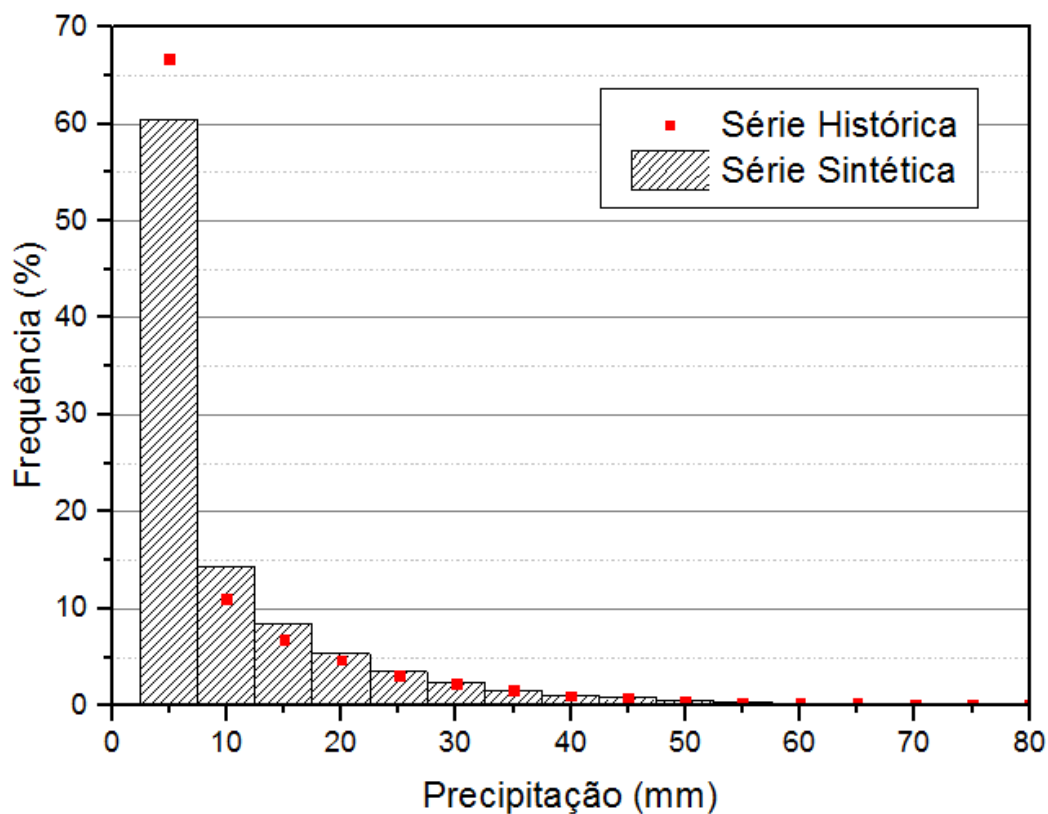


FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DOS DIAS CHUVOSOS DA SÉRIE SINTÉTICA

