

Caracterização pluviométrica do Quadrilátero Ferrífero na região do Sinclinal Moeda – Minas Gerais

Camila Evellyn Cruz^{1,*}, Isabela Sabadini Henriques Caetano², Ana Clara Vieira Mota¹, Júlia Jordânia Ferreira¹, Joana Victoria Fernandes de Souza², Leila Nunes Menegasse Velásquez³, Rodrigo Sérgio de Paula³

¹ Graduanda em Engenharia Ambiental. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), CEP: 31270-901, Belo Horizonte/MG, Brasil

² Graduanda em Engenharia de Minas. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), CEP: 31270-901, Belo Horizonte/MG, Brasil

³ Professora e Professor no Departamento de Geologia. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), CEP: 31270-901, Belo Horizonte/MG, Brasil

* E-mail do autor correspondente: camevellyn@gmail.com

Submetido em: 30 ago. 2021. Aceito em: 28 out. 2021

Resumo

Localizado na porção leste do Quadrilátero Ferrífero e sul da região metropolitana de Belo Horizonte, o Sinclinal Moeda apresenta relevância hídrica para a região e compreende 9 municípios. A análise do regime pluviométrico importa para conhecimento da dinâmica hídrica, além de ser um instrumento indicador de tendências climáticas e possíveis anomalias. Foram utilizados dados de séries históricas de sete estações pluviométricas da área no período de 1984/85 a 2018/19. Utilizou-se os métodos de Dupla Massa e Regressão Linear Múltipla para verificar a homogeneidade dos dados e completar os dados anuais faltantes através do R^2 . Realizou-se o cálculo das médias pluviométricas por estação, a partir do método da média aritmética. Em seguida, utilizou-se o método dos Polígonos Thiessen para os cálculos das áreas de influência e da precipitação média, além de determinar a estação mais representativa da área. Esboçou-se o comportamento pluviométrico centenário com a análise de dados da estação Mineração Morro Velho, com mais de 130 anos registrados, observando-se ciclos de aproximadamente 9 anos, afora uma redução a partir de 2013/14. A análise da pluviometria em relação aos dias de chuvas dos ciclos indicou a diminuição da pluviometria total, por revelar o decaimento dos dias de chuva.

Palavras-chave: Dupla Massa; Regressão Linear Múltipla; Polígonos de Thiessen.

Abstract

Pluviometric characterization of Quadrilátero Ferrífero in the region of Moeda Syncline - Minas Gerais

Located in the east portion of the Quadrilátero Ferrífero and south of the metropolitan region of Belo Horizonte, Moeda syncline has water relevance for the region and comprises 9 municipalities. The area rainfall study is necessary to understand its water dynamics, in addition to being an indicator of climate trends and possible

anomalies. The data from a historical series of rainfall stations in the hydrological period from 1984/85 to 2018/19 was used. The Double Mass and Multiple Linear Regression methods were used to verify the data homogeneity and complete the missing annual data through the R^2 . The calculation of rainfall averages per season was executed using the arithmetic average method. Then, Thiessen Polygon method enabled the calculation of the areas of influence, the average precipitation of the region, in addition to the most representative station. The centenary rainfall behavior was sketched from the data analysis of the Mineração Morro Velho station, which has more than 130 years of registers, observing 9-year cycles, in addition to a reduction from 2013/14. The rainfall analysis concerning the cycles rainy days indicated a decrease in total rainfall, as it reveals the decay of rainy days.

Keywords: Double Mass; Multiple Linear Regression; Thiessen Polygons.

Introdução

A análise da pluviometria em bacias hidrográficas, através de sua distribuição geográfica e regularidade temporal, é de suma importância, entre outras temáticas, para a caracterização do clima de uma região. Sena et al. (2014) apontaram sobre a relevância dos conhecimentos sobre o clima, uma vez que este é um dos principais fatores que possibilitam as condições de vida atuais e o desenvolvimento das mais diversas atividades antrópicas, além dos ecossistemas (SENA et al., 2014).

Embora crucial para a manutenção da vida como existe hoje, de acordo com o relatório publicado em 2021 pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as mudanças climáticas estão acontecendo de forma brusca e em uma velocidade cada vez maior e, com isso, ocasionando os eventos climáticos cada vez mais extremos, observados não apenas na temperatura global, mas também na mudança no regime de precipitação, como na ocorrência e intensidade das chuvas, causando graves danos sociais, econômicos e ambientais.

Além disso, o conhecimento da variabilidade, distribuição e tendências da precipitação auxilia nos estudos de comportamento das águas superficiais e subterrâneas, e, segundo Simioni et

al. (2014), possibilita o planejamento e gestão adequada tanto do uso do solo, quanto da concessão de outorgas e licenças para o uso da água em determinadas estações do ano.

Neste contexto, os dados que serão apresentados a seguir fazem parte de uma coletânea a respeito da pluviometria da região do Sinclinal Moeda, correspondendo à face oeste do Quadrilátero Ferrífero. O estudo tem como objetivo apresentar a dinâmica da precipitação no período de 35 anos (1984 - 2019) desta região, através de análises da variação pluviométrica, considerando anos hidrológico, que segundo Naghettini e Pinto (2007), são caracterizados pelo início concomitante ao início do período chuvoso (outubro a março) e término no período seco (abril a setembro).

Devido à proximidade da área de estudo com a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), um conhecimento mais detalhado dos recursos hídricos desta área, contribuirá em tomadas de decisões futuras sobre o planejamento dos recursos hídricos desta região, uma vez que, a região de estudo tem grande participação no fornecimento de recursos hídricos para a RMBH, que conta com uma população superior a 6 milhões de pessoas (IBGE, 2018).

Caracterização Física da Área

A área de estudo, possui cerca de 470 km², e envolve parcialmente os municípios de Brumadinho, Nova Lima, Rio Acima, Moeda, Itabirito, Belo Vale, Ouro Preto, Congonhas e Jeceaba (Figura 1).

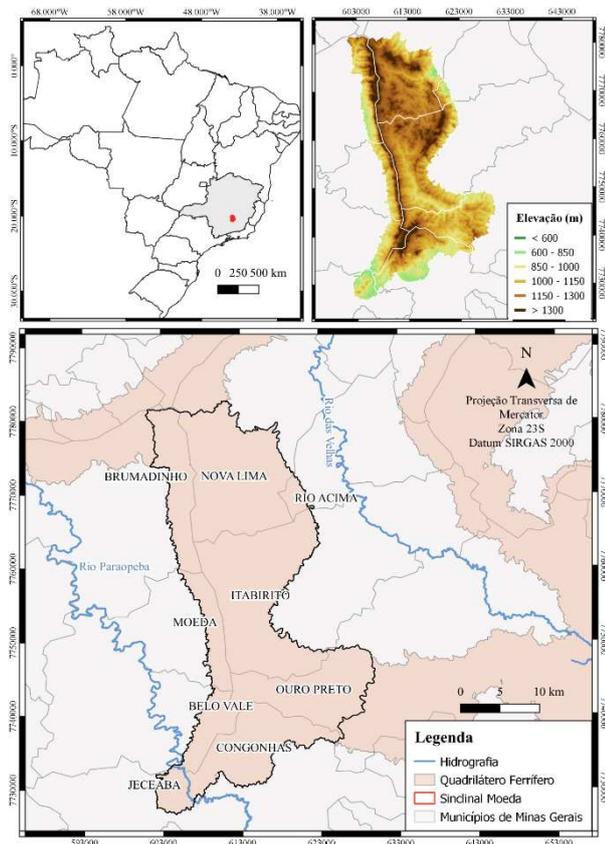


Figura 1. Mapa de localização e hipsométrico da área de estudo com identificação dos municípios.

O Sinclinal Moeda está localizado na porção sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Essa formação consiste em um alinhamento montanhoso que se estende por aproximadamente 50 km no sentido norte-sul, delimitado a oeste pela Serra da Moeda e a leste pela Serra das Serrinhas, que são as áreas de maior elevação e correspondem às bordas do Sinclinal (FORMOSO, 2013).

O Sinclinal Moeda situa-se na região das nascentes dos rios das Velhas (leste) e Paraopeba (oeste), ambos afluentes da margem direita do Rio

São Francisco (FORMOSO, 2013). Silva (2007) apontou a Serra da Moeda como um importante divisor hidrográfico das bacias dos rios das Velhas e Paraopeba (Figura 2) (SILVA, 2007). A drenagem da região está dividida em dois compartimentos: o primeiro relaciona-se com as águas drenando o interior do Sinclinal que vertem em direção a dois rios principais, o rio do Peixe (norte) e o ribeirão Mata-Porcos (sul), que atravessam a borda do Sinclinal e desaguam no rio das Velhas e no seu afluente, o rio Itabirita [sic]. O segundo compartimento é referente às águas drenando a partir das suas bordas para o exterior do Sinclinal que apresenta orientação para leste, oeste e sul (FORMOSO, 2013).

