



RAYSSA GARCIA DE SOUSA

**MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA
QUALIDADE DA ÁGUA EM FUNÇÃO DO USO E
OCUPAÇÃO DO SOLO E DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO
RIO PARÁ - MG**

TRÊS CORAÇÕES - MG

SETEMBRO/2020

RAYSSA GARCIA DE SOUSA

**MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA QUALIDADE DA ÁGUA EM
FUNÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO
RIO PARÁ - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Vale do Rio Verde (UninCor) como parte das exigências do programa de Mestrado Profissional em Sustentabilidade em Recursos Hídricos, para a obtenção do título de Mestre.
Área de Concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Dr. Aurivan Soares de Freitas

Coorientador: Dr. Humberson Rocha Silva

TRÊS CORAÇÕES
SETEMBRO/2020

533
S728m Sousa, Rayssa Garcia de

Mapeamento da distribuição espacial da qualidade da água em função do uso e ocupação do solo e da precipitação na Bacia do Rio Pará MG – Três Corações : Universidade Vale do Rio Verde, 2020.
89 fls. il

Orientador: Dr. Aurivan Soares de Freitas
Coorientador: Dr. Humberson Rocha Silva

Dissertação – Universidade Vale do Rio Verde de Três Corações/
Mestrado em Letras.

1. Recursos Hídricos. 2. Correlação. 3. Krigagem. I. Prof^ª. Dr. Aurivan Soares de Freitas, orientador. II. Dr. Humberson Rocha Silva, coorientador. III. Universidade Vale do Rio Verde de Três Corações. IV. Título.

Catálogo na fonte

Bibliotecária responsável: ERNESTINA MARIA PEREIRA CAMPOS DANTAS CRB6: 2.101

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE MESTRADO APRESENTADA POR RAYSSA GARCIA DE SOUSA, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE NO PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM SUSTENTABILIDADE EM RECURSOS HÍDRICOS.

Aos dez dias do mês de agosto de dois mil e vinte, reuniu-se, remotamente, a Comissão Julgadora, constituída pelos professores doutores: Prof. Dr. Aurivan Soares de Freitas (UninCór), Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda (IFMG), Prof. Dr. Humberson Rocha Silva (UFRPE) e Prof. Dr. Alisson Souza de Oliveira (UninCór), para examinar o(a) candidato(a) Rayssa Garcia de Sousa na defesa de seu trabalho de conclusão de curso intitulado: "DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA, OCUPAÇÃO DO SOLO E PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO PARÁ-MG". O(a) Presidente da Comissão, Prof. Dr. Aurivan Soares de Freitas, iniciou os trabalhos às 09:00, solicitando ao(a) candidato(a) que apresentasse, resumidamente, os principais pontos do seu trabalho. Concluída a exposição, os examinadores arguíram alternadamente o(a) candidato(a) sobre diversos aspectos da pesquisa e da dissertação. Após a arguição, que terminou às 14:50, a Comissão reuniu-se para avaliar o desempenho do(a) candidato(a), tendo chegado ao seguinte resultado: Prof. Dr. Aurivan Soares de Freitas (APROVADA), Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda (APROVADA), Prof. Dr. Humberson Rocha Silva (APROVADA) e Prof. Dr. Alisson Souza de Oliveira (APROVADA). Em vista deste resultado, o(a) candidato(a) Rayssa Garcia de Sousa foi considerado(a) APROVADA, fazendo jus ao título de Mestre pelo Programa de Mestrado Profissional em Sustentabilidade em Recursos Hídricos. Sendo verdade, eu, Prof. Francislaine Santos Silva do Rosário, Secretária Geral da UninCór, confirmo e lavro a presente ata, que assino juntamente com os Membros da Banca Examinadora. Três Corações, 10 de agosto de 2020.

Novo título (sugerido pela banca):

MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA QUALIDADE DA ÁGUA EM FUNÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO PARÁ - MG

Prof. Dr. Aurivan Soares de Freitas (UninCór)

Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda (IFMG)

Prof. Dr. Humberson Rocha Silva (UFRPE)

Prof. Dr. Alisson Souza de Oliveira (UninCór)

Dedico este trabalho a José Carlos Correia, que foi o maior incentivador e suporte fundamental para realização do mestrado, e a minha família, por compreender as ausências.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir a realização deste projeto.

A minha mãe Léia, pela compreensão e por acreditar que tudo é possível.

Ao meu amor e companheiro José Carlos, pelo incentivo, apoio e colaboração contínua.

Aos meus familiares por compreender e respeitar as ausências.

Ao orientador, Dr. Aurivan Soares de Freitas, pela sugestão do tema, ensinamentos passados, presteza na condução dos estudos, compreensão e pela intensa e espetacular orientação.

Ao Professor Dr. Alisson Souza de Oliveira, pela amizade, orientações, vídeos e ensinamentos transmitidos desde as primeiras aulas.

Ao Professor Dr. Marcelo Lion Batista, pelo apoio fundamental na revisão final do trabalho.

Aos colegas Flávio e Lucas, pelo convívio neste período, caronas e incentivo.

À Universidade Vale do Rio Verde (UninCor) e a todos os colegas professores.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para o meu êxito profissional.

“Sobre tudo o que se deve guardar, guarda o teu coração, porque dele procedem as saídas da vida.” Provérbios 4:23.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros e principais fontes e impactos da poluição	22
Quadro 2 – Classificação dos cursos de água.....	24
Quadro 3 – Variáveis e valores máximos permitidos na bacia hidrográfica do rio Pará no sudoeste de Minas Gerais	25
Quadro 4 – Pontos de amostragem de qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais	36
Quadro 5 – Estações meteorológicas na bacia hidrográfica do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais.....	38
Quadro 6 – Categorias de uso e ocupação do solo	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de Pearson durante o período seco na bacia do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais (1997-2018).....	47
Tabela 2 – Coeficiente de Pearson durante o período chuvoso na bacia do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais (1997-2018)	48
Tabela 3 – Distribuição do uso e ocupação do solo na bacia do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais em 1997, 2002, 2007, 2012 e 2017	53
Tabela 4 – Modelos selecionados, estimativas dos parâmetros dos semivariogramas isotrópicos ajustados (C_0 , C_1 e A), grau de dependência espacial (GDE) e indicadores de qualidade do ajuste (ME e RMSSE) referentes às variáveis do período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018	57
Tabela 5 – Modelos selecionados, estimativas dos parâmetros dos semivariogramas isotrópicos ajustados (C_0 , C_1 e A), grau de dependência espacial (GDE) e indicadores de qualidade do ajuste (ME e RMSSE) referentes às variáveis do período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018.....	60

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Propriedades de um semivariograma típico com patamar (modificado)	32
Figura 2 – Municípios que compõem a bacia hidrográfica do rio Pará no sudoeste de Minas Gerais.....	34
Figura 3 – Pontos de amostragem de qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais	37
Figura 4 – Estações Meteorológicas na bacia hidrográfica do rio Pará selecionadas para este estudo, localizadas no sudoeste de Minas Gerais	39
Figura 5 – Comparativo da correlação de Pearson na bacia do rio Pará no período seco e chuvoso	50
Figura 6 – Uso e ocupação do solo na bacia do rio Pará no sudoeste de Minas Gerais em 1997, 2002, 2007, 2012 e 2017	52
Figura 7 – Evolução do uso e ocupação do solo na bacia do rio Pará no sudoeste de Minas Gerais em 1997, 2002, 2007, 2012 e 2017	54
Figura 8 – Semivariogramas ajustados para precipitação, alumínio dissolvido, bário e chumbo total no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018.....	57
Figura 9 – Semivariogramas ajustados para cobre dissolvido, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, fósforo, manganês e níquel total e nitrogênio no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018	58
Figura 10 – Semivariogramas ajustados para oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, turbidez e zinco total no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018.....	59
Figura 11 – Semivariogramas ajustados para precipitação e alumínio dissolvido no período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018.....	60
Figura 12 – Semivariogramas ajustados para chumbo total, cobre dissolvido, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, ferro dissolvido, fósforo total, níquel total e nitrogênio entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018.....	61
Figura 13 – Semivariogramas ajustados para oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, turbidez e zinco total no período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018.....	62
Figura 14 – Mapeamento da precipitação (a), bário total (b), sólidos dissolvidos totais (c) e manganês total (d) no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018.....	64
Figura 15 – Krigagem para alumínio dissolvido (a), cobre dissolvido (b), chumbo total (c), ferro dissolvido (d), níquel total (e) e zinco total (f) no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018	66

Figura 16 – Krigagem para nitrogênio (a), fósforo total (b), coliformes termotolerantes (c), demanda bioquímica de oxigênio (d), oxigênio dissolvido (e) e turbidez (f) no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018	68
Figura 17 – Krigagem para precipitação (a) e sólidos dissolvidos totais (b) no período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018	69
Figura 18 – Krigagem para alumínio dissolvido (a), cobre dissolvido (b), chumbo total (c), ferro dissolvido (d), níquel total (e) e zinco total (f) no período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018.....	72
Figura 19 – Krigagem para nitrogênio (a), fósforo total (b), coliformes termotolerantes (c), demanda bioquímica de oxigênio (d), oxigênio dissolvido (e) e turbidez (f) no período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
As	Arsênio
Ba	Bário
Cd	Cádmio
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
Cr	Cromo
CT	Coliformes Termotolerantes
CT	Coliformes Termotolerantes
Cu	Cobre
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Fe	Ferro
GDE	Grau de Dependência Espacial
Hg	Mercúrio
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
ME	Erro Médio
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
Ni	Níquel
OD	Oxigênio Dissolvido
P	Fósforo
Pb	Chumbo
RMSSE	Raiz Quadrada do Erro Médio
VMP	Valor Máximo Permitido
Zn	Zinco

RESUMO

A redução da disponibilidade de água de boa qualidade é preocupante e deve ser mitigado com ações de preservação dos recursos hídricos, contudo para aplicação destas medidas é importante conhecer as fontes de poluição e sua distribuição. Neste contexto, a geoestatística é uma técnica que permite obter mapas com distribuição espacial das variáveis de qualidade dos recursos hídricos e da precipitação na bacia, a partir da aquisição de dados em pontos de monitoramento. Outras técnicas de geoprocessamento permitem, por meio de imagens de satélite, representar o uso e ocupação do solo, característica está de fundamental importância para interpretação da qualidade dos recursos hídricos em uma bacia. Assim, objetivou-se com este trabalho analisar a distribuição espacial da qualidade da água, precipitação e uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Pará, uma sub-bacia do rio São Francisco (MG). Os dados de qualidade e precipitação, amostrado em 25 pontos, entre 1997 e 2018, a partir de 15 estações climatológicas foram submetidos ao teste de coeficiente de Pearson. As variáveis estudadas foram selecionadas considerando limite legal estabelecido para curso d'água classe II a nível estadual. Para aquelas que apresentaram correlação forte e muito forte entre si foram gerados mapas de krigagem. De forma concomitante, foram elaborados mapas de uso e ocupação do solo para os anos de 1997, 2002, 2007, 2012 e 2017. Houve diferença na distribuição da precipitação entre o período seco e chuvoso, porém, em ambas as análises o maior volume de chuva ocorreu na cabeceira da bacia. Na análise das variáveis de qualidade da água o grupo dos metais alumínio, cobre, chumbo, ferro, níquel e zinco apresentou distribuição espacial muito homogênea, com concentração elevada em regiões com uso do solo predominante de infraestrutura urbana, bem como porções de áreas não vegetadas e atividades minerárias. Já para os teores de bário e manganês total, os índices mais expressivos situaram-se na porção do exutório da bacia, representando o acúmulo da interferência do uso do solo em toda a bacia. Por fim, as concentrações de nitrogênio, fósforo, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais e turbidez mais elevadas, em especial no período seco, coincidentes com a localização dos maiores centros urbanos da bacia.

Palavras-chave: Recursos Hídricos. Correlação. Krigagem.

ABSTRACT

The reduction in the availability of good quality water is worrying and must be mitigated with actions to preserve water resources, however, for the application of these measures it is important to know the sources of pollution and their distribution. In this context, geostatistics is a technique that allows obtaining maps with spatial distribution of water quality variables and rainfall in the basin, from the acquisition of data at monitoring points. Other geoprocessing techniques allow, through satellite images, to represent the use and occupation of the soil, a characteristic that is of fundamental importance for the interpretation of the quality of water resources in a basin. Thus, the objective of this work was to analyze the spatial distribution of water quality, precipitation and land use and occupation in the hydrographic basin of the Pará River, a sub-basin of the São Francisco River (MG). The quality and precipitation data, sampled at 25 points, between 1997 and 2018, from 15 climatological stations were subjected to Pearson's coefficient test. The studied variables were selected considering the legal limit established for class II watercourse at the state level. Kriging maps were generated for those that showed a strong and very strong correlation with each other. Concomitantly, maps of land use and occupation were prepared for the years 1997, 2002, 2007, 2012 and 2017. There was a difference in the distribution of precipitation between the dry and rainy periods, however, in both analyzes the greater volume of rain occurred at the head of the basin. In the analysis of water quality variables, the group of metals aluminum, copper, lead, iron, nickel and zinc presented a very homogeneous spatial distribution, with a high concentration in regions with predominant soil use of urban infrastructure, as well as portions of non-vegetated areas. and mining activities. As for the levels of barium and total manganese, the most expressive indexes were located in the exutory portion of the basin, representing the accumulation of land use interference throughout the basin. Finally, the concentrations of nitrogen, phosphorus, thermotolerant coliforms, biochemical oxygen demand, dissolved oxygen, total dissolved solids and higher turbidity, especially in the dry period, coinciding with the location of the largest urban centers in the basin.