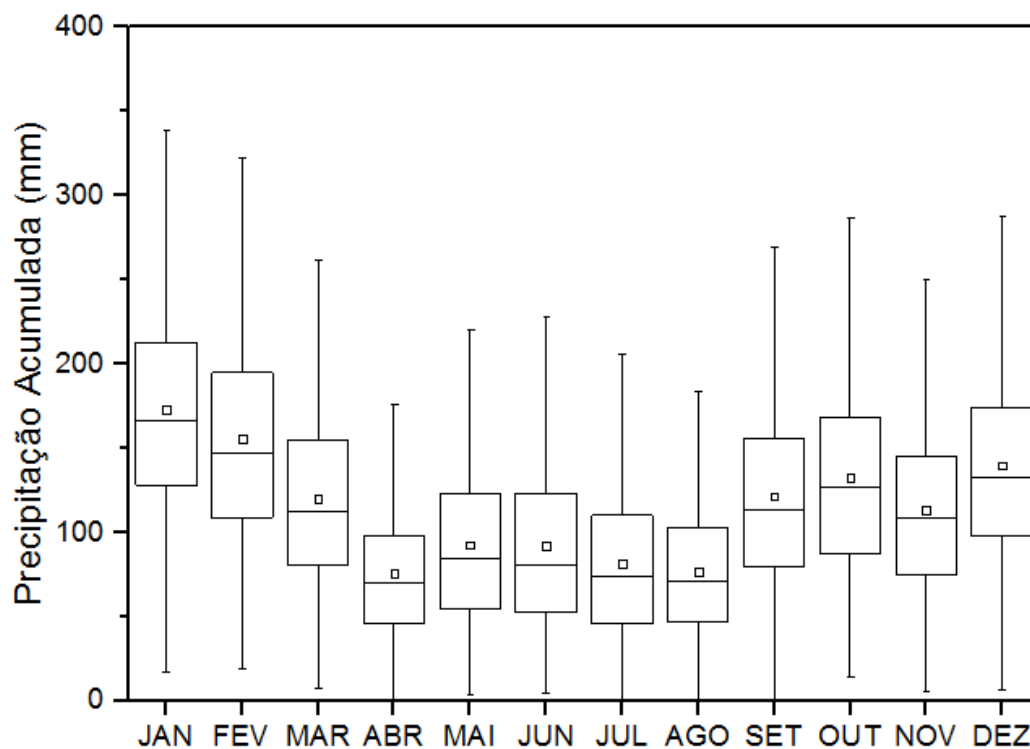


FIGURA 14 - DIAGRAMA DAS DISTRIBUIÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DURANTE OS MESES DO ANO NA SÉRIE SINTÉTICA. OS LIMITES SUPERIOR E INFERIOR REPRESENTAM MÁXIMOS E MÍNIMOS, RESPECTIVAMENTE; OS QUARTIS SUPERIOR E INFERIOR

REPRESENTAM 75% E 25% DOS DADOS; A LINHA NO MEIO REPRESENTA A MEDIANA E O QUADRADO REPRESENTA A MÉDIA

Sobre as precipitações acumuladas da série sintética, apresentadas na Figura 14, pode-se afirmar que também se assemelha à série histórica, pois apresenta os mesmos períodos seco e chuvoso durante o ano. A principal diferença neste caso é que as precipitações acumuladas em cada mês são maiores.

5.5.2 Relação Área x Demanda x Volume

Da mesma forma como foi feito com a série histórica, utilizou-se o programa desenvolvido pelo próprio autor para se obter diversos volumes de reservatório através de variações na área e na demanda. Assim como mostrado no Item 5.2, para dimensionar o reservatório, além destas duas variáveis é necessário o coeficiente de *runoff*, que foi considerado igual a 0,95. As áreas foram variadas entre 5 e 100 m² com incrementos de 5 m² e a demanda variou de 5 L ao “máximo valor de demanda” (Ver item 4.3.1), que depende da precipitação média da série inteira, com incrementos de 1 L. O resultado obtido com essa utilização do modelo é apresentado na Tabela 11 e na Figura 15.

Percebe-se pela Figura 15 que o padrão nos valores de volume em relação à série histórica se mantém. Isto significa que os volumes de reservatório gerados a partir da variação da área e da demanda são semelhantes quando se utiliza a série sintética. Logo, é independente, neste caso, a utilização ou não da série gerada para dimensionar o reservatório de captação.