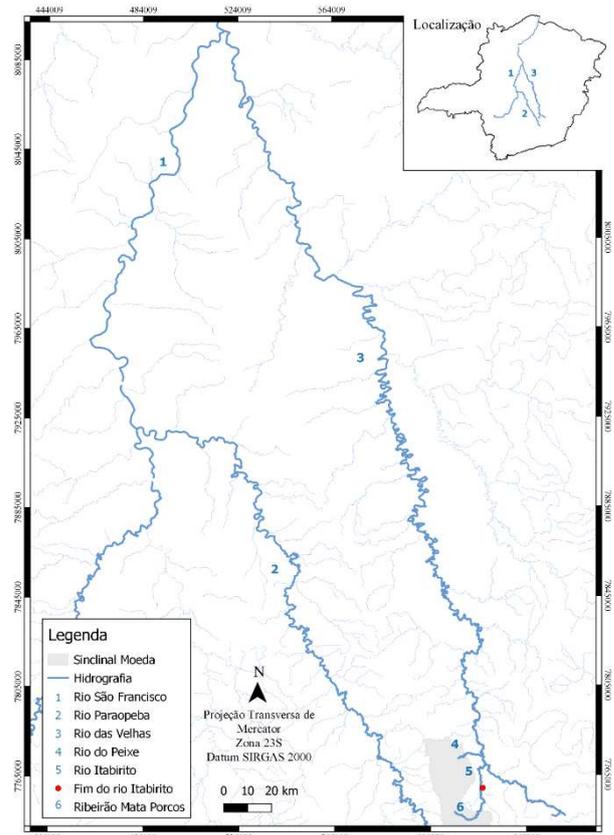


Figura 2. Mapa de localização do Sinclinal Moeda em relação aos rios São Francisco, Paraopeba, das Velhas, além do rio do Peixe, rio Itabirito e ribeirão Mata-Porcos.

Dorr (1969, apud Bezerra, 2014) descreveu a paisagem do Quadrilátero Ferrífero por cristas altas e irregulares, longas cadeias de *hogback's*, platôs elevados, canyons profundos e vales amplos (DORR, 1969). Salgado (2006) discorreu sobre a ocorrência de erosão diferencial na região do Quadrilátero Ferrífero, onde as rochas mais resistentes constituem os quartzitos e itabiritos, as de resistência mediana, xistos e filitos, e as de resistência inferior, granitos-gnaisses e mármore/dolomíticos, estando, além disso, as áreas de altitudes elevadas (cristas) mais sujeitas à intensidade do processo erosivo.

No Quadrilátero Ferrífero predomina o clima do tipo Cwa, de acordo com a classificação climática de Köppen (1928), caracterizado como temperado-quente, com duas estações bem definidas: verão chuvoso e inverno seco (SILVA, 2007). A influência das variações de altitude favorece o surgimento de microclimas com temperatura e umidade bem diferentes da temperatura média anual da região, que se mantém entorno de 20°C com precipitação que varia entre 1300 mm e 2100 mm por ano (RUCHKYS, et al., 2012). Além disso, de acordo com Ribeiro e Mól (1985), conforme citado por Nonato (2002), a média anual da temperatura é de 21,5° C, e cerca de 89% das chuvas se distribuem entre os meses mais quentes do ano, de outubro a março, tendo sua maior concentração em dezembro e janeiro. Herz (1970, apud SILVA, 2007) descreveu que a precipitação média da região do Quadrilátero Ferrífero varia entre 1300 mm, na porção leste, a 2100 mm, na porção sul.

A estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero é composta, da base para o topo, pelas seguintes unidades litoestratigráficas principais: terrenos granito-gnáissicos de idade arqueana (CARNEIRO, 1992); sequência metavulcano-sedimentar do tipo *greenstone belt*, que

caracteriza o Supergrupo Rio das Velhas de idade arqueana (DORR, 1957), e sequências metassedimentares paleoproterozóicas, que constituem o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi (DORR, 1969). Além de diques máficos intrusivos que cortam toda a sequência (ALKMIM; MARSHAK, 1998). Tectonicamente a região foi afetada por, pelo menos, três ciclos orogênicos: Jequié (2,7-2,5 Ga), Transamazônico (2,1-1,9 Ga) e Brasileiro (0,7-0,5 Ga) (ROSIÈRE; CHEMALE JR, 2000).

O Quadrilátero Ferrífero está localizado na borda sul do Cráton do São Francisco (DE ALMEIDA, 1977). Ele é caracterizado pelo arranjo quadrangular de sinclinais onde afloram sedimentos do Supergrupo Minas (ROSIÈRE; CHEMALE JR, 2000). De acordo com Ruchkys (2009), o Quadrilátero é um importante terreno pré-cambriano, em que se tem registro de diversos eventos, como magmatismo, tectonismo e mudanças na atmosfera, hidrosfera, biosfera e nos sistemas de sedimentação.

Em termos hidrogeológicos, o Quadrilátero Ferrífero foi dividido por Beato, Monsorens e Bertachini (2006) em oito sistemas aquíferos e classificados de acordo com o potencial de produção e armazenamento.

Mourão (2007) a respeito do quadrilátero ferrífero, identificou e listou sete unidades hidrogeológicas, são elas: aquíferos inconsolidados, aquíferos quartzíticos, aquífero carbonático, aquíferos em formações ferríferas, aquíferos em xistos, aquíferos em rochas granito-gnáissicas e unidades confinantes.

Os aquíferos inconsolidados foram discriminados por Mourão (2007) em aquíferos de depósitos eluviais, coluviais e aluviais e aquíferos em cangas e lateritas. Esses aquíferos possuem características semelhantes se comparados com os sistemas aquíferos itabirítico e granular

propostos por Beato, Monsores e Bertachini (2006), sendo que os depósitos possuem baixo potencial de armazenamento e os aquíferos em cangas e lateritas possuem alta capacidade de armazenamento de água e estão associados a unidades ferruginosas.

Os aquíferos quartzíticos são de porosidade fissural e vão de livres a semiconfinados (MOURÃO, 2007) com potencial de armazenamento pouco conhecido, variando de baixo a médio. Esses aquíferos propostos por Mourão correspondem aos sistemas aquíferos quartzíticos e quartzito cercadinho propostos por Beato, Monsores e Bertachini (2006). As unidades estratigráficas desses aquíferos são as formações Moeda e Maquiné, e os grupos Piracicaba e Itacolomi.

O aquífero carbonático trata-se de um aquífero fraturado ou cárstico, livre ou confinado por unidades metapelíticas ou materiais argilosos resultantes do intemperismo ou relacionados a sedimentos lacustres (MOURÃO, 2007). O aquífero possui o potencial de armazenamento de baixo a elevado e é representado pelo aquífero Gandarela.

Os aquíferos em formações ferríferas associam-se às formações proterozóicas do tipo Lago Superior (Formação Cauê) ou arqueanas do tipo Algoma (intercalações no grupo Nova Lima) (MOURÃO, 2007), o aquífero Cauê é o principal aquífero da região. O potencial de armazenamento desses aquíferos é elevado e a recarga é por aquíferos encaixantes e cursos d'água (BEATO; MONSORES; BERTACHINI, 2006).

Os aquíferos em xistos e em granito-gnáissicos, segundo Beato, Monsores e Bertachini (2006) possuem baixo potencial de armazenamento e a recarga é pluvial e a partir de cursos d'água.

Por fim, as unidades confinantes, Moeda, Batatal, Fecho do Funil e Barreiro, além dos diques e sills de rochas básicas e depósitos sedimentares argilosos cenozóicos (MOURÃO, 2007), sendo a unidade batatal a mais importante pois representa o limite do aquífero Cauê.

Material e Métodos

Em hidrologia, as séries históricas de precipitação são informações fundamentais para o entendimento do regime hidrológico (DE MELLO; DA SILVA, 2005). Para a análise da pluviosidade da região, foram utilizados dados pluviométricos das estações da área, sendo elas Mineração Morro Velho (1943000), Itabirito Linígrafo (2043060), Lagoa Grande (MMV) (2043002), Conselheiro Lafaiete (2043005), Fazenda Água Limpa Jusante (2043056), Entre Rios de Minas (2044007) e Ibitiré (2044012), no período hidrológico de 1984/85 a 2018/19, adotando o ano hidrológico de outubro a setembro para cada um dos anos civis de 1984 a 2019. Os dados das estações pluviométricas foram obtidos através do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas (ANA).