Palavras-chave: Water resources. Correlation. Kriging.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral.....	18
2.2	Objetivos específicos	18
3	JUSTIFICATIVA.....	19
4	REFERENCIAL TEÓRICO	20
4.1	Gestão de Bacias Hidrográficas.....	20
4.2	Qualidade da água	21
4.3	Uso e ocupação do solo	26
4.4	Precipitação	27
4.5	Coefficiente de <i>Pearson</i>	29
4.6	Geoestatística.....	30
4.6.1	Semivariograma	31
4.6.2	Krigagem	32
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
5.1	Caracterização da área de estudo.....	34
5.2	Técnica de pesquisa	35
5.3	Obtenção das séries históricas	36
5.3.1	Dados de qualidade da água.....	36
5.3.2	Dados de uso e ocupação do solo	37
5.3.3	Série histórica da precipitação	38
5.4	Métodos.....	39
5.4.1	Análise dos dados	40
5.4.1.1	Qualidade da água	40
5.4.1.2	Uso e ocupação do solo	40
5.4.1.3	Precipitação Média Anual	41
5.4.2	Correlação de <i>Pearson</i>	42
5.4.3	Geoestatística	42
5.4.3.1	Semivariograma.....	42
5.4.3.2	Krigagem	44

5.4.4	<i>Softwares</i> usados	45
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
6.1	Precipitação e Qualidade da água	46
6.2	Coefficiente de correlação de Pearson	46
6.3	Uso e ocupação do solo	52
6.4	Geoestatística	56
6.4.1	Semivariograma	56
6.4.1.1	Período Seco.....	56
6.4.1.2	Período Chuvoso	59
6.4.2	Espacialização das variáveis analisadas por Krigagem	62
6.4.2.1	Período Seco.....	62
6.4.2.2	Período Chuvoso	69
6.5	Correlações entre variáveis nos períodos seco e chuvoso	75
7	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICES	84
	APÊNDICE A	84
	APÊNDICE B.....	85
	APÊNDICE C.....	86

1 INTRODUÇÃO

A redução da disponibilidade de água de boa qualidade é um fator preocupante no contexto mundial. No Brasil, a poluição dos cursos hídricos está normalmente associada ao lançamento de efluentes não tratados, à não preservação das matas ciliares, aos processos erosivos que levam à perda de solo e ao assoreamento das águas, dentre outros fatores.

Conhecer as fontes de poluição e sua relação com a degradação dos recursos hídricos é fundamental na busca de medidas mitigadoras destes impactos. Devido à vasta extensão da poluição dos recursos hídricos, torna-se necessária a realização de trabalhos em unidades territoriais representativas do estudo em curso, aplicando, por exemplo, a bacias hidrográficas configuradas como unidades de planejamento. Portanto, tem-se a aplicação de bacias hidrográficas como unidades de planejamento.

O monitoramento da qualidade das águas e da precipitação nas bacias hidrográficas é uma ferramenta importante, pois permite a elaboração de diagnósticos da condição deste recurso a partir de um número representativo destes dados. No entanto, a interpretação dos resultados obtidos algumas vezes é ineficiente, ficando os mesmos subutilizados e sem aplicação prática como instrumento de gestão dos recursos hídricos e fortalecimento da Política Estadual de Recursos Hídricos, estabelecida pela Lei Estadual nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999.

Tem-se como fatores de restrição ao uso dos dados de monitoramento a falta de interpretação destes dados e a não identificação da variação espacial das variáveis de qualidade da água e sua relação com as atividades existentes na bacia. Cabe ressaltar que os impactos que acarretam a degradação dos recursos hídricos, em sua maior parte, estão ligados às ações antrópicas, portanto, a correlação espacial de não conformidade com a fonte geradora de tal degradação é fundamental na implantação de medidas corretivas e mitigadoras dos problemas.

Neste contexto, a geostatística é uma técnica capaz de suprir as lacunas citadas e proporcionar síntese de resultados em mapas de fácil interpretação e uso, visto que a mesma é utilizada para representação das variáveis regionalizadas, ou seja, dos atributos influenciados por condicionante espacial (ALMEIDA; COELHO; ALMEIDA; COSTA, 2018). Essa técnica possibilita, a partir do ajuste do semivariograma e da interpolação por krigagem, estimar valores de variáveis distribuídas no espaço, a partir de valores adjacentes considerados como interdependentes (MELLO; OLIVEIRA, 2016).

A área de estudo escolhida foi a da bacia hidrográfica do rio Pará, localizada em Minas Gerais, devido a existência de diversos pontos de monitoramento (28 pontos de amostragem)

que permitem o emprego das técnicas de geoprocessamento. Cabe ressaltar também que não foram desenvolvidos estudos desta natureza para a região, reforçando a necessidade de melhor aplicação dos dados de monitoramento.

Foi realizada a análise dos dados de monitoramento físico químico, precipitação e uso e ocupação do solo, por meio do geoprocessamento, para a bacia hidrográfica do rio Pará.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Mapear a distribuição espacial da qualidade da água em função do uso e ocupação do solo e da precipitação na bacia hidrográfica do rio Pará MG, por meio de aplicação do geoprocessamento.

2.2 Objetivos específicos

Elaborar mapas de amostragem de qualidade da água e precipitação a partir de estações de monitoramento climatológico na bacia do rio Pará, entre 1997 e 2018.

Realizar levantamento do uso e ocupação do solo na bacia nos anos de 1997, 2002, 2007, 2012 e 2017 com base nos levantamentos do Projeto MapBiomias. Elaborar planilha de usos para os referidos anos e definir o uso prioritário, no período de estudo, para cada área de contribuição que influencia na qualidade dos recursos hídricos do ponto de amostragem.

Analisar dados com uso da estatística descritiva, por meio das médias das variáveis e fazer correlação de Pearson nos pontos de amostragens e estações.

Analisar a distribuição espacial do uso e ocupação do solo e da precipitação na bacia hidrográfica do rio Pará por meio de técnicas de geoprocessamento.

Elaborar mapas de qualidade da água, precipitação e o uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Pará MG.

3 JUSTIFICATIVA

A busca constante da preservação dos recursos hídricos passa primeiramente pela necessidade de obtenção de diagnósticos da condição das águas e identificação das fontes de poluição. A aplicação de técnicas de geoprocessamento, como a geoestatística, na avaliação da qualidade das águas de uma bacia hidrográfica amplia a interpretação dos dados, uma vez que, durante este processo tem-se a projeção de resultados, por meio de interpolação de dados, em regiões nas quais não há pontos de amostragem.

A bacia do rio Pará possui diversos pontos de monitoramento e estações meteorológicas, o que gera um volume expressivo de dados, porém, ainda não interpretados. Diante disso, nesse trabalho foram elaboradas informações de fácil assimilação quanto ao uso e ocupação do solo, a qualidade da água e a precipitação local, fornecendo produtos que melhorem a gestão desta bacia.

Cabe ressaltar também o fortalecimento da aplicação da Política Estadual de Recursos Hídricos, estabelecida pela Lei Estadual nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999, que prevê no artigo 11º, como etapa dos Planos Diretores de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas, a elaboração de “diagnóstico da situação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica”. As técnicas aplicadas neste trabalho permitem a elaboração do diagnóstico em tela.

Além disso, no lado social e econômico, esse trabalho define uma metodologia que pode ser empregada em outras unidades de planejamento, e também, permite a priorização de projetos na bacia hidrográfica do Rio Pará, promovendo a aplicação adequada dos recursos da cobrança.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

O conhecimento da qualidade das águas de uma bacia hidrográfica é fundamental para proposição de políticas públicas e antecipação de conflitos de uso das mesmas, visto que estes se tornam cada vez mais frequentes, devido à contínua degradação e redução da disponibilidade destes recursos em condições adequadas.

Britto *et al.* (2018) ressaltam que o monitoramento pode gerar dados de difícil interpretação e que a análise das informações com intuito de evidenciar a condição da qualidade da água é um desafio. Entretanto, os resultados podem indicar mudanças nas características físicas, químicas e biológicas dos recursos, quando adequadamente processados e analisados, e assim podem contribuir na melhoria da gestão das bacias hidrográficas e conseqüentemente, dos recursos hídricos.

A interpretação dos resultados obtidos deve considerar sempre o local do ponto de amostragem, em especial a observação do uso e ocupação do solo, haja vista a relação existente entre o local gerador da degradação da qualidade do curso d'água e os parâmetros caracterizadores desta condição. Outro fator fundamental é entender as interferências promovidas nos monitoramentos devido às alterações climáticas, sobretudo da precipitação, que podem superestimar ou diluir concentrações dos parâmetros em estudo.

Para Mello e Oliveira (2016), a geoestatística facilita entender o comportamento dos parâmetros associado à regionalização dos dados. A seguir são apresentados detalhadamente cada um dos temas considerados fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

4.1 Gestão de Bacias Hidrográficas

A manutenção da qualidade das águas do País é um desafio enfrentado diariamente por governantes, especialistas e pela sociedade civil. São muitos os impactos causados nestes recursos, que tem como ponto comum a falta de compatibilização entre o desenvolvimento e a preservação ambiental (FEIL; STRASBURG; SPILKI, 2017). As ações de mitigação dos impactos não podem ser realizadas imediatamente e nem mesmo concomitantemente em todo o território. Portanto, é necessário que se determinem regiões de planejamento, que permitam estabelecer um adequado gerenciamento das águas e a promoção da melhoria contínua da qualidade das mesmas.

Neste sentido, a bacia hidrográfica compõe uma unidade de planejamento e a gestão dos recursos hídricos é estabelecida a partir da observação das condições físicas que delimitam determinadas influências exercidas sobre os cursos d'água de uma região. A bacia compreende

a área na qual, após a ocorrência de precipitação, toda a água escoar por meio dos canais de drenagem até desaguar em um rio principal, lagoa ou oceano (FEIL; STRASBURG; SPILKI, 2017). Segundo os mesmos autores, o gerenciamento de recursos hídricos com uso da bacia é um instrumento que permite obtenção de melhores resultados na preservação e conservação das águas, além de promover maior compreensão e resolução de conflitos de interesse, em especial aqueles referentes à degradação das águas.

Ritter *et al.* (2015) ratificam a bacia como ferramenta de gestão, ponderando que esta permite um diagnóstico holístico, uma vez que soma características ecológicas, geomorfológicas e sociais integradoras, das quais se cita a influência do manejo e proteção do solo, da condição da vegetação, da ocupação da área e das atividades industriais e agrícolas na conservação da qualidade das águas.

A delimitação física deste ambiente permite ainda a aplicação de técnicas de correlação espacial que promovem adequada regionalização das condições estudadas no território, contribuindo com a priorização de ações de gestão e a adequação do emprego dos recursos arrecadados por meio da cobrança pelo uso das águas (RITTER *et al.*, 2015). Cabe ressaltar que a cobrança pelo uso da água é um instrumento previsto na Política Nacional de Recursos Hídricos e que os recursos arrecadados devem ser revertidos na preservação ambiental da unidade de planejamento.

O ponto de partida para obtenção de diagnóstico sobre a qualidade da água de determinada região deve iniciar pela delimitação da região, considerando como limite a bacia hidrográfica. A partir deste território, são levantados dados que contribuem para o entendimento da dinâmica da bacia e permitem a avaliação de relações de uso e ocupação do solo, precipitação e resultados de monitoramento obtidos nos cursos d'água que a compõem (RITTER *et al.*, 2015).

4.2 Qualidade da água

A avaliação da qualidade da água das bacias hidrográficas oferece informações fundamentais na identificação de impactos e na determinação dos níveis de qualidade dos que fazem parte desta. Os órgãos ambientais de todo o País possuem redes de qualidade com pontos de monitoramento periódicos em Minas Gerais e os dados são adquiridos e gerenciados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

Trindade *et al.* (2017) expõem que estas redes de qualidade geram grande volume de dados que é pouco interpretado e aplicado como ferramenta de gestão das águas. Os mesmos autores destacam que métodos estatísticos são frequentemente utilizados para análise de

tendência, no que tange aos recursos hídricos, e que estas podem ser empregadas no acompanhamento dos resultados e para ampliar o foco dos parâmetros de maior interesse.

No Brasil, a Resolução n° 357, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), publicada em 17 de março de 2005, estabelece o padrão de qualidade da água por classes que variam desde classe especial, passando por classes 1 a 4. Em Minas Gerais, a Deliberação Normativa n° 1 de 05 de maio de 2008, instituída pelo Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH) estabeleceu critérios semelhantes para o estado.

São vários os parâmetros estabelecidos para análise da qualidade da água, porém, busca-se neste estudo focar nas variáveis de metais pesados e parâmetros gerais de caracterização. A observação de cada uma delas permite a identificação das possíveis fontes de poluição, seja ela natural ou antropogênica, ou ainda na constatação de ocorrência de valores regionais naturalmente elevados, o que constitui o *background* geoquímico da área em estudo.

O Quadro 1 apresenta os parâmetros previamente selecionados para o estudo, bem como os principais impactos observados nas águas superficiais quando da modificação destes índices, acrescido da descrição das principais fontes que contribuem para esta alteração.

Quadro 1 – Parâmetros e principais fontes e impactos da poluição

Parâmetro	Relação com os recursos hídricos
Potencial Hidrogeniônico (pH)	<ul style="list-style-type: none"> • Alterações causam efeito sobre a fisiologia das espécies; • Influencia na precipitação de metais pesados e solubilização de nutrientes.
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Organismos aquáticos possuem limites de tolerância térmica; • Existem temperaturas ótimas de crescimento, migração, desova e incubação de ovos; • É normalmente alterada por despejos de efluentes industriais.
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	<ul style="list-style-type: none"> • Valores elevados indicam a presença de despejos de origem predominante orgânica em cursos d'água e conseqüente redução do oxigênio dissolvido.
Oxigênio Dissolvido (OD)	<ul style="list-style-type: none"> • Valores baixos indicam águas poluídas.
Turbidez	<ul style="list-style-type: none"> • Despejo de efluentes e chuvas tendem a aumentar os valores de turbidez; • Valores altos de turbidez reduzem a fotossíntese do curso d'água e as atividades biológicas aquáticas.
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentação de sólidos em excesso no leito dos rios pode destruir organismos e danificar leitos de desovas de peixes. • Retenção de bactérias e resíduos orgânicos no fundo dos rios.
Nitrogênio	<ul style="list-style-type: none"> • Principal fonte são os despejos de efluentes sanitários, algumas indústrias químicas, petroquímicas, siderúrgicas, farmacêuticas, conservas alimentícias, matadouros, frigoríficos e curtumes; • Altos valores indicam a presença de zona de degradação destes efluentes; • Em áreas agrícolas, as chuvas realizam a lixiviação de diversas formas de nitrogênio para as águas; • Excesso causa eutrofização de cursos d'água.

(Continuação)

Quadro 1 – Parâmetros e principais fontes e impactos da poluição

Parâmetro	Relação com os recursos hídricos
Fósforo total	<ul style="list-style-type: none"> • Despejo de efluentes; • Detergentes em pó; • Efluentes de indústrias de fertilizantes, pesticidas, indústrias químicas em geral, conservas alimentícias, abatedouros, frigoríficos e laticínios; • Em áreas agrícolas as chuvas realizam a lixiviação de diversas formas de fósforo para as águas. • Excesso causa eutrofização de cursos d'água.
Coliformes Termotolerantes (CT)	<ul style="list-style-type: none"> • Ligado a presença de fezes humanas, mamíferos e pássaros; • Está vinculado à presença de grande quantidade de matéria orgânica e solo em decomposição.
Alumínio total	<ul style="list-style-type: none"> • A solubilidade é baixa em pH entre 5,5 e 6,0; • Valores são mais elevados em águas mais ácidas; • Chuvas tendem a aumentar os valores de alumínio.
Bário total	<ul style="list-style-type: none"> • Indústrias de borracha, têxtil, cerâmica, farmacêutica, dentre outras; • Ocorrência natural normalmente com concentração entre 0,7 e 900µg/L.
Cádmio total	<ul style="list-style-type: none"> • Indústrias de galvanoplastias, produção de pigmentos, soldas, equipamentos eletrônicos, lubrificantes e acessórios fotográficos; • Uso de fertilizantes; • Ocorrência natural normalmente com concentração inferior a 1µg/L.
Chumbo total	<ul style="list-style-type: none"> • Indústria de tabaco, bebidas, alimentos, baterias, tintas, esmaltes, inseticidas, vidros, ligas metálicas, entre outros.
Cobre dissolvido	<ul style="list-style-type: none"> • Indústrias de fabricação de tubos, válvulas, acessórios para banheiro e ligas e revestimentos; • Usado como algicida na forma de sulfato ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$); • Mineração de cobre e outros metais associados.
Cromo total	<ul style="list-style-type: none"> • Produção de ligas metálicas, estruturas da construção civil, fertilizantes, tintas, pigmentos, curtumes, preservativos para madeira, entre outros; • A maioria das águas superficiais contém entre 1 e 10 µg/L de cromo.
Ferro dissolvido	<ul style="list-style-type: none"> • Elevação dos teores na estação chuvoso; • Efluentes de indústrias metalúrgicas.
Manganês total	<ul style="list-style-type: none"> • Indústria de aço, ligas metálicas, baterias, vidros, oxidantes para limpeza, fertilizantes, vernizes, suplementos veterinários, etc.; • Ocorrência natural normalmente com concentração inferior a 1mg/L.
Mercurio total	<ul style="list-style-type: none"> • Produção eletrolítica de cloro, equipamentos elétricos, amalgamas e mercúrio, células de mercúrio, tintas e fundição; • Atividades de garimpo de ouro; • Ocorrência natural normalmente com concentração inferior a 0,5µg/L.
Níquel total	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricação de aço inoxidável, baterias, moedas, pigmentos, alimentos, artigos de panificadoras, refrigerantes e solventes aromatizados; • Indústria de eletrodeposição, mineração, entre outros; • Queima de combustível; • Ocorrência natural normalmente com concentração inferior a 0,1mg/L, podendo ser mais concentrados em áreas ricas neste mineral.
Zinco total	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricação de ligas e latão, borracha como pigmento branco, suplementos vitamínicos, protetores solares, desodorantes, shampoos e galvanização de aço; • Ocorrência natural normalmente com concentração inferior a 10µg/L.

Fonte: COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2017.

O Quadro 2 apresenta a classificação do enquadramento dos cursos d'água de acordo com o tipo de atividade ao qual se destina, conforme diretrizes estabelecidas na Resolução COPAM CERH 1 de 1 de maio de 2008.

Quadro 2 – Classificação dos cursos de água

Classe	Destinação
Classe Especial	<ul style="list-style-type: none"> • Abastecimento para consumo humano, com filtração e desinfecção; • Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e • Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
Classe 1	<ul style="list-style-type: none"> • Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; • Proteção das comunidades aquáticas; • Recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho; • Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e • Proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
Classe 2	<ul style="list-style-type: none"> • Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; • Proteção das comunidades aquáticas; • Recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho; • Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e • Aqüicultura e à atividade de pesca.
Classe 3	<ul style="list-style-type: none"> • Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; • Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; • Pesca amadora; • Recreação de contato secundário; e • Dessedentação de animais.
Classe 4	<ul style="list-style-type: none"> • Navegação; • Harmonia paisagística; e • Usos menos exigentes.

FONTE: COPAM CERH, 2008.

O Quadro 3 apresenta um resumo das variáveis de interesse deste trabalho e os Valores Máximos Permitidos (VMP) para cada classe de enquadramento do curso hídrico, conforme estabelecido pela Deliberação Normativa nº 1 de 05 de maio de 2008, instituída pelo Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH).

Quadro 3 – Variáveis e valores máximos permitidos na bacia hidrográfica do rio Pará no sudoeste de Minas Gerais

Parâmetro	Unidade	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
pH	-	6-9	6-9	6-9	6-9
Temperatura	°C	-	-	-	-
Demanda Bioquímica Oxigênio	mg L ⁻¹	3	5	10	-
Oxigênio Dissolvido (mínimo)	mg L ⁻¹	6	5	4	2
Turbidez	UNT	40	100	100	-
Sólidos dissolvidos Totais	mg L ⁻¹	500	500	500	-
Nitrogênio amoniacal total para pH ≤ 7,5	mg L ⁻¹	3,7	3,7	13,3	-
Nitrogênio amoniacal total para 7,5 < pH ≤ 8,0	mg L ⁻¹	2,0	2,0	5,6	-
Nitrogênio amoniacal total para 8 < pH ≤ 8,5	mg L ⁻¹	1,0	1,0	2,2	-
Nitrogênio amoniacal total para > 8,5	mg L ⁻¹	0,5	0,5	1,0	-
Fósforo total (ambiente lântico)	mg L ⁻¹	0,020	0,020	0,05	-
Fósforo total (ambiente intermediário)	mg L ⁻¹	0,025	0,025	0,075	-
Fósforo total (ambiente lótico)	mg L ⁻¹	0,01	0,01	0,15	-
Coliformes fecais	UFC's	200	1000	2500	-
Alumínio dissolvido	mg L ⁻¹	0,1	0,1	0,2	-
Arsênio total	mg L ⁻¹	0,01	0,01	0,033	-
Bário total	mg L ⁻¹	0,7	0,7	1,0	-
Ferro dissolvido	mg L ⁻¹	0,3	0,3	5,0	-
Cádmio total	mg L ⁻¹	0,001	0,001	0,01	-
Cobre dissolvido	mg L ⁻¹	0,009	0,009	0,013	-
Chumbo total	mg L ⁻¹	0,01	0,01	0,033	-
Mercúrio total	mg L ⁻¹	0,0002	0,0002	0,002	-
Manganês total	mg L ⁻¹	0,01	0,01	0,5	-
Cromo total	mg L ⁻¹	0,05	0,05	0,05	-
Níquel total	mg L ⁻¹	0,025	0,025	0,025	-
Zinco total	mg L ⁻¹	0,18	0,18	5,0	-

Fonte: MINAS GERAIS, 2008.

Finkler *et al.* (2015) realizaram análises dos resultados de monitoramento das águas das seis micro bacias localizadas no município de Caxias do Sul - RS, por meio da técnica estatística de análise de componentes principais. Os autores observaram que a associação de alterações nos parâmetros de coliformes termotolerantes, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos totais e oxigênio dissolvidos indicaram que os cursos hídricos recebiam despejos de efluentes domésticos bruto ou com tratamento ineficiente. Por outro lado, variações no parâmetro alumínio foram consideradas como características de *background* geoquímico, ou seja, valores de referência de qualidade que ocorrem naturalmente na região das bacias.

Rocha *et al.* (2016) empregaram a mesma técnica para seleção de parâmetros de monitoramento em manancial utilizado na captação de água. Foram investigados treze parâmetros, dos quais oito estavam relacionados às condições de qualidade da água, como cor, turbidez e ferro.

Estudo desenvolvido na bacia hidrográfica do Açude Acarape do Meio (Ceará) demonstrou que, em áreas rurais, a carga de fósforo, a DBO e os coliformes termotolerantes

estavam associados ao lançamento de esgoto *in natura* por fontes difusas, sendo o primeiro parâmetro, o fósforo, incrementado também pelas regiões com adubação química e orgânica; já na zona urbana, a elevação destes parâmetros estava associada à ineficiência das estações de tratamento de esgoto, que proporcionavam a concentração dos problemas (LIMA; MAMEDE; LIMA NETO, 2018).

Em estudo realizado na região baixa do Rio São Francisco, também foram observados aumentos de valores de coliformes termotolerantes, nitrato e fósforo, sendo o último relacionado às atividades agrícolas desenvolvidas na região, em especial aos solos desprovidos de vegetação e os dois primeiros ao lançamento de efluentes. Os mesmos autores também observaram que, nestes ambientes alterados, houve redução do oxigênio dissolvido e maior aporte de sedimentos no rio no período chuvoso (BRITTO *et al.*, 2018).

4.3 Uso e ocupação do solo

Dentro do ambiente de uma bacia hidrográfica pode ocorrer variação nos usos e ocupações variadas do solo, no tipo de cobertura e na forma de manejo de cada região que refletem diretamente na qualidade dos recursos hídricos de cada porção da bacia.

A qualidade da água é influenciada pelo uso e ocupação do solo e pela ocorrência de precipitação. Bonnet, Ferreira e Carneiro Lobo (2008) verificaram com o emprego do Índice de Qualidade da Água (IQA) em um conjunto de bacias hidrográficas (Goiás), que durante o período de chuvas, houve correspondência da piora da qualidade da água. A redução da qualidade foi devido ao maior aporte de sedimentos e matéria orgânica, visto que na estação chuvosa tem maior escoamento superficial e incremento de vazão nos cursos d'água por escoamento superficial. Soma-se a esta condição, o uso preponderante da bacia em estudo, visto que bacias com maior cobertura vegetal irão ter um reduzido aporte de contaminantes.

De acordo com estudo conduzido por Santos e Hernandez (2012), na microbacia do córrego Ipê, foi constatado que houve má conservação do solo e supressão vegetal. Além disso, esses autores evidenciaram que a implantação de áreas urbanas teve influência negativa e direta na qualidade das águas, conforme já se esperava, e que o conhecimento do uso e ocupação do solo é fundamental na correlação dos impactos com suas fontes.

A ausência de tratamento adequado de efluentes influencia diretamente na qualidade da água de uma bacia hidrográfica (FRANCO *et al.*, 2015). Os mesmos autores comprovaram, em estudo conduzido na bacia do rio Almada (Bahia), que as piores condições de qualidade da água, em relação aos parâmetros coliformes termotolerantes e *Escherichia coli* estavam

relacionados às regiões urbanas desta bacia, onde se concentrava a produção de efluentes e não ocorria tratamento abrangente e eficiente dos mesmos.

Cabral e Reis (2015) avaliaram a influência do uso do solo no assoreamento de cursos d'água. Os autores concluíram que solos mais expostos e áreas urbanizadas produziram sedimentos em excesso, que contribuíram para o assoreamento de corpos d'água, enquanto ambientes com vegetação predominante tiveram volume de sedimentos reduzidos e conseqüentemente, menor impacto na qualidade da água (CABRAL; REIS, 2015).

Pesquisas realizadas na bacia do Rio das Velhas, em sua porção baixa, indicaram que valores reduzidos de oxigênio dissolvido estavam ligados ao lançamento de efluentes domésticos, industriais e agrícolas e os valores alterados de condutividade elétrica tinham conexão com o manejo do solo na bacia.

Estudo desenvolvido na bacia do Igarapé da Prata (Pará) demonstrou que a caracterização do uso e ocupação do solo é fundamental para o entendimento adequado das transformações sofridas na bacia e que os dados de ocupação evidenciaram a importância da cobertura vegetal na preservação das águas. Ainda segundo o estudo, o oposto ocorria em áreas de pastagem, onde se verificava processos erosivos e poluição dos recursos hídricos (NASCIMENTO; FERNANDES, 2017).

Na bacia hidrográfica do rio Pará, Oliveira *et al.* (2017), por meio de análise multivariada e teste paramétrico dos resultados de monitoramentos físico-químicos no período de 2008 a 2016, apontaram que os afluentes córrego Pinto e Ribeirão Fartura, localizados no município de São Gonçalo do Pará e Nova Serrana, respectivamente, foram os mais degradados da bacia. O rio Pará, no município de Passa Tempo e seu afluente Rio do Peixe, em Pitangui, foram os que se apresentaram mais conservados, com menor registro de impacto ambiental.

4.4 Precipitação

A qualidade dos recursos hídricos também pode ser influenciada pela precipitação, tendo em vista que sua ocorrência acarreta a lavagem das superfícies e a lixiviação de substâncias para o leito dos rios. Estas substâncias são variadas conforme as condições de conservação dos ambientes que recebem estas chuvas e da intensidade das mesmas.

Pontes, Marques e Marques (2012) observaram na sub-bacia do córrego Banguelo, no município de Contagem, que a incidência de precipitação contribuiu para a degradação dos parâmetros DBO e fosfato, proporcionada pelo carreamento de materiais para os cursos d'água devido ao escoamento superficial, e a redução do nitrato, uma vez que os rios, normalmente,

possuem pequenas vazões e encontram-se fortemente poluídos pelo lançamento de efluentes que são diluídos durante o período chuvoso.

Monitoramentos na bacia do Rio Jari (Amapá) demonstraram que a precipitação é um fator relevante na análise da variabilidade da qualidade das águas superficiais. Em especial, com ocorrência de elevação dos parâmetros de cor, turbidez, alumínio, manganês e *E. coli* nos meses chuvosos (OLIVEIRA; CUNHA, 2014).

Segundo estudo conduzido no Rio Amazonas, na cidade de Macapá (Amapá), evidenciou-se redução dos valores de turbidez e DBO no período chuvoso, justificados pelo fato desta estação apresentar vazões mais elevadas, favorecer a diluição dos efluentes lançados na bacia e permitir que o rio estivesse menos vulnerável às interferências antrópicas (DAMASCENO *et al.*, 2015). Os mesmos autores também observaram aumento dos valores de fósforo no período chuvoso, mas não constataram variação sazonal para os parâmetros pH e coliformes termotolerantes.

Pieron *et al.* (2015) observaram influência da precipitação na variação dos parâmetros sólidos totais em suspensão, turbidez e oxigênio dissolvido, em um trecho da sub-bacia hidrográfica do Córrego Água Limpa, influenciadas pela mineração de níquel. Segundo os autores, essas alterações ocorrem devido ao funcionamento ineficiente de bacias de contenção de sedimentos, que são construídas para absorver as vazões com sólidos, provenientes do escoamento superficial dos depósitos de rejeitos que não contam com proteção.

A influência da precipitação na elevação dos resultados de cor, turbidez, ferro, oxigênio consumido e condutividade foi observada nos monitoramentos realizados na represa Dr. João Penido, usada para o abastecimento da cidade de Juiz de Fora – MG (ROCHA; PEREIRA, 2016).

De Paula, Benedetti e Pereira Filho (2016) verificaram em pesquisa desenvolvida na bacia do Rio Ingaí (Rio Grande do Sul) que a ocorrência de precipitação associada ao tipo de uso do solo favorece o aumento do aporte de sólidos em suspensão para os cursos d'água.

Também foi observada a variação dos resultados de monitoramento em relação à precipitação na sub-bacia do rio Parafuso (Pará), no qual a turbidez apresentou maiores valores no período de estiagem, devido à significativa redução de vazão dos rios associada à presença de grande quantidade de material em suspensão como argilas, coloides e matéria orgânica (MIRANDA *et al.*, 2017).

Os resultados obtidos pelos autores citados reforçam a importância na avaliação da influência da sazonalidade nos dados de monitoramento de uma bacia hidrográfica.

4.5 Coeficiente de *Pearson*

O coeficiente de Pearson (r) pode ser definido como um indicador que representa a interdependência linear entre variáveis. As mesmas são consideradas perfeitamente correlacionadas quando o resultado do coeficiente apresentar valores mais próximo de -1 e 1 (BENESTY *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2018). O oposto, a independência das variáveis, ocorre quando este resultado for próximo de 0.

Rocha e Pereira (2016) aplicaram o coeficiente de Pearson para analisar as variáveis em um manancial e consideraram que valores superiores a 0,5 expressaram forte interdependência, por outro lado, valores de 0,3 a 0,49 representaram moderada correlação.

A interdependência é considerada nula, quando a correlação for 0. Quando estiver entre 0 e 0,3 é fraca e entre 0,31 e 0,6 regular. Já para valores entre 0,61 e 0,9 é avaliada como forte e entre 0,91 e 99 muito forte. Se o valor for igual a 1 é entendida como plena, inclusive nas versões negativas (FEIL; STRASBURG; SPILKI, 2017).

Vanzela *et al.* (2009) e Santos e Hernandes (2012) aplicaram o coeficiente de Pearson na correlação entre o uso e ocupação do solo com a qualidade dos recursos hídricos. Esses autores estabeleceram as seguintes classes de correlação: $0,0 < r \leq 0,1$ (muito baixa), $0,1 < r \leq 0,3$ (baixa) $0,3 < r \leq 0,5$ (moderada), $0,5 < r \leq 0,7$ (alta), $0,7 < r \leq 0,9$ (muito alta) e $0,9 < r \leq 1,0$.

O coeficiente de Pearson também pode demonstrar a correlação linear entre variáveis de monitoramento de qualidade do solo e da água. Alves *et al.* (2014) usaram o coeficiente para avaliar esta correlação, a partir de resultados de análises físico químicas de amostras de solo. A interpretação do coeficiente foi baseada em valores inferiores a 0,25 considerados como fraca, entre 0,25 e 0,75 moderada, e maior que 0,75 forte.

A aplicação deste coeficiente também permitiu observar em áreas agricultáveis interdependência positiva entre diferentes níveis de cálcio, magnésio e dureza total (VANZELA *et al.*, 2009). Santos e Hernandes (2012) observaram correlação positiva entre a presença de coliformes e as áreas ociosas, de pastagem, várzea e assentamento.

Em pesquisa realizada na bacia do Rio Vacacaí-Mirim, verificou-se que *E. coli* relacionou-se com DBO ($r = 0,80$) e amônia ($r = 0,87$), e a turbidez com os sólidos suspensos ($r = 0,91$), conforme resultados obtidos por Sousa e Gastaldini (2014).

Em estudo realizado na bacia hidrográfica de Cancela Tamandaí (RS), constatou-se que valores de coeficiente de Pearson acima de 0,5 apresentavam interdependência e que houve relação entre temperatura e DBO ($r = 0,60$), turbidez e *E. coli* ($r = 0,63$), sólidos totais e sólidos

dissolvidos ($r = 0,96$), cobre e nitrito ($r = 0,99$), condutividade elétrica e nitrato ($r = 0,66$), DBO e DQO ($r = 0,78$), oxigênio dissolvido e nitrito ($r = 0,85$) e cobre e nitrito ($r = 0,99$) (SANTOS *et al.*, 2018).

4.6 Geoestatística

Variáveis relacionadas às ciências da terra geralmente apresentam dependência espacial. Dessa forma, as técnicas clássicas de estatística não são capazes de representar adequadamente os resultados, sendo necessário incluir metodologias que ponderem a variação espacial entre as observações de um mesmo atributo, permitindo analisar a correlação entre pontos observados, em função da posição espacial das amostras. O uso de técnicas de geoprocessamento viabiliza a elaboração de mapas, que quando comparados, irão permitir a observação de dependência espacial entre resultados de variáveis de monitoramento, precipitação e a condição do uso e ocupação do solo da região em estudo (MANUEL *et al.*, 2017).

Almeida *et al.* (2018) obtiveram espacialização de chuvas máximas diárias no estado de Minas Gerais, por meio da geoestatística, nos mapas produzidos é possível observar os valores de chuvas para todo o estado.

A geoestatística foi aplicada na avaliação de atributos físicos e químicos no solo e foi possível observar que a técnica facilita a avaliação da variabilidade espacial e permite a análise de variáveis representativas do fenômeno em número reduzido de mapas (ALVES *et al.*, 2014). A análise de mapas com distribuição espacial de variáveis permite a associação entre fatores do uso e ocupação do solo, as fontes de poluição e os resultados dos monitoramentos (TRINDADE *et al.*, 2017).

Exemplos da aplicação destas técnicas são apresentados por Souza e Gastaldini (2014), que avaliaram o monitoramento físico-químico em quatro sub-bacias do rio Vacacaí-Mirim, submetidas a diferentes impactos antrópicos. Conforme os autores, a sub-bacia considerada com baixo grau de degradação apresentou menores valores de coliformes totais, *E. coli* e outros parâmetros avaliados.

Nas duas sub-bacias com predominância de atividades agrícolas os autores registraram maiores índices de turbidez, sólidos dissolvidos, totais e suspensos, decorrentes do constante revolvimento do solo e da maior susceptibilidade a erosão do mesmo (SOUZA; GASTALDINI, 2014). Também foram identificados nesta área metais como cobre ($0,0039\text{mg L}^{-1}$), níquel ($0,012\text{mg L}^{-1}$), chumbo ($0,011\text{mg L}^{-1}$) e zinco ($0,03\text{mg L}^{-1}$), relacionados a mesma atividade, e a presença de odor forte e cor escura em 87,5% das amostras coletadas, sendo estes ligados ao lançamento de efluentes e presença de atividades pecuárias.

A última região do estudo foi a sub-bacia considerada com características urbanas, nesta encontrou-se menor valor de oxigênio dissolvido, maiores quantidades de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), além de valores elevados de nitrogênio, fósforo, amônia, *E. coli* e condutividade elétrica, justificados pelo lançamento de efluentes não tratados e vastas áreas impermeabilizadas (SOUZA; GASTALDINI, 2014). Os autores ainda ressaltaram que a concentração dos impactos em pequenas áreas, tais como as que ocorre em agrupamento de maior número de habitantes, eleva significativamente a pressão sobre os recursos hídricos.

4.6.1 Semivariograma

Conforme Yamamoto e Landim (2013) e Mello e Oliveira (2016), o semivariograma é a principal função empregada na geoestatística e tem como papel determinar a dependência entre duas variáveis em função da distância e da direção das mesmas. Aplicado previamente ao método de interpolação por krigagem, o semivariograma permite análise quantitativa de um fenômeno regionalizado.

Segundo Manuel *et al.* (2017) e Silva (2018), o semivariograma representa a dependência espacial entre valores de uma determinada variável em função da distância entre elas.

As propriedades típicas do semivariograma, apresentadas na Figura 1, são: alcance (a), efeito pepita (C_0) e patamar ($C_0 + C_1$). Conforme Silva (2003), o efeito pepita é o valor da semivariância na distância zero e significa variação não conferida à dependência espacial; o patamar corresponde ao valor da semivariância, quando a mesma assume valor constante entre a dependência e independência entre as amostras, e o alcance refere-se à distância da origem até o ponto em que o patamar atinge valores constantes, sendo neste ponto o limite da dependência espacial entre as amostras.

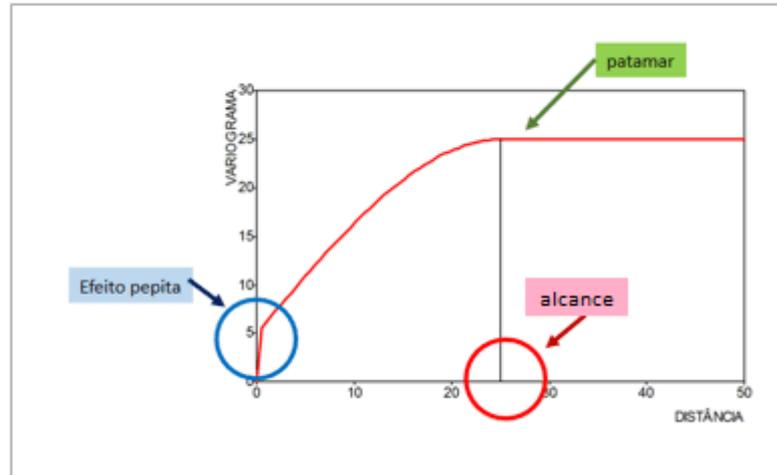


Figura 1 – Propriedades de um semivariograma típico com patamar (modificado)

Fonte: <https://geokrigagem.com.br/variogramas/>

Conforme Yamamoto e Landim (2013), a função semivariograma, também denominada semivariograma, mede a variação entre pontos de um mesmo atributo, separados por uma distância h . Portanto, pontos mais próximos apresentam menor variância.

O valor desta variância, normalmente, tende a se estabilizar em torno de uma variância máxima a partir de determinada distância, ou seja, deste ponto em diante mesmo que haja aumento deste espaço entre as variáveis não ocorrerá aumento de variância, este valor corresponde ao patamar ou soleira (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

4.6.2 Krigagem

A krigagem é um método de interpolação espacial usado para dados dispersos e pouco abundantes, que permite analisar a auto correlação espacial. Mello e Oliveira (2016) definem a krigagem como um método univariado de inferência espacial que usa a dependência no espaço, expressa no semivariograma entre amostras vizinhas, para estimar valores em qualquer posição da área de estudo, sem tendência e com variância mínima. Outro ponto de destaque é que o método é comumente empregado com uso de amostragem aleatória, gerando irregularidade entre as distâncias dos pontos, o que pode trazer menor exatidão global quando comparada à amostragem regular em grade. No entanto, a interpolação com uso de grades irregulares possui maior exatidão da predição (CUNHA *et al.*, 2013).

Yamamoto e Landim (2013) destacam que a krigagem se baseia na ideia de que, quanto maior a covariância entre uma amostra e o local que está sendo estimado, mais essa amostra deve contribuir com a estimativa, portanto, é o método mais significativo em áreas com maior cobertura de pontos de monitoramento, apresentando estimativas mais confiáveis.

O comportamento espacial do Cádmiio e Cobre, foi avaliado no rio Meuse, com aplicação da krigagem, e foi observado isotropia do fenômeno, visto que os autores concluíram que o padrão de distribuição espacial de ambas as variáveis na região é idêntico (MANUEL *et al.*, 2017).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área de estudo

O trabalho foi realizado com dados coletados na bacia hidrográfica do rio Pará, localizada a sudoeste do estado de Minas Gerais. Esta bacia é composta por 35 municípios, dos quais 51% apresentam todo o seu território inserido na região da bacia. A unidade de planejamento totaliza uma área de aproximadamente 12.300 km² e o leito principal tem cerca de 365 km de extensão. Na Figura 2 é apresentado o mapa da bacia do rio Pará com os municípios que a compõem.

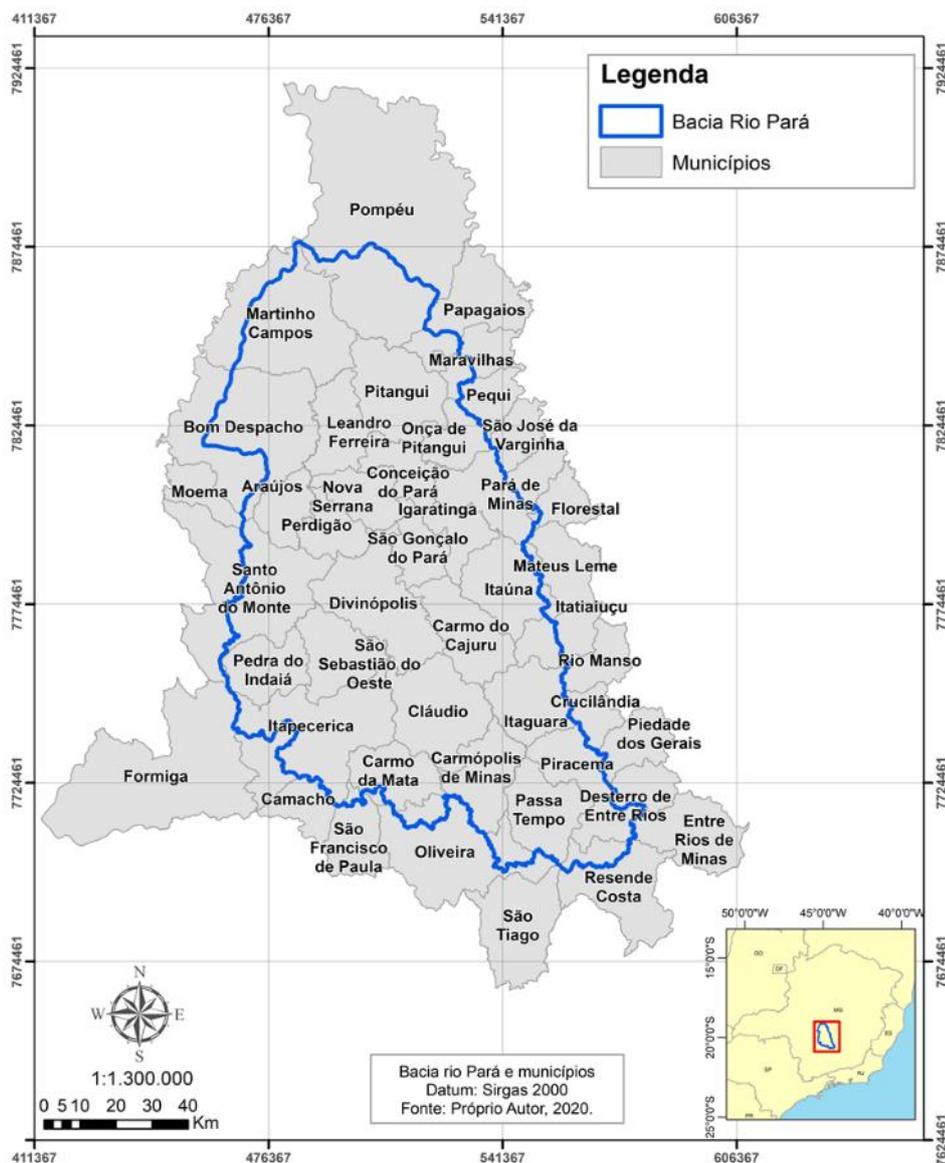


Figura 2 – Municípios que compõem a bacia hidrográfica do rio Pará no sudoeste de Minas Gerais

Fonte: Próprio Autor, 2020.

De acordo com a classificação de Köppen, na região em estudo são predominantes o clima subtropical úmido (Cwa e Cwb) e temperado chuvoso (Aw), sendo o primeiro predominante na porção sul e central e o segundo na porção norte, respectivamente. A temperatura mínima na bacia varia de 14,5 a 17,0 °C e a máxima de 27,5 a 30,0 °C. Já a precipitação média anual está entre 1050 e 1450 mm, sendo esta variabilidade devido a concentração das chuvas na porção sul (maior altitude), enquanto na norte tem-se a região de menor precipitação (TECNOLOGIA EM SISTEMAS ESPACIAIS, 2006).

A vegetação nativa é caracterizada pela presença de Campo, Campo Cerrado, Campo Rupestre, Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual, sendo os dois últimos os mais representativos. No que se refere aos sistemas de aquíferos, o Gnáissico-Granítico ocupa a maior porção do território com 81%, enquanto os sistemas Pelítico, Quartizítico e Pelítico-Carbonático representam respectivamente 11, 5 e 3% da área da bacia do rio Pará (TECNOLOGIA EM SISTEMAS ESPACIAIS, 2006).

A bacia hidrográfica do rio Pará conta com 28 pontos de monitoramento de qualidade estabelecidos e mantidos pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), e 15 estações meteorológicas, com dados para o período de estudo, disponíveis no Portal HidroWeb, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

5.2 Técnica de pesquisa

No estudo, utilizou-se o método indutivo, no qual os dados foram analisados para que houvesse verificação de padrões entre as variáveis. Conforme Gray (2012), a partir das análises podem ser criadas teorias, generalizações ou relações, porém, sem fazer inferências sobre o tema pesquisado e sem preocupação em confirmar ou refutar uma teoria.

A técnica de pesquisa baseou-se no estudo descritivo, pesquisa correlacional e análise quali-quantitativa dos dados levantados. A pesquisa descritiva, juntamente com a análise qualitativa, foi empregada na composição do uso e ocupação do solo, na qual a exposição destas condições permitiu a observação das características atuais e dos possíveis impactos gerados por cada categoria de uso. Conforme Fernandes e Gomes (2003), esta modalidade de pesquisa busca descrever, analisar e verificar relações entre variáveis, demonstrando os resultados obtidos por meio da avaliação da intensidade, motivo e tipo de fenômeno observado.

Referente ao estudo correlacional, este teve foco na observação das relações causais entre o uso e a ocupação do solo, a precipitação e os resultados de monitoramentos físicos químicos. A técnica permite estabelecer nível de associação entre variáveis, sem que qualquer nexo de causalidade seja identificado.

5.3 Obtenção das séries históricas

Para o desenvolvimento desse trabalho, foram pesquisados dados de qualidade, de precipitação, e de uso e ocupação do solo, conforme apresentado a seguir.

5.3.1 Dados de qualidade da água

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas possui uma rede de monitoramento em diversas porções do estado de Minas Gerais, no qual são aferidos periodicamente os resultados de variáveis físicas, químicas e biológicas. A bacia do rio Pará está incluída na referida rede e para desenvolvimento deste trabalho foi realizado levantamento de dados entre 1997 e 2018, devido a disponibilidade de dados de monitoramento.

A partir da avaliação dos dados, verificou-se que, na bacia em questão, existem 28 pontos de amostragem, os quais estão nomeados e distribuídos conforme Quadro 4 e Figura 3, respectivamente.

Quadro 4 – Pontos de amostragem de qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais

Ponto	Município	Código	Estação	Latitude*	Longitude
PA001	Passa Tempo	Classe 1	1	559268,41	7718450,81
PA002	Carmópolis de Minas	Classe 2	2	539750,42	7731249,53
PA003	Carmópolis de Minas Cláudio Itaguara	Classe 1	3	539163,80	7743489,54
PA004	Divinópolis São Sebastião Do Oeste	Classe 1	4	508756,24	7764492,92
PA005	Carmo Do Cajuru Divinópolis	Classe 1	5	516573,72	7776653,30
PA007	Divinópolis	Classe 3	6	512601,13	7775112,00
PA009	Itaúna	Classe 2	7	541083,53	7781786,82
PA010	Onça De Pitangui Pará De Minas	Classe 3	8	530660,75	7811848,23
PA011	Conceição Do Pará Pitangui	Classe 2	9	514925,79	7819069,61
PA013	Conceição Do Pará Pitangui	Classe 2	10	507357,23	7822322,33
PA015	Leandro Ferreira Martinho Campos	Classe 1	11	497677,24	7840555,03
PA017	Martinho Campos	Classe 1	12	484579,39	7866239,13
PA019	Martinho Campos Pompéu	Classe 2	13	487139,50	7870766,42
PA020	Nova Serrana	Classe 2	14	507211,37	7870117,76
PA021	Bom Despacho	Classe 1	15	468572,14	7834049,57
PA022	Santo Antônio Do Monte	Classe 1	16	478808,07	7783251,69
PA023	Cláudio	Classe 1	17	533576,69	7747113,52
PA025	Passa Tempo	Classe 1	18	523187,89	7738727,45
PA026	Cláudio	Classe 3	19	555116,50	7731308,95
PA028	Cláudio	Classe 3	20	521509,89	7768498,16
PA029	Piracema	Classe 1	21	552422,84	7732196,61
PA031	Carmo Do Cajuru Divinópolis	Classe 1	22	503234,70	7745393,90
PA032	Piracema	Classe 1	23	511250,10	7738092,77
PA034	Itapecerica	Classe 2	24	513586,97	7792029,98
PA036	Cláudio Itapecerica	Classe 2	25	550978,95	7761946,35
PA040	São Gonçalo Do Pará	Classe 2	26	484543,41	7757209,85
PA042	Itatiaiuçu	Classe 1	27	516363,83	7836870,80
PA044	Pedra Do Indaiá	Classe 1	28	497443,50	7866463,12

Fonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2019. * Datum Sirgas 2000.

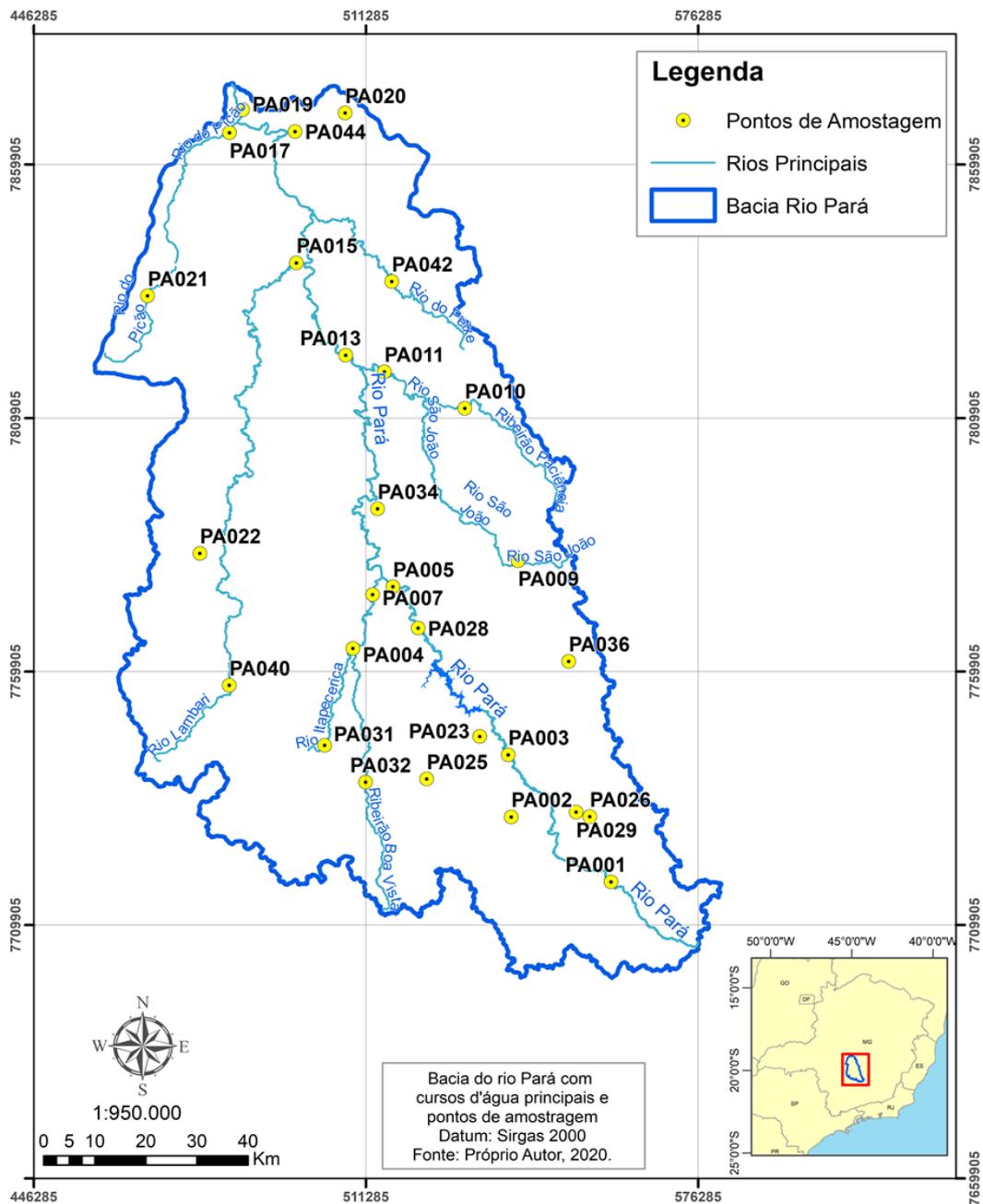


Figura 3 – Pontos de amostragem de qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais

Fonte: Próprio Autor, 2020.

5.3.2 Dados de uso e ocupação do solo

O levantamento de dados de uso e ocupação do solo foi realizado por meio do banco de dados do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil, disponível na plataforma *Google Earth Engine*¹.

¹ Site plataforma Google Engine <https://earthengine.google.com/>.

A partir de uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos do solo, sensoriamento remoto, Sistema de Informação Geográfica (SIG) e ciência da computação, são gerados mapas de uso e ocupação do solo para todo o País, com frequência anual.

A plataforma MapBioma² foi utilizada para a obtenção dos mapas da bacia do rio Pará para os anos de 1997, 2002, 2007, 2012 e 2017. Este período foi escolhido para compatibilizar com os resultados disponíveis na qualidade da água, bem como representar as variações dos usos com análise a cada 5 anos. As imagens foram obtidas no formato *raster*.

5.3.3 Série histórica da precipitação

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico disponibiliza, por meio do portal HidroWeb, dados de monitoramento de precipitação de diversas regiões do País. A partir do mesmo, foi realizada a avaliação das estações mapeadas na bacia do rio Pará e seu entorno.

Foram identificadas 48 estações meteorológicas, as quais tiveram suas séries de dados avaliadas no período de interesse deste estudo, entre 1997 e 2018. Ao término deste processo, somente 15 estações foram consideradas aptas, com séries completas para uso neste período e que não demandaram tratamento de falhas. As demais não tinham dados o que impediu o uso. O Quadro 5 apresenta as estações selecionadas e a Figura 4 a distribuição espacial das mesmas.

Quadro 5 – Estações meteorológicas na bacia hidrográfica do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais

Estação	Nome da Estação	Código	Município	Latitude*	Longitude
EP01	Fazenda Campo Grande	2044009	Passa Tempo	-20,625278	-44,433333
EP02	Carmo Da Mata (Copasa)	2044042	Carmo da Mata	-20,562500	-44,867500
EP03	Lamounier	2045005	Itapecerica	-20,472222	-45,036111
EP04	Fazenda Benedito Chaves	2044016	Itatiaiuçu	-20,169167	-44,515000
EP05	Itaúna – Montante	2044002	Itaúna	-20,071389	-44,570278
EP06	Carmo Do Cajuru	2044003	Carmo do Cajuru	-20,192222	-44,793611
EP07	Divinópolis	2044006	Divinópolis	-20,136944	-44,891944
EP08	Santo Antônio Do Monte	2045013	Santo Antônio do Monte	-20,084444	-45,296667
EP09	Estação Álvaro Da Silveira	1945004	Bom Despacho	-19,751667	-45,116944
EP10	Velho da Taipa	1944021	Pitangui	-19,696111	-44,929444
EP11	Jaguaruna – Jusante	1944011	Onça de Pitangui	-19,728056	-44,806667
EP12	Martinho Campos	1945039	Martinho Campos	-19,332222	-45,228056
EP13	Papagaios	1944049	Papagaios	-19,428333	-44,719722
EP14	São Tiago	2044050	São Tiago	-20,897222	-44,500278
EP15	Entre Rios de Minas	2044007	Entre Rios de Minas	-20,661111	-44,072222

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019. * Datum Sirgas 2000.

² Site plataforma MapBiomas <https://mapbiomas.org/>.

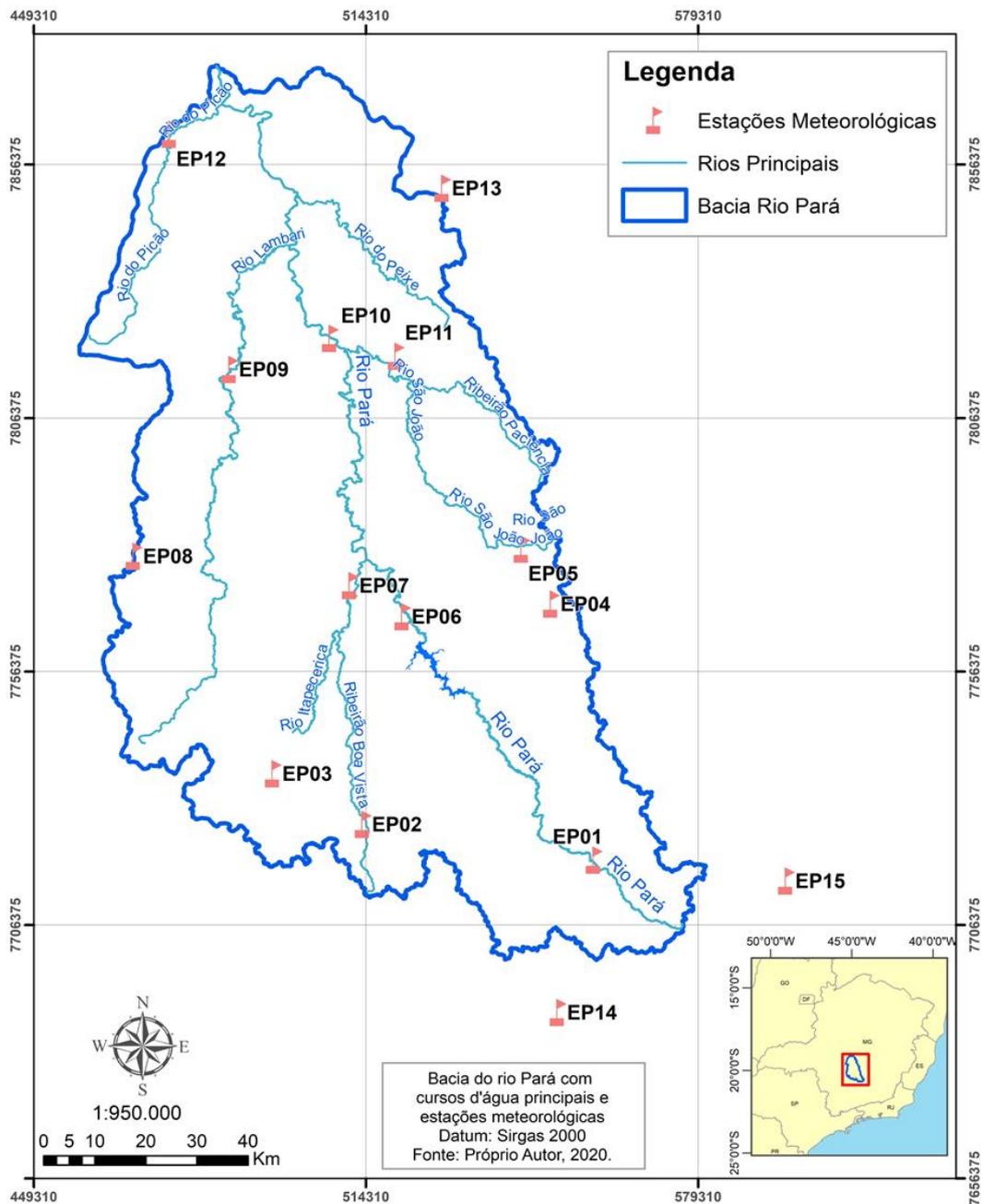


Figura 4 – Estações Meteorológicas na bacia hidrográfica do rio Pará selecionadas para este estudo, localizadas no sudoeste de Minas Gerais
 Fonte: Próprio Autor, 2020.

5.4 Métodos

Para desenvolvimento deste trabalho, foi realizado inicialmente análise estatística descritiva e exclusão de *outliers* dos dados brutos, conforme detalhado a seguir. Sequencialmente, procedeu-se à análise da interdependência das variáveis de qualidade da água

por meio de correlação de Pearson. O geoprocessamento foi usado com o emprego da geoestatística para estudar a correlação espacial das variáveis de monitoramento hídrico.

5.4.1 Análise dos dados

A análise dos dados brutos foi realizada para as variáveis de qualidade da água, precipitação, uso e ocupação do solo. A seguir é descrito o detalhamento de cada uma destas etapas.

Toda a análise de dados foi realizada com uso de tabela dinâmica do *software* Excel.

5.4.1.1 Qualidade da água

Os dados brutos de qualidade foram organizados por parâmetro e ponto de amostragem. Os valores censurados, ou seja, menores que o limite de detecção dos métodos analíticos, foram substituídos pelo próprio limite de detecção, de forma análoga à metodologia empregada por Oliveira *et al.* (2017).

Outlier(s) é valor (es) atípico (s) que apresenta um grande afastamento dos demais dados da série. Para remoção dos *outliers* da série de dados de monitoramento hídrico foi realizado o cálculo dos valores de percentil 5 e 95% dos dados, considerados limites inferior e superior, respectivamente. Todos os valores identificados como *outliers* foram previamente excluídos dos dados brutos, gerando um conjunto de dados remanescentes.

Em seguida os dados remanescentes foram separados em período chuvoso (outubro a março) e seco (abril a setembro), e calculado a média por variável para cada um dos períodos. Cabe ressaltar que as variáveis de monitoramento hídrico tinham diferentes frequências de monitoramento, variando entre trimestral e semestral.

Como critério para composição da média por variável foi garantido que a mesma deveria possuir no mínimo 12 dados válidos por período seco e chuvoso, por ponto de amostragem. O detalhe desta avaliação e das estações excluídas é apresentado no Apêndice B.

5.4.1.2 Uso e ocupação do solo

Os arquivos *raster* do estado de Minas Gerais foram exportados do *site* MapBiomas para os anos de 1997, 2002, 2007, 2012 e 2017. Sequencialmente, realizou-se o processamento e recorte da área da bacia, transformando os arquivos *shape*.

No Quadro 6 é possível verificar a legenda de mapeamento do solo apresentado pelo MapBiomas e a nova legenda consolidada que foi empregada neste trabalho.

Quadro 6 – Categorias de uso e ocupação do solo

Legenda MapBiomas	Nº	Legenda Consolidada
1.Floresta	1	
1.1. Floresta Natural	1	
1.1.1. Formação Florestal	1	
1.1.2. Formação Savânica	1	
1.1.3. Mangue	1	
1.2. Floresta Plantada	2	
2. Formação Natural não Florestal	1	
2.1. Área Úmida Natural não Florestal	1	
2.2. Formação Campestre	1	
2.3. Apicum	1	
2.4. Outra Formação Natural não Florestal	1	1. Vegetação nativa (VN)
3. Agropecuária	3	2. Floresta plantada (FP)
3.1. Pastagem	3	3. Agropecuária (AG)
3.2. Agricultura	3	4. Área não vegetada (AV)
3.2.1. Cultura Anual e Perene	3	5. Infraestrutura Urbana (IU)
3.2.2. Cultura Semi-Perene	3	6. Mineração (MI)
3.3. Mosaico de Agricultura e Pastagem	3	7. Corpos de água (CA)
4. Área não vegetada	4	8. Não observado (NO)
4.1. Praia e Duna	4	
4.2. Infraestrutura Urbana	5	
4.3. Afloramento Rochoso	4	
4.4. Mineração	6	
4.5. Outra Área não vegetada	4	
5. Corpos D'água	7	
5.1 Rio, Lago e Oceano	7	
5.2 Aquicultura	7	
6. Não observado	8	

Os arquivos *shape* foram agrupados nos usos propostos e criadas tabelas de atributos para cada ano, por meio do *software* ArcGis. Foram elaborados mapas de uso e ocupação do solo a partir do uso da legenda consolidada e determinadas as áreas respectivas de cada uso.

Os resultados do uso predominante na área de contribuição foram correlacionados com os resultados da krigagem para as variáveis estudadas na bacia.

5.4.1.3 Precipitação Média Anual

Os dados de precipitação obtidos diariamente nas estações foram agrupados por meses. Sequencialmente os resultados foram avaliados e excluídos os anos que continham meses com falhas. Não foi executado neste trabalho nenhum procedimento para interpolar dados para compor dados faltantes.

Cada estação teve suas informações remanescentes agrupadas em período seco e chuvoso, de forma análoga à qualidade da água. Em seguida, foram geradas as médias anuais por período.

5.4.2 Correlação de Pearson

O coeficiente de Pearson foi aplicado nas variáveis de qualidade da água, precipitação e uso e ocupação de solo, com o objetivo de avaliar a existência de correlação entre elas. Aquelas que apresentaram interdependência forte (entre 0,61 e 0,9), muito forte (entre 0,91 e 99) ou plena (igual a 1), conforme metodologia Feil, Strasburg e Spilki (2017), foram submetidas ao ajuste de modelos de semivariograma e à interpolação por krigagem ordinária, com análise de tendência de primeira ordem.

5.4.3 Geoestatística

A geoestatística é utilizada para entendimento das variáveis regionalizadas, ou seja, aquelas influenciadas por condicionante espacial, por meio do uso da matemática, da observação da gênese e das leis naturais que regem fenômenos tidos como regionais (LADIM, 2006).

Neste trabalho realizou-se a análise geoestatística por meio do emprego de semivariograma e da krigagem para composição de mapas relacionando dados de precipitação, qualidade da água e o uso e ocupação do solo na bacia do rio Pará.

5.4.3.1 Semivariograma

A geoestatística foi empregada para verificação da dependência espacial das variáveis e interpolação dos dados. Foram construídos semivariogramas partindo das pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca e do cálculo da semivariância estimada pela Equação 1.

$$\bar{y}(h) = \frac{\sum_{h=i}^{N(h)} [z(x) - z(x+h)]^2}{2N(h)}$$

Equação (1)

Onde:

$\bar{y}(h)$	Estimativa da semivariância entre os pares de pontos separados pela distância h
h	Distância entre dois pontos
$z(x)$	Valor da variável de interesse no ponto x
$z(x+h)$	Relação de Z no ponto $x+h$
$N(h)$	Número de pares de pontos separados pela distância h

Para as variáveis em estudo, foram ajustados os modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano, conforme metodologia utilizada por Burrough; McDonnelle (1998), Freitas (2013) e Silva (2018) e apresentado nas equações 2, 3 e 4.

Modelo Esférico

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\left(1,5 \frac{h}{a}\right) - 0,5 \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C_1 & \text{para } h \geq a \end{cases}$$

Equação (2)

Modelo Exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right]$$

Equação (3)

Modelo Gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right)^2 \right]$$

Equação (4)

Onde:

C_0	Efeito pepita
C_1	Variabilidade espacial
a	Alcance
h	Distância entre os pares de pontos

A escolha do melhor modelo para cada atributo foi realizada conforme metodologia aplicada por Silva (2018), que utilizou como critérios da avaliação o erro médio mais próximo de 0 (Equação 5) e a raiz quadrada do erro médio padronizado mais próxima de 1 (Equação 6).

Erro médio (ME)

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)]$$

Equação (5)

Raiz Quadrada do Erro Médio Padronizado (RMSSE)

$$RMSSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=a}^N \left[\frac{\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)}{\sigma^2(x_i)} \right]^2}$$

Equação (6)

Onde:

N	Número de observações
$\hat{Z}(x_i)$	Krigagem estimada
$Z(x_i)$	Valor observado no local x_i e σ^2 é a variância da krigagem

O Grau de Dependência Espacial (GDE), indicador da correlação espacial da variável em análise, foi calculado para os semivariogramas, conforme equação 7. Os semivariogramas com efeito pepita (C_0) de até 25%, entre 25 e 75% e acima de 75% do patamar foram considerados com dependência espacial forte, moderada e fraca, respectivamente (CAMBARDELLA, *et al*, 1994).

Grau de Dependência Espacial (GDE)

$$GDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100$$

Equação (7)

Onde:

C_0	Efeito pepita
$C_0 + C_1$	Patamar

Após o ajuste dos semivariogramas, foi realizada a interpolação por krigagem ordinária.

5.4.3.2 Krigagem

A partir do ajuste do semivariograma foi possível estimar valores para locais não amostrados por meio do interpolador geoestatístico da krigagem ordinária, apresentado na Equação 8.

Equação de interpolados por meio de krigagem ordinária

$$\sum_{i=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) - \alpha = \gamma(x_i - x_0)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

Equação (8)

Onde:

$\gamma(x_i, x_j)$ Semivariância entre os pontos x_i e x_j
 $\gamma(x_i, x_0)$ Semivariância entre os pontos x_i e x_0
 α Multiplicador de Lagrange

5.4.4 *Softwares* usados

A análise de dados foi realizada com o emprego da tabela dinâmica do Excel e, para aplicação do coeficiente de Pearson, foi utilizado o *software* XLSTAT.

O ajuste dos semivariogramas e a elaboração dos mapas por krigagem foram realizados utilizando-se *software* ArcGis, versão 10.3.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Precipitação e Qualidade da água

Cada estação de precipitação teve as informações agrupadas em período seco e chuvoso. Em seguida, foram geradas as médias anuais por período e estação climatológica, considerando no mínimo quinze anos de dados válidos para composição de cada média, conforme resultados apresentados no Apêndice A. A bacia hidrográfica do rio Pará possui precipitação média no período seco de 161,27mm e no chuvoso de 1.155,96mm, considerando os anos de 1997 a 2018.

Os dados de qualidade da água remanescentes do tratamento estatístico foram divididos em período seco e chuvoso, as médias de cada variável é apresentada no Apêndice B, considerando os anos de 1997 a 2018.

6.2 Coeficiente de correlação de Pearson

Os resultados das variáveis válidas submetidas à correlação de Pearson, nos períodos seco e chuvoso, separadamente, estão descritos na Tabela 1 e na Tabela 2.

No período seco, foi observado correlação positiva muito forte (acima de 91%), conforme metodologia de Feil, Strasburg e Spilki (2017), entre demanda bioquímica de Oxigênio (DBO) e sólidos dissolvidos totais (SDT), alumínio dissolvido, cobre dissolvido e ferro dissolvido, confirmando o comportamento similar entre os metais, bem como a conexão dos metais com o aumento de SDT, e a conseqüente influencia no aumento da entre DBO.

Houve correlação negativa muito forte entre oxigênio dissolvido (OD) e nitrogênio (N) e fósforo (P), visto que valores baixos de OD estão associados a teores elevados de N e F. Para o período chuvoso, foi verificada correlação positiva muito forte entre DBO e coliformes e entre N e fósforo (P).

Tabela 1 – Coeficiente de Pearson durante o período seco na bacia do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais (1997-2018)

Variáveis	pH	Temp.	DBO	OD	Turbidez	SDT	N	P	CT	Al	As	Ba	Cd	Pb	Cu	Cr	Fe	Mn	Hg	Ni	Zn
pH		0,218	-0,052	0,033	-0,082	0,147	0,085	0,098	-0,031	-0,076	0,073	0,008	0,150	-0,152	-0,062	0,159	-0,058	-0,050	0,144	0,367	0,285
Temperatura	0,218		0,029	0,135	-0,158	0,083	-0,142	-0,108	-0,037	0,252	-0,027	-0,028	-0,022	0,017	0,176	-0,171	-0,044	-0,345	-0,036	0,266	0,165
DBO	-0,052	0,029		-0,860	0,826	0,934	0,847	0,820	0,868	0,919	0,327	0,215	-0,098	0,876	0,931	0,011	0,942	0,522	-0,099	0,592	0,788
OD	0,033	0,135	-0,860		-0,724	-0,847	-0,948	-0,912	-0,778	-0,685	-0,282	-0,429	-0,085	-0,616	-0,695	0,108	-0,887	-0,800	0,004	-0,554	-0,682
Turbidez	-0,082	-0,158	0,826	-0,724		0,776	0,737	0,662	0,669	0,755	0,269	0,334	-0,039	0,858	0,737	-0,058	0,780	0,494	-0,081	0,518	0,690
SDT	0,147	0,083	0,934	-0,847	0,776		0,824	0,775	0,740	0,900	0,395	0,145	-0,079	0,816	0,914	0,028	0,922	0,568	-0,069	0,739	0,801
Nitrogênio (N)	0,085	-0,142	0,847	-0,948	0,737	0,824		0,963	0,795	0,626	0,423	0,319	0,025	0,592	0,666	-0,062	0,856	0,774	-0,029	0,567	0,706
Fósforo (P)	0,098	-0,108	0,820	-0,912	0,662	0,775	0,963		0,872	0,572	0,310	0,371	0,112	0,535	0,653	-0,116	0,778	0,770	0,007	0,549	0,750
Coliformes (CT)	-0,031	-0,037	0,868	-0,778	0,669	0,740	0,795	0,872		0,683	0,151	0,349	0,041	0,661	0,769	-0,086	0,738	0,554	-0,044	0,469	0,800
Alumínio (Al)	-0,076	0,252	0,919	-0,685	0,755	0,900	0,626	0,572	0,683		0,279	0,109	-0,152	0,911	0,959	0,021	0,865	0,308	-0,125	0,626	0,717
Arsênio (As)	0,073	-0,027	0,327	-0,282	0,269	0,395	0,423	0,310	0,151	0,279		-0,537	-0,550	0,193	0,316	0,281	0,395	0,269	-0,236	0,281	0,112
Bário total (Ba)	0,008	-0,028	0,215	-0,429	0,334	0,145	0,319	0,371	0,349	0,109	-0,537		0,613	0,148	0,053	-0,328	0,197	0,368	0,243	0,140	0,367
Cadmio total (Cd)	0,150	-0,022	-0,098	-0,085	-0,039	-0,079	0,025	0,112	0,041	-0,152	-0,550	0,613		-0,106	-0,148	-0,345	-0,135	0,148	0,822	0,042	0,127
Chumbo total (Pb)	-0,152	0,017	0,876	-0,616	0,858	0,816	0,592	0,535	0,661	0,911	0,193	0,148	-0,106		0,903	0,016	0,816	0,323	-0,100	0,538	0,692
Cobre dissolvido (Cu)	-0,062	0,176	0,931	-0,695	0,737	0,914	0,666	0,653	0,769	0,959	0,316	0,053	-0,148	0,903		0,046	0,851	0,416	-0,112	0,679	0,791
Cromo total (Cr)	0,159	-0,171	0,011	0,108	-0,058	0,028	-0,062	-0,116	-0,086	0,021	0,281	-0,328	-0,345	0,016	0,046		0,069	-0,052	-0,046	-0,004	0,064
Ferro dissolvido (Fe)	-0,058	-0,044	0,942	-0,887	0,780	0,922	0,856	0,778	0,738	0,865	0,395	0,197	-0,135	0,816	0,851	0,069		0,577	-0,091	0,544	0,656
Manganês total (Mn)	-0,050	-0,345	0,522	-0,800	0,494	0,568	0,774	0,770	0,554	0,308	0,269	0,368	0,148	0,323	0,416	-0,052	0,577		0,069	0,518	0,554
Mercúrio total (Hg)	0,144	-0,036	-0,099	0,004	-0,081	-0,069	-0,029	0,007	-0,044	-0,125	-0,236	0,243	0,822	-0,100	-0,112	-0,046	-0,091	0,069		0,024	0,041
Níquel total (Ni)	0,367	0,266	0,592	-0,554	0,518	0,739	0,567	0,549	0,469	0,626	0,281	0,140	0,042	0,538	0,679	-0,004	0,544	0,518	0,024		0,817
Zinco total (Zn)	0,285	0,165	0,788	-0,682	0,690	0,801	0,706	0,750	0,800	0,717	0,112	0,367	0,127	0,692	0,791	0,064	0,656	0,554	0,041	0,817	

Legenda: **Negrito** - correlação negativa Forte Muito Forte

Fonte: Próprio autor, 2020.

Tabela 2 – Coeficiente de Pearson durante o período chuvoso na bacia do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais (1997-2018)

Variáveis	pH	Temp.	DBO	OD	Turbidez	SDT	N	P	CT	Al	As	Ba	Cd	Pb	Cu	Cr	Fe	Mn	Hg	Ni	Zn
pH		0,347	0,010	0,043	0,305	0,202	0,130	0,190	0,045	0,126	0,417	-0,040	-0,056	0,122	0,429	-0,031	-0,091	-0,247	0,019	0,318	0,392
Temperatura	0,347		-0,019	0,087	-0,363	0,085	-0,112	-0,047	-0,021	0,233	-0,035	-0,014	-0,096	-0,268	0,125	0,111	0,050	-0,439	-0,116	-0,105	0,023
DBO	0,010	-0,019		-0,864	0,241	0,885	0,897	0,839	0,939	-0,006	-0,204	0,148	-0,077	0,084	0,126	-0,031	0,719	0,209	-0,041	0,119	0,445
OD	0,043	0,087	-0,864		-0,234	-0,854	-0,879	-0,778	-0,758	0,130	0,172	-0,348	0,130	-0,056	-0,140	0,128	-0,762	-0,515	-0,033	-0,178	-0,453
Turbidez	0,305	-0,363	0,241	-0,234		0,227	0,507	0,513	0,256	0,081	0,070	0,232	0,279	0,795	0,611	-0,227	0,001	0,307	0,116	0,749	0,483
SDT	0,202	0,085	0,885	-0,854	0,227		0,816	0,717	0,772	-0,046	-0,085	0,055	-0,117	0,042	0,177	-0,077	0,817	0,184	-0,030	0,156	0,409
Nitrogênio (N)	0,130	-0,112	0,897	-0,879	0,507	0,816		0,922	0,827	-0,047	-0,120	0,248	-0,080	0,297	0,373	-0,053	0,599	0,368	0,024	0,386	0,554
Fósforo (P)	0,190	-0,047	0,839	-0,778	0,513	0,717	0,922		0,867	-0,033	-0,129	0,350	-0,086	0,380	0,507	-0,140	0,426	0,379	0,067	0,534	0,728
Coliformes (CT)	0,045	-0,021	0,939	-0,758	0,256	0,772	0,827	0,867		-0,013	-0,270	0,215	-0,085	0,120	0,171	-0,070	0,568	0,199	-0,020	0,164	0,541
Alumínio (Al)	0,126	0,233	-0,006	0,130	0,081	-0,046	-0,047	-0,033	-0,013		-0,237	0,301	0,293	0,164	0,093	-0,159	-0,070	-0,253	0,020	0,047	0,092
Arsênio (As)	0,417	-0,035	-0,204	0,172	0,070	-0,085	-0,120	-0,129	-0,270	-0,237		-0,339	-0,191	-0,116	0,178	0,117	-0,024	-0,132	-0,080	0,141	-0,125
Bário total (Ba)	-0,040	-0,014	0,148	-0,348	0,232	0,055	0,248	0,350	0,215	0,301	-0,339		0,149	0,392	0,135	-0,482	-0,025	0,400	0,185	0,256	0,539
Cadmio total (Cd)	-0,056	-0,096	-0,077	0,130	0,279	-0,117	-0,080	-0,086	-0,085	0,293	-0,191	0,149		0,425	-0,051	-0,062	-0,087	-0,024	0,000	0,155	-0,001
Chumbo total (Pb)	0,122	-0,268	0,084	-0,056	0,795	0,042	0,297	0,380	0,120	0,164	-0,116	0,392	0,425		0,557	-0,224	-0,154	0,256	0,121	0,769	0,568
Cobre dissolvido (Cu)	0,429	0,125	0,126	-0,140	0,611	0,177	0,373	0,507	0,171	0,093	0,178	0,135	-0,051	0,557		-0,082	-0,066	0,301	0,114	0,885	0,557
Cromo total (Cr)	-0,031	0,111	-0,031	0,128	-0,227	-0,077	-0,053	-0,140	-0,070	-0,159	0,117	-0,482	-0,062	-0,224	-0,082		0,010	-0,170	-0,138	-0,161	-0,303
Ferro dissolvido (Fe)	-0,091	0,050	0,719	-0,762	0,001	0,817	0,599	0,426	0,568	-0,070	-0,024	-0,025	-0,087	-0,154	-0,066	0,010		0,326	-0,076	-0,068	0,039
Manganês total (Mn)	-0,247	-0,439	0,209	-0,515	0,307	0,184	0,368	0,379	0,199	-0,253	-0,132	0,400	-0,024	0,256	0,301	-0,170	0,326		0,185	0,442	0,318
Mercurio total (Hg)	0,019	-0,116	-0,041	-0,033	0,116	-0,030	0,024	0,067	-0,020	0,020	-0,080	0,185	0,000	0,121	0,114	-0,138	-0,076	0,185		0,155	0,130
Níquel total (Ni)	0,318	-0,105	0,119	-0,178	0,749	0,156	0,386	0,534	0,164	0,047	0,141	0,256	0,155	0,769	0,885	-0,161	-0,068	0,442	0,155		0,665
Zinco total (Zn)	0,392	0,023	0,445	-0,453	0,483	0,409	0,554	0,728	0,541	0,092	-0,125	0,539	-0,001	0,568	0,557	-0,303	0,039	0,318	0,130	0,665	

Legenda: **Negrito** - correlação negativa Forte Muito Forte

Fonte: Próprio autor, 2020.

A correlação forte (entre 0,61 e 0,9) no período seco foi verificada entre as seguintes variáveis:

- Correlação negativa entre DBO e turbidez e positiva entre DBO e N, P, coliformes, chumbo total e zinco total;
- OD apresentou correlação negativa em relação à DBO, turbidez, SDT, coliformes termotolerantes, alumínio dissolvido, cobre dissolvido, chumbo total, ferro dissolvido, manganês total e zinco total;
- Correlação positiva da turbidez com DBO, SDT, N, P, coliformes termotolerantes, alumínio dissolvido, chumbo total, cobre dissolvido, ferro dissolvido e zinco total e correlação negativa com o OD;
- SDT apresentou forte correlação positiva com à DBO, turbidez, nitrogênio, fósforo, coliformes termotolerantes, alumínio dissolvido, chumbo total, níquel total e zinco total;
- Nitrogênio apresentou correlação positiva com à DBO, turbidez, SDT, coliformes termotolerantes, alumínio dissolvido, cobre dissolvido, ferro dissolvido, manganês total e zinco total.
- O P apresentou a mesma correlação para as mesmas variáveis apresentados para o nitrogênio, exceto alumínio dissolvido;
- Coliformes termotolerantes possui correlação positiva com a DBO, turbidez, SDT, N, P, alumínio dissolvido, chumbo total, cobre dissolvido, ferro dissolvido e zinco total;
- Correlação positiva entre alumínio dissolvido em relação à turbidez, SDT, nitrogênio, coliformes termotolerantes, ferro dissolvido, níquel total e zinco total;
- Correlação positiva entre chumbo total em relação à DBO, turbidez, SDT, coliformes termotolerantes, ferro dissolvido e zinco total;
- Cobre dissolvido apresentou correlação positiva com turbidez, nitrogênio, fósforo, coliformes termotolerantes, ferro dissolvido, níquel total e zinco total. A mesma correlação foi verificada entre manganês total em relação a nitrogênio e fósforo;
- Correlação positiva entre níquel total em relação a SDT, alumínio dissolvido, cobre dissolvido e zinco total.

A correlação forte (entre 0,61 e 0,9) conforme metodologia de Feil, Strasburg e Spilki (2017), no período chuvoso, foi verificada nas seguintes variáveis:

- Correlação negativa entre OD em relação à DBO, SDT, nitrogênio, fósforo, coliformes termotolerantes e ferro dissolvido;

- DBO e coliformes termotolerantes apresentaram correlação positiva com relação à SDT, nitrogênio e fósforo, sendo que a DBO ainda apresentou correlação positiva com o ferro dissolvido;
- A turbidez apresentou correlação positiva com chumbo total, cobre dissolvido e níquel total;
- SDT apresentou correlação positiva com DBO, nitrogênio, fósforo, coliformes termotolerantes e ferro dissolvido;
- Nitrogênio e fósforo apresentaram correlação positiva com DBO, SDT e coliformes termotolerantes, sendo que o nitrogênio também apresentou correlação positiva com o zinco total;
- Níquel total apresentou correlação positiva com a turbidez, chumbo total, cobre dissolvido e zinco total.

A partir da aplicação do coeficiente de correlação de Pearson, verificou-se que a bacia do rio Pará apresentou maior número de correlações muito forte e forte no período seco, correspondente a 5,7 e 28,6% enquanto no período chuvoso, as correlações forte e muito forte juntas, somam apenas 12%. Esta situação evidencia a influência da precipitação na relação com outros atributos de qualidade da água, que pode ser relacionada à diluição de certas variáveis e a concentração de outras, conforme será detalhado nos mapas apresentados sequencialmente (Figura 5).

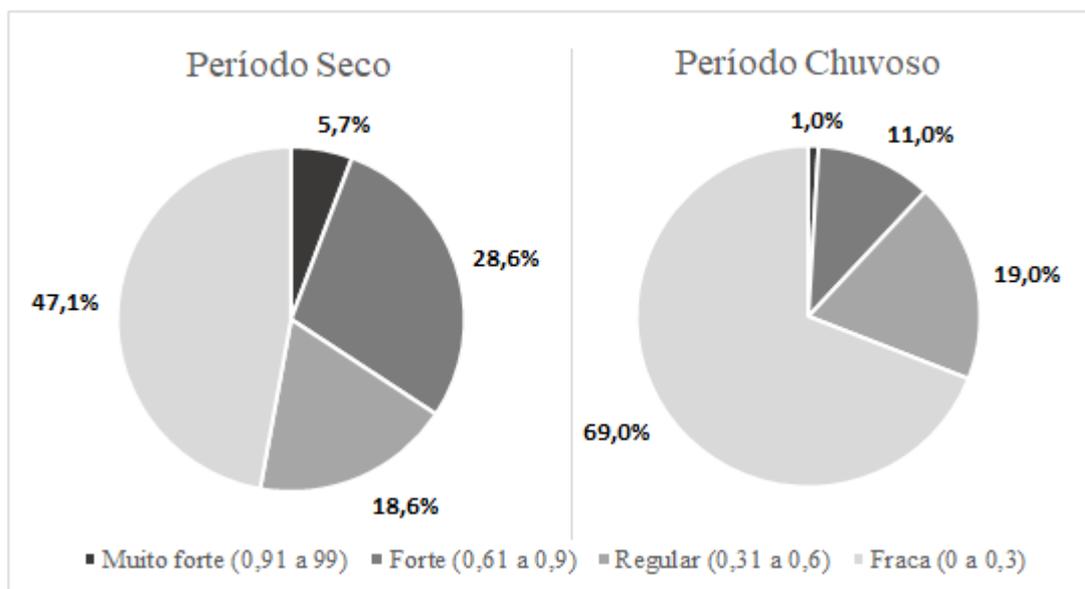


Figura 5 – Comparativo da correlação de Pearson na bacia do rio Pará no período seco e chuvoso

Fonte: Próprio Autor, 2020.

No período seco, a variável DBO apresentou o maior número de correlações positivas muito fortes, quatro registros, enquanto para as negativas, o OD apresentou o maior número, dois registros. No período chuvoso, as variáveis DBO, OD, turbidez, SDT, nitrogênio, fosforo e coliformes termotolerantes apresentaram um registro de correlação muito forte positiva, e não houve apontamento de correlação negativa.

6.3 Uso e ocupação do solo

A partir da observação dos dados de satélite obtidos no MapBiomas, foi possível verificar que a bacia do rio Pará possuía sete tipos de uso do solo divididos entre agropecuária, área não vegetada, floresta plantada, infraestrutura urbana, mineração e recursos hídricos e vegetação nativa. Os mapas a seguir apresentam a evolução do uso e ocupação do solo para a área da bacia (Figura 6).

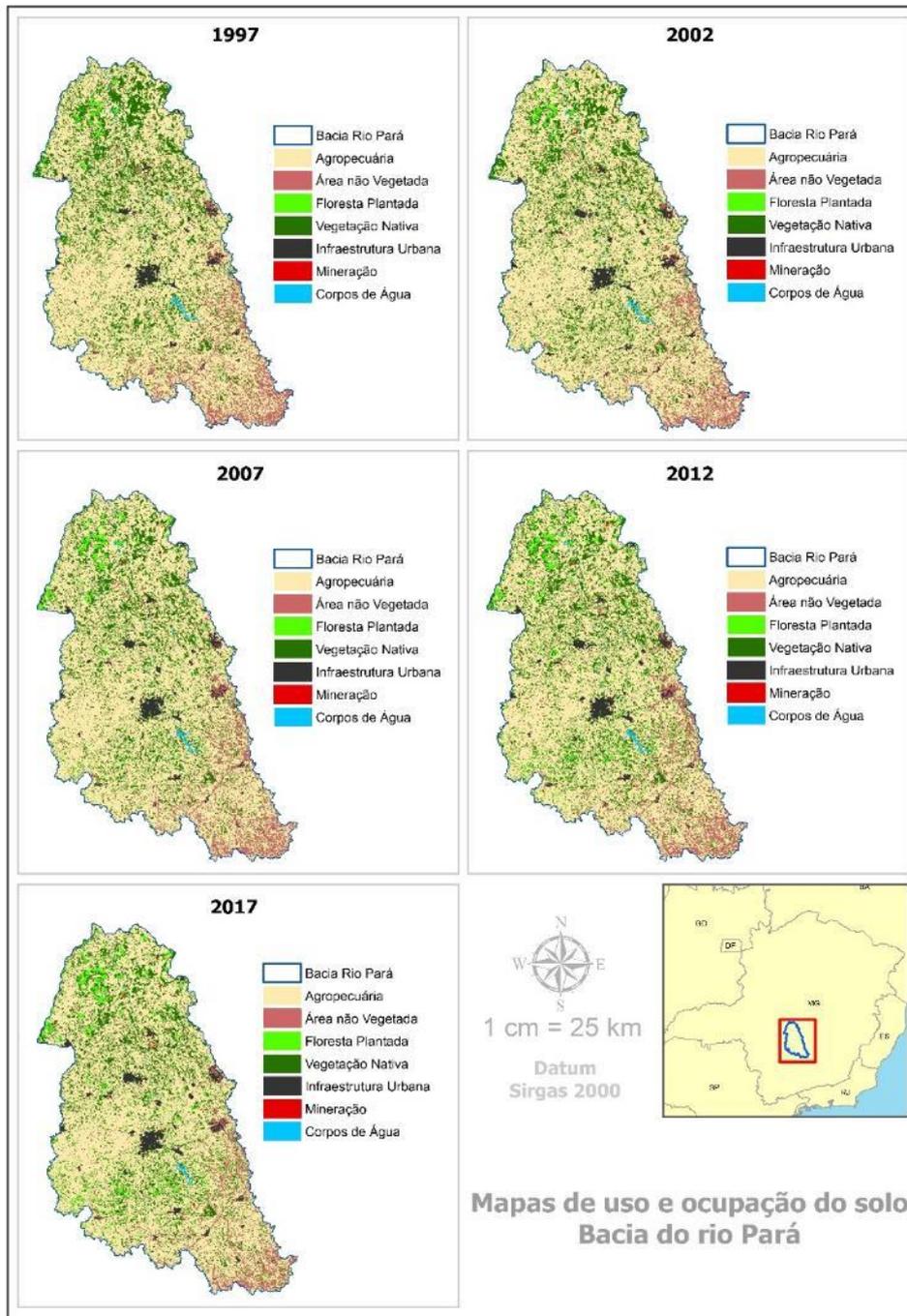


Figura 6 – Uso e ocupação do solo na bacia do rio Pará no sudoeste de Minas Gerais em 1997, 2002, 2007, 2012 e 2017

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Em todos os anos avaliados, a agropecuária apresentou uso predominante na bacia, variando entre 70,55% a 73,75% da porção do território, sendo atingido o menor valor em 2012 e o maior em 2002. Sequencialmente, o segundo maior uso registrado foi a vegetação nativa que variou entre 23,02% a 25,27%, sendo o menor registro em 2007 e o maior em 1997, o que demonstra uma redução de 2,15% no total, se comparados os anos de 1997 e 2017. Os cinco usos restantes somaram, no ano de 2017, apenas 5,71% do território da bacia (Figura 7 e Tabela 3).

O uso de floresta plantada, com a terceira maior área, apresentou crescimento ao longo dos anos estudados, chegando a representar um aumento de cerca de quatro vezes (469,41%), entre 1997 e 2017, porém, em relação à área total da bacia, este uso representou, no último ano, um percentual de 3,99%, equivalente a 487,49 km². Os demais usos para os anos avaliados não apresentaram variações individuais superiores a 1,08%. Em relação à área total da bacia e considerando os valores do último ano avaliado, os demais usos somaram 1,72%, equivalente a 210,61 km². A referida área está dividida entre infraestrutura urbana (130,38 km²), área não vegetada (45,1 km²), recursos hídricos (32,80 km²) e mineração (2,33 km²) (Figura 7 e Tabela 3).

Tabela 3 – Distribuição do uso e ocupação do solo na bacia do rio Pará, no sudoeste de Minas Gerais em 1997, 2002, 2007, 2012 e 2017

Uso Agrupado	1997		2002		2007		2012		2017	
	Área (km ²)	Área (%)								
Agropecuária	8821,38	72,17	9015,01	73,75	8950,00	73,23	8623,90	70,55	8699,66	71,17
Área não vegetada	64,39	0,53	55,47	0,45	62,00	0,51	59,48	0,49	45,10	0,37
Floresta Plantada	104,00	0,85	113,12	0,93	235,00	1,92	424,53	3,47	487,49	3,99
Infraestrutura Urbana	90,28	0,74	101,96	0,83	108,00	0,88	123,49	1,01	130,38	1,07
Mineração	0,56	0,00	0,98	0,01	1,00	0,01	1,54	0,01	2,33	0,02
Recursos Hídricos	53,86	0,44	49,92	0,41	52,00	0,43	50,78	0,42	32,80	0,27
Vegetação Nativa	3088,22	25,27	2886,29	23,61	2813,00	23,02	2939,34	24,05	2825,30	23,11
Não observado	0,35	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Próprio Autor, 2020.

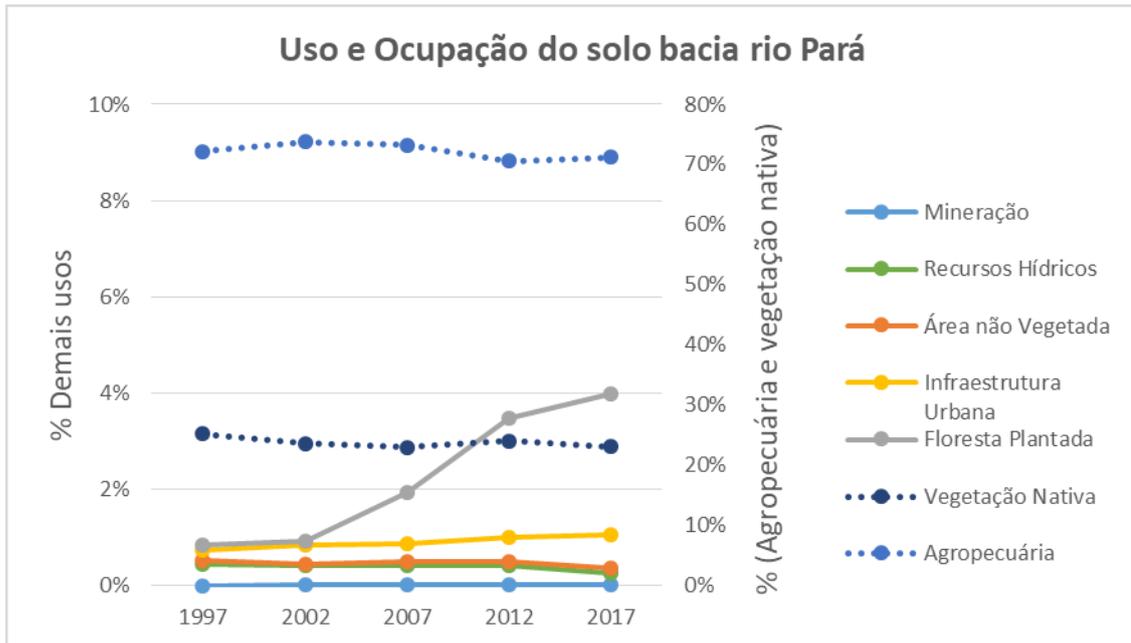


Figura 7 – Evolução do uso e ocupação do solo na bacia do rio Pará no sudoeste de Minas Gerais em 1997, 2002, 2007, 2012 e 2017

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Elevadas concentrações de coliformes termotolerantes foi observada em monitoramentos realizados em regiões relativas ao uso de infraestrutura urbana. Franco *et al.* (2015) observaram a mesma ocorrência em estudos realizados na Bacia Almada (Bahia) no qual os autores verificaram que a presença do CT estava associada a ausência do tratamento eficiente dos efluentes dos centros urbanos.

Lima, Mamede e Lima Neto (2018) observaram que elevadas concentrações de fósforo estão relacionados ao uso de agropecuária em estudos realizados em uma bacia hidrográfica do semiárido. De forma análoga, neste estudo pode-se também observar a elevação do variável nitrogênio, e tem-se que o uso predominante na bacia (agropecuária), é o mesmo observado pelos autores em acima citado.

O oxigênio dissolvido apresentou os melhores resultados para as regiões com floresta plantada, vegetação nativa e na cabeceira da bacia. Estas regiões são consideradas preservadas. Britto *et al.* (2018) confirmaram esses resultados ao identificaram que baixos valores desta variável estavam associados a ambientes alterados. Baggio, Freitas e Araújo (2016) associaram esse fato ao lançamento de efluentes.

Metais como alumínio dissolvido, chumbo total, cobre dissolvido e ferro dissolvido, no período seco, apresentaram um índice mais elevado na região central da bacia, porém, ao observar o uso e ocupação do solo, tem-se como uso predominante a infraestrutura urbana e

não as atividades minerárias, as quais normalmente expõem os solos e conseqüentemente disponibilizam estes metais ao meio ambiente.

Esperava-se que os resultados dos referidos metais estivessem associados à mineração, no entanto, na região norte, com destaque para este uso, não se repetiram os picos observados na porção central. Pieroni *et al.* (2015) confirmaram os resultados deste estudo e também não constataram elevação na concentração de metais na bacia do Córrego Água Limpa, sob influência da mineração de níquel, mais sim aumento de sólidos totais em suspensão, turbidez e oxigênio dissolvido. Finkler *et al.* (2015) comprovaram correlação do alumínio dissolvido com características de *background*, o que reforça a não correlação entre esta variável e a mineração.

Não foi possível avaliar a correlação direta como observado por Lima, Mamede e Lima Neto (2018) e Britto *et al.* (2018), tendo em vista que, na bacia do rio Pará, ocorre distribuição praticamente uniforme da atividade de agricultura e os valores de fósforo também foram elevados em toda a bacia, porém, não de maneira padronizada, o que pode ter efeