

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**NATHAN SOARES**

**ESTIMATIVA DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL PARA O ESTADO DO  
PARANÁ**

**TOLEDO-PR  
2021**

**NATHAN SOARES**

**ESTIMATIVA DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL PARA O ESTADO DO  
PARANÁ**

**ESTIMATION OF PROBABLE MAXIMUM PRECIPITATION FOR THE PARANA  
STATE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Toledo.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Alessandro Pansera.

**TOLEDO-PR**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**NATHAN SOARES**

**ESTIMATIVA DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL PARA O ESTADO  
DO PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação  
apresentado como requisito para a obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR) – Campus Toledo.

Dia de aprovação: 26 de novembro de 2021.

---

Orientador

Wagner Alessandro Pansera  
Doutor em Engenharia Agrícola  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Gustavo Henrique Dalposso

Doutor em Engenharia Agrícola  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Benedito Martins Gomes

Doutor em Agronomia  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

**TOLEDO-PR**

**2021**

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato à Deus por ter me conduzido com seu infinito amor e embaixo da sua graça até o final de mais uma etapa. É com alegria que, por meio desse trabalho, encerro esse ciclo que foi tão importante para meu desenvolvimento acadêmico, profissional e sem dúvidas, pessoal. Sou grato à Ele pelas experiências incríveis que vivi, pelos sonhos realizados e por todas as pessoas maravilhosas que conheci nesse período de muito crescimento e aprendizado.

Agradeço a minha família, especialmente à minha mãe, minha vó e minha dinda que sempre apoiaram minhas decisões, me dando suporte emocional e financeiro para conseguir cursar a graduação em outra cidade, longe de casa. Agradeço também aos meus amigos, de dentro e de fora da universidade, que além de me auxiliar com os estudos, também ajudaram a espairecer nos momentos de estresse, facilitando essa caminhada que sem eles, sem dúvida, seria muito mais penosa. Em especial ao melhor equatoriano de todos, meu amigo Sebastian Brito, que me ajudou a desenvolver o software responsável pela seleção dos dados dessa pesquisa.

Deixo meus agradecimentos a UTFPR e a todo seu corpo docente por contribuir para minha formação, compartilhando seus conhecimentos e me auxiliando com todas as minhas dúvidas. Agradeço especialmente ao meu professor orientador Dr. Wagner Alessandro Pansera por me ajudar com o tema desse trabalho e por estar sempre disponível para esclarecer meus questionamentos.

Enfim, à todos os que contribuíram direta ou indiretamente com a realização dessa pesquisa que, acima de tudo, marca a conclusão do curso de graduação em Engenharia Civil.

*Your love is a flood  
and I'm caught in the current  
of your living waters*

Chardon Lewis

## RESUMO

O estudo das chuvas máximas é de grande importância para a sociedade, uma vez que por meio desse é possível encontrar valores de Precipitação Máxima Provável (PMP) que são usados no dimensionamento de estruturas hidráulicas, como reservatórios, barragens, hidrelétricas e etc. A PMP pode ser estimada de diversas formas distintas e por conta da sua praticidade, os métodos estatísticos são largamente utilizados no mundo todo. Um dos métodos recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) é o método estatístico proposto por Hershfield, que junto com os parâmetros estatísticos, utiliza um fator de frequência ( $K_m$ ) na determinação da PMP e considera que todas as amostras possuem um único *outlier*, o que, do ponto de vista estatístico, não pode ser considerado verdade, já que cada conjunto de dados tem suas particularidades. Assim sendo, alguns pesquisadores sugerem uma modificação no processo tradicional: a utilização de um teste identificador de *outlier* (IQR). O presente trabalho selecionou 65 estações pluviométricas no estado do Paraná com pelo menos 50 anos de registro e após a aplicação do teste IQR, 80% das estações apresentaram quantidade de *outlier* diferente de 1. Ainda, os resultados obtidos pelos dois métodos, o tradicional e o modificado, foram comparados e as diferenças chegaram a 57%. O  $K_m$  também foi determinado de duas formas, uma pelo gráfico de Hershfield e outra baseada na curva envelope gerada para o estado paranaense, a comparação entre os fatores de frequência mostrou que o  $K_m$  gerado pelo envelopamento regional foi pelo menos 50% menor em todas as estações estudadas. Além disso, os valores de PMPs foram analisados espacialmente, através de mapas, destacando que as PMPs tendem a seguir o padrão observado na distribuição da classificação climática do estado e que, em geral, PMPs mais altas aparecem nas extremidades leste e oeste e as mais baixas aparecem com mais frequência nas regiões norte e sul do estado. Visto isso, reitera-se que o método modificado apresentou resultados mais seguros e coerentes com a realidade do Paraná, e que pode, sem dúvidas, ser utilizado no dimensionamento de estruturas hidráulicas.

**Palavras-chave:** Precipitação Máxima Provável; Hershfield; Outliers; Estado do Paraná.

## ABSTRACT

The maximum rainfall study has a great importance for society, once it is possible to find Maximum Probable Precipitation (PMP) values that are used in the designing process of hydraulic works, such as reservoirs, dams, hydroelectric plants, etc. PMP can be estimated in several different ways, and because of its practicality, statistical methods are widely used around the world. One of the procedures recommended by the World Meteorological Organization (WMO) is the statistical one proposed by Hershfield, which along with statistical parameters, uses a frequency factor ( $K_m$ ) while determining the PMP and considers that all samples have a single outlier, which, from a statistical point of view, cannot be considered true, since each data set has its own particularities. Therefore, some researchers suggest a modification in the traditional process: the use of an outlier identifier test (IQR). The present work selected 65 rainfall stations in the State of Paraná with at least 50 years record and after applying the IQR test, 80% of the stations presented an outlier amount other than 1. Furthermore, the results obtained by the two methods, the traditional and the modified, were compared and the differences reached 57%. The  $K_m$  was also determined in two ways, one by the Hershfield graph and the other based on the envelope curve generated for the State of Paraná, the comparison between the frequency factors showed that the  $K_m$  generated by the regional enveloping was at least 50% lower in all stations studied. In addition, the PMP values were spatially analyzed, through maps, highlighting that PMPs tend to follow the pattern observed in the distribution of the state's climate classification and, in general, higher PMPs appear in the eastern and western extremities and lower ones appear more frequently in the northern and southern regions of the state. All things considered, it is restated that the modified method presented safer results, consistent with the Parana's reality, and it can, with no doubt, be used in the design of hydraulic structures.

**Key-words:** Probable Maximum Precipitation; Hershfield; Outliers; State of Parana.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ocorrência de desastres hidrológicos entre 1970 e 2021 .....	15
Figura 2 - Mapa global de catástrofes resultantes de enchentes .....	15
Figura 3 - Mapa e localização do estado do Paraná .....	23
Figura 4 - Distribuição da classificação climática de Köppen e Geiger .....	24
Figura 5 - Mapa de bacias hidrográficas no Paraná .....	25
Figura 6 - Estações pluviométricas selecionadas .....	26
Figura 7 - $Km$ em função da média de precipitações máximas anuais .....	28
Figura 8 - Ajuste da média (a) e do desvio padrão (b) em razão do máximo valor observado .....	28
Figura 9 - Ajuste da média e desvio padrão para o tamanho da amostra .....	29
Figura 10 - Fluxograma para estimar a PMP pelos 2 métodos .....	30
Figura 11 - Gráfico <i>Box Plot</i> com as precipitações limites e os <i>outliers</i> .....	35
Figura 12 - Curva para determinação do $Km$ para o estado do Paraná .....	39
Figura 13 - Mapa de PMPs estimadas pelo método de Hershfield tradicional ...	46
Figura 14 - Mapa de PMPs estimadas pelo método de Hershfield modificado ..	47
Figura 15 - Mapa da diferença entre as PMPs estimadas pelo método de Hershfield tradicional e pelo método modificado .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros estatísticos .....	36
Tabela 2 - Fatores de frequência ( <i>K</i> ) .....	40
Tabela 3 - Comparação das Precipitações Máximas Prováveis .....	42
Tabela 4 - Estações pluviométricas selecionadas .....	56
Tabela 5 - Comparação dos <i>Kms</i> determinados com média ajustada do método modificado .....	59

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>12</b>
1.2.1	Objetivo geral .....	12
1.2.2	Objetivo Específicos .....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Precipitações máximas</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Precipitação Máxima Provável</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>Métodos estatísticos</b> .....	<b>17</b>
2.3.1	Hershfield .....	18
2.3.2	Hershfield Modificado .....	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1</b>	<b>Local de estudo</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2</b>	<b>Coleta e seleção de dados</b> .....	<b>25</b>
<b>3.3</b>	<b>Métodos aplicados</b> .....	<b>27</b>
3.3.1	Hershfield .....	27
3.3.2	Hershfield Modificado .....	29
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Quantidade de <i>outliers</i></b> .....	<b>32</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise estatística do conjunto de dados</b> .....	<b>36</b>
<b>4.3</b>	<b>Fator de frequência (<i>Km</i>)</b> .....	<b>38</b>
<b>4.4</b>	<b>Valores de PMP</b> .....	<b>42</b>
<b>4.5</b>	<b>Análise espacial da PMP</b> .....	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>52</b>
	<b>APÊNDICE A - Estações pluviométricas selecionadas</b> .....	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE B - Comparação dos <i>Kms</i> determinados com as médias ajustadas pelo método de Hershfield tradicional e pelo modificado</b> ...58	

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo das chuvas máximas bem como a determinação da vazão de projeto para obras hidráulicas é extremamente relevante se considerado o grau de influência que tais estruturas exercem sobre a sociedade e o meio ambiente. O dimensionamento incorreto de barragens, reservatórios e hidrelétricas, por exemplo, se subcalculado, pode colocar em risco a segurança de todo seu entorno e gerar prejuízos imensuráveis – no caso de uma inundação, por exemplo – como danos materiais à infraestrutura local, devastação da fauna e flora, colapso no sistema de distribuição de energia, vítimas fatais, entre outros. Por outro lado, se superdimensionadas, as estruturas hidráulicas podem se tornar onerosas ou inviáveis do ponto de vista econômico.

Nesse contexto, a vazão de projeto pode ser obtida por meio da Precipitação Máxima Provável (PMP) que permite estimar, baseada nos registros históricos anuais de chuva máxima diária, a mais alta lâmina precipitada passível de ocorrência na área de estudo. A estimativa da PMP é hoje largamente utilizada em todo o mundo em razão da sua fácil conversão em Cheia Máxima Provável (CMP), possibilitando, dessa forma, a determinação da vazão utilizada no projeto e no dimensionamento de estruturas hidráulicas. A PMP pode ser estimadas por diferentes métodos que se dividem entre os hidrometeorológicos e os estatísticos e a escolha do método a ser utilizado se baseia na disponibilidade e nos tipos de dados climatológicos locais.

Os hidrometeorológicos são os métodos mais tradicionais e se fundamentam na maximização meteorológica local dos eventos históricos, necessitando de complexos dados meteorológicos, como por exemplo, o ponto de condensação do orvalho e o registro de ventos da região. Como muitas localidades não mantêm o registro de tais informações, os métodos estatísticos se apresentam como uma alternativa mais prática, visto que para a sua aplicação, são necessários apenas dados pluviométricos. Além disso, os métodos estatísticos possuem custo mais baixo e demandam menos tempo de aplicação se comparados com os processos mais tradicionais.

Dentre os métodos estatísticos para se estimar a PMP, o mais conhecido e mundialmente aceito é o proposto por Hershfield em 1965. O método é baseado, grosso modo, em uma equação geral de frequência composta pelos parâmetros

estatísticos da série (média e desvio padrão) e por um fator de forma que pode ser estimado por meio de gráficos empíricos. Apesar de ser usado no mundo todo, em bacias hidrográficas com características bem distintas, o método recebe várias críticas, de maneira geral, por superestimar os valores de PMP. Dessa forma, é pertinente que estudos avaliando, e principalmente, propondo adaptações e melhorias para o referido método sejam feitos, de modo a possibilitar a garantia de uma estimativa coerente e segura para a PMP.

### 1.1 Justificativa

Como já discutido, o estudo das chuvas extremas é importante, uma vez que através dele se calcula a vazão de projeto para obras hidráulicas, que exercem grande influência no meio ambiente e na sociedade a sua volta. A estimativa da PMP é o primeiro passo para se obter a CMP e assim determinar a vazão de projeto de acordo com o tipo de estrutura hidráulica. Dessa forma, devido a sua praticidade para se estimar a PMP, os métodos estatísticos foram escolhidos para serem aplicados nessa pesquisa, já que permitem uma análise puramente estatística das precipitações máximas. No entanto, como já mencionado, o método de Hershfield – principal entre os estatísticos – recebe várias críticas, por isso Fernando e Wickramasuriya (2021), com o intuito de solucionar um dos problemas, relativo à superestimativa da PMP, sugerem uma análise diferente com relação aos eventos *outliers*.

Os autores criticam a forma como Hershfield interpretou os eventos *outliers* e destacam que assumir que todas as séries possuem apenas um único valor extremo é estatisticamente errado e pode, na maioria das vezes, contribuir para uma PMP superestimada. Assim, os pesquisadores propõem a utilização de um teste para se determinar a quantidade de valores *outliers*, trazendo para o método de Hershfield uma análise estatística mais coerente e conseqüentemente, resultando em PMPs mais baixas. À vista disso, e sobretudo, por até a presente data não serem encontrados outros trabalhos, nacionais ou internacionais, que utilizam a metodologia proposta por Fernando e Wickramasuriya, decidiu-se por aplicar esse método modificado nos dados de chuva de estações do estado do Paraná, que possui uma grande rede fluvial e um elevado potencial energético.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal estimar a Precipitação Máxima Provável para o Paraná.

### 1.2.2 Objetivo Específicos

O objetivo dessa pesquisa pode ser explicitado pelos seguintes tópicos:

- Aplicar o método estatístico de Hershfield tradicional para a estimativa da PMP e também a modificação desse com respeito à análise dos eventos *outliers*;
- Comparar os resultados obtidos pelos dois métodos aplicados;
- Elaborar um mapa de PMP para o estado do Paraná para cada método e um para a diferença entre eles;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Precipitações máximas

As chuvas são eventos naturais fundamentais para evolução da sociedade e completamente indispensáveis para diversas áreas estratégicas e industriais. Sua relevância justifica a necessidade de seu estudo e esse deve acontecer de maneira a possibilitar o entendimento de todas as suas características e modos de ocorrência – que influenciam áreas distintas, como por exemplo, a agricultura, o saneamento, o escoamento pluvial urbano, obras hidráulicas e *etc.* Assim como pontua Gonçalves (2011), a avaliação das precipitações pluviais se dá em razão da necessidade de se conhecer as condições de risco e o impacto desse fenômeno na região em que acontece.

Segundo Silva (2003), a precipitação extrema ou chuva máxima ou chuva intensa pode ser definida como sendo “aquela que apresenta grande lâmina precipitada, durante pequeno intervalo de tempo [...]” e se caracteriza, conforme Araújo *et al.* (2008), pela irregularidade na sua distribuição, tanto temporal quanto espacialmente. Visto isso, o estudo hidrológico é extremamente importante para a completa compreensão do fenômeno de chuva, pois, de acordo com Bertoni e Tucci (2015), quando a ocorrência da precipitação se dá de maneira extrema, em quantidade consideravelmente acima da usual, essa pode ocasionar inúmeros problemas, como erosão do solo, enchentes, inundações, falhas na segurança de obras hidráulicas e *etc.*

Considerando todas as implicações das chuvas máximas – que muitas vezes podem ser catastróficas – e visando a mitigação de seus efeitos, a disposição de uma base técnica sólida é mais que necessária para possibilitar um controle coerente das cheias nas bacias, permitindo assim que soluções objetivas e sustentáveis sejam adotadas (CALDEIRA, 2014). Ademais, Caldeira *et al.* (2015) acrescentam que o conhecimento das precipitações extremas é imprescindível no contexto de gestão dos recursos hídricos, uma vez que o comportamento das bacias hidrográficas deve ser compreendido afim de que se possa estimar – de modo coerente e seguro – vazões de projeto para o dimensionamento de obras hidráulicas.

Muitos autores, em concordância com o exposto acima, salientam a necessidade de um estudo hidrológico completo que garanta a segurança e bem estar da sociedade. A exemplo tem-se Righetto (1998), que afirma que para se garantir a estabilidade e o correto funcionamento de estruturas hidráulicas, a estimativa de chuvas intensas é indispensável. Ainda, Rocha (2018) acrescenta que equívocos durante a análise desses fenômenos podem acarretar prejuízos incontáveis para a sociedade e o meio ambiente e destaca que a compreensão das chuvas intensas vai muito além da simples observação de eventos passados.