Visando a completção de dados nas estações apresentadas, foi adotado o método de Dupla Massa, desenvolvido pelo *U.S. Geological Survey*, que é utilizado para analisar e identificar as possíveis mudanças que ocorreram na precipitação ou no mesmo local de observação ao longo do tempo.

De acordo com Tucci (2012), a execução do método da Dupla Massa consiste em montar um gráfico em que a média de pluviometria de duas estações é plotada em razão do período de dados analisados, formando, ao final, uma linha de tendência das médias. Foram utilizados os valores anuais das estações localizadas na área de estudo e plotados em um gráfico de dispersão. A partir

dessa relação de variáveis, foi possível calcular o coeficiente de determinação (R^2) e obter um valor de aproximação entre as estações. Procurando realizar uma análise mais precisa, uma vez que os dados obtidos contemplam mais de três décadas e muitos dados não tinham sido consistidos, foram removidos os outliers superiores e inferiores mais desconexos das curvas, garantindo uma totalidade de correspondência de 80% dentro da análise.

Na ausência de dados de umas das estações em determinado período, o mesmo período da outra foi removido do estudo, haja vista a impossibilidade de cálculo das médias pluviométricas e, portanto, uma possível inexatidão do valor do coeficiente de determinação (R^2).

Segundo de Oliveira et al. (2010), o processo de registro de dados pluviométricos ao longo dos anos pode ser comprometido pela ausência de dados em determinados anos devido a problemas relacionados aos aparelhos de medição ou aos seus operadores, o que torna necessário o preenchimento de tais falhas possibilitando o tratamento estatístico dos dados de uma série histórica. Para isso, o método de Regressão Linear Múltipla torna-se uma excelente alternativa.

Após a avaliação da consistência dos dados de cada estação pluviométrica através do método de Dupla Massa anteriormente exposto, foi estimado o valor da precipitação para cada estação e ano observados e empregou-se a metodologia de Regressão Linear Múltipla que, como descrito por Tucci (2001), consiste em correlacionar a estação que apresenta falhas com as estações vizinhas a partir da Equação (1), visando o preenchimento das falhas existentes.

- Equação de regressão linear múltipla

$$P_x = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i * P_i \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

P_x é a precipitação anual da estação que apresenta falha a ser preenchida (mm);

P_i é a precipitação anual da estação vizinha, sendo i a sequência temporal em que se observa falha (mm);

a_0 e a_i são os coeficientes de ajuste a serem determinados a partir do método de Regressão Linear; e

n é o número de estações vizinhas consideradas.

De acordo com Barbosa *et al.* (2005), utilizando o método de Regressão Linear, devem ser consideradas no preenchimento de falhas apenas estações que apresentam valores de coeficiente de determinação (R^2) superiores a 0,7. Após o preenchimento, uma segunda análise utilizando o método de Dupla Massa foi realizada para verificar a consistência da série histórica com os dados preenchidos.

Em seguida, utilizou-se o método da média aritmética para estimar a média da precipitação em cada estação da área para o período de estudo. De acordo com Mendonça, Sena e Santos (2015), o método é mais simples, uma vez que não leva em consideração variações geográficas da precipitação, sendo obtido através da média aritmética das precipitações medidas na área durante um tempo determinado. A Tabela 1 apresenta os valores das médias da precipitação calculada para cada estação pluviométrica localizadas na área de estudo através do método da média aritmética, bem como seus respectivos códigos e coordenadas geográficas.

Visando a análise mais precisa da pluviometria da região, adotou-se o método dos Polígonos de Thiessen (Equação 2), idealizado pelo meteorologista americano Alfred H. Thiessen (1911), amplamente utilizado para o cálculo da precipitação média de determinada área pois, ao

contrário do método da média aritmética, considera a variabilidade de distribuição dos postos, apresentando uma maior precisão. Segundo Villela (1975), o método é caracterizado pela atribuição de pesos relativos aos postos pluviométricos da área, possibilitando assim a identificação dos postos mais significativos que nela se encontram. Entretanto, de acordo com Tucci (2001), no cálculo não é levado em consideração o relevo do local, o que dificulta a avaliação de microclimas nos topos das serras,

Tabela 1. Estações pluviométricas da área de estudos ressaltando a média pluviométrica do período de 1984/2019.

Estação	Código	Y	X	Média (mm)
Mineração Morro Velho	1943000	620318	7790408	1467,10
Itabirito Linígrafo	2043060	620082	7756252	1390,26
Lagoa Grande (MMV)	2043002	625391	7768235	1616,92
Conselheiro Lafaiete	2043005	629865	7718856	1375,80
Fazenda Água Limpa Jusante	2043056	644526	7754371	1309,97
Entre Rios de Minas	2044007	596644	7715083	1326,98
Ibirité	2044012	600052	7783496	1741,56

Resultados e Discussão

O método de Dupla Massa foi utilizado para o complemento de dados das estações abordadas considerando a maior correlação entre os dados pluviométricos, ou seja, maior coeficiente de determinação (R^2). A estação Lagoa Grande (MMV) apresentou a maior correlação com as demais, já que está situada aproximadamente no centro da área. Esta foi utilizada para completar cinco das sete estações, nas Tabelas 2 e 3 estão apresentados o complemento de cada estação e

fato que é amenizado devido à razoável densidade de postos localizados na área de estudo.

- Equação da precipitação média

$$P_m = \frac{1}{A} * \sum A_i * P_i \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

P_m é a precipitação média da área (mm);

P_i é a precipitação registrada na estação i (mm);

A é a área total de estudo; e

A_i é a área de influência da estação.

seus respectivos coeficientes, antes e depois da remoção dos outliers.

O método de Regressão Linear Múltipla está intrínseco ao de Dupla Massa, pois ele fornece o coeficiente de determinação (R^2). Dessa forma, é possível dizer que os resultados da Regressão são os mesmos da Dupla Massa, já que um conclui o outro.

A partir das Figuras 3 e 4 observa-se que os dados faltantes das estações foram complementados com a estação comparada que possui o maior coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 2. Estações-base, suas respectivas estações complementares e seus coeficientes de determinação (R^2) antes de retirar os *outliers*

Estação	Complemento	R^2
Mineração Morro Velho	Lagoa Grande (MMV)	0,725
Itabirito Linógrafo	Fazenda Água Limpa Jusante	0,782
Lagoa Grande (MMV)	Ibirité	0,853
Conselheiro Lafaiete	Lagoa Grande (MMV)	0,727
Fazenda Água Limpa Jusante	Lagoa Grande (MMV)	0,861
Entre Rios de Minas	Lagoa Grande (MMV)	0,838
Ibirité	Lagoa Grande (MMV)	0,898

Tabela 3. Estações-base, suas respectivas estações complementares e seus coeficientes de determinação (R^2) após retirar os *outliers*.

Estação	Complemento	R^2
Mineração Morro Velho	Lagoa Grande (MMV)	0,891
Itabirito Linógrafo	Fazenda Água Limpa Jusante	0,955
Lagoa Grande (MMV)	Ibirité	0,987
Conselheiro Lafaiete	Lagoa Grande (MMV)	0,969
Fazenda Água Limpa Jusante	Lagoa Grande (MMV)	0,977
Entre Rios de Minas	Lagoa Grande (MMV)	0,977
Ibirité	Lagoa Grande (MMV)	0,995

As estações Mineração Morro Velho e Lagoa Grande (MMV), correlacionadas no período de 1984/85 a 2018/19, apresentaram falhas de dados nos anos de 1988/89, 1990/91, 1993/94, 1996/97, 1998/99, de 2002/03 a 2013/14 e de 2017/18 a 2018/19. As estações Itabirito Linógrafo e Fazenda Água Limpa Jusante, correlacionadas no período de 1984/85 a 2018/19, possuíam falhas nos anos de 1985/86, 1988/89, 2001/02 e de 2017/18 a 2018/19. As estações Lagoa Grande (MMV) e Ibirité, correlacionadas no período de 1984/85 a 2014/15, possuíam falhas nos anos de 1998/99, 2002/03, 2004/05 e 2014/15. As estações Conselheiro Lafaiete e Lagoa Grande (MMV), correlacionadas no período de 1984/85 a 2018/19, possuíam falhas nos anos de 1984/85, 1990/91, 1998/99, 2006/07, 2009/10 e 2013/14. As estações Fazenda Água Limpa Jusante e Lagoa Grande

(MMV), correlacionadas no período de 1984/85 a 2018/19, possuíam falhas nos anos de 1985/86, 1991/92 a 1992/93, 1996/97, 2003/04, 2009/10 e 2017/18. As estações Entre Rios de Minas e Lagoa Grande (MMV), correlacionadas no período de 1984/85 a 2018/19, possuíam falhas nos anos de 1984/85, 1987/88, 1994/95, 2002/03, 2009/10, 2015/16. As estações Ibirité e Lagoa Grande (MMV), correlacionadas no período de 1984/85 a 2014/15, possuíam falhas nos anos de 1985/86, 1998/99, 2002/03 a 2004/05 e 2012/13.