TABELA 11 - ÁREAS E DEMANDAS OBTIDAS DA SÉRIE SINTÉTICA

Área (m ²)	Demanda máxima (L)
5	18,0
25	94,0
50	189,0
75	284,0
100	379,0

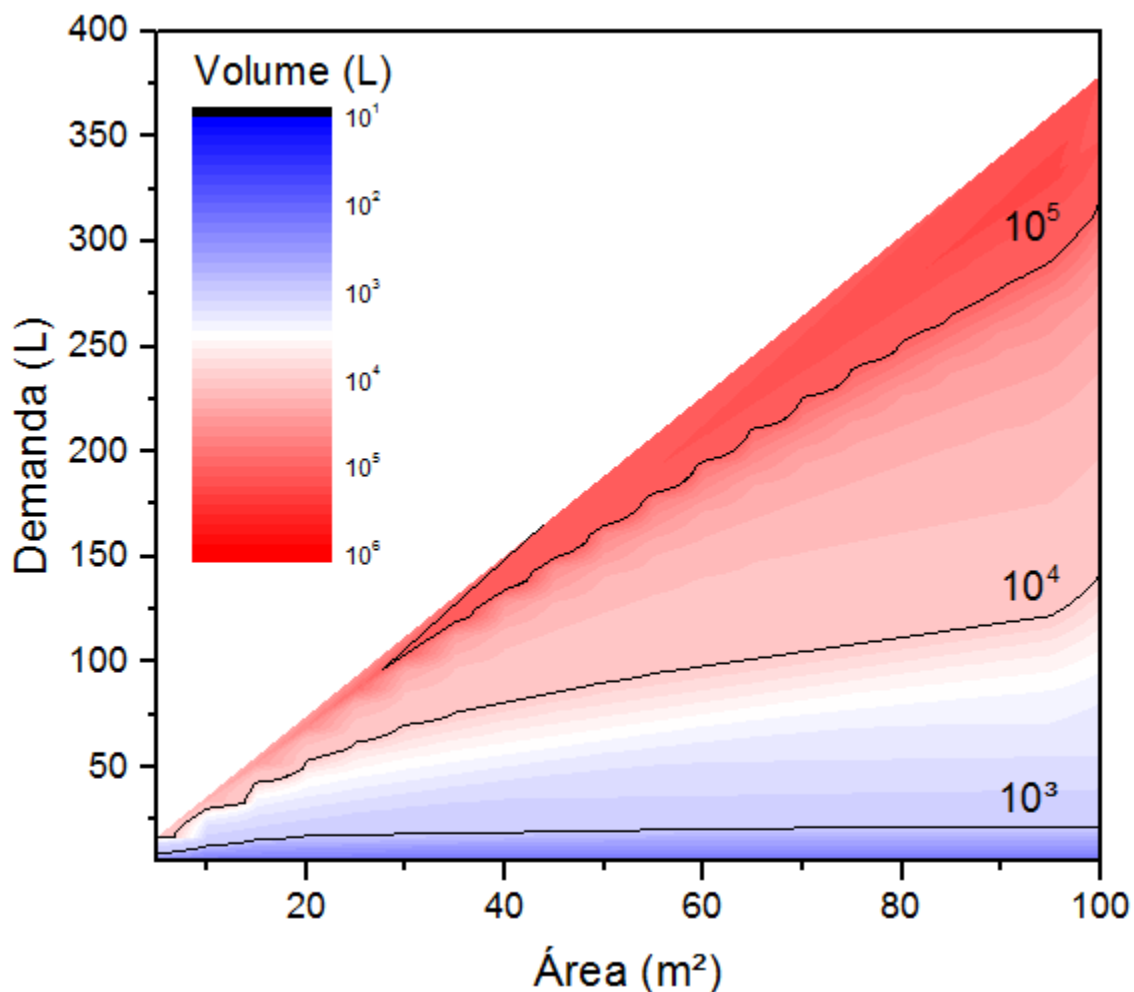


FIGURA 15 - VOLUMES DO RESERVATÓRIO PARA DIVERSOS CENÁRIOS (EM ESCALA LOGARÍTMICA) NA SÉRIE SINTÉTICA

5.5.3 Probabilidade e Risco

Da mesma forma como foi realizada com a série histórica, se viu necessária uma análise das probabilidades e do risco envolvidos com o dimensionamento do reservatório através da utilização da série sintética. Partiu-se do mesmo conceito de probabilidade de falha, e com isso calcularam-se os máximos déficits acumulados (volumes do reservatório) para cada ano com demanda e área fixas. Contudo, desta vez trabalhou-se com mais valores de volume e de probabilidade, devido ao tamanho da série sintética. A probabilidade do sistema falhar foi calculada como sendo o oposto da probabilidade de ocorrência daquele volume em todo o período, logo, tem-se apresentado na Figura 16 a relação entre esses volumes e esta probabilidade de falha.