Um importante aspecto a ser analisado no contexto de chuvas máximas é a influência das mudanças climáticas – que, por razões evidentes, acontece de maneira direta. No seu estudo de revisão, Westras *et al.* (2014) afirmam que nos últimos anos, as evidências a respeito do aumento na intensidade das precipitações extremas vêm se intensificando e os maiores incrementos têm acontecido em tempestades de curta duração, o que favorece a ocorrência de enchentes. Ainda, os autores concluem que existe uma relação clara entre a temperatura atmosférica e a intensidade das precipitações intensas.

Assim como acontece com a intensidade das chuvas máximas, o número de ocorrência dessas também vem crescendo em todo o planeta e um aumento ainda mais acentuado é esperado durante o restante do século XXI em muitas regiões do globo, inclusive no Brasil. Embora não seja este o escopo do presente trabalho, a causa que se apresenta como a mais provável para os aumentos descritos acima é a influência antropogênica (IPCC, 2014).

A Figura 1 apresenta o número de ocorrência de desastres hidrológicos no mundo todo entre 1970 e maio de 2021 e que fazem parte dos registros do *The International Disaster Database* (EM-DAT). Os dados em questão englobam enchentes e escorregamentos de terra, sendo o segundo responsável por apenas 14% do total de ocorrências. Através do gráfico, é possível observar uma tendência ascendente no número de catástrofes hídricas durante o período analisado, fato esse que acompanha o aumento das precipitações intensas.



## 2.2 Precipitação Máxima Provável

A estimativa da Precipitação Máxima Provável (PMP), em condições desfavoráveis, pode ser utilizada para a determinação da Cheia Máxima Provável (CMP) que serve para projetar uma dada estrutura hidráulica dentro de uma certa bacia hidrográfica, a CMP auxilia na determinação da altura de barragem, da capacidade do reservatório, das dimensões de vertedouro e *etc.* A PMP é definida como a precipitação máxima, em milímetros (mm), que pode acontecer teoricamente – sob condições meteorológicas modernas – dentro de uma dada duração sobre uma dada bacia hidrográfica (WMO, 2009).

Cabe destacar que, teoricamente, a probabilidade de ocorrência de uma lâmina precipitada superior à estimada através da PMP é nula, no entanto esse suposto limite máximo já foi superado no passado (KOUTSOYIANNIS, 1999). Ainda assim, a existência ou não de limite superior para chuvas intensas está em discussão, visto que em relação a esse conceito não há consenso entre os pesquisadores. Apesar disso, Fernandes (2009) destaca que tanto o conceito de PMP como o de CMP vêm sendo usados de maneira adequada no campo da engenharia hidrológica, uma vez que são essenciais no dimensionamento e no projeto de obras hidráulicas, tais como: vertedouros, reservatórios, barragens de contenção e centrais nucleares.

Ainda no contexto prático da engenharia, Fernando e Wickramasuriya (2021) pontuam que existem problemas tanto no caso de superdimensionamento quanto no caso de subdimensionamento da PMP, enquanto o primeiro provavelmente resultaria em obras onerosas e economicamente inviáveis, o segundo impactaria diretamente na segurança da estrutura e da população à sua volta. Assim, fica claro a importância de uma estimativa correta e que seja baseada em dados amostrais coerentes. Ademais, destaca-se a vital importância da ponderação dos resultados pelo engenheiro, que deve possuir qualificação técnica adequada e acima de tudo, o olhar crítico necessário no desempenho desse tipo de atividade – que exerce enorme influência na sociedade e no meio ambiente.

Segundo Berod *et al.*<sup>2</sup> (1992 *apud* Fernandes 2009), o problema não está no limite superior de chuvas máximas, mas sim na forma como esse é calculado, pois, em razão da complexidade dos eventos meteorológicos, é impossível determinar precisamente o valor desse limite. Ainda, destaca-se que as amostras utilizadas para a estimativa da PMP podem conferir incertezas à sua determinação e por conta disso, a PMP precisa ser interpretada como uma variável de características aleatórias, com comportamento expresso por uma distribuição de probabilidade. Dessa forma, deve ser entendido que através da PMP e seus métodos de estimação é plausível apenas uma aproximação do limite para precipitações intensas.

A PMP pode ser estimada de diversas formas distintas, existem vários modelos que em geral se baseiam na localização da bacia e também no tipo e na disponibilidade dos dados. Os processos para a estimativa da PMP são divididos em 2 grupos: os métodos hidrometeorológicos, que se fundamentam na maximização meteorológica local dos eventos históricos, e os métodos estatísticos, que, como o próprio nome sugere, dependem exclusivamente de uma análise estatística das ocorrências passadas de precipitação extrema (FERNANDES, 2009; CHAVAN, S. R.; SRINIVAS, 2015).

Os métodos hidrometeorológicos são tidos como os mais tradicionais, no entanto, em muitos casos apresentam a problemática da insuficiência de dados, pois necessitam de complexas informações meteorológicas - que muitas regiões não mantêm registro. Tais métodos ainda apresentam alto custo de aplicação, o que pode inviabilizar sua utilização. Em vista disso, os métodos estatísticos ganham destaque por se apresentarem como uma opção mais prática em relação aos demais processos, uma vez que, além de possuírem custo baixo, necessitam somente dados de precipitação (BURGUER, 2014).

### **2.3 Métodos estatísticos**

Os métodos estatísticos são convenientes pois demandam consideravelmente menos tempo de aplicação quando comparados com os processos mais tradicionais e também não exigem conhecimento meteorológico avançado, uma vez que sua

---

<sup>2</sup> BEROD, D. *et al.* **Calcul des crues extrêmes par des methodes deterministes du type pluie maximale probable (PMP)/crue maximale probable (PMF): application au cas de la Suisse.** Lausanne, 1992.

aplicação e análise se dá de maneira inteiramente matemática. Tais processos, apesar de serem baseados na análise de frequência, se diferenciam em importantes aspectos, como por exemplo, o fato de que os métodos estatísticos enfatizam regiões amplas, não sendo indicados para uma única estação ou única bacia. O cerne dos referidos métodos é a regionalização de chuvas e seu uso para a estimativa da PMP é recomendado sempre que os dados de precipitação local estejam disponíveis e sejam suficientes ou quando outros dados meteorológicos como ponto de condensação e registro de ventos sejam escassos (WMO, 2009).

### 2.3.1 Hershfield

Dentre os métodos estatísticos utilizados para estimar a PMP, o proposto por Hershfield em 1961 é o mais usado no mundo todo, inclusive é recomendado pela Organização Meteorológica Mundial no Manual para a Estimativa da PMP (2009) onde é destacado que tal procedimento é bastante usado para estimativas rápidas em bacias hidrográficas de até 1000 km<sup>2</sup>, mas que também é usado sobre extensões muito maiores. O referido método é representado por uma equação geral de frequência (Equação 1), onde a PMP – para uma determinada região em um dado intervalo de tempo – pode ser estimada pela média da amostra mais o produto do desvio padrão com um fator de frequência ( $K_m$ ).

Inicialmente em seu trabalho, Hershfield (1961) analisou os dados anuais de precipitação máxima de 2645 estações pluviométricas, das quais cerca de 90% se localizavam dentro do território norte-americano e com isso, concluiu que o fator de frequência ( $K_m$ ) não dependia da intensidade da chuva e assumiria o valor máximo de 15. No entanto, mais tarde, Hershfield (1965) reavaliou o fator de frequência constatando que na realidade o  $K_m$  varia inversamente com a precipitação e que  $K_m = 15$  é considerado muito alto para regiões com chuvas fortes e muito baixo para áreas áridas. Com isso, o autor elaborou um gráfico com curvas envoltórias empíricas que permite determinar o  $K_m$  por meio da média e da duração da série de chuvas intensas anuais.

Ainda, a Organização Meteorológica Mundial (2009) destaca que existem métodos para o ajuste da média e desvio padrão em razão da presença de valores atípicos ou do tamanho da amostra, pois dados raros e extremos chamados *outliers*

podem afetar os fatores estatísticos de maneira inversamente proporcional ao tamanho da série.

Para limitar a influência do *outlier*, deve-se calcular a razão da média sem o valor do evento extremo com a média normal e essa relação permite, através de um gráfico, determinar a porcentagem de ajuste da média; o mesmo deve ser feito para o desvio padrão. Como a distribuição de frequência de chuvas extremas possui assimetria com concentração a esquerda, a média e o desvio padrão tendem a aumentar com o tamanho da amostra, dessa forma, um ajuste é recomendado a fim de que se tenha parâmetros estatísticos mais coerentes com a realidade. Mais uma vez, o processo é feito com o auxílio de gráfico, que expressa, em duas curvas, o valor do ajuste necessário para a média e desvio padrão, de acordo com o tamanho da amostra em anos. Os valores dos ajustes são dados em porcentagem e podem tanto resultar em aumento como também na redução dos parâmetros estatísticos, dependendo das características de cada amostra (WMO, 2009).

Vale ressaltar que apesar de ser aceito mundialmente, o método proposto por Hershfield recebe diversas críticas. Koutsoyiannis (1999) por exemplo, apontou que não existem evidências no trabalho de Hershfield que suporte a suposição de um limite físico para a PMP, ou seja, apesar de os resultados apresentados serem relevantes, esses não deveriam ser interpretados como valores de PMP. Ademais, o autor propôs uma reavaliação do método e com os mesmos dados utilizados por Hershfield mostrou que a PMP pode ser estimada pela distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) – com fator de forma expresso por uma função linear da precipitação média anual máxima e com um período de retorno (T) de 60.000 anos. Como essa abordagem se dá de maneira puramente estatística, pode ser considerada mais consistente, além do que dispensa completamente o uso dos gráficos empíricos propostos por Hershfield.

Em seu estudo conduzido na região de Catalunha na Espanha, Casas *et. al* (2008) utilizam o método proposto por Hershfield para estimar a PMP de 1 dia. Foram coletados dados de 145 estações pluviométricas com pelo menos 15 anos de registros disponíveis e através desses, os autores conseguiram gerar uma curva envoltória relacionando o fator de frequência ( $K_m$ ) com as médias das séries históricas de precipitações intensas. Alguns anos depois, Casas *et. al* (2011) estimaram a PMP

para a capital da região anteriormente estudada, a cidade de Barcelona. Nesse trabalho, os autores utilizaram uma base com mais de 60 anos de dados pluviométricos da cidade e além do método estatístico proposto por Hershfield, também aplicaram um método hidrometeorológico baseado na maximização de tempestades reais. Os resultados mostraram que os valores de PMP estimados pelos dois métodos não apresentaram grande diferença.

Şen, As-Sefry e Al-Harithy (2016) conduziram um trabalho para a estimativa da PMP considerando a influência das mudanças climáticas na região da cidade de Jeddah, no reino da Arabia Saudita. Os autores aplicaram o método proposto por Hershfield, combinando o fator de frequência com uma função de distribuição de probabilidade gama e utilizaram 12 estações meteorológicas com registros de mais de 39 anos. Ainda, com o intuito de averiguar a relação de proximidade entre os valores de PMP estimados e as máximas reais registradas, foi utilizado um fator de eficiência mostrando que em nenhuma estação o valor estimado foi alcançado no passado – o registro mais próximo apresentou uma diferença de cerca de 9%. Os valores de PMP apresentados são condizentes com valores estimados para regiões áridas e semiáridas e consideravelmente mais altos que os determinados por métodos convencionais.

No Brasil, Burguer (2014) realizou uma pesquisa com 37 estações telemétricas e 50 estações convencionais no estado do Paraná, com registros variando de 3 a 124 anos. A autora utilizou um modelo que representasse matematicamente o gráfico proposto por Hershfield e um método de simulação de séries sintéticas para a estimativa do fator de frequência ( $K_m$ ). O trabalho resultou em valores, em geral, mais altos para as estimativas baseadas no gráfico de Hershfield, caracterizando-o como mais conservador em comparação com a simulação de séries sintéticas. Ainda, com objetivo de avaliar seus resultados, a pesquisadora os comparou com os valores obtidos por Carvalho (2000)<sup>3</sup> – que fez uso de um método hidrometeorológico para estimar a PMP no Paraná. A comparação mostrou que tanto o modelo empírico como o de simulação apresentaram valores de PMP mais altos que os obtidos pelo método hidrometeorológico, em 78% e 66%, respectivamente.

---

<sup>3</sup> CARVALHO, M. C. L. **Análise Regional da Precipitação Máxima Provável no Estado do Paraná**. 2000. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

Na região norte do Brasil, Silva Neto *et al.* (2020) estimaram a PMP para o estado de Tocantins aplicando o método apresentado por Hershfield nos dados de 10 estações pluviométricas, com séries históricas variando entre 9 a 11 anos de duração, ainda utilizaram o interpolador Inverso da Potência da Distância para que a espacialização dos resultados em toda a extensão do estado fosse possível. Como resultado, obtiveram valores de PMP que oscilam de 410,9 a 768,2 mm para uma duração de 24 horas (1440 min), com fatores  $K_m$  calculados menores que os sugeridos empiricamente por Hershfield. Segundo os próprios autores, tais valores apresentam correspondência em outros estudos publicados, tanto em âmbito nacional quanto em internacional.

### 2.3.2 Hershfield Modificado

O método para a estimativa da PMP proposto por Hershfield (1965) sugere, após a seleção e tratamento dos dados, a não inclusão do maior evento observado no cálculo da média e do desvio padrão da série histórica estudada. Dessa forma, sem a aplicação de um teste estatístico que pudesse identificar tais eventos, essa precipitação máxima é interpretada como o único *outlier* e, portanto, excluído da amostra. Os autores Kirk e McCuen (2008) definem o termo *outlier* como sendo um evento inconsistente com o resto dos dados contidos na série analisada e destacam que a presença de *outliers* na série pode levar a conclusões incoerentes com a realidade.

Com o objetivo de resolver esse problema presente no método proposto por Hershfield (1965), Fernando e Wickramasuriya (2021) propõem uma análise estatística mais sólida, focada na avaliação da presença ou não de eventos tidos como *outliers*. Os autores criticam a suposição feita por Hershfield onde ele determina que o máximo evento observado será sempre um *outlier* e o único, independentemente da série de dados analisada e destacam que tal interpretação não é sempre verdade, uma vez que uma amostra pode tanto conter vários *outliers* como também não conter nenhum. Para determinar tais eventos, os autores utilizaram um teste baseado em quartis, mais precisamente no intervalo interquartil (IQR), que consiste no cálculo de uma precipitação limite e todos os valores que excederem tal limite serão tratados como *outliers* e desse modo, removidos da amostra.

Em seu trabalho conduzido no Sri Lanka, Fernando e Wickramasuriya (2021) aplicaram o método tradicional proposto por Hershfield e o modificado (utilizando o teste IQR para identificar os *outliers*) nos registros de séries históricas que variam entre 54 e 135 anos de duração de 19 estações pluviométricas. O teste IQR permitiu identificar 13 estações com quantidades de *outliers* diferentes de 1, e os valores de PMP estimados pelo método modificado se mostraram significativamente menores que os determinados pelo tradicional, chegando a apresentar uma diferença de 45,9%. Por fim, os resultados de 7 estações foram comparados com valores de PMP estimados por um método hidrometeorológico – em trabalho<sup>4</sup> anterior realizado em 2011 pelos mesmos autores – e a comparação mostrou uma diferença de menos de 5% entre tais valores e os estimados pelo método modificado.

Diante do exposto com relação aos dois métodos, fica clara a importância do método proposto por Hershfield e sua relevância no estudo e determinação da PMP em âmbito global. Contudo, como já discutido nesse capítulo, cabe destacar que tal abordagem apresenta algumas falhas e essas se tornam mais evidentes na comparação dos resultados com outros métodos. A grande maioria dos pesquisadores concluíram que o referido processo é mais conservador, apresentando PMPs mais altas em comparação com métodos tanto estatísticos como hidrometeorológicos.

Desse modo, a modificação a respeito da interpretação dos valores *outliers*, sugerida por Fernando e Wickramasuriya, vai de encontro ao exposto por Hershfield e se destaca como uma alternativa à superestimação da PMP que vem sendo resultado da abordagem de Hershfield, uma vez que a identificação e retirada dos eventos mais extremos da amostra promoveu uma considerável redução nas estimativas das PMPs. Isso posto e principalmente em razão de tal proposição não apresentar nenhum outro estudo relacionado – por ter sido publicada no ano de 2021, decidiu-se utilizá-la para se estimar a PMP no estado do Paraná. Até a presente data, não há registro de outros trabalhos nacionais ou internacionais que aplicam essa nova abordagem proposta por Fernando e Wickramasuriya.

---

<sup>4</sup> Fernando, W. C. D. K.; S. S. Wickramasuriya. 2011. The hydrometeorological estimation of probable maximum precipitation under varying scenarios in Sri Lanka. **Int. J. Climatology**. 31 (5): 668–676.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Local de estudo

O Paraná é um dos três estados pertencentes à região Sul do Brasil, fazendo fronteira com Santa Catarina, Mato Grosso do Sul e São Paulo e também com os países Paraguai e Argentina como mostra a Figura 3; no Leste ainda é banhado pelo oceano Atlântico. O estado possui uma área de 199.315 km<sup>2</sup> e fica localizado a - 24° 30' 0 (Sul) e - 51° 19' 59 (Oeste), com mais de 11 milhões de habitantes. Segundo IBGE e IPARDES (2018), a economia paranaense pode ser grosseiramente representada por 3 principais atividades: agropecuária (9,5%), indústria (24,5%) e serviços (66%), que em conjunto são responsáveis por aproximadamente 6,3% do PIB nacional, colocando o Paraná na 5ª posição do ranking, com uma receita um pouco superior a 440 bilhões de reais.