Os valores de R^2 produzidos, foram todos superiores a 0,7, o que descrito por Barbosa et al. (2005), consiste no limite mínimo para o preenchimento dos dados. Desta forma foi possível completar os dados inexistentes nas estações.

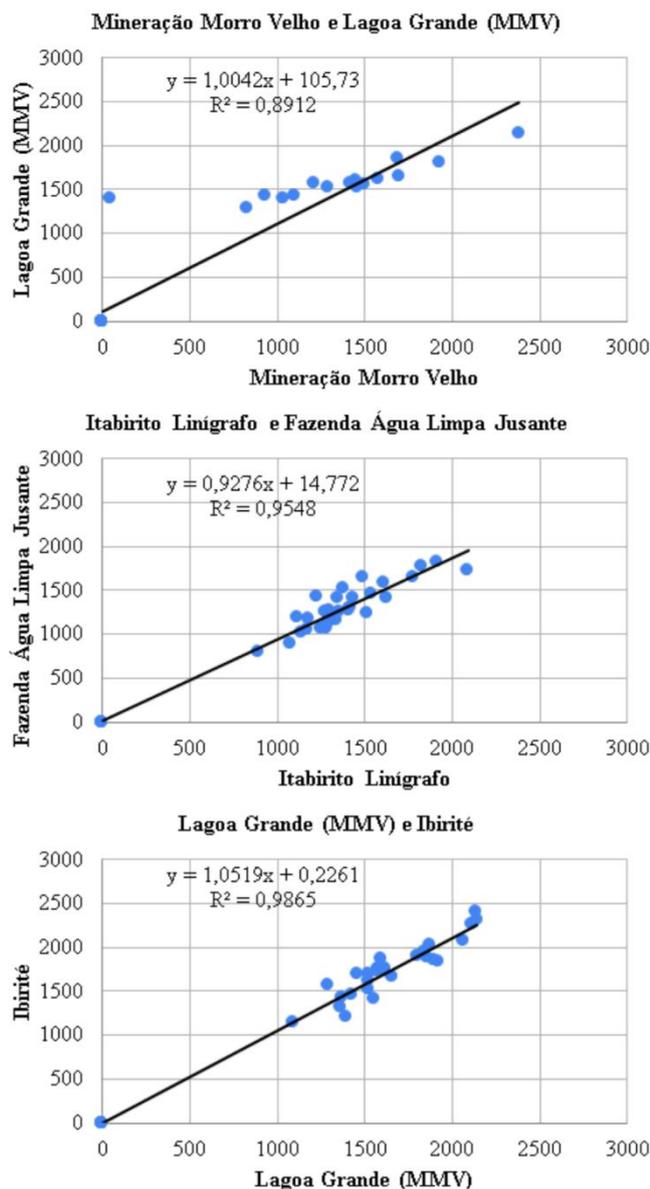


Figura 3. Relação de Dupla Massa através do método de Regressão Linear das estações Mineração Morro Velho com Lagoa Grande (MMV), Itabirito Linígrafo com Fazenda Água Limpa Jusante e Lagoa Grande (MMV) com Ibirité.

Completados os dados que se encontravam inexistentes em alguns períodos com o método de regressão linear múltipla, obteve-se valores mais precisos na determinação da média aritmética pluviométrica de cada uma delas em todo o período hidrológico de 1984/85 a 2018/19 a partir do tratamento dos dados do período.

A Figura 5 mostra a média aritmética das precipitações para cada estação no período de 1984/85 a 2018/19 com dados completados por Dupla Massa, método intrínseco à Regressão Linear. Ela indica que, em todo o período, a estação Ibirité apontou maior valor de pluviosidade com 1741,6 mm; seguida por Lagoa Grande (MMV), com 1616,9 mm; Mineração Morro Velho, com 1467,1 mm; Itabirito Linígrafo, com 1390,3 mm; Conselheiro Lafaiete, com 1375,8 mm; Entre Rios de Minas, com 1326,9 mm; e, por último, Fazenda Água Limpa Jusante, com 1309,9 mm. A média aritmética da área calculada para o período de 1984/85 a 2018/19 foi de 1461,2 mm.

Após a avaliação do último ano hidrológico 2018/19 para cada estação (Figura 6) e comparação com a geometria da curva apresentada na Figura 5, observa-se que ambas as curvas apresentam a mesma geometria entre os valores máximos e mínimos, mostrando a representatividade destas estações no ano hidrológico referido com seu período histórico.

A média pluviométrica no ano hidrológico de 2018/19 foi de 1046,1 mm. De maneira regional, quando comparando os dois períodos (Figuras 5 e 6) observados tem-se que, em relação à média histórica, o último ano hidrológico alcançou valor de média 28,4% inferior ao observado em todo o período, indicando um período de recessão pluviométrica.

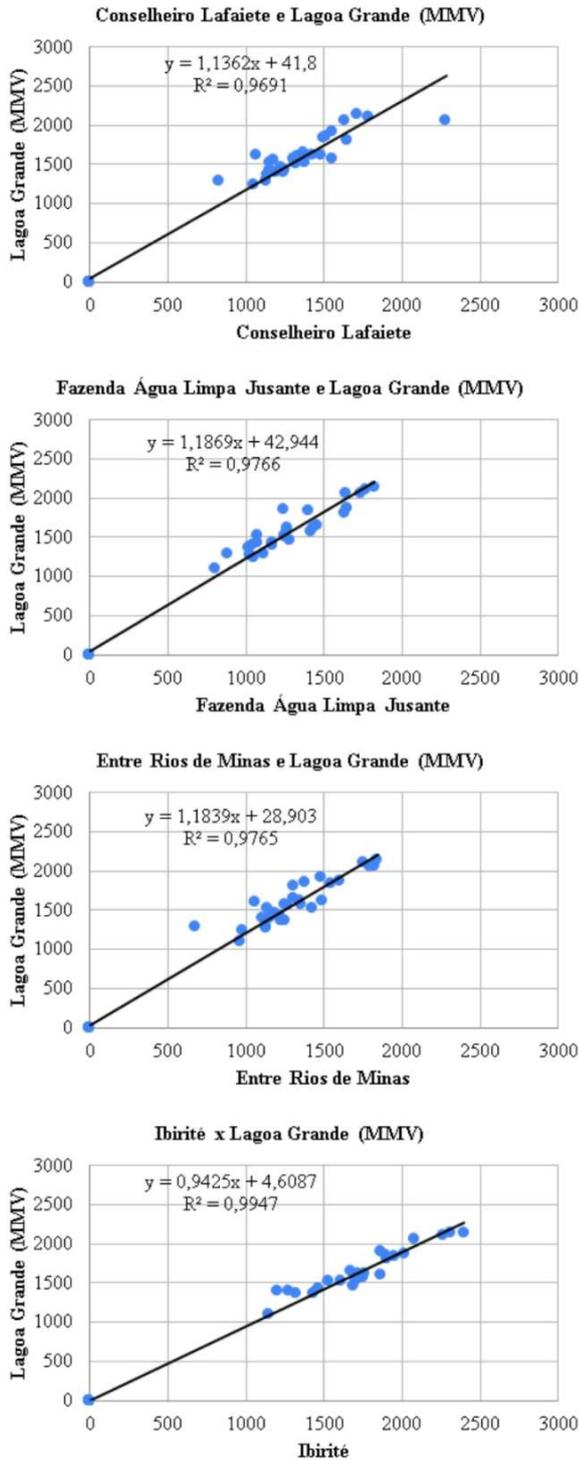


Figura 4. Relação de Dupla Massa através do método de Regressão Linear das estações Conselheiro Lafaiete com Lagoa Grande (MMV), Fazenda Água Limpa Jusante com Lagoa Grande (MMV), Entre Rios de Minas com Lagoa Grande (MMV) e Ibirité com Lagoa Grande (MMV).