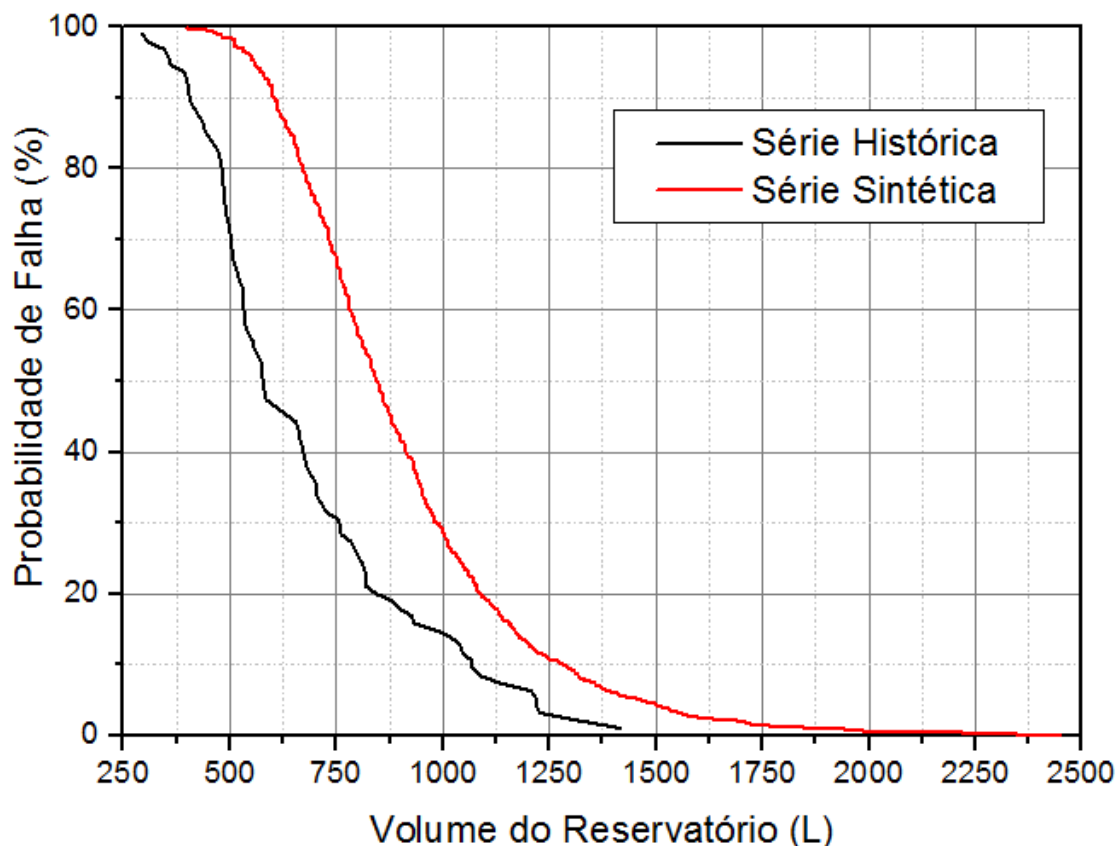


FIGURA 16 - PROBABILIDADE DO SISTEMA FALHAR EM RELAÇÃO AO VOLUME DO RESERVATÓRIO COMPARANDO AS SÉRIES HISTÓRICA E SINTÉTICA.

Nota-se que a curva que representa a série sintética é muito mais suave que a série histórica. Isto provém do fato da sintética possuir muito mais dados do que a histórica, sendo que por esse mesmo motivo, a série varia muito mais quanto ao volume do reservatório. É visível que, com uma mesma demanda, os valores de volume obtidos através do método dos máximos déficits acumulados diferem quando se utilizam cada uma das séries.

Os volumes são próximos quando a probabilidade de falha no sistema é grande, isto é, quando há um reservatório menor, a chance do usuário ficar sem água é grande. Contudo, quando o reservatório é menor, a chance da água acabar é mínima, sendo que, ao se utilizar a série sintética, o volume do reservatório pode ser maior ainda, fazendo com que esta probabilidade diminua ainda mais.

Ainda é relevante realizar a mesma análise feita para a série histórica, onde se comparam as razões entre demanda e área com as proporções entre

volume e área. Assim, calcularam-se as probabilidades de falha no sistema de captação comparadas a estas relações. O resultado é apresentado na Figura 17.