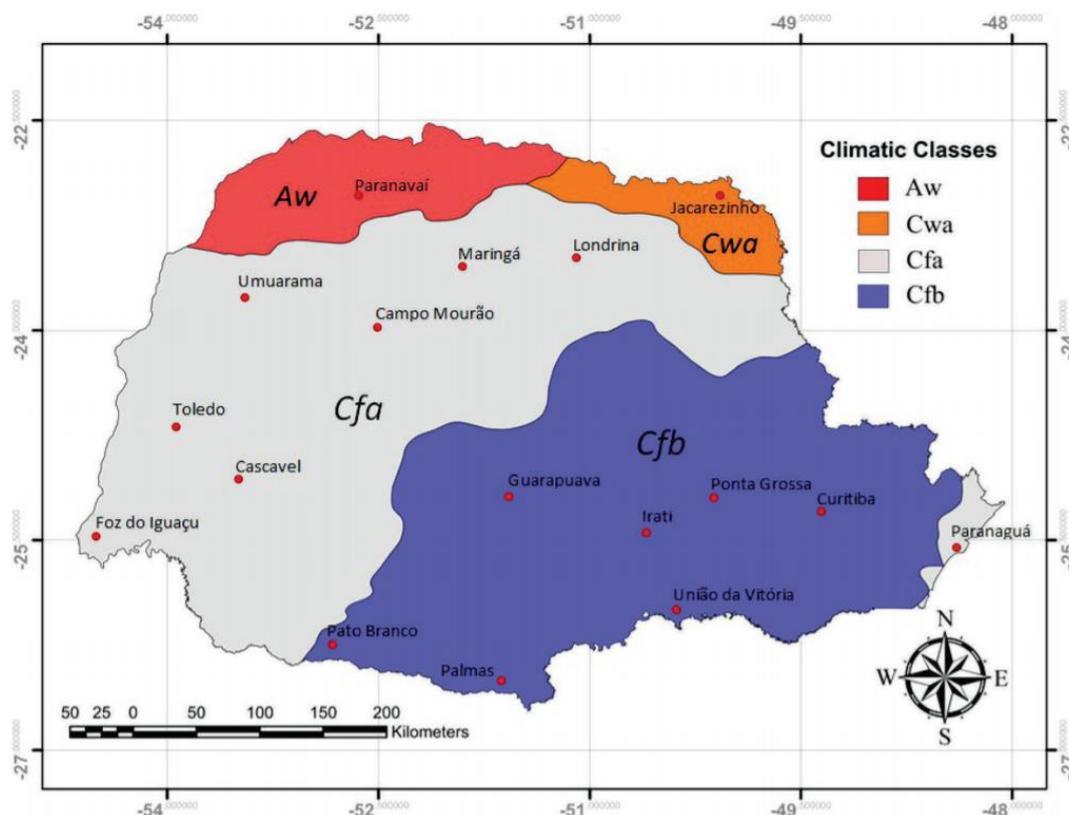
**Figura 3 - Mapa e localização do estado do Paraná**



**Fonte: Paraná (2020)**

Segundo Aparecido *et al.* (2009), baseado no sistema de classificação climática Köppen e Geiger, o clima do Paraná pode ser dividido em 4 classes: temperado úmido com verão quente (Cfa), temperado úmido com verão moderadamente quente (Cfb), savana tropical úmida (Aw) e temperado úmido com inverno seco (Cwa), que representam cerca de 50%, 39,8%, 5,7% e 4,3% respectivamente. A Figura 4 apresenta a distribuição das classes climáticas sobre o estado.

**Figura 4 - Distribuição regional da classificação climática de Köppen e Geiger**



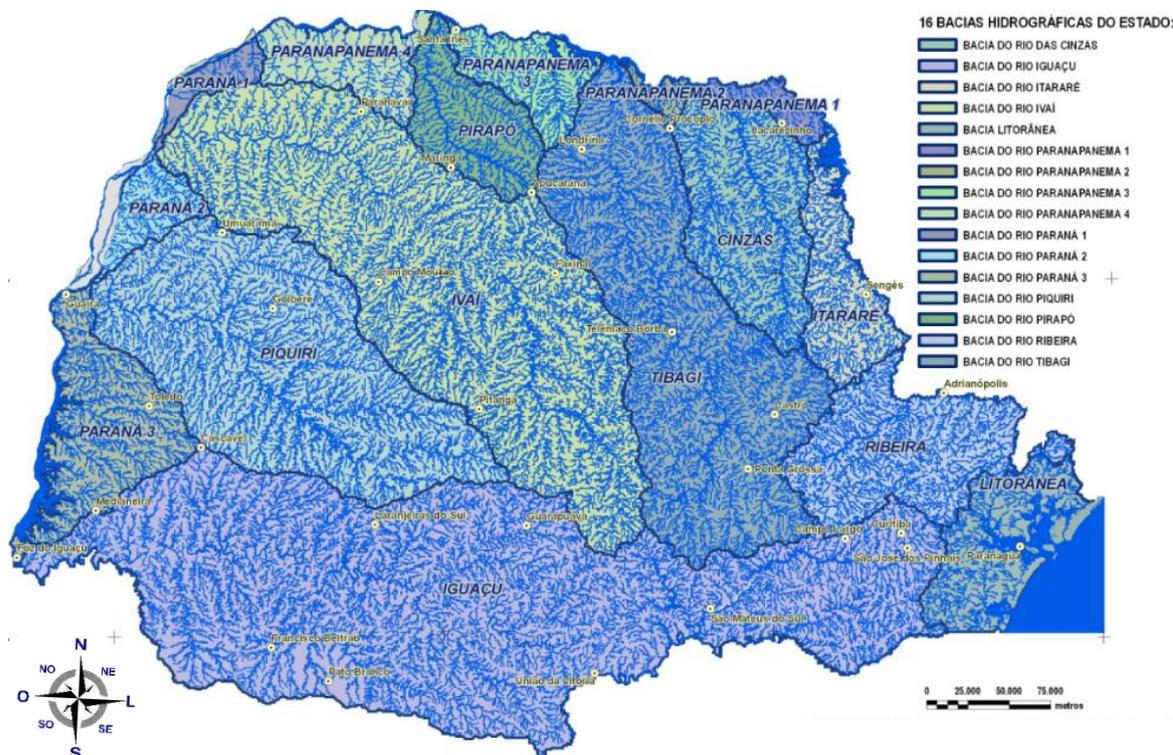
Fonte: Aparecido et al. (2009)

O estado do Paraná possui uma altitude média de 415 m, no entanto, a distribuição de sua elevação é bem diversificada e vai de 0 m no nível do mar até 1899 m no Pico Paraná – o ponto mais alto da região sul, localizado na Serra do Mar. Além disso, o Paraná dispõe de uma grande rede hidrográfica que se divide em 16 bacias, apresentadas na Figura 5. Um dos mais importantes rios do estado, é o Rio Paraná, que apresenta cerca 400 km extensão dentro do território paranaense e sua bacia – que ultrapassa os limites do estado – possui um potencial energético estimado em cerca de 61.400 MW. Somente o estado paranaense tem 15 empreendimentos hidrelétricos, ocupando, segundo Paraná (2020), o primeiro lugar no ranking de produção de energia do País.

De acordo com Paraná (2021), dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) e da Associação Brasileira de PCHs e CGHs (Abrapch) colocam o estado paranaense na sexta posição dos estados com mais pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) do País, destacando ainda, que o Estado detém mais de 82 mil kW de potência outorgada por 68 empreendimentos hidrelétricos. Além disso, com o sancionamento da Lei 19989 de outubro de 2019, o governo estadual aprovou a construção de mais

19 empreendimentos para geração de energia, dentre esses 14 centrais geradoras hidrelétricas (CGHs) e 2 PCHs (PARANÁ, 2019).

**Figura 5 - Mapa de bacias hidrográficas no Paraná**



Fonte: SUDERHSA (2007)

### 3.2 Coleta e seleção de dados

Para a execução desse trabalho foram utilizados dados pluviométricos de séries históricas do estado do Paraná. Os dados de chuvas são disponibilizados pelo portal HidroWeb – ferramenta que faz parte do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), gerido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). De acordo com referido portal, existem cerca de 1500 estações pluviométricas espalhadas em todo o território paranaense, no entanto, com o objetivo de se realizar uma pesquisa sólida, foram utilizadas apenas estações que possam fornecer pelo menos 50 anos de registro de chuvas máximas.

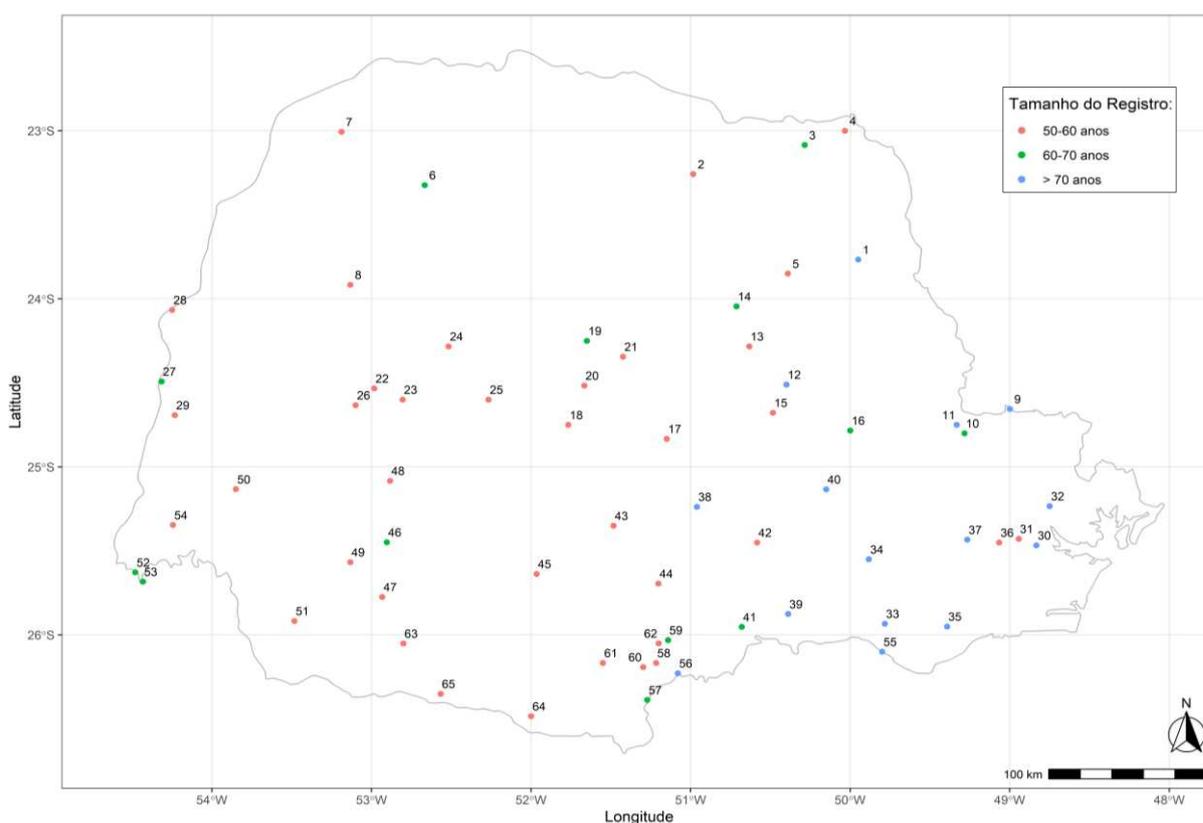
Além do tamanho da amostra, foi avaliada a continuidade da série, ou seja, estações com intervalos de dados faltantes foram desconsideradas, admitindo falhas nos registros de no máximo 5%. Em síntese, se em uma amostra de 50 anos, estavam faltando 3 anos ou mais, essa não foi considerada. Igualmente, se em um dado ano, estiveram faltando 2 ou mais meses, esse ano também foi descartado. Os dados

pluviométricos disponíveis no portal HidroWeb são dados de chuvas diárias e para esse trabalho foram utilizadas as máximas diárias anuais de cada estação pluviométrica. Para agilizar o processo de seleção dos dados, foi desenvolvido um *software* simples que pudesse interpretar as planilhas disponíveis no portal e resultar as que atendessem aos requisitos buscados, de tamanho e continuidade. Ao todo foram selecionadas 65 estações, que são apresentadas na Tabela 4 do Apêndice A.

A Tabela 4 exhibe, além do código de cada estação e suas respectivas cidades, as coordenadas geográficas em graus, suas altitudes em metros e também o tamanho de seus registros em anos.

Uma preocupação adicional era que as estações estivessem bem distribuídas dentro de todo o território paranaense. Felizmente, após a plotagem do gráfico com todas as 65 estações pluviométricas, verificou-se que elas estão espaçadas de maneira satisfatória ao longo da área do estado, o que pode ser observado na Figura 6, que apresenta o mapa do Paraná plotado com todas as estações selecionadas. Destaca-se ainda que o referido mapa foi elaborado com o auxílio do *software* RStudio.

**Figura 6 - Estações pluviométricas selecionadas**



Fonte: Autor (2021)

O mapa exibe uma distribuição espacial irregular, mas com estações presentes em todas as regiões do estado. Além disso, é possível ver os pontos – que descrevem a localização das estações – divididos em 3 categorias, que expressam o tamanho do registro de cada estação. Em rosa, as estações com até 59 anos de registro. Em verde, as que tem entre 60 e 69 anos e em azul, as que apresentam pelo menos 70 anos de máximas diárias anuais.

### 3.3 Métodos aplicados

Nos dados selecionados foram aplicados dois métodos estatísticos com o intuito de se estimar a PMP: Hershfield tradicional e Hershfield modificado. O primeiro, que recebe o nome de seu autor, foi proposto em 1965 e é recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO), o segundo é uma revisão do primeiro e foi proposto por Fernando e Wickramasuriya em 2021.

#### 3.3.1 Hershfield

O método estatístico proposto por Hershfield (1961) foi resultado da análise de mais de 2600 estações pluviométricas e resultou na Equação 1 que se baseia na fórmula de frequência geral. Onde  $X_{PMP}$  representa a PMP para uma determinada região em um dado intervalo de tempo,  $\bar{X}_n$  a média e  $S_n$  o desvio padrão de uma amostra  $n$  de chuvas máximas anuais, com  $K_m$  sendo o fator de frequência.

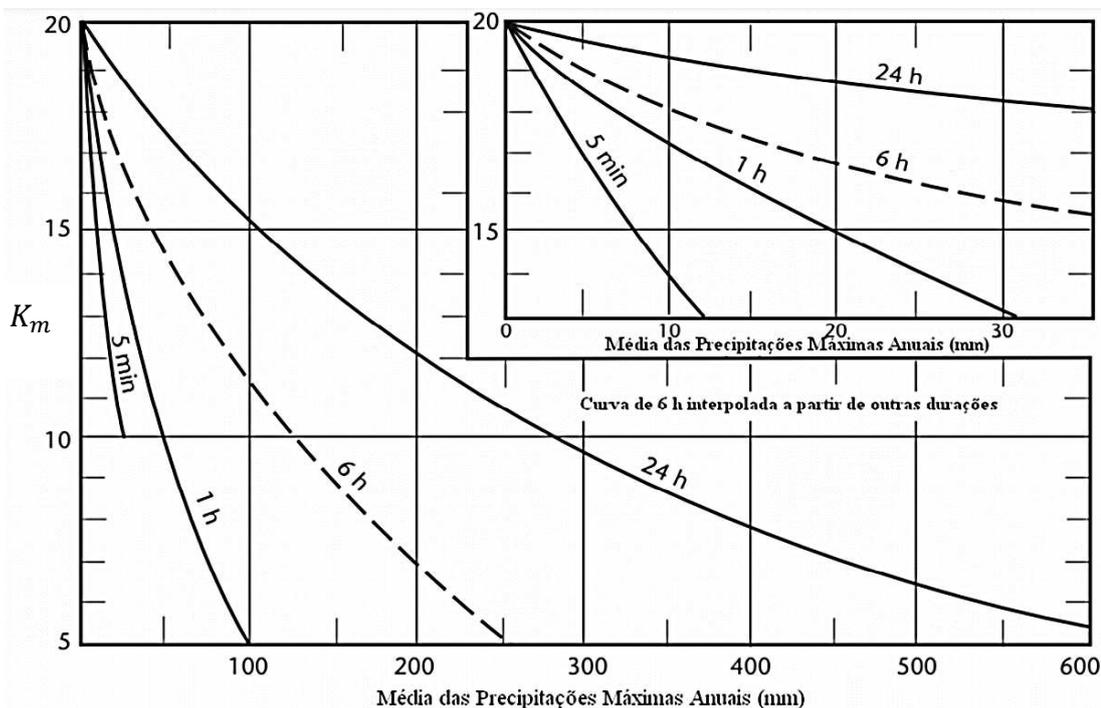
$$X_{PMP} = \bar{X}_n + K_m \cdot S_n \quad (1)$$

O autor determinou o fator  $K_m$  ainda fazendo uso da Equação 1, no entanto, a parcela  $X_{PMP}$  que representava a PMP passou a ser a maior precipitação observada ( $X_{MAX}$ ) na dada série e a média e o desvio padrão passaram a ser  $\bar{X}_{n-1}$  e  $S_{n-1}$  respectivamente, isto é, os parâmetros estatísticos agora sem o maior evento observado (*outlier*) como na Equação 2.

$$K = \frac{X_{MAX} - \bar{X}_{n-1}}{S_{n-1}} \quad (2)$$

Dessa maneira, Hershfield (1965) pode elaborar um gráfico onde se pode estimar o fator de frequência  $K_m$  apenas utilizando o valor da média ( $\bar{X}_{n-1}$ ). O gráfico, que pode ser observado na Figura 7, permite a determinação de  $K_m$  para séries de chuvas máximas com diferentes durações.