Após a análise da estatística apresentada, foi aplicado o método de Thiessen na área de estudo para uma avaliação espacial. Foram observadas as estações pluviométricas cuja áreas de influência obtidas pelos polígonos de Thiessen se encontravam dentro da área de estudo, o Sinclinal Moeda. Dessa forma, após a obtenção dos polígonos através do software de geoprocessamento QGis, notou-se que a estação 109, Fazenda Água Limpa Jusante, apresentou área de influência para além da área de estudo e, por este motivo, fez-se necessária sua exclusão para uma análise mais precisa.

No período hidrológico de 35 anos, de 1984/85 a 2018/19, a precipitação total média pelo método de Thiessen para a área de estudo foi de 1496,2 mm por estação (Figura 7). O valor encontrado para a precipitação total média se mostra coerente se comparado à média das precipitações por estação, que no período foi de 1486,4 mm, indicando uma aderência maior que 99,3% entre os dados. A estação Itabirito Linígrafo apresenta maior representatividade espacial (42%), juntamente com a estação Lagoa Grande (MMV). A influências das duas contemplam mais de 80% da área de estudo.

Sabendo-se que o Polígono de Thiessen é formado por intercessões geométricas, a figura com os dados históricos foi utilizada para realização dos polígonos para o ano hidrológico de 2018/19, obtendo uma precipitação total média de 1102,4 mm, valor que indica mais de 94,8% de aderência se comparado à média da precipitação nas estações, que foi de 1045,5 mm para o mesmo período.

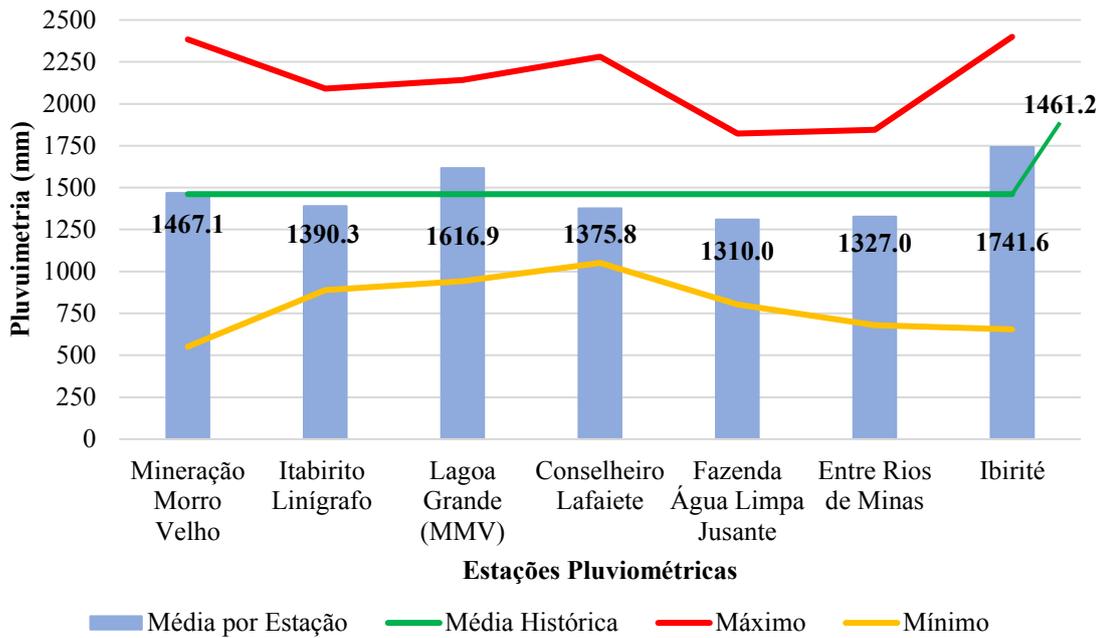


Figura 5. Dados estatísticos dos históricos de precipitação das estações estudadas durante os anos hidrológicos de 1984/85 a 2018/19.

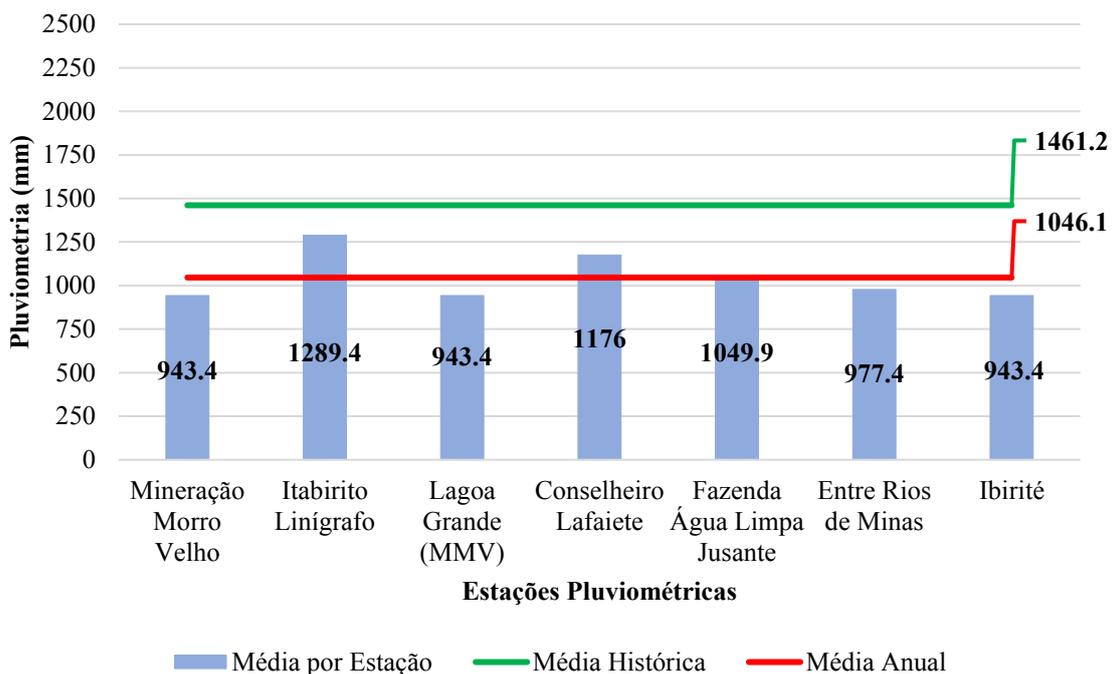


Figura 6. Dados estatísticos dos históricos de precipitação das estações estudadas para o ano hidrológico de 2018/2019.

Apesar do método de Thiessen possuir limitações quanto a incluir o efeito das variações do relevo do local de estudo no cálculo das precipitações médias, os resultados obtidos para a região de interesse se mostraram satisfatórios,

apresentando sempre aderência próximo a 95% para o ano de 2018/19 e superior a 99% para o período histórico. É esperado o valor mais elevado para o período histórico, pois um maior período de dados proporciona maior amortização em

comparação. Sobretudo, a pequena variação percentual encontrada entre os valores históricos e do ano hidrológico estudado mostra a aplicabilidade do método para o ano de 2018/2019.

Com base na pluviometria de Thiessen, e em sua aderência com os dados pluviométricos analisados, a estação Itabirito Linígrafo foi adotada, uma vez que essa tem uma maior representatividade de área, de modo a avaliar um maior período histórico de dados. Foram relacionados seus dados com os da estação Mineração Morro Velho, pois essa estação apresenta mais de um século de monitoramento, e com a média histórica de todas as estações estudadas durante os 35 anos (Figura 8).

A partir da análise das curvas acima é possível observar que, em geral, há certa similaridade entre elas, confirmada no percentual de similaridade entre a estação Mineração Morro Velho com a média histórica (99,5%) e a estação Itabirito Linígrafo (94,5%), como apresentado na Figura 5. Comparativamente, é possível notar que, na maior parte do período observado, a estação Itabirito Linígrafo apresentou valores inferiores aos registrados na estação Mineração Morro Velho havendo, porém, uma inversão neste comportamento a partir do ano hidrológico de 2013/14, no qual ambas as estações apresentam valores abaixo da média histórica, sendo registrados os menores valores da estação Itabirito Linígrafo no mesmo período e da Mineração Morro Velho no ano hidrológico a partir do 2014/15.

Com objetivo de uma abordagem centenária para área de estudo, foram analisados os dados da estação Mineração Morro Velho, uma vez que essa possui mais de 130 anos das séries históricas, sendo uma das mais antigas estações de monitoramento pluviométrico do Estado de Minas Gerais. É possível esboçar o comportamento da pluviometria centenária na região, já que essa estação apresenta uma similaridade de 94,5% com a estação mais representativa da área durante um período de 35 anos de análise.