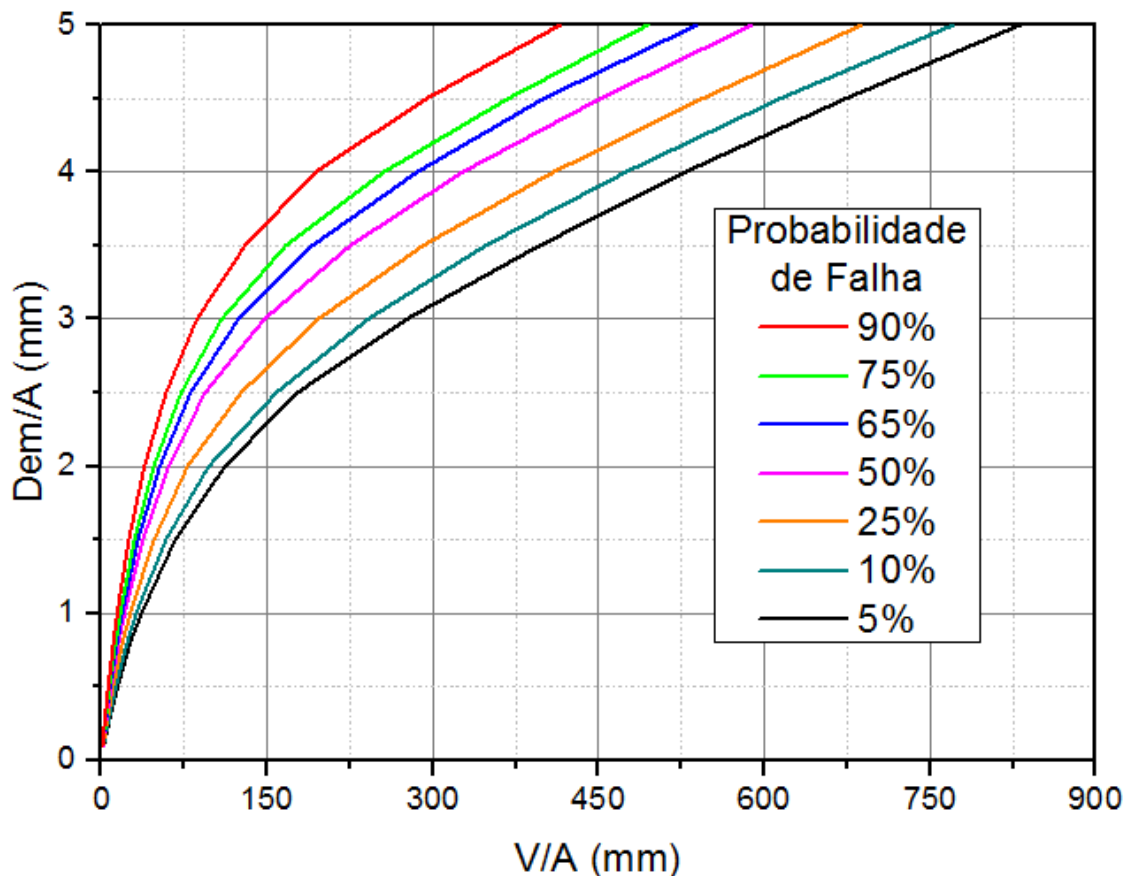


FIGURA 17 - PROBABILIDADE DE FALHA EM FUNÇÃO DA DEMANDA E VOLUME DO RESERVATÓRIO RELATIVOS A ÁREA DE CAPTAÇÃO PARA A SÉRIE SINTÉTICA

Como a área de captação utilizada para a elaboração da Figura 17 é fixada em 100 m², assim como a Figura 11 (ver item 5.4) é necessário comparar as duas. Diferentemente da Figura 11, a razão entre vazão e área para a série sintética atinge valores menores para as mesmas probabilidades de falha. Isto significa que para os valores de demanda apresentados no gráfico e as probabilidades de falha associadas, a utilização da série sintética gera valores de volume mais razoáveis.

Ainda assim, viu-se necessário aproximar a escala do gráfico para demandas e volumes mais usuais. Portanto, a Figura 18 apresenta estas relações, entre demanda e volume para uma área fixada, com diferentes probabilidades do sistema falhar.

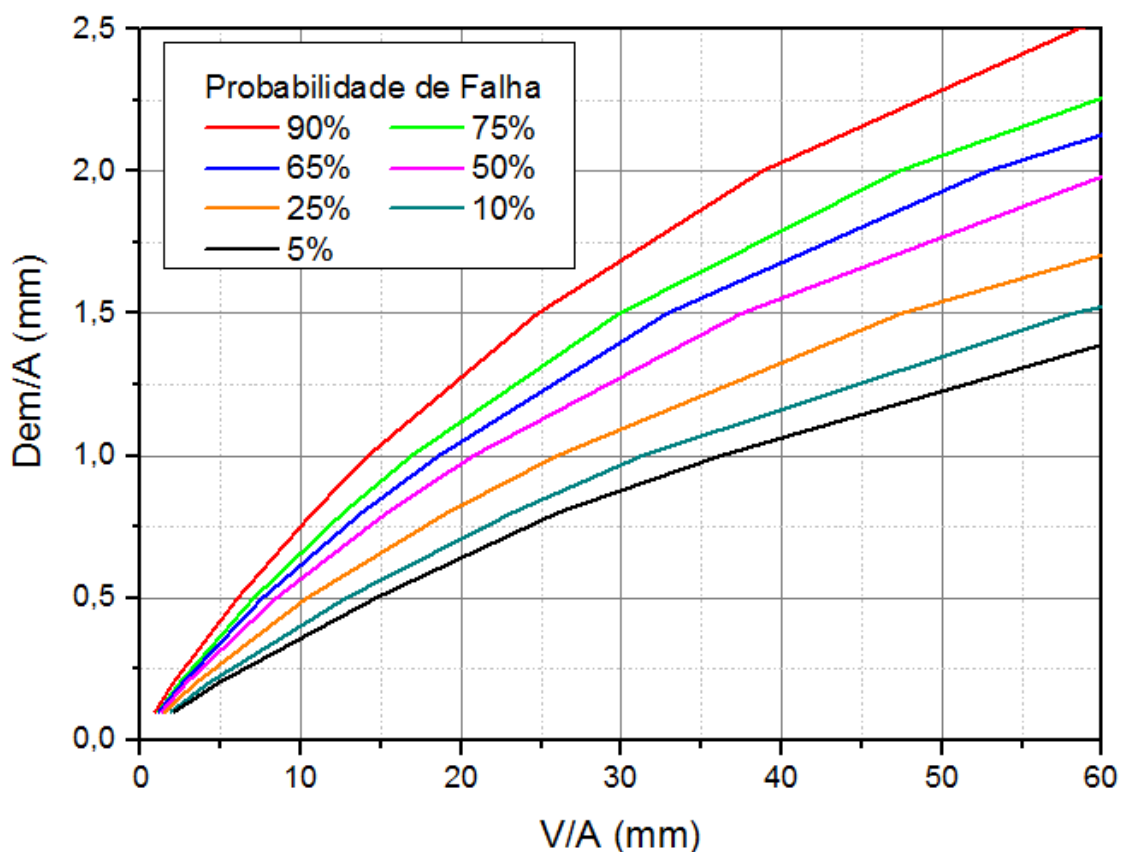


FIGURA 18 - PROBABILIDADE DE FALHA EM FUNÇÃO DA DEMANDA E VOLUME DO RESERVATÓRIO RELATIVOS A ÁREA DE CAPTAÇÃO EM ESCALA AMPLIADA PARA A SÉRIE SINTÉTICA