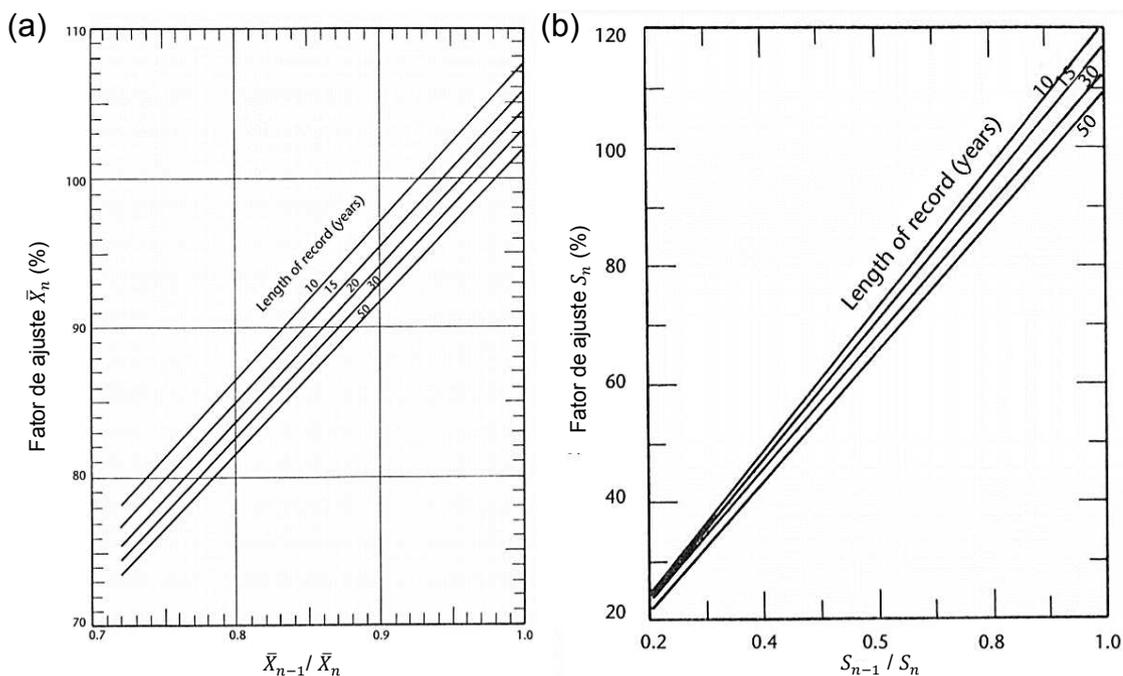
Figura 7 -  $K_m$  em função da média de precipitações máximas anuais



Fonte: WMO (2009)

Com o intuito de reduzir a influência do evento *outlier* na estimativa da PMP, Hershfield desenvolveu outros 2 gráficos que relacionam a média e o desvio padrão sem o evento máximo observado ( $\bar{X}_{n-1}$  e  $S_{n-1}$ ) com a média e desvio padrão de série toda ( $\bar{X}_n$  e  $S_n$ ), incluindo o valor *outlier*. A Figura 8 apresenta os gráficos para o ajuste da média e do desvio padrão.

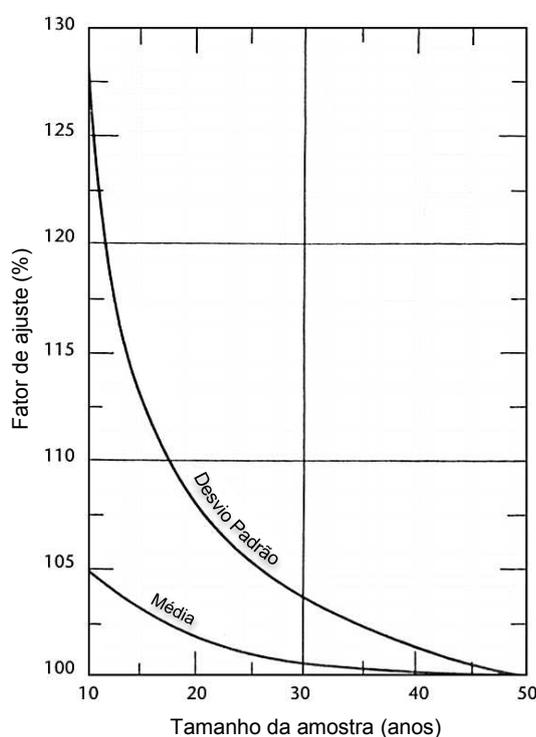
Figura 8 - Ajuste da média (a) e do desvio padrão (b) em razão do máximo valor observado



Fonte: WMO (2009)

O autor também definiu um ajuste que relaciona o efeito do tamanho da amostra sobre os parâmetros estatísticos. Essa etapa é recomendada por conta da forma como a frequência de eventos extremos de precipitação é distribuída. Tal distribuição se caracteriza por ser assimétrica e possuir curva para direita, indicando que a ocorrência de um evento extremo grande é mais provável com o aumento da amostra do que um evento extremo pequeno (WMO, 2009). O gráfico, resultado da análise empírica da influência do tamanho da amostra sobre a média e o desvio padrão, é apresentado na Figura 9.

**Figura 9 - Ajuste da média e desvio padrão para o tamanho da amostra**



**Fonte: WMO (2009)**

### 3.3.2 Hershfield Modificado

A modificação sugerida por Fernando e Wickramasuriya (2021) acontece na fase inicial do processo de estimativa de PMP de Hershfield, na maneira como os valores dos eventos extremos (*outliers*) são determinados e interpretados. Os autores destacam que para uma análise estatística mais sólida é necessário que seja aplicado um teste identificador de *outliers*, o teste indicado se baseia no intervalo interquartil (IQR) representado pela Equação 3.

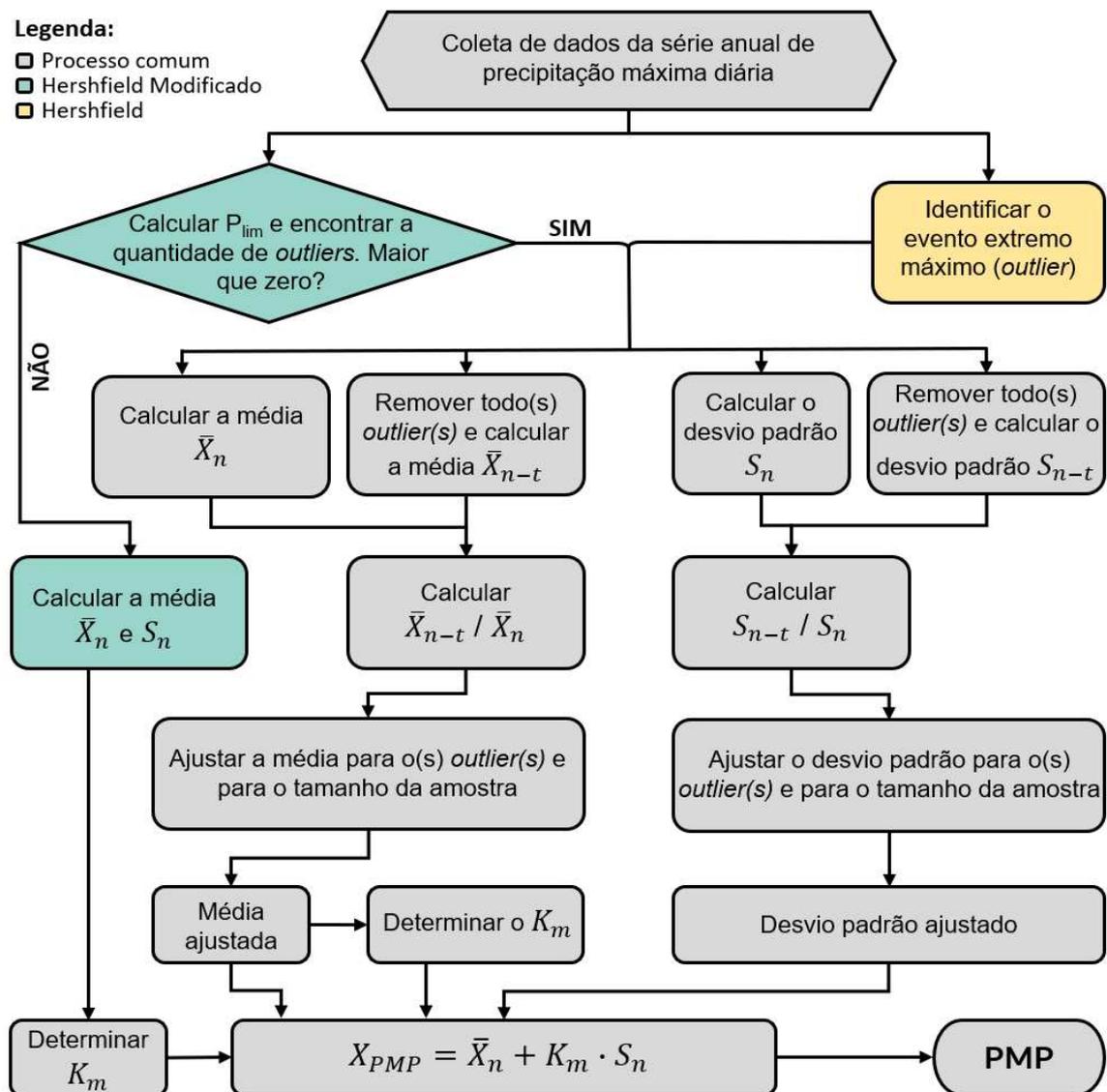
$$IQR = Q3 - Q1 \quad (3)$$

Onde  $Q1$  e  $Q3$  são o primeiro e o terceiro quartil, respectivamente. Na sequência, o IQR é utilizado na Equação 4 para a determinação do limite superior ( $P_{lim}$ ) da amostra, esse limite serve como base para a identificação dos *outliers*, ou seja, os valores de precipitação máxima superiores ao  $P_{lim}$  são tidos como *outliers* extremos e, portanto, removidos da série.

$$P_{lim} = Q3 + 3 \cdot IQR \quad (4)$$

A partir da identificação dos *outliers*, o processo para a estimativa da PMP segue idêntico ao proposto por Hershfield em 1965. As razões entre os parâmetros estatísticos com e sem os eventos *outliers* devem ser calculadas para que sejam determinados os ajustes necessários para a média e o desvio padrão.

Figura 10 - Fluxograma para estimar a PMP pelos 2 métodos



Fonte: Autor (2021)

A Figura 10 apresenta um fluxograma com o procedimento que será realizado. Em verde, as etapas exclusivas do método modificado, em amarelo, o que diz respeito somente ao processo tradicional e em cinza, o que é comum nos dois métodos. Ainda, cabe destacar que após a aplicação dos dois métodos, os resultados obtidos em cada um deles foram comparados pela Equação 5.

$$Erro = \frac{PMP_{HERSHFIELD} - PMP_{MODIFICADO}}{PMP_{HERSHFIELD}} \cdot 100 \quad (5)$$

### 3.4 Mapas

Com os resultados obtidos pelos dois métodos e pela Equação 5, foram gerados mapas com o intuito de espacializar os dados em toda a área do estado paranaense. Dessa forma, foram elaborados 3 mapas distintos, um para o método de Hershfield tradicional, um para o método modificado e um com a diferença entre os dois métodos.

Todos os 3 mapas foram feitos com o auxílio do *software RStudio* e obtidos por meio da técnica de interpolação baseada no Inverso do Quadrado da Distância, onde a influência local do ponto de cada amostra vai diminuindo com a distância. Assim, Amorim, Ribeiro e Leite (2008) simplificam que, ao analisar o processamento de uma célula no mapa, o referido método supõe que os pontos mais próximos exercem influência maior sobre essa célula do que os pontos mais distantes e que tal interpolação é representada pela Equação 6.

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{x_j}{d_{ij}^k} \right)}{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{d_{ij}^k} \right)} \quad (6)$$

Onde:

$x_i$  = valor estimado no ponto  $i$ ;

$x_{ij}$  = distância entre os pontos  $i$  e  $j$ ;

$x_j$  = valor amostrado de  $x$  no ponto  $j$ ;

$n$  = número de pontos da amostra;

$k$  = coeficiente da potência do interpolador, nesse caso 2.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a seleção das estações pluviométricas respeitando os critérios já mencionados e de posse de todos os dados de máximas diárias anuais, os métodos descritos na seção anterior foram empregados.

### 4.1 Quantidade de *outliers*

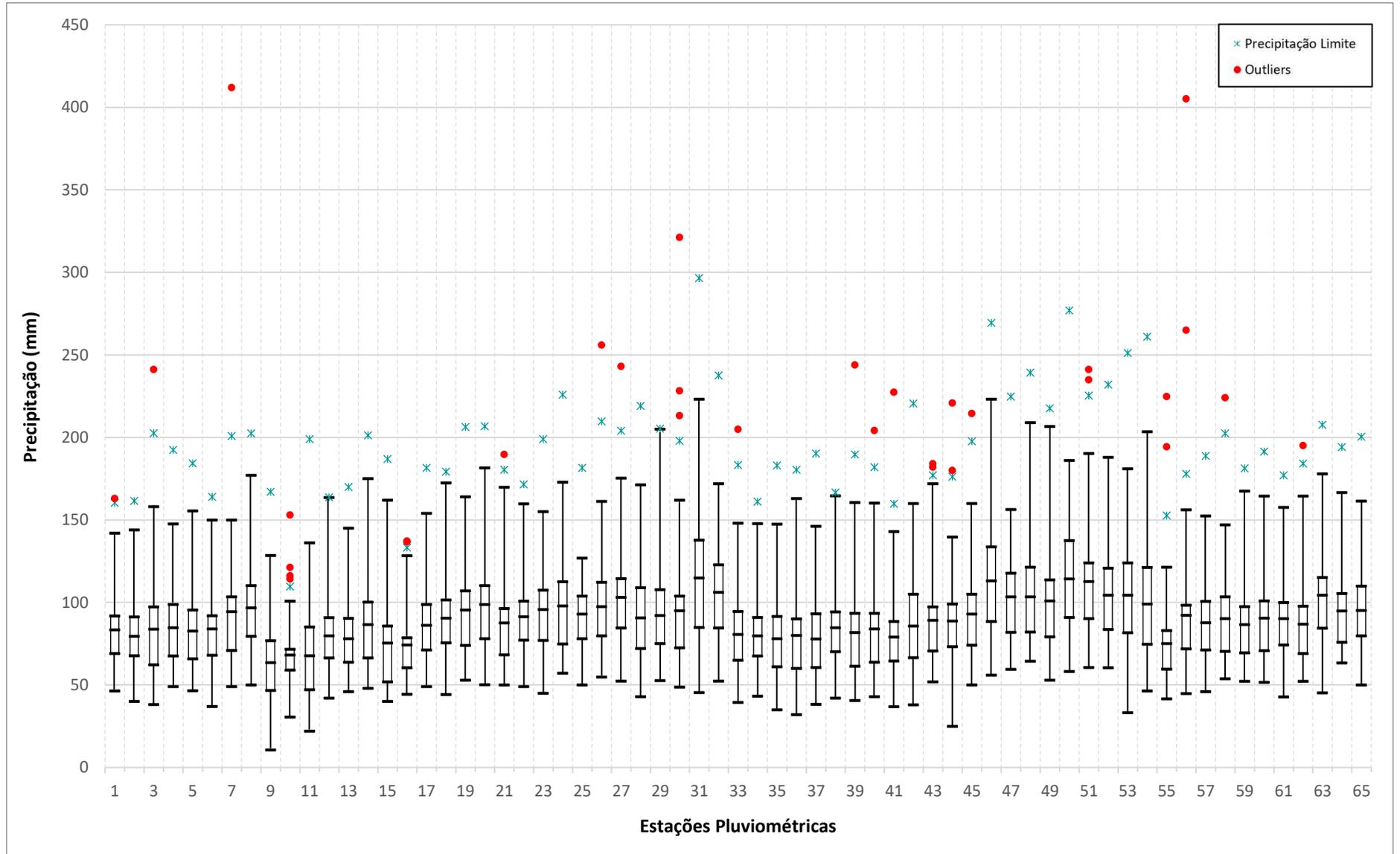
Inicialmente foi aplicado o teste detector de *outliers*. Calculou-se, portanto, a precipitação limite ( $P_{lim}$ ) com a Equação 4 e assim foi possível determinar a quantidade de eventos extremos em cada estação. A Figura 11 apresenta o gráfico *Box Plot* (ou diagrama de caixas) com todas as estações pluviométricas nas abcissas e os valores de precipitação, em milímetros, no eixo das ordenadas. Através do *Box Plot* é possível observar as precipitações limite ( $P_{lim}$ ), que são representadas pelo asterisco verde, e também os valores *outliers*, simbolizados pelo círculo vermelho.