Observa-se no gráfico (Figura 9) que a ocorrência de ciclos, alternando entre picos e vales, é comum ao regime pluvial nesta área com variações de ascensão e recessão pluviométrica por volta de 9 anos, sendo uma curvatura assimétrica com mais ano de seca e menos de chuva quando comparado com a média histórica. Essa distribuição assimétrica ressalta a ocorrência de anos com mais problemas de inundações e outros agravados por secas severas. Entretanto, durante os 131 anos de monitoramento nenhum período registrou valores tão abaixo da média e por um período demasiadamente prolongado como registrado a partir do ano hidrológico de 2013/14, evidenciando, assim, uma seca centenária que assolou a região na última década e cujo seus impactos primassem até hoje (Figura 6 e 8).

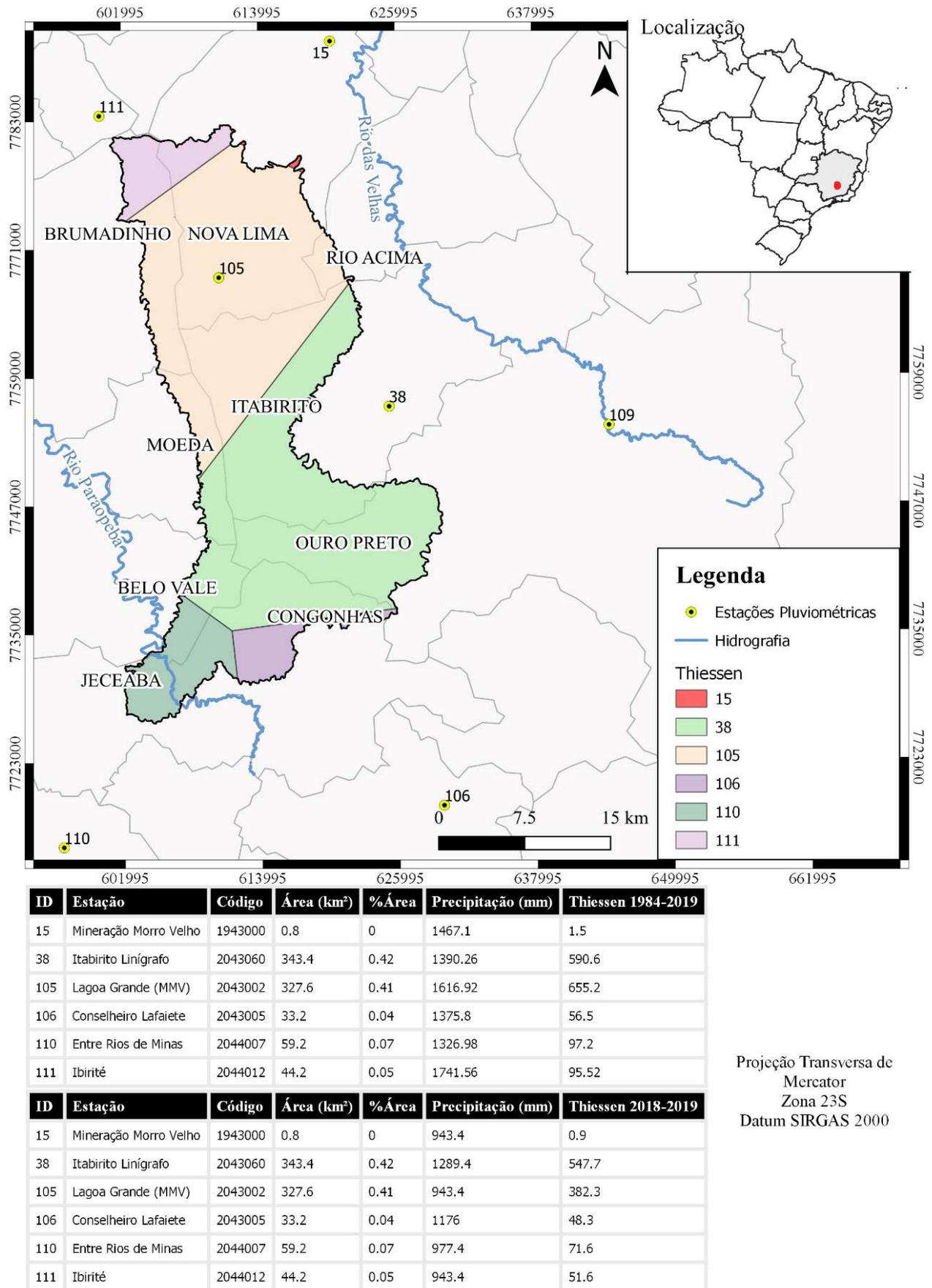


Figura 7. Mapa dos Polígonos de Thiessen evidenciando a área de influência de cada estação pluviométrica. A estação 109 não foi utilizada para a confecção dos polígonos.

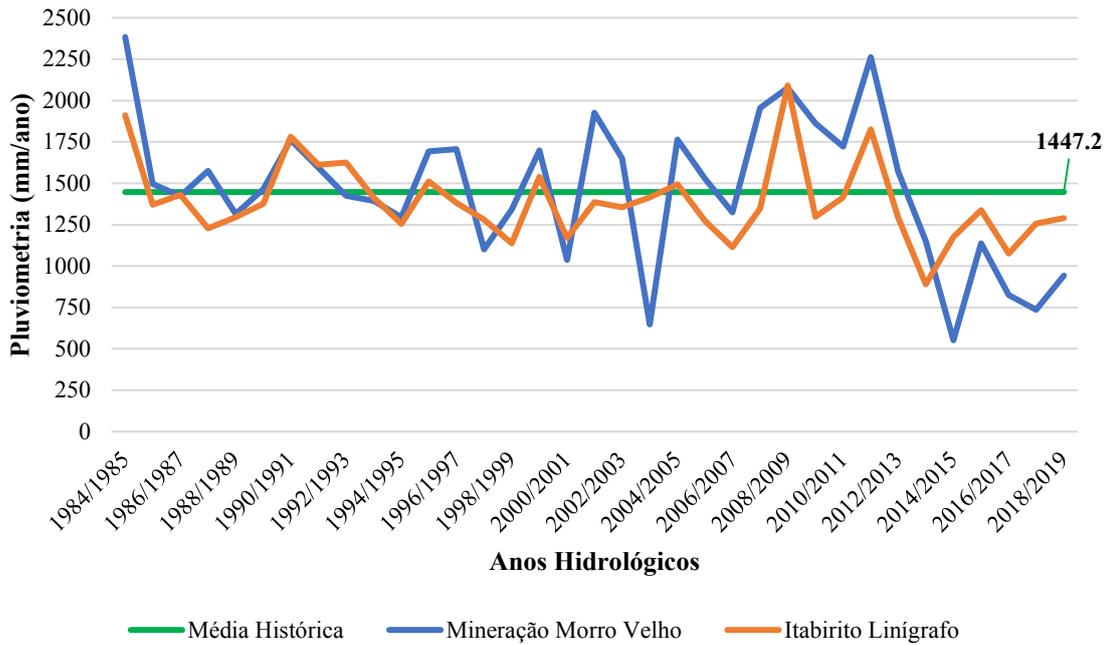


Figura 8. Histórico pluviométrico das estações Itabirito Linígrafo, Mineração Morro Velho e média de todas as estações referente aos anos hidrológicos de 1984/85 a 2018/19.

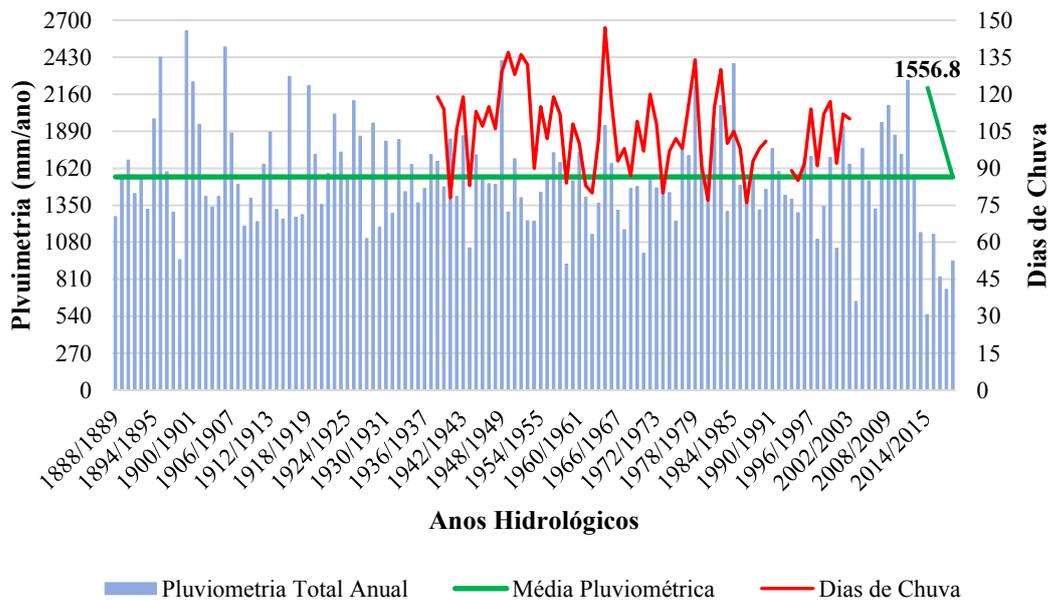


Figura 9. Histórico pluviométrico da estação pluviométrica Mineração Morro Velho dos anos hidrológicos de 1888/89 a 2018/19, com o histórico de dias de chuva de 1938/39 a 2002/03, com exceção dos anos de 1990/91 a 1992/93.

A partir da análise de 131 anos de chuvas da região do Sinclinal Moeda, através dos dados da estação pluviométrica Mineração Morro Velho, é possível observar ciclos pluviométricos com cerca de 9 anos. O primeiro ciclo, de 1888/89 a 1898/99,

possui média pluviométrica de 1552,6 mm/ano; o segundo ciclo, de 1899/00 a 1910/11, possui média pluviométrica de 1725,0 mm/ano, 11% maior que o anterior; o terceiro ciclo, de 1911/12 a 1920/21, possui média pluviométrica de 1619,7

mm/ano, 6,1% menor que o anterior; o quarto ciclo, de 1921/22 a 1929/30, possui média pluviométrica de 1692,0 mm/ano, 4,5% maior que o anterior; o quinto ciclo, de 1930/31 a 1943/44, possui média pluviométrica de 1563,8 mm/ano, 7,6% menor que o anterior; o sexto ciclo, de 1944/45 a 1953/54, possui média pluviométrica de 1555,0 mm/ano, 0,6% menor que o anterior; o sétimo ciclo, de 1954/55 a 1962/63, possui média pluviométrica de 1458,8 mm/ano, 6,2% menor que o anterior; o oitavo ciclo, de 1963/64 a 1970/71, possui média pluviométrica de 1424,2 mm/ano, 2,4% menor que o anterior; o nono ciclo, de 1971/72 a 1980/81, possui média pluviométrica de 1619,6 mm/ano, 13,4% maior que o anterior; o décimo ciclo de, 1981/82 a 1988/89, possui média pluviométrica de 1686,0 mm/ano, 4,1% maior que o anterior; o décimo primeiro ciclo, de 1989/90 a 1997/98, possui média pluviométrica de 1493,3 mm/ano, 11,4% menor que o anterior; o décimo segundo ciclo, de 1998/99 a 2006/07, possui média pluviométrica de 1435,5 mm/ano, 3,9% menor que o anterior; e, por fim, o décimo terceiro ciclo, de 2007/08 a 2017/18, possui média pluviométrica de 1441,2 mm/ano, 0,4% maior que o anterior.

Comparando os 13 ciclos analisados, vemos que esses apresentam uma alternância quase regular do primeiro ao décimo terceiro ciclo. Quando comparamos a média dos nove anos de um ciclo com a média dos nove anos do ciclo anterior, a variação é de 0,4% a 13,4% entre os 13 períodos.

Essa alternância regular iniciada no ano 1888, como início de um ciclo, segue constante até o final

do quinto ciclo 1944 (a menor). Os três ciclos seguintes são marcados por diminuições sucessivas de pluviometria quando comparados com ciclos anteriores, marcando uma redução pluviométrica (1930 – 1963). Após esse período de diminuições pluviométricas de mais de 30 anos, a alternância entre os ciclos de maior e menor período pluviométrico volta a se estabilizar. Contudo, os períodos regulares de um ciclo menor seguido por outro menor são substituídos por períodos de dois ciclos maiores (9 e 10) seguidos por dois ciclos menores (11 e 12).

Apesar destas variações serem normais em uma série de 131 anos de monitoramento, existem períodos de maior e menor precipitação, ciclos de grandes secas e outros mais chuvosos. Quando se compara a média, temos um desvio padrão de 104,37 mm com uma redução linear de 14,6 mm do regime pluviométrico a cada ciclo. Outro fato a se ressaltar é que o último ciclo analisado, 2007/08 a 2017/18, representa um período de alta, assim como esperado para os próximos nove anos, o que é preocupante já que, após o ano de 2013/2014, observou-se vários anos de pluviometria muito abaixo da média para poucos anos de alta pluviométrica, enfatizando mais problemas com secas severas e anos de grandes inundações.

A partir da análise pluviométrica e a possível redução da pluviometria da região, foi avaliado a distribuição dessa chuva em relação aos dias (Figura 10). A estação Mineração Morro Velho apresentava apenas os totais mensais até 1937/38 e não havia registros dos dias de chuva entre 1991/92 a 1992/93 e posterior a 2003/04.

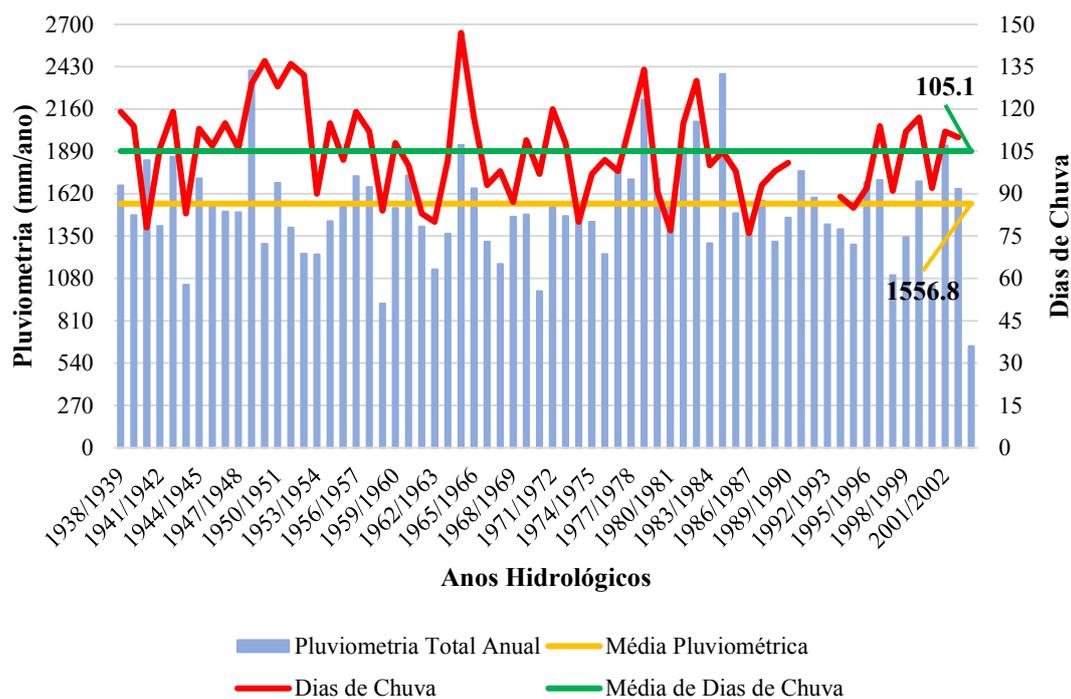


Figura 10. Histórico pluviométrico, dias de chuva da estação pluviométrica Mineração Morro Velho dos anos hidrológicos de 1938/39 a 2003/04 e suas respectivas médias.

Nos anos em que não há inconsistências dos dados registrados, os dias de chuva variaram entre 76 e 147. Foi viável analisar a média dos dias de chuva através dos ciclos pluviométricos da estação Mineração Morro Velho citados anteriormente. No primeiro ciclo, dentro do período de dados disponíveis de dias de chuva, 1944/45 a 1953/54, a média é de 119,3 dias. No segundo ciclo, 1954/55 a 1962/63, a média é de 100,3 dias, 15,9% menor que a anterior. No terceiro ciclo, 1963/64 a 1970/71, a média é de 106,3 dias, 5,9% maior que a anterior. Nos próximos ciclos, 1971/72 a 1980/81 e 1981/82 a 1988/89, as médias são de 102,3 e 101,9 dias, respectivamente, houveram seguidas reduções, de 0,4 e 6,4%. A média geral de dias de chuva dos ciclos é de 106,0 e o desvio padrão em comparação com cada ciclo é de 6,9 dias.

Os ciclos de 1930/31 a 1943/44 e de 1998/99 a 2006/07 estão com dados de dias de chuva

incompletos, logo, não puderam ser utilizados para comparação estatística.

Dessa forma, é possível inferir que tal diminuição dos dias de chuva continua nos anos seguintes, até o final de período de estudo (2018/19), uma vez que há queda na média pluviométrica, principalmente a partir de 2013/14. E também é inferido que a queda a partir do ano hidrológico de 2013/14, em relação à média histórica apresentada na Figura 9, pode ser indício de uma redução da pluviosidade da área.

Conclusão

O estudo realizado revelou métodos que foram utilizados para determinar a pluviometria da área de estudo nos anos hidrológicos de 1984/85 a 2018/19.

Com o método de Dupla Massa pôde-se analisar a consistência dos dados das séries históricas e com o método de Regressão Linear Múltipla foi possível preencher dados que

apresentavam falhas. Logo, os valores referentes às precipitações foram avaliados e calculados com maior precisão. O método de Polígonos de Thiessen foi aplicado à região para o cálculo da precipitação média e das áreas de influência de cada estação pluviométrica selecionada para o estudo.

Pelo método de Thiessen observou-se a precipitação média de 1496,2 mm para o período de 1984/85 a 2018/19, valor que se mostrou coerente se comparado à média da precipitação na área que foi de 1486,4 mm, apontando 99,3% de coerência entre os dados. O último ano hidrológico do período de estudo, 2018/19, apresentou média de precipitação nas estações e precipitação média por Thiessen, de 1045,5 e 1102,4 mm, respectivamente, registrando 94,8% de aderência.

A partir da análise de Thiessen, obteve-se a estação pluviométrica que mais influenciou na área de estudo: Itabirito Linígrafo. Ao compará-la com a estação Mineração Morro Velho, cuja série histórica apresenta dados desde 1888/89, e com a média histórica anual das estações, observou-se a semelhança entre as curvas, havendo a diminuição dos valores de ambas a partir de 2013/14.

Durante o período de 35 anos, 1984/85 a 2018/19, considerando todas as estações, a precipitação apresentou mínimo de 551,9 e máximo de 2399,4 mm e indicou uma média pluviométrica histórica de 1461,2 mm por estação. Observando a série histórica da estação Mineração Morro Velho, foi possível observar a existência de 13 ciclos pluviométricos, de aproximadamente 9 anos cada, marcados por mais anos com pluviosidade menor que a média histórica e menos com pluviosidade maior que a média, ressaltando, assim, eventos severos de cheias nos períodos chuvosos em anos de pluviometria elevada. Constatou-se que em

relação ao primeiro, 1888/89 a 1898/99, e ao último ciclo, 2007/08 a 2017/18, houve uma diminuição média linear de 14,6 mm para cada ciclo.

Em relação aos dias de chuva, no período de 65 anos, que engloba cinco ciclos completos, 1938/39 a 2003/04, os dados alteraram entre 76 e 147 com média de 106,0 dias. Relatou-se que os dias de chuva variaram tanto positiva, quanto negativamente ao longo do período, porém, em relação ao primeiro e ao último ciclo, houve uma diminuição linear média de 3,5 dias para cada ciclo.

Notou-se ainda que, a partir de 2013/14, as médias de precipitação se tornaram menos expressivas, com 1150,4 mm/ano, não ultrapassando a média histórica, de 1556,8 mm/ano, marcando um período de seca que assolou esse ciclo. Ainda há de ressaltar que esse período compreende um ciclo de elevação pluviométrica comparado com ciclo anterior, ressaltando ainda mais os longos períodos de estiagem como registrado nos últimos anos. Com base nas análises acima, sugere-se, para estudos futuros, uma avaliação conjunta dos eventos pluviométricos com os cursos d'água das ba 16 dos rios das Velhas e Paraopeba, uma vez que esses rios podem estar sendo impactados pelos dados pluviométricos aqui apresentados.

Referências

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998.

BARBOSA, S. E. d. S.; BARBOSA JÚNIOR, A. R.; SILVA, G. Q. d.; CAMPOS, E. N. B. et al. Geração

de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a Bacia do Rio do Carmo, Minas Gerais.

Engenharia Sanitária e Ambiental, 10, n. 1, p. 64-71, 2005.

BEATO, D. A.; MONSORES, A. L.; BERTACHINI, A. Potencial aquífero nos metassedimentos do quadrilátero ferrífero-região da APA sul RMBH-MG. In: Revista Águas subterrâneas. **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Geografia**, 2006. P. 1-20.

BEZERRA, D. P. **Quadrilátero ferrífero MG: fatores condicionantes do relevo**. 2014. Dissertação (Mestre) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais Disponível em: <https://bit.ly/3xg0y9D>.

CARNEIRO, M. A. **O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero, MG): Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano**. 1992. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

DE ALMEIDA, F. O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, 7, n. 4, p. 349-364, 1977.

DE MELLO, C. R.; DA SILVA, A. M. Métodos estimadores dos parâmetros da distribuição de Gumbel e sua influência em estudos hidrológicos de projeto. **Irriga**, 10, n. 4, p. 334-350, 2005.

DE OLIVEIRA, L. F.; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M.; SILVA, M. A. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de**

Engenharia Agrícola e Ambiental, 2010, 14, n. 11, p. 1186-1192, 2010.

DORR, J. V. N. **Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero**. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 1957.

DORR, J. V. N. **Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Geological Survey Professional Paper 641-A, Preparado em Cooperação com o Dep. Nac. Produção Mineral, 1969.

FORMOSO, D. M. L. **Identificação e estudo das áreas prioritárias para conservação da biodiversidade no Sinclinal Moeda (MG) com base nos serviços ecossistêmicos**. 2013. Dissertação (Mestre) - Instituto de Geociências / Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tabelas e gráficos especiais – Estimativas**, 2018.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. p. 91-102, 1928.

MENDONÇA, M. C. S.; SENA, I. M. N.; SANTOS, M. Comparação dos métodos da média aritmética e de Thiessen para determinação da pluviosidade média da sub-bacia do Rio Siriri. **Anais 2º Congresso Internacional RESAG**, 2015. P. 1-7.

MOURÃO, M. A. A. **Caracterização hidrogeológica do aquífero cauê, quadrilátero ferrífero, MG: Subsídios para a gestão dos recursos hídricos no quadrilátero ferrífero**.

2007. Tese (Doutorado) - Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

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

NONATO, C. A. **Contribuição à caracterização geológica-geomecânica no Quadrilátero Ferrífero**. 2002. Tese (Doutorado). Engenharia Metalúrgica e de Minas Universidade Federal de Minas Gerais Disponível em: <https://bit.ly/2TeyODo>.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR, F. Brazilian iron formations and their geological setting. **Revista Brasileira de Geociências**, 30, n. 2, p. 274-278, 2000.

RUCHKYS, U.; MACHADO, M.; CASTRO, P.; RENGGER, F. et al. Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG)-Proposta. **Geoparques do Brasil-Propostas. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil**. Belo Horizonte: CPRM, 1, p. 183-220, 2012.

RUCHKYS, Ú. A. Geoparques e a musealização do território: um estudo sobre o Quadrilátero Ferrífero. **Geologia USP. Publicação Especial**, 5, p. 35-46, 2009.

SALGADO, A. A. R. **Estudo da evolução do relevo do quadrilátero ferrífero, MG-Brasil, através da quantificação dos processos erosivos e denudacionais**. 2006. Tese (Doutorado) – Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto.

SENA, J. d. O.; MELO, J.; LUCENA, D.; MELO, E. Caracterização da precipitação na microrregião do

cariri paraibano por meio da técnica dos Quantis. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 7, n. 5, p. 871-879, 2014.

SILVA, F. R. **A paisagem do Quadrilátero Ferrífero, MG: potencial para o uso turístico da sua geologia e geomorfologia**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geografia - Universidade Federal de Minas Gerais.

SIMIONI, J. P. D.; ROVANI, F. F. M.; IENSSE, A. C.; WOLLMANN, C. A. Caracterização da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, RS. **Revista do Departamento de Geografia**, 28, p. 112-133, 2014.

TUCCI, C. E. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2001. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH.

TUCCI, C. E. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2012. Porto Alegre: Editora da Universidade.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. 1975.