Percebe-se que a Figura 18 mantém o mesmo padrão da Figura 12 (ver item 5.4), e que cada linha que representa uma probabilidade de falha diferente também se assemelham umas das outras. A utilidade em se trabalhar com a Figura neste formato está no fato de que os valores de volume e demanda são mais tangíveis. Assim como na série histórica, estes dados da série sintética podem ser utilizados para definir o volume do reservatório através da definição de uma demanda diária e uma probabilidade do sistema falhar. Como a área é fixa em 100 m², se o usuário definir uma demanda de 100 L e uma probabilidade de falha de 25%, o volume do reservatório será aproximadamente 2550 L, um tamanho palpável para se ter em qualquer residência com uma demanda dessas.

5.6 AVALIAÇÃO DE OUTROS MÉTODOS

Antes de finalizar, é interessante avaliar se os outros métodos de dimensionamento do reservatório podem ser comparados ou aplicados de alguma forma à metodologia apresentada neste trabalho. Com isso, apresenta-se a Tabela 12, com os métodos do item 3.4.7 e com as devidas observações relacionadas a cada um.

TABELA 12 – VOLUMES OBTIDOS POR OUTROS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO. UTILIZOU-SE A ÁREA DE CAPTAÇÃO IGUAL A 100 m² E NOS CASOS EM QUE A DEMANDA É CONSIDERADA, ESTA FOI DEFINIDA COMO 100 L

Nome do Método	Volume Obtido (L)	Demanda é considerada?	Dados de precipitação
Método da Simulação	6.260	Sim	Diários
Método Azevedo Neto	31.690	Não	Mensais
Método Prático Alemão	1.680	Sim	Anuais
Método Prático Inglês	6.375	Não	Anuais
Método Prático Australiano	7.290	Sim	Mensais

Viu-se necessário apresentar se cada um dos métodos utiliza a demanda no cálculo do tamanho do reservatório e de que forma são utilizadas as informações de precipitação. Cada um deles tem a sua particularidade; contudo, todos dependem da área de captação, e apenas alguns dependem da demanda.

Como os cálculos foram realizados com a série histórica, estes valores podem ser aplicados na Figura 11, tanto nos métodos em que há dependência da demanda quanto naqueles em que esta não é utilizada. Os valores de volume e demanda podem ser empregados na Figura e assim obter probabilidades de falha.

No caso dos métodos Azevedo Neto e Prático Inglês, em que não se utiliza a demanda, a razão entre o volume e a área de captação é sobreposta na Figura e obtém-se a demanda máxima que pode ser utilizada para determinada probabilidade.

5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante citar que após a geração da série sintética, as probabilidades de ocorrência ou não de chuva neste caso são indiferentes e não serão utilizadas na comparação. Logo, não viu-se necessária a confecção de uma tabela comparativa destas probabilidades de ocorrência de precipitação da série sintética com a Tabela 9, que trata sobre a série histórica (ver item 5.4.1).

Além disso, a informação sobre o risco também se mantém a mesma, visto que depende apenas da probabilidade de falha. Por não depender da variação da demanda, da área, do volume ou do período de registro de dados, o risco associado ao sustento do sistema de captação de água da chuva depende apenas do tempo que se pretende atribuir à vida útil deste e da probabilidade de falha que o próprio usuário define. Logo, tanto para a série histórica quanto para a série sintética, a relação de risco com a probabilidade permanece como apresentado na Tabela 8.

Por fim, vale citar que nos gráficos em que se relacionam as razões de demanda pela área e volume pela área com as diversas probabilidades do sistema falhar apresentaram-se aqueles em que a área de captação foi fixada em 100 m². Porém, deve-se informar que se buscou analisar se havia diferenças entre a utilização de áreas diferentes. Chegou-se à conclusão de que não há desigualdades aparentes no gráfico quando se utilizam áreas diferentes, e, portanto, as Figuras 11, 12, 17 e 18 dependem apenas das demandas diárias e das probabilidades de falha definidas pelo usuário, sendo que o volume do reservatório é obtido através do método do máximo déficit acumulado.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados pode-se chegar à algumas conclusões referentes ao dimensionamento do reservatório de captação de água da chuva e a utilização de séries sintéticas de precipitação para a modelagem deste.

Primeiramente, a análise a respeito dos volumes gerados a partir de variações na demanda diária e na área de captação é bastante relevante, pois é possível se ter uma ideia de como este se modifica de acordo estas alterações. É óbvio que, nos resultados apresentados, há diversos valores de volume que não condizem com a realidade, pois são praticamente impossíveis de serem reservados por qualquer caixa d'água ou cisterna, pois são valores extremamente grandes. Contudo, a partir das Figuras 8 e 14 é possível retirar diversos tamanhos de reservatório somente com um valor de demanda e de área de captação e, portanto, é possível que qualquer leitor deste trabalho dimensione um reservatório apenas com estas informações.

Além disso, se o usuário deste buscar algo a mais para precisar o tamanho do reservatório é viável utilizar os conceitos de probabilidade e risco. Atribuindo-se um tempo de vida útil desejado e uma probabilidade do sistema falhar tem-se o risco do reservatório esvaziar. Pode-se também fazer a análise de forma inversa, atribuindo um risco aceitável e com isso encontrar uma probabilidade de falha no sistema. Tendo esses valores também é possível dimensionar o reservatório com a demanda e a área. Porém, diferentemente do caso anterior, neste não há a necessidade de encontrar um ponto no gráfico em que se tenha a demanda e a área que se desejam utilizar, pois apenas a demanda varia a partir de uma área fixa.

Como já exemplificado em Resultados (Capítulo 5), se a intenção for utilizar uma área fixa e atrelar a isso uma probabilidade basta usar a informação sobre a demanda para encontrar o volume do reservatório. Este é facilmente identificável, pois a relação se dá entre as razões de demanda e área e volume e área. Se o desejo for utilizar uma probabilidade de falha que não está apresentada no gráfico basta realizar uma interpolação entre as linhas o gráfico para obter o volume associado à falha que se definiu.

Quanto à série sintética, deve-se citar que não houve dificuldades acerca disso, visto que a utilização do software CLIMA BR permitiu que a geração fosse feita de forma rápida e objetiva. Comparando-se com a série histórica observou-se que não há diferenças aparentes entre uma e outra. A série gerada mantém o mesmo padrão da histórica quando se tratam de parâmetros estatísticos, como a média, o desvio padrão e a variância. Além disso, a série sintética possui proporções semelhantes de dias secos e chuvosos, o que mostra uma boa representação da série histórica por parte da gerada.

Isto pode ser observado através das distribuições mensais de chuva e da frequência dos dias chuvosos. Nos dois casos, a série sintética manteve os mesmos padrões da série histórica. No caso das distribuições, percebeu-se que os períodos secos e chuvosos permaneceram os mesmos, independente da série utilizada. Com relação às frequências ocorreu o mesmo, com pequenas variações na ocorrência das precipitações menores.

O principal benefício em se utilizar a série sintética foi na precisão dos valores. Como a série histórica possui apenas 94 anos de dados discretos, a aplicação da série sintética de 1.000 anos se mostra muito viável para refinar os resultados. Isto fica bem claro na Figura 16, que apresenta a probabilidade de falha para diversos volumes. A linha que representa a série sintética é muito mais suave do que na série histórica, e se houvessem muito mais dados gerados, o gráfico tenderia a uma curva teórica.

Ainda se podem citar os gráficos com diversas probabilidades de falha, onde a série sintética apresenta valores mais coerentes e do que na série histórica. Fez-se necessária aproximar a escala para identificar de forma clara onde os volumes são menores, mas ainda assim é notável que a série gerada apresente valores melhores do que a histórica.

Logo, é indicada a utilização da série sintética no dimensionamento do reservatório de captação de água da chuva. O estudo foi realizado na cidade de Curitiba, mas se deve levar em consideração que muitas cidades não apresentam muitos registros históricos, e com isso as séries sintéticas se mostram como a melhor alternativa. Se houver necessidade, estas podem ser geradas a partir de outros modelos e softwares, para que se chegue à maior exatidão possível quando compará-las com a série histórica.

A captação de água da chuva se apresenta como uma grande possibilidade para aqueles que buscam economia de água e, conseqüentemente, custos. Diversos locais utilizam tecnologias diferentes de captação para estocar água em quantidade suficiente para a manutenção das atividades diárias. Todavia, o dimensionamento correto e eficiente do reservatório para que o sistema não fique sem água é de extrema relevância para essas questões, pois independente da maneira como a água é captada, o mais importante é como e quanto será armazenado desta água.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 10844/1989 - **Instalações prediais de águas pluviais**

ABNT NBR 12213/1992 - **Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público**

ABNT NBR 12214/1992 - **Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público**

ABNT NBR 12217/1994 - **Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público**

ABNT NBR 5628/1998 - **Instalação predial de água fria**

ABNT/NBR 15527/2007 – **Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos.**

ANDERSEN, C. CARISSIMI, E. SANAGIOTTO, D. G. **Aproveitamento das águas pluviais para fins não potáveis no Aeroporto Salgado Filho (Porto Alegre/RS - Brasil).** XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011. Brasil.

CAMPOS, J. N.; STUDART, T. M. C. **Método de Monte Carlo e SIMRES: Laboratório computacional para análise de reservatórios.** IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 1991. Brasil.

CARVALHO, R. S. **Potencial econômico do aproveitamento de águas pluviais: análise da implantação de um sistema para a região urbana de Londrina.** Universidade Federal do Paraná. 2010. Apucarana, Paraná, Brasil.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrología Aplicada.** McGraw-Hill Interamericana S.A. Tradução de SALDARRIAGA, J.G. Santafé de Bogotá, Colombia. 1994.

COHIM, E.; GARCIA, A.; KIPERSTOK, A. **Captação e aproveitamento de água da chuva: dimensionamento de reservatórios.** IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. 2008. Brasil

COUTINHO, A. P.; GUSMAO, P. T. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONIO, A. C. D.; CABRAL, J. J. S. P.; SILVA, F. B.; SILVA, R. O. B. **Comparação de diferentes metodologias para dimensionamento de sistemas de captação de água de chuva em meso- regiões do estado de Pernambuco.** XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011. Brasil.

DETZEL, D. H. M. **Geração de séries sintéticas de precipitação.** Universidade Federal do Paraná. 2009. Curitiba, Paraná, Brasil.

DIAS, D. M.; MARTINEZ, C. B.; LIBÂNIO, M. **Avaliação do impacto da variação da renda no consumo domiciliar de água.** Engenharia Sanitária e Ambiental. V. 15, n. 2. 2010. 155-166.

FENDRICH, R. **Coleta, armazenamento, utilização e infiltração das águas pluviais na drenagem urbana.** Universidade Federal do Paraná. 2002. Curitiba, Paraná, Brasil.

FENDRICH, R.; OLIYNIK, R. **Manual de utilização das águas pluviais – 100 maneiras práticas.** Editora Livraria do Chain. Curitiba, Paraná. 2002. p. v.

FIOCRUZ - Olimpíada Brasileira de Saúde e Meio Ambiente. Mudanças climáticas e a escassez de água. 2015. Disponível em: www.olimpiada.fiocruz.br. Acesso em: 20/11/2016

GIACCHINI, M. **Estudo quali-quantitativo do aproveitamento da água de chuva no contexto da sustentabilidade dos recursos hídricos.** Universidade Federal do Paraná. 2010. Curitiba, Paraná, Brasil.

MARENGO, J. A. **Água e mudanças climáticas**. Estudos avançados V. 22, n. 63. 2008.

MIERZWA, J. C. **Águas pluviais: método de cálculo do reservatório e conceitos para um aproveitamento adequado**. Revista de Gestão de Água da América Latina – V. 4, n. 1, p. 29-37, 2007.

MIRANDA, A. A.; FILL, H. D. O. A. **Avaliação da viabilidade do abastecimento doméstico a partir da coleta das águas pluviais**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2009. Brasil.

Ministério do Meio Ambiente - Disponível em: www.mma.gov.br. Acesso em: 08/10/2015.

NAGHETTINI, M. PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Belo Horizonte, Brasil. p. 109-110. 2007.

OLIVEIRA, V. P. S. **Modelo para Geração de Séries Sintéticas de Precipitação**. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais. Brasil. 2003.

PAZ, A. R. **Hidrologia Aplicada – Texto Básico**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. 2004.

Portaria 2914 de 12 de dezembro de 2011 – Ministério da Saúde

SANTOS, R; TUCCI, C.; SILVEIRA, A.; FILHO, A. S. M. **Estimativa do Hidrograma de Projeto com Base na Incerteza dos Parâmetros do Modelo**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V. 6, n.1. 2001. p. 29-41.

SIMON, F. W. PICKBRENNER, K. MARCUZZO, F. F. N. **Estudo do regime hídrico pluvial e fluvial em bacia hidrográfica com precipitação homogênea**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2013. Brasil.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de Água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis.** Navegar Editora. São Paulo, SP. 2003. p. 18-30.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de Água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis.** 2009. Brasil.

TOMAZ, P. **Curso de manejo de água pluviais.** Cap. 2 – Método Racional. 2012. Brasil.

VIEIRA, A. M.; MENDONÇA, L. C. **Aproveitamento de água da chuva, estudo de caso no município de Aracaju – SE: percepção dos moradores, viabilidade e dimensionamento de reservatórios.** XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011. Brasil.

ZANETTI, S. S. **Modelo computacional para geração de séries sintéticas de precipitação e do seu perfil instantâneo.** Universidade Federal do Viçosa. 2003. Viçosa, Minas Gerais, Brasil.