O gráfico da Figura 11 mostra que com o teste detector de *outliers*, muitas estações apresentaram quantidade de *outliers* diferente do sugerido no método tradicional de Hershfield. Das 65 estações estudadas, somente 13 apresentaram apenas 1 *outlier*, o que corresponde a 20% do total, ou seja, 80% dos resultados obtidos divergem do método tradicional, reforçando a necessidade da aplicação do teste, que possibilita a determinação correta da quantidade de eventos extremos em uma dada amostra.

Além disso, das 52 estações (80%) que apresentaram número de *outliers* diferente de 1, 44 exprimiram quantidade de eventos *outliers* igual a zero, isto é, pouco mais de 67% das estações não tiveram nenhum evento extremo máximo. Ademais, 6 estações apresentaram 2 *outliers*, correspondendo a cerca de 9,2% do total. Uma estação teve 3 eventos extremos e a estação de número 10, com código 2449006 apresentou a maior quantidade de *outliers*, 4 ao todo – ambas correspondendo a cerca de 1,54% do total.

Cabe destacar que nas estações 10, 16 e 43 existem eventos *outliers* de magnitude muito próxima, o que, em decorrência da escala do gráfico, gerou pontos sobrepostos. As estações 16 e 43 possuem 2 *outliers*. A quantidade de *outliers* de todas as estações também está expressa na Tabela 1.

Figura 11 - Gráfico *Box Plot* com as precipitações limites ( $P_{lim}$ ) e os outliers



Fonte: Autor (2021)

## 4.2 Análise estatística do conjunto de dados

O emprego dos dois métodos, o tradicional de Hershfield e o modificado, como se esperava, gerou medidas estatísticas distintas, que variam concomitantemente com a quantidade de *outliers* da série de dados. A Tabela 1 traz os parâmetros estatísticos de três situações diferentes: do conjunto completo de dados, dos dados após a aplicação do processo de Hershfield e dos dados trabalhados com o método modificado. Além disso, a tabela mostra a quantidade de *outliers* em cada estação pluviométrica e também a diferença em porcentagem entre a média e o desvio padrão calculados pelos dois métodos.

Tabela 1 - Parâmetros estatísticos

(continua)

Nº	Conjunto Completo			Hershfield		Modificado			Diferença (%)	
	Média	Desvio Padrão	PMO/ Outlier	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Nº de Outliers	Média	Desvio Padrão
1	83,33	22,34	163,00	82,29	20,52	82,29	20,52	1	0,00	0,00
2	79,53	18,41	144,00	78,44	16,66	79,53	18,56	0	-1,37	-10,24
3	83,79	31,86	241,10	81,51	26,00	81,51	26,00	1	0,00	0,00
4	84,67	19,61	147,60	83,41	17,82	84,67	19,80	0	-1,49	-9,99
5	82,67	22,74	155,50	81,24	20,73	82,67	22,96	0	-1,73	-9,73
6	83,91	24,62	150,00	82,84	23,53	83,91	24,82	0	-1,27	-5,22
7	94,42	50,10	412,00	88,07	22,65	88,07	22,65	1	0,00	0,00
8	96,77	28,59	177,10	95,25	26,88	96,77	28,86	0	-1,57	-6,87
9	63,55	26,45	128,50	62,72	25,74	63,55	26,62	0	-1,31	-3,32
10	68,10	21,07	153,00	66,71	18,35	64,09	14,58	4	4,08	25,84
11	67,77	26,27	136,20	66,80	25,34	67,77	26,45	0	-1,42	-4,22
12	79,74	20,35	163,60	78,65	18,20	79,74	20,48	0	-1,37	-11,14
13	78,00	20,73	145,00	76,63	18,77	78,00	20,94	0	-1,75	-10,38
14	86,57	28,27	175,00	85,09	26,30	86,57	28,51	0	-1,70	-7,74
15	74,01	27,00	162,00	72,38	24,65	74,01	27,25	0	-2,20	-9,53
16	74,21	22,35	137,20	73,27	21,30	72,31	19,94	2	1,33	6,82
17	86,15	20,21	154,00	84,94	18,38	86,15	20,39	0	-1,41	-9,82
18	90,44	26,00	172,40	88,80	23,75	90,44	26,26	0	-1,81	-9,57
19	95,41	28,97	164,00	94,28	28,06	95,41	29,20	0	-1,18	-3,92
20	98,83	30,32	181,60	97,18	28,54	98,83	30,62	0	-1,67	-6,82
21	87,55	27,29	189,70	85,58	23,78	85,58	23,78	1	0,00	0,00
22	91,34	20,49	159,80	89,97	18,43	91,34	20,70	0	-1,50	-10,97
23	95,74	23,82	155,00	94,55	22,75	95,74	24,06	0	-1,24	-5,44
24	97,92	27,43	172,90	96,42	25,81	97,92	27,70	0	-1,53	-6,84
25	92,95	17,66	126,90	92,27	17,33	92,95	17,83	0	-0,73	-2,79
26	97,52	31,19	255,90	94,41	22,36	94,41	22,36	1	0,00	0,00
27	103,16	29,93	243,00	101,07	24,95	101,07	24,95	1	0,00	0,00
28	90,68	29,37	171,20	89,13	27,70	90,68	29,65	0	-1,71	-6,61
29	92,07	26,31	205,10	89,90	21,54	92,07	26,56	0	-2,36	-18,91

Tabela 1 - Parâmetros estatísticos.

Nº	Conjunto Completo			Hershfield		Modificado			(conclusão) Diferença (%)	
	Média	Desvio Padrão	PMO/ Outlier	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Nº de Outliers	Média	Desvio Padrão
30	95,06	40,04	321,20	92,20	31,31	88,86	23,64	3	3,76	32,44
31	114,90	42,06	223,20	112,86	40,09	114,90	42,46	0	-1,78	-5,57
32	106,18	27,55	172,00	105,25	26,80	106,18	27,75	0	-0,87	-3,42
33	80,71	25,93	204,90	79,00	21,77	79,00	21,77	1	0,00	0,00
34	79,78	18,66	147,80	78,90	17,20	79,78	18,78	0	-1,11	-8,44
35	78,00	22,06	147,50	77,08	20,83	78,00	22,21	0	-1,19	-6,22
36	80,13	28,26	163,00	78,70	26,53	80,13	28,50	0	-1,78	-6,91
37	77,90	21,55	146,20	77,17	20,58	77,90	21,66	0	-0,93	-4,99
38	84,65	23,42	164,60	83,57	21,79	84,65	23,58	0	-1,28	-7,58
39	81,85	30,15	243,90	79,72	24,06	79,72	24,06	1	0,00	0,00
40	83,92	28,53	204,20	82,25	25,11	82,25	25,11	1	0,00	0,00
41	79,03	26,80	227,40	76,84	20,15	76,84	20,15	1	0,00	0,00
42	85,74	27,14	160,00	84,34	25,62	85,74	27,39	0	-1,63	-6,45
43	89,15	28,58	184,00	87,54	26,22	85,91	23,24	2	1,90	12,80
44	88,83	29,24	220,80	86,43	23,63	84,70	20,02	2	2,05	18,05
45	93,03	29,71	214,50	90,90	25,42	90,90	25,42	1	0,00	0,00
46	113,11	32,03	223,20	111,46	29,50	113,11	32,27	0	-1,45	-8,56
47	103,39	25,27	156,30	102,48	24,71	103,39	25,48	0	-0,88	-3,01
48	103,34	29,13	209,00	101,27	25,60	103,34	29,42	0	-2,00	-13,00
49	100,94	31,11	206,70	98,78	27,76	100,94	31,43	0	-2,14	-11,68
50	114,33	30,04	186,00	112,89	28,85	114,33	30,34	0	-1,25	-4,91
51	112,72	37,97	241,20	110,10	33,92	107,50	28,92	2	2,42	17,30
52	104,47	28,29	188,00	103,15	26,68	104,47	28,52	0	-1,27	-6,43
53	104,43	31,30	181,00	103,27	30,30	104,43	31,54	0	-1,11	-3,91
54	99,11	31,89	203,40	96,98	28,77	99,11	32,21	0	-2,15	-10,67
55	75,11	26,53	224,80	73,48	21,68	72,16	17,65	2	1,84	22,87
56	92,25	47,46	405,20	88,19	31,72	85,86	24,45	2	2,71	29,74
57	87,81	20,86	152,40	86,83	19,58	87,81	21,01	0	-1,11	-6,84
58	90,17	28,41	224,00	87,60	21,93	87,60	21,93	1	0,00	0,00
59	86,60	25,73	167,50	85,40	24,11	86,60	25,92	0	-1,39	-6,98
60	90,53	26,00	164,40	87,85	22,45	90,53	26,23	0	-2,97	-14,41
61	90,28	22,17	157,70	88,91	20,38	90,28	22,39	0	-1,52	-9,00
62	86,94	26,39	195,10	84,86	22,14	84,86	22,14	1	0,00	0,00
63	104,38	28,67	177,90	103,12	27,47	104,38	28,92	0	-1,21	-5,02
64	94,83	24,58	166,70	93,42	22,87	94,83	24,82	0	-1,49	-7,86
65	95,20	21,62	161,40	93,91	19,92	95,20	21,83	0	-1,36	-8,76

Fonte: Autor (2021)

Fica clara, portanto, a influência direta da quantidade de *outliers* nos valores de média e desvio padrão. Quando a quantidade é zero, há um aumento na média e desvio padrão em relação ao método tradicional, uma vez que nenhum ano é retirado e a série inteira é usada nessa determinação. Tal aumento, que é representado na

Tabela 1 com o sinal negativo (-), chegou a ser quase 3% para a média e cerca de 14,4% para o desvio padrão. Isso ocorre porque o teste IQR determinou que, estatisticamente, as estações em questão não apresentam nenhum evento extremo muito distante do resto da amostra.

Com relação as estações pluviométricas que apresentaram apenas um *outlier* após a aplicação do teste IQR, nota-se que essas não exibem nenhuma diferença entre as médias e os desvios padrão obtidos pelos dois métodos, isso ocorre pois o número de *outliers* para o método tradicional sempre é igual a 1. Como a quantidade, nessas estações, é a mesma, os parâmetros estatísticos também são – resultando, dessa forma, em diferença igual a zero, observada na Tabela 1.

Seguindo essa linha, observa-se que, para as estações que apresentaram mais de um evento extremo, existe uma diminuição das medidas estatísticas. Nas estações com 2 *outliers*, as diferenças entre as médias e desvios padrão chegam até cerca de 2,7% e 29,7%, respectivamente. Na estação com 3 *outliers*, as médias apresentaram diferença de quase de 3,8% e os desvios padrão, de aproximadamente 32,4%.

Fernando e Wickramasuriya (2021), analisando uma estação pluviométrica no Sri Lanka – que também apresentou 3 *outliers*, encontraram uma redução de 4,2% para as médias e de 17,1% para o desvio padrão. Concluindo, portanto, que essa diminuição é inversamente proporcional ao número de *outliers*. O mesmo princípio é visto na estação pluviométrica com 4 *outliers*, que exibe uma redução de 4,08% para a média e de cerca de 25,8% para o desvio padrão.

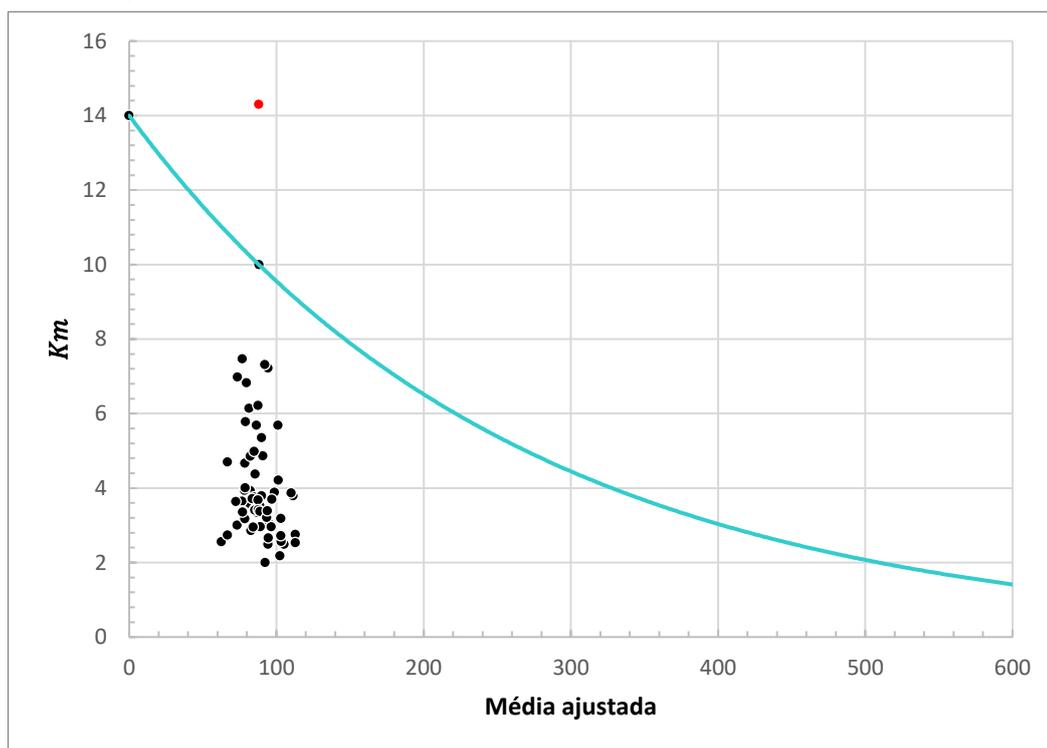
### 4.3 Fator de frequência ( $K_m$ )

O fator de frequência ( $K_m$ ), de acordo com o método de Hershfield tradicional, pode ser obtido através do gráfico da Figura 7, cruzando-se o valor da média ajustada com a curva de 24h. No entanto, vários pesquisadores desenvolveram a curva de envelope baseada nos dados da região de estudo, conferindo assim, maior precisão na determinação do  $K_m$  (ALIAS; LUO; TAKARA, 2013; CASAS *et. al.*, 2008). Com isso, foram comparados os  $K_m$ s obtidos por meio da Figura 7 com os  $K_m$ s obtidos pelo ajuste empírico regional da curva envelope para o estado Paraná.

Para gerar a curva para os dados do estado do Paraná, primeiramente, através da Equação 2, foi calculado o  $K$  para cada estação. Assim, foi gerado o gráfico de dispersão (Figura 12) com as médias ajustadas no eixo horizontal e os valores de  $K_m$  no eixo das ordenadas. Com os pontos marcados e para que a curva representasse a série da maneira mais precisa possível, optou-se por remover o ponto com o maior  $K$  – que está destacado em vermelho, do processo de envelopamento. Metodologia semelhante foi utilizada por Alias, Luo e Takara (2013). Assim, foi plotada a linha de tendência baseada somente nos maiores valores (com exceção do ponto vermelho) e por fim, gerada a curva de envelope que pode ser descrita pela Equação 7, onde  $\bar{X}_n$  é a média ajustada.

$$K_m = 14 \cdot e^{-0,004 \cdot \bar{X}_n} \quad (7)$$

**Figura 12 - Curva para determinação do Km para o estado do Paraná**



**Fonte: Autor (2021)**

A Tabela 2 exibe os valores de  $K_m$  encontrados. Na terceira coluna são apresentados os  $K_m$ s calculados pela Equação 2, na quarta coluna são apresentados os valores obtidos através do gráfico elaborado por Hershfield (Figura 7) e na quinta coluna, são apresentados os  $K_{mP}$ s determinados por meio da curva envelope que é exibida na Figura 12. Já a última coluna apresenta a diferença entre  $K_{mH}$  e  $K_{mP}$ .

Tabela 2 - Fatores de frequência (*K*)

					(continua)
Nº	Código da Estação	<i>K</i>	<i>K<sub>mH</sub></i>	<i>K<sub>mP</sub></i>	Diferença
1	2349033	3,93	15,89	10,05	58,11%
2	2350000	3,94	16,05	10,21	57,17%
3	2350002	6,14	15,97	10,13	57,64%
4	2350017	3,60	15,85	10,01	58,33%
5	2350062	3,58	15,95	10,11	57,77%
6	2352000	2,85	15,87	10,03	58,24%
7	2353001	14,30	15,85	10,21	57,17%
8	2353002	3,05	15,39	9,55	61,17%
9	2449000	2,56	16,69	10,87	53,50%
10	2449006	4,70	16,55	10,72	54,31%
11	2449007	2,74	16,52	10,70	54,43%
12	2450002	4,67	16,04	10,20	57,22%
13	2450005	3,64	16,13	10,30	56,67%
14	2450006	3,42	15,79	9,95	58,69%
15	2450009	3,64	16,32	10,49	55,60%
16	2450010	3,00	16,25	10,42	55,97%
17	2451003	3,76	15,79	9,95	58,72%
18	2451013	3,52	15,65	9,81	59,56%
19	2451014	2,48	15,41	9,57	61,02%
20	2451015	2,96	15,32	9,48	61,61%
21	2451017	4,38	15,79	9,95	58,70%
22	2452009	3,79	15,59	9,75	59,90%
23	2452011	2,66	15,40	9,56	61,07%
24	2452014	2,96	15,34	9,50	61,46%
25	2452015	2,00	15,48	9,63	60,63%
26	2453013	7,22	15,48	9,64	60,59%
27	2454000	5,69	15,18	9,35	62,47%
28	2454001	2,96	15,63	9,79	59,66%
29	2454003	5,35	15,63	9,78	59,70%
30	2548000	7,31	15,56	9,72	60,11%
31	2548002	2,75	14,73	8,91	65,39%
32	2548003	2,49	14,98	9,15	63,77%
33	2549000	5,78	16,05	10,21	57,17%
34	2549001	4,01	16,02	10,18	57,33%
35	2549003	3,38	16,10	10,26	56,88%
36	2549004	3,18	16,05	10,21	57,16%
37	2549006	3,35	16,08	10,25	56,95%
38	2550000	3,72	15,84	10,00	58,41%
39	2550001	6,83	16,03	10,20	57,24%
40	2550003	4,86	15,91	10,07	57,96%
41	2550005	7,47	16,15	10,32	56,54%
42	2550025	2,95	15,82	9,98	58,53%
43	2551000	3,68	15,70	9,86	59,26%
44	2551001	5,69	15,77	9,93	58,81%
45	2551004	4,86	15,58	9,74	59,96%

Tabela 2 - Fatores de frequência ( $K$ )

Nº	Código da Estação	$K$	$K_{mH}$	$K_{mP}$	(conclusão)
					Diferença
46	2552000	3,79	14,77	8,94	65,14%
47	2552001	2,18	15,08	9,25	63,09%
48	2552006	4,21	15,17	9,34	62,52%
49	2553004	3,89	15,27	9,44	61,88%
50	2553009	2,53	14,70	8,88	65,54%
51	2553012	3,87	14,85	9,03	64,57%
52	2554001	3,18	15,07	9,24	63,16%
53	2554002	2,57	15,06	9,23	63,22%
54	2554006	3,70	15,34	9,50	61,45%
55	2649006	6,98	16,27	10,44	55,86%
56	2651000	9,99	15,76	9,92	58,86%
57	2651003	3,35	15,70	9,86	59,23%
58	2651004	6,22	15,73	9,89	59,05%
59	2651005	3,41	15,77	9,93	58,83%
60	2651013	3,41	15,73	9,89	59,09%
61	2651015	3,38	15,64	9,79	59,64%
62	2651016	4,98	15,82	9,98	58,50%
63	2652009	2,72	15,07	9,24	63,16%
64	2652010	3,20	15,46	9,62	60,74%
65	2652011	3,39	15,43	9,59	60,89%

Nota:  $K$  é o fator de frequência calculado pela Equação 2,  $K_{mH}$  foi obtido pelo gráfico da Figura 7 e  $K_{mP}$  foi determinado pela curva envelope (Figura 12) gerada para o Paraná.

Fonte: Autor (2021)

Por meio da Tabela 2 é possível observar que determinar o  $K_m$  baseado nos dados da região estudada ao invés de o fazer seguindo o gráfico proposto por Hershfield (Figura 7) pode gerar diferenças consideráveis. Analisando os dados em questão, fica evidente que a curva do método tradicional não representa as características de precipitação do estado paranaense, uma vez que resulta em fatores de frequência muito maiores que os calculados. Dessa forma, o ajuste empírico regional da curva envelope se mostra mais adequado, em concordância com Sammen *et al.* (2018) e Sarkar e Maity (2020).

Já a curva elaborada para o Paraná, apesar de ainda gerar valores mais altos que os calculados, exhibe resultados menores e, portanto, mais coerentes com a realidade da região em questão. A diferença entre os  $K_m$ s obtidos das duas formas variam entre pouco mais de 50% até quase 66%, dependendo da estação. Disparidade essa que, nessa ordem, contribui para PMPs mais altas.

Além das duas formas para a determinação do fator de frequência citadas – que utilizam a média ajustada do método tradicional, foi verificada também a utilização da média ajustada do método modificado. No entanto, os  $K_{ms}$  estimados com a média ajustada do método modificado apresentaram variação muito pequena quando comparados com os baseados na média do processo tradicional. A diferença expressa, em módulo, não foi maior que 3%. Visto isso, optou-se por os apresentar na Tabela 5 do Apêndice B e prosseguir, portanto, com os primeiros valores, mostrados na Tabela 2.

#### 4.4 Valores de PMP

Após a determinação dos parâmetros estatísticos e de posse dos  $K_{ms}$ , o próximo passo foi estimar os valores de PMPs. A Tabela 3 mostra os resultados encontrados para o estado do Paraná. São exibidos 4 valores de PMPs (em mm) para a mesma estação pluviométrica, onde cada método apresenta duas PMPs. A primeira,  $PMP_1$ , é calculada com o  $K_{mH}$  e a segunda,  $PMP_2$ , é determinada com  $K_{mP}$  – os detalhes dos  $K_{ms}$  foi discutido na seção anterior. Além disso, a mesma tabela apresenta a diferença entre os resultados em porcentagem, em “a” a diferença entre as  $PMP_1$  e em “b” a diferença entre as  $PMP_2$ . O sinal negativo (-) expressa um aumento na estimativa do processo modificado em comparação com o tradicional.

Tabela 3 - Comparação das Precipitações Máximas Prováveis

Nº	Código da Estação	Nº de Outliers	Hershfield Tradicional		Hershfield Modificado		Diferença (%)	
			PMP <sub>1</sub>	PMP <sub>2</sub>	PMP <sub>1</sub>	PMP <sub>2</sub>	a	b
1	2349033	1	409,45	289,44	409,45	289,44	0,00	0,00
2	2350000	0	342,77	246,80	405,77	287,68	-15,53	-14,21
3	2350002	1	450,31	315,24	450,31	315,24	0,00	0,00
4	2350017	0	363,84	260,68	428,49	302,44	-15,09	-13,81
5	2350062	0	409,91	289,65	483,42	337,29	-15,21	-14,13
6	2352000	0	472,20	329,12	514,87	356,87	-8,29	-7,78
7	2353001	1	261,33	165,74	261,33	165,74	0,00	0,00
8	2353002	0	519,55	358,68	582,78	399,06	-10,85	-10,12
9	2449000	0	518,80	360,00	549,19	380,37	-5,53	-5,36
10	2449006	4	354,92	253,47	243,76	179,65	45,60	41,09
11	2449007	0	507,36	352,23	545,58	377,66	-7,00	-6,73
12	2450002	0	363,74	260,16	439,32	309,03	-17,21	-15,81
13	2450005	0	375,68	267,57	447,79	314,59	-16,10	-14,95
14	2450006	0	506,52	350,75	578,99	397,51	-12,52	-11,76
15	2450009	0	472,59	329,54	560,08	386,93	-15,62	-14,83
16	2450010	2	433,37	304,35	387,07	273,98	11,96	11,08

(continua)

Tabela 3 - Comparação das Precipitações Máximas Prováveis

(continuação)

Nº	Código da Estação	Nº de Outliers	Hershfield Tradicional		Hershfield Modificado		Diferença (%)	
			PMP <sub>1</sub>	PMP <sub>2</sub>	PMP <sub>1</sub>	PMP <sub>2</sub>	a	b
17	2451003	0	373,33	266,83	438,70	308,91	-14,90	-13,62
18	2451013	0	459,01	320,88	540,24	373,02	-15,04	-13,98
19	2451014	0	551,72	378,67	587,92	402,00	-6,16	-5,81
20	2451015	0	545,96	375,00	612,12	417,20	-10,81	-10,12
21	2451017	1	442,13	310,18	442,13	310,18	0,00	0,00
22	2452009	0	372,09	266,57	444,94	313,15	-16,37	-14,88
23	2452011	0	460,09	321,77	501,61	348,45	-8,28	-7,66
24	2452014	0	503,00	348,41	563,14	386,80	-10,68	-9,93
25	2452015	0	380,49	272,14	395,58	282,05	-3,81	-3,51
26	2453013	1	364,10	261,92	364,10	261,92	0,00	0,00
27	2454000	1	445,29	312,93	445,29	312,93	0,00	0,00
28	2454001	0	534,41	368,12	597,78	408,97	-10,60	-9,99
29	2454003	0	390,05	277,72	546,26	377,15	-28,60	-26,36
30	2548000	3	506,81	350,81	321,96	232,94	57,41	50,60
31	2548002	0	726,66	484,09	798,77	529,30	-9,03	-8,54
32	2548003	0	531,99	366,28	561,31	384,92	-5,22	-4,84
33	2549000	1	398,75	282,42	398,75	282,42	0,00	0,00
34	2549001	0	356,41	255,54	409,36	289,85	-12,93	-11,83
35	2549003	0	422,69	297,61	469,21	327,93	-9,91	-9,25
36	2549004	0	514,69	356,19	580,27	398,96	-11,30	-10,72
37	2549006	0	422,71	297,63	459,26	321,45	-7,96	-7,41
38	2550000	0	434,26	305,17	493,41	343,31	-11,99	-11,11
39	2550001	1	414,84	292,67	414,84	292,67	0,00	0,00
40	2550003	1	465,68	324,99	465,68	324,99	0,00	0,00
41	2550005	1	343,31	246,85	343,31	246,85	0,00	0,00
42	2550025	0	501,93	347,88	559,75	385,38	-10,33	-9,73
43	2551000	2	499,27	346,13	408,04	287,66	22,36	20,33
44	2551001	2	414,35	292,69	318,32	230,98	30,17	26,72
45	2551004	1	460,13	321,63	460,13	321,63	0,00	0,00
46	2552000	0	549,62	377,04	634,71	429,86	-13,41	-12,29
47	2552001	0	501,15	347,37	524,46	362,38	-4,44	-4,14
48	2552006	0	473,31	330,19	592,00	404,82	-20,05	-18,43
49	2553004	0	511,14	353,46	626,26	426,21	-18,38	-17,07
50	2553009	0	557,79	381,98	602,83	410,33	-7,47	-6,91
51	2553012	2	600,52	407,96	461,51	321,50	30,12	26,89
52	2554001	0	517,47	357,39	575,14	393,76	-10,03	-9,24
53	2554002	0	585,93	399,33	624,32	423,75	-6,15	-5,76
54	2554006	0	531,18	365,87	639,80	434,76	-16,98	-15,85
55	2649006	2	387,89	275,16	279,23	204,51	38,91	34,54
56	2651000	2	450,75	315,62	298,50	218,14	51,01	44,69
57	2651003	0	402,14	285,14	449,24	315,45	-10,48	-9,61
58	2651004	1	377,29	269,46	377,29	269,46	0,00	0,00
59	2651005	0	474,34	330,47	533,83	368,82	-11,14	-10,40
60	2651013	0	419,39	295,93	541,93	374,95	-22,61	-21,07

Tabela 3 - Comparação das Precipitações Máximas Prováveis

Nº	Código da Estação	Nº de Outliers	Hershfield Tradicional		Hershfield Modificado		Diferença (%)	
			PMP <sub>1</sub>	PMP <sub>2</sub>	PMP <sub>1</sub>	PMP <sub>2</sub>	a	b
61	2651015	0	408,68	289,37	473,75	331,16	-13,73	-12,62
62	2651016	1	405,00	286,72	405,00	286,72	0,00	0,00
63	2652009	0	536,27	368,91	581,56	397,65	-7,79	-7,23
64	2652010	0	452,43	316,95	514,87	356,86	-12,13	-11,18
65	2652011	0	403,28	286,42	464,36	325,37	-13,15	-11,97

Nota: PMP<sub>1</sub> calculadas com o  $K_{mH}$  e PMP<sub>2</sub> com o  $K_{mP}$ , todas em milímetros.

Fonte: Autor (2021)

Por meio da Tabela 3, é possível observar que os valores de PMPs para o estado do Paraná variam de cerca 165 até quase 800 milímetros, dependendo da estação pluviométrica. Resultados esses que, em geral, são muito parecidos com os obtidos por Burger (2014), embora a pesquisadora tenha aplicado outros métodos e estudado estações diferentes no estado.

Olhando para cada método individualmente, fica clara a influência do  $K_m$  na estimativa da PMP. Os valores obtidos com o  $K_{mH}$  (PMP<sub>1</sub>) são consideravelmente mais altos que os estimados com  $K_{mP}$  (PMP<sub>2</sub>), apresentado uma diferença na ordem de 30%, tanto para o Hershfield tradicional quanto para o método modificado. Semelhantemente, a diferença entre as PMPs estimadas com o  $K_{mH}$  também foi mais alta que a calculada entre as PMPs determinadas com o  $K_{mP}$ .

Agora comparando os dois métodos aplicados, a Tabela 3 mostra que houve um aumento nas PMPs estimadas pelo método modificado, em comparação com o Hershfield tradicional, para as estações pluviométricas que não apresentaram nenhum *outlier*. Para essas estações, a diferença entre os métodos varia entre cerca 3,5% até 28,6%, mostrando que o método tradicional nem sempre é mais conservador, como observado por alguns pesquisadores (ŞEN; AS-SEFRY; AL-HARITHY, 2016; BURGUER, 2014). Da mesma forma, para as estações que, após a aplicação do teste detector de *outliers*, tiveram apenas 1 evento extremo, a diferença na PMP é nula, visto que os dois métodos, nesse caso, resultaram na mesma quantidade de *outliers*.

Para as estações com mais de um *outlier*, a Tabela 3 exibe PMPs estimadas pelo método modificado menores que as determinadas pelo método de Hershfield tradicional. O método modificado, para as estações com 2 eventos extremos, apresentou uma diminuição nos valores de PMP que varia entre 11,8% até pouco mais

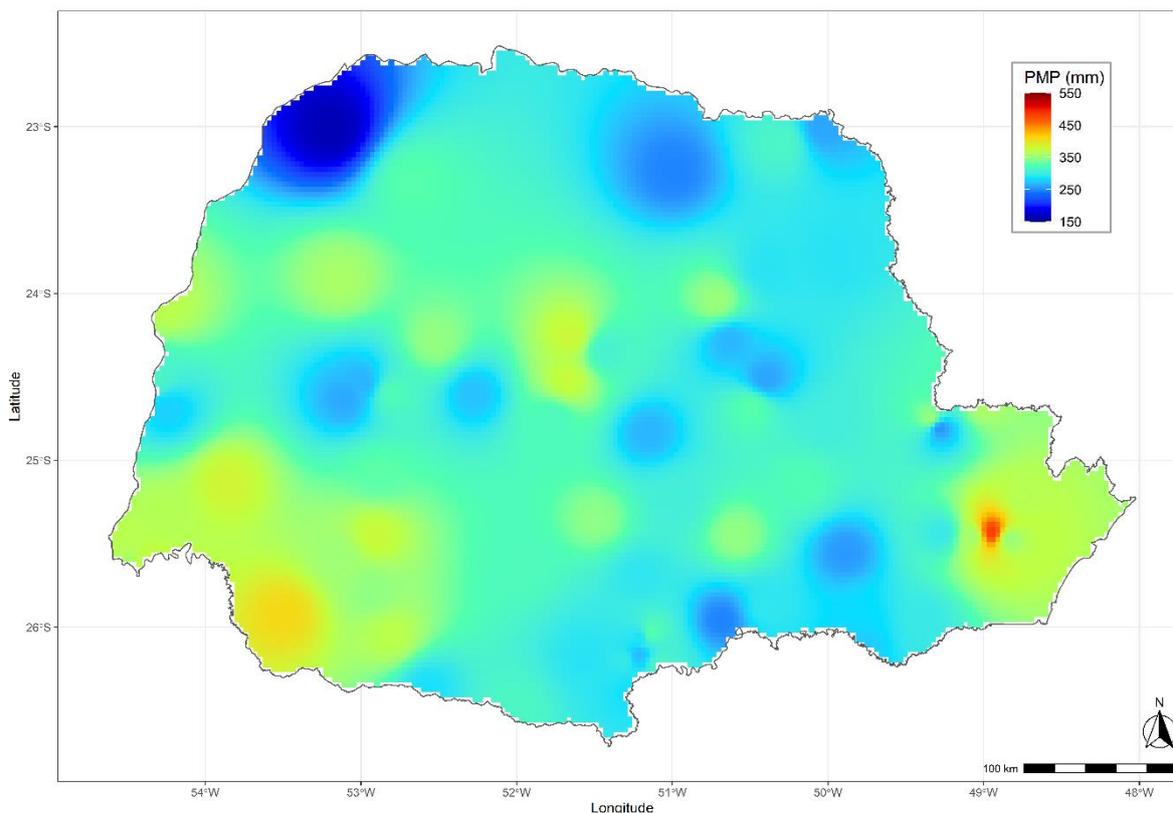
de 51%. Para a estação com 3 *outliers*, a variação entre as PMPs estimadas pelos dois métodos, é de 57,41% para as determinadas com  $K_{mH}$  e de 50,6 para as que levaram o  $K_{mP}$  em sua fórmula.

Ainda, dentre as estações selecionadas, uma apresentou 4 *outliers*. Para essa amostra, o método modificado resultou em uma estimativa para  $PMP_1$  45,6% menor que o método de Hershfield tradicional e, paralelamente cerca de 40,1% menor para  $PMP_2$ . Os resultados descrevem a influência notória que os eventos extremos têm sobre a estimativa final da PMP em uma dada amostra, sendo essa influência proporcional ao número de *outliers* determinado, ou seja, quando a quantidade de outliers aumenta, a PMP estimada pelo método modificado tende a diminuir em comparação com a estimativa de Hershfield, fato que corrobora com os achados de Fernando e Wickramasuriya (2021).

#### 4.5 Análise espacial da PMP

Com os resultados da Tabela 3, ou seja, com os valores de PMPs obtidos através da aplicação do método de Hershfield tradicional e do método modificado, foram gerados mapas, um para os resultados de cada método e um para a diferença entre eles. Para que a plotagem em todo território do estado fosse possível, foi realizado a interpolação espacial pelo inverso do quadrado da distância baseado nos resultados das 65 estações estudadas. Ainda, cabe destacar que os valores de PMP utilizados para os mapas, foram os estimados com o fator de frequência para o estado do Paraná -  $K_{mP}$ .

Na Figura 13 é possível ver o mapa de PMP gerado com os valores estimados pelo método de Hershfield tradicional, os resultados variam em uma escala cromática iniciada pelo azul escuro que representa 150 mm até o vermelho escuro, representando 550 mm de precipitação. Pela distribuição espacial, observa-se uma tendência de valores de PMP mais altos nos extremos leste e oeste do estado, com PMPs maiores que 400 milímetros. Enquanto que no centro, norte e sul do mapa, as nuvens azuis se destacam, refletindo PMPs mais baixas, próximas 150 mm. Excetuando os pontos já mencionados, o verde ou azul água predomina sobre o mapa, representando PMPs na ordem de 300 mm.

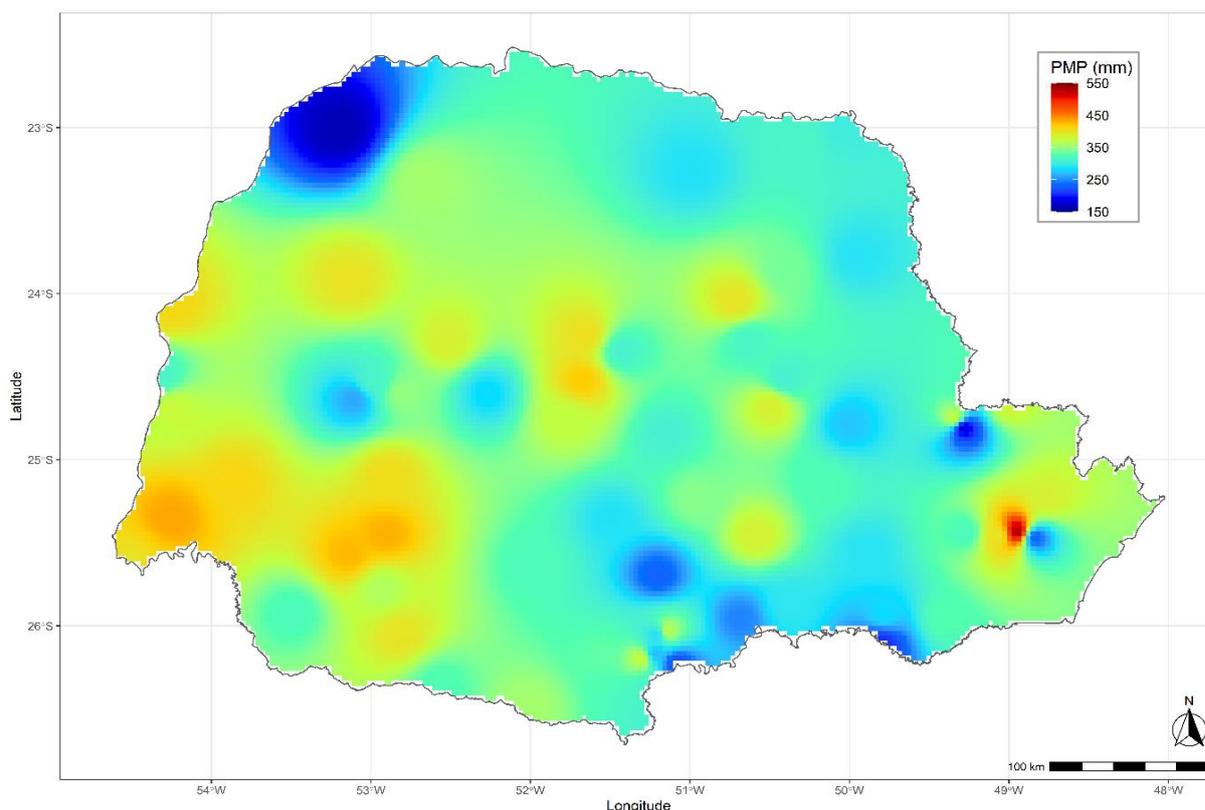
**Figura 13 - Mapa de PMPs estimadas pelo método de Hershfield tradicional**

**Fonte: Autor (2021)**

O mapa de PMP do método de Hershfield modificado é apresentado na Figura 14. Os valores de PMP se distribuem espacialmente seguindo a mesma escala cromática do mapa da Figura 13. Através do mapa é possível observar valores de PMP mais altos no oeste paranaense, variando entre cerca de 400 a 450 mm. No extremo leste do estado, encontra-se o ponto de PMP mais alta, com valor próximo a 550 milímetros, contrastando com um ponto muito próximo de PMP baixa, na ordem de 150 mm.

O método modificado também apresentou valores de PMP mais baixas no sul. No entanto, diferentemente do visto na Figura 13, o método não resultou em PMPs tão baixas no norte nem no centro do Paraná, o que pode ser justificado pelo grande número de estações pluviométricas que não apresentaram nenhum *outlier*, resultando, como visto na Tabela 3, em estimativas mais altas, quando em comparação com o método de Hershfield tradicional.

**Figura 14 - Mapa de PMPs estimadas pelo método de Hershfield modificado**



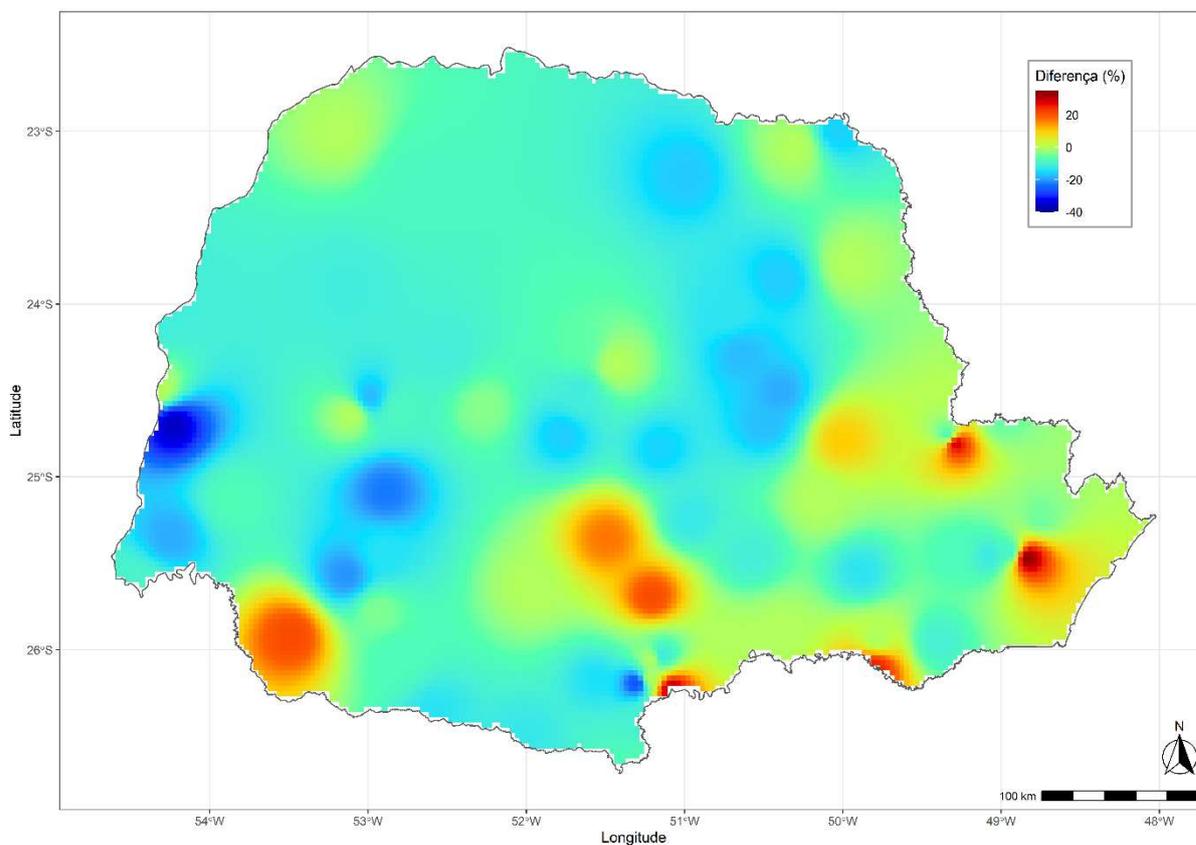
**Fonte: Autor (2021)**

As diferenças entre os valores obtidos pelo método de Hershfield tradicional e o método modificado estão apresentadas no mapa da Figura 15. Essa distribuição espacial foi gerada a partir da diferença entre as interpolações baseadas nas 65 estações para os dois métodos estatísticos. A escala cromática que representa a diferença entre os métodos é a mesma utilizada nos mapas das Figuras 13 e 14, indo do azul escuro até o vermelho escuro, com a diferença expressa em porcentagem e, dessa vez, variando entre - 40 e 35%. O sinal (-) negativo está associado à uma PMP estimada pelo método modificado maior que a estimada pelo tradicional e, portanto, a diferença positiva significa que os valores obtidos pelo método modificado são menores que os estimados pelo Hershfield tradicional.

A partir do mapa da Figura 15, verifica-se que no sul e leste do estado há maior incidência de diferenças positivas, ou seja, nessa área as PMPs estimadas pelo método modificado foram, em geral, menores que as estimadas pelo método tradicional, resultando em uma diferença positiva próxima a 30%. Já no norte e oeste, o que se vê é a predominância de azuis claro, refletindo valores de PMP estimados pelo método modificado maiores, em magnitude não superior a 20%, que os estimados pelo método de Hershfield tradicional. Ainda nessa região, é possível

observar alguns pontos isolados onde o azul se intensifica, expressando diferenças, em módulo, maiores que 20%.

**Figura 15 - Mapa da diferença entre as PMPs estimadas pelo método de Hershfield tradicional e pelo método modificado**



**Fonte: Autor (2021)**

É interessante observar que, ao comparar os mapas gerados com os resultados do método tradicional e do método modificado com a distribuição climática do Paraná da Figura 4, é possível ver que a distribuição dos valores de PMPs no estado segue um padrão muito parecido com a classificação climática regional de Köppen e Geiger apresentada por Aparecido *et al.* (2016).

A região norte por exemplo, que é caracterizada por não apresentar grandes volumes de precipitação, visto que seu clima é classificado em savana tropical úmida (Aw) e clima úmido temperado com inverno seco (Cwa), apresentou as menores PMPs do mapa. Já na região classificada como Cfa, que abrange o oeste, uma parte pequena do centro, do norte e do extremo leste do estado e é descrita como clima úmido temperado com verão quente, os valores de PMP foram os maiores, concordando com o fato desse tipo de clima não apresentar épocas muito secas.

Por fim, cabe mencionar que as diferenças, plotadas no mapa da Figura 15, foram obtidas por meio da aplicação da Equação 5 nos resultados da interpolação – pelo inverso do quadrado da distância – dos valores de PMP estimados pelos dois métodos. E, por consequência, os valores exibidos no mapa podem se distanciar um pouco das diferenças apresentadas na Tabela 3.

## 5 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo principal a estimativa da PMP para o estado do Paraná e além disso, a comparação dos resultados obtidos por dois métodos estatísticos: Hershfield tradicional e Hershfield modificado. A modificação, que é focada em uma análise estatística mais completa, se mostrou mais adequada para as 65 estações pluviométricas estudadas, já que consegue levar em consideração as características da distribuição dos eventos observados em cada amostra.

A referida pesquisa mostrou que, diferente do adotado pelo método de Hershfield tradicional, muitas das estações estudadas, exatos 80% do total, apresentaram quantidade de *outliers* diferente de 1. Fato esse que evidencia a importância da aplicação do teste identificador de *outlier* (IQR) – tido como a principal diferença apresentada pelo método modificado – uma vez que a influência desses eventos extremos pode ser muito significativa, resultando em diferenças que chegam a quase 60% quando comparados valores estimados pelos dois métodos, o tradicional e o modificado.

Para as estações que não apresentaram nenhum *outlier*, todos os valores de PMPs estimados pelo método modificado foram maiores que os estimados pelo método de Hershfield tradicional, em até quase 30%, exemplificando que o processo tradicional não gera sempre resultados superestimados e que cada série de dados de possui características diferentes que podem influenciar a estimativa da PMP. Agora para as estações que apresentaram mais de um *outlier*, as PMPs determinadas pelo método modificado foram sempre menores que as estimadas pelo método tradicional, com diferenças variando entre cerca de 11% até 57,4%.

Assim como a determinação do número de *outliers*, o fator de frequência ( $K_m$ ) também foi estimado de duas maneiras distintas, uma pelo gráfico empírico elaborado por Hershfield e outra pela curva de envelope baseada nos registros do próprio estado paranaense. Dentre os dois, o processo de envelopamento feito para o Paraná se mostrou mais preciso, com  $K_m$ s menores e consequentemente, mais próximos da realidade local. As diferenças entre os fatores de frequência determinados pelas duas formas foram sempre maiores que 50%, chegando até cerca de 65,5%.

Com relação a distribuição espacial dos valores de PMP, verificou-se que as maiores PMPs estão, em geral, localizadas nos extremos leste e oeste do estado. Enquanto que os menores valores de PMP são vistos com maior frequência nos extremos norte e sul do Paraná. Além disso, ficou evidente que a distribuição espacial das PMPs segue padrão semelhante à disposição da classificação climática do estado paranaense. Dessa forma, foi possível observar que PMPs mais altas, em geral, apareceram nas regiões onde o tipo de clima é justamente caracterizado por apresentar volumes maiores de precipitação.

Por fim, diante de todo o exposto e com os objetivos atendidos, cabe ressaltar que a modificação proposta por Fernando e Wickramasuriya (2021), por apresentar uma análise estatística mais completa, pode ser considerada mais precisa e, portanto, mais confiável para estimativas das PMPs, resultando em valores que podem ser usados com segurança no dimensionamento de estruturas hidráulicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIAS, Nor Eliza; LUO, Pingping; TAKARA, Kaoru. Probable maximum precipitation using statistical method for the Yodo River basin. **Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)**, v. 69, n. 4, p. I\_157-I\_162, 2013.
- AMORIM, R. C. F.; RIBEIRO, A.; LEITE, C. C. Avaliação do desempenho de dois métodos de espacialização da precipitação pluvial para o Estado de Alagoas. **Acta Scientiarum Technology**, v. 30, n. 1, p. 87-91, 2008.
- APARECIDO, L. E. O. *et al.* Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, p. 405-417, 2016.
- ARAÚJO, L. E. *et al.* Análise estatística de chuvas intensas na bacia hidrográfica do rio Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 2, p. 162-169, 2008.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: ABRH; UFRS, 2015. p.177-241.
- BURGER, L. C. **Adaptação e análise do método de Hershfield para estimativa da precipitação máxima provável (PMP)**. Curitiba, 2014.
- CALDEIRA T. L. *et al.* Modelagem probabilística de eventos de precipitação extrema no estado do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.19, n.3, p.197–203, 2015.
- CALDEIRA, T. L. **Regionalização de chuvas intensas no estado do Rio Grande do Sul**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Hídrica) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.
- CASAS M.C. *et al.* Estimation of the probable maximum precipitation in Barcelona (Spain). **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 9, p. 1322-1327, 2011.
- CASAS M.C. *et al.* The estimation of probable maximum precipitation: The case of Catalonia. Trends and directions in climate research. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1146, p. 291–302, 2008.
- CHAVAN, S. R.; SRINIVAS, V. V. Probable maximum precipitation estimation for catchments in Mahanadi river basin. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 892-899, 2015.
- EM-DAT, **The International Disaster Database**. CRED/UCLouvain, Bruxelas, Bélgica. (D. Guha-Sapir). Disponível em: [www.emdat.be](http://www.emdat.be). Acesso em: 02/07/2021.
- FERNANDES, W. S. **Método para a estimação de quantis de enchentes extremas com o emprego conjunto de análise bayesiana, de informações não sistemáticas e de distribuições limitadas superiormente**. 2009. Tese (Doutorado - Curso de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- FERNANDO, W. C. D. K.; WICKRAMASURIYA, S. S. Concept of Threshold in the Estimation of Probable Maximum Precipitation: Hershfield's Method Revisited. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 26, n. 3, p. 04020069, 2021.

GONÇALVES, L. S. **Relações Intensidade-duração-frequência com base em estimativas de precipitação por satélite**. 2011. Dissertação (Mestrado - Curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HERSHFIELD, D. M. Estimating the probable maximum precipitation. **Proc. Am. Soc. Civ. Eng. J. Hydraulics Division**, v. 87 n. 5, p. 99-116, 1961.

HERSHFIELD, D. M. Method for estimating the probable maximum precipitation. **J. Am. Water Works Association**, v. 57 n. 8, p. 965-972, 1965.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA; INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO SOCIAL E ECONÔMICO. **Paraná em números**. Curitiba: IGBE, 2018. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/Pagina/Parana-em-Numeros>. Acesso em: 14 jul. 2021.

IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change edited by Field. C. B. *et al.* 582 f. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, EUA, 2014.

KIRK, A. J.; MCCUEN, R. H. Outlier detection in multivariate hydrologic data. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 7, p. 641-646, 2008.

KOUTSOYIANNIS, Demetris. A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 4, p. 1313-1322, 1999.

PARANÁ. Agência de Notícias do Paraná. Secretaria de Estado da Comunicação Social e da Cultura. **Paraná vai receber novos empreendimentos hidrelétricos**. 2019. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=104499&tit=Parana-vai-receber-novos-empreendimentos-hidreletricos>. Acesso em: 20 jul. 2021.

PARANÁ. Instituto Água e Terra. Secretaria do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo. **Paraná está entre os estados com maior potencial de construção de PCHs e CGHs**. 2021. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/Noticia/Parana-esta-entre-os-estados-com-maior-potencial-de-construcao-de-PCHs-e-CGHs#>. Acesso em: 20 jul. 2021.

PARANÁ. Invest Paraná. Secretaria do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo. **Invista no Paraná o Estado mais inovador do Brasil**. 2020. Disponível em: <http://www.investparana.org.br/#>. Acesso em: 20 jul. 2021.

ROCHA, S. A. F. **Análise diária das chuvas intensas na bacia do Rio Mourão PR**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

SAMMEN, Saad *et al.* Estimation of probable maximum precipitation for tropical catchment. **MATEC Web of Conferences** 162, 03012, 2018.

SARKAR, Subharthi; MAITY, Rajib. Estimation of Probable Maximum Precipitation in the context of climate change. **MethodsX**, v. 7, p. 100904, 2020.

ŞEN, Zekai; AS-SEFRY, Saleh; AL-HARITHY, Saad. Probable maximum precipitation and flood calculations for Jeddah area, Kingdom of Saudi Arabia. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 1, p. 1-21, 2017.

SILVA NETO, V. L. *et al.* Precipitação máxima provável no estado do Tocantins: primeira aproximação pelo método estatístico de Hershfield. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, 2020.

SILVA, D. D. *et al.* **Equações de intensidade-duração-frequência da precipitação pluvial para o Estado de Tocantins**. Engenharia na Agricultura, v. 11, n. 1-4, 2003.

SUDERHSA. **Bacias Hidrográficas do Paraná**. Paraná: 2007. 1 mapa, color. Disponível em: [http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos\\_restritos/files/imagem/2020-07/bacias\\_hidrograficas\\_a4.jpg](http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/imagem/2020-07/bacias_hidrograficas_a4.jpg). Acesso em: 2 ago. 2021.

WESTRA, S. *et al.* Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall, **Reviews of Geophysics**, n. 52, p. 522–555, 2014.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation - PMP**. 291 p. Geneva: 2009.

## **APÊNDICE A - Estações pluviométricas selecionadas**

Tabela 4 - Estações pluviométricas selecionadas

(continua)

Nº	Código da Estação	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude	Anos
1	2349033	Tomazina	-23.7667	-49.9500	483	78
2	2350000	Jataizinho	-23.2583	-50.9844	350	60
3	2350002	Andirá	-23.0853	-50.2856	375	70
4	2350017	Cambará	-23.0000	-50.0331	450	51
5	2350062	Figueira	-23.8503	-50.3911	526	52
6	2352000	Rondon	-23.3242	-52.6669	250	63
7	2353001	Santa Isabel do Ivaí	-23.0067	-53.1889	400	51
8	2353002	Mariluz	-23.9167	-53.1331	320	54
9	2449000	Adrianópolis	-24.6556	-48.9997	180	79
10	2449006	Cerro Azul	-24.8000	-49.2833	270	62
11	2449007	Doutor Ulysses	-24.7500	-49.3333	400	72
12	2450002	Tibagi	-24.5108	-50.4000	720	78
13	2450005	Telêmaco Borba	-24.2831	-50.6331	650	50
14	2450006	Ortigueira	-24.0450	-50.7128	550	61
15	2450009	Tibagi	-24.6778	-50.4844	750	55
16	2450010	Castro	-24.7833	-50.0000	1009	68
17	2451003	Cândido de Abreu	-24.8333	-51.1500	550	57
18	2451013	Pitanga	-24.7500	-51.7667	860	51
19	2451014	Ivaiporã	-24.2500	-51.6500	360	62
20	2451015	Manoel Ribas	-24.5167	-51.6667	972	51
21	2451017	Grandes Rios	-24.3444	-51.4239	600	53
22	2452009	Ubiratã	-24.5333	-52.9833	509	51
23	2452011	Campina da Lagoa	-24.5997	-52.8042	618	51
24	2452014	Mamborê	-24.2831	-52.5167	702	51
25	2452015	Roncador	-24.6000	-52.2667	730	51
26	2453013	Iguatu	-24.6333	-53.1000	730	52
27	2454000	Marechal Cândido Rondon	-24.4922	-54.3161	225	68
28	2454001	Guaira	-24.0667	-54.2500	218	53
29	2454003	Entre Rios do Oeste	-24.6925	-54.2325	245	53
30	2548000	Morretes	-25.4667	-48.8333	8	80
31	2548002	Morretes	-25.4283	-48.9442	680	54
32	2548003	Antonina	-25.2333	-48.7500	80	72
33	2549000	Lapa	-25.9333	-49.7833	750	74
34	2549001	Porto Amazonas	-25.5500	-49.8833	793	78
35	2549003	Quitandinha	-25.9500	-49.3931	810	76
36	2549004	Piraquara	-25.4500	-49.0667	900	59
37	2549006	Curitiba	-25.4333	-49.2667	924	95
38	2550000	Prudentópolis	-25.2372	-50.9608	690	75
39	2550001	São Mateus do Sul	-25.8756	-50.3894	760	77
40	2550003	Ponta Grossa	-25.1333	-50.1500	790	73
41	2550005	Mallet	-25.9522	-50.6792	750	69
42	2550025	Teixeira Soares	-25.4500	-50.5833	893	54
43	2551000	Guarapuava	-25.3500	-51.4833	950	60
44	2551001	Inácio Martins	-25.6942	-51.2025	960	56
45	2551004	Guarapuava	-25.6372	-51.9656	740	58

Tabela 4 - Estações pluviométricas selecionadas

						(conclusão)
Nº	Código da Estação	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude	Anos
46	2552000	Quedas do Iguaçu	-25.4483	-52.9044	550	68
47	2552001	São Jorge do Ivaí	-25.7739	-52.9328	390	59
48	2552006	Guaraniaçu	-25.0833	-52.8833	920	52
49	2553004	Cruzeiro do Iguaçu	-25.5667	-53.1333	450	50
50	2553009	Céu Azul	-25.1331	-53.8500	610	51
51	2553012	Ampére	-25.9167	-53.4833	330	50
52	2554001	Foz do Iguaçu	-25.6278	-54.4806	131	64
53	2554002	Foz do Iguaçu	-25.6831	-54.4331	152	67
54	2554006	São Miguel do Iguaçu	-25.3458	-54.2442	309	50
55	2649006	Rio Negro	-26.1000	-49.8000	770	93
56	2651000	União da Vitória	-26.2281	-51.0803	736	78
57	2651003	General Carneiro	-26.3867	-51.2719	800	67
58	2651004	Porto Vitória	-26.1667	-51.2167	790	53
59	2651005	União da Vitória	-26.0306	-51.1419	840	68
60	2651013	Bituruna	-26.1906	-51.2978	802	57
61	2651015	Bituruna	-26.1667	-51.5500	900	50
62	2651016	União da Vitória	-26.0500	-51.2000	800	53
63	2652009	Bom Sucesso do Sul	-26.0506	-52.8008	550	59
64	2652010	Palmas	-26.4833	-52.0000	1060	52
65	2652011	Mariópolis	-26.3500	-52.5667	850	52

Fonte: Autor (2021).

**APÊNDICE B - Comparação dos  $K_m$ s determinados com as médias ajustadas pelo método de Hershfield tradicional e pelo modificado**

**Tabela 5 - Comparação dos  $K_m$ s determinados com média ajustada do método modificado (continua)**

Nº	Código da Estação	Nº de Outliers	Hershfield		Modificado		Diferença	
			$K_{mH}$	$K_{mP}$	$K_{mH}$	$K_{mP}$	a	b
1	2349033	1	15,89	14,04	15,89	14,04	0,00%	0,00%
2	2350000	0	16,05	14,20	15,96	14,11	0,55%	0,88%
3	2350002	1	15,97	14,12	15,97	14,12	0,00%	0,00%
4	2350017	0	15,85	14,00	15,75	13,89	0,63%	1,01%
5	2350062	0	15,95	14,10	15,83	13,98	0,72%	1,15%
6	2352000	0	15,87	14,01	15,78	13,92	0,54%	0,86%
7	2353001	1	15,85	13,99	15,85	13,99	0,00%	0,00%
8	2353002	0	15,39	13,51	15,27	13,39	0,76%	1,22%
9	2449000	0	16,69	14,89	16,62	14,82	0,42%	0,67%
10	2449006	4	16,55	14,74	16,76	14,96	-1,26%	-2,01%
11	2449007	0	16,52	14,71	16,44	14,63	0,49%	0,78%
12	2450002	0	16,04	14,20	15,95	14,10	0,55%	0,88%
13	2450005	0	16,13	14,29	16,02	14,18	0,69%	1,10%
14	2450006	0	15,79	13,93	15,68	13,81	0,74%	1,19%
15	2450009	0	16,32	14,49	16,18	14,35	0,82%	1,31%
16	2450010	2	16,25	14,42	16,33	14,51	-0,48%	-0,76%
17	2451003	0	15,79	13,93	15,69	13,83	0,61%	0,98%
18	2451013	0	15,65	13,78	15,52	13,65	0,82%	1,32%
19	2451014	0	15,41	13,53	15,33	13,44	0,57%	0,91%
20	2451015	0	15,32	13,44	15,19	13,30	0,84%	1,34%
21	2451017	1	15,79	13,93	15,79	13,93	0,00%	0,00%
22	2452009	0	15,59	13,72	15,49	13,61	0,69%	1,10%
23	2452011	0	15,40	13,53	15,31	13,43	0,60%	0,96%
24	2452014	0	15,34	13,46	15,23	13,34	0,76%	1,21%
25	2452015	0	15,48	13,60	15,42	13,54	0,34%	0,55%
26	2453013	1	15,48	13,61	15,48	13,61	0,00%	0,00%
27	2454000	1	15,18	13,29	15,18	13,29	0,00%	0,00%
28	2454001	0	15,63	13,77	15,51	13,64	0,78%	1,25%
29	2454003	0	15,63	13,76	15,46	13,58	1,09%	1,75%
30	2548000	3	15,56	13,69	15,81	13,96	-1,59%	-2,54%
31	2548002	0	14,73	12,82	14,58	12,66	1,04%	1,65%
32	2548003	0	14,98	13,08	14,91	13,01	0,47%	0,75%
33	2549000	1	16,05	14,21	16,05	14,21	0,00%	0,00%
34	2549001	0	16,02	14,18	15,95	14,10	0,44%	0,71%
35	2549003	0	16,10	14,26	16,02	14,18	0,47%	0,75%
36	2549004	0	16,05	14,21	15,93	14,09	0,72%	1,15%
37	2549006	0	16,08	14,24	16,03	14,18	0,37%	0,59%
38	2550000	0	15,84	13,98	15,75	13,89	0,54%	0,87%
39	2550001	1	16,03	14,19	16,03	14,19	0,00%	0,00%
40	2550003	1	15,91	14,06	15,91	14,06	0,00%	0,00%
41	2550005	1	16,15	14,32	16,15	14,32	0,00%	0,00%
42	2550025	0	15,82	13,96	15,71	13,85	0,70%	1,13%
43	2551000	2	15,70	13,84	15,82	13,97	-0,80%	-1,27%
44	2551001	2	15,77	13,91	15,91	14,06	-0,84%	-1,34%

**Tabela 6 - Comparação dos  $K_m$ s determinados com média ajustada do método modificado (conclusão)**

Nº	Código da Estação	Nº de Outliers	Hershfield		Modificado		Diferença	
			$K_{mH}$	$K_{mP}$	$K_{mH}$	$K_{mP}$	a	b
45	2551004	1	15,58	13,71	15,58	13,71	0,00%	0,00%
46	2552000	0	14,77	12,86	14,64	12,73	0,84%	1,33%
47	2552001	0	15,08	13,19	15,02	13,12	0,46%	0,74%
48	2552006	0	15,17	13,28	15,02	13,12	1,05%	1,67%
49	2553004	0	15,27	13,39	15,11	13,22	1,09%	1,74%
50	2553009	0	14,70	12,80	14,60	12,69	0,73%	1,16%
51	2553012	2	14,85	12,95	15,05	13,15	-1,27%	-2,01%
52	2554001	0	15,07	13,18	14,97	13,07	0,67%	1,07%
53	2554002	0	15,06	13,17	14,98	13,08	0,59%	0,94%
54	2554006	0	15,34	13,46	15,18	13,29	1,07%	1,72%
55	2649006	2	16,27	14,44	16,38	14,56	-0,65%	-1,03%
56	2651000	2	15,76	13,90	15,94	14,09	-1,10%	-1,76%
57	2651003	0	15,70	13,84	15,63	13,76	0,49%	0,79%
58	2651004	1	15,73	13,87	15,73	13,87	0,00%	0,00%
59	2651005	0	15,77	13,91	15,67	13,81	0,61%	0,97%
60	2651013	0	15,73	13,87	15,52	13,64	1,35%	2,16%
61	2651015	0	15,64	13,77	15,53	13,66	0,69%	1,11%
62	2651016	1	15,82	13,97	15,82	13,97	0,00%	0,00%
63	2652009	0	15,07	13,18	14,98	13,08	0,64%	1,02%
64	2652010	0	15,46	13,58	15,35	13,47	0,71%	1,14%
65	2652011	0	15,43	13,56	15,33	13,45	0,65%	1,05%

Nota:  $K_{mH}$  foi obtido pelo gráfico da Figura 7 e  $K_{mP}$  foi determinado pela curva envelope (Figura 12) gerada para o Paraná. E a e b são as diferenças, entre os  $K_{mH}$  e  $K_{mP}$  respectivamente.

**Fonte: Autor (2021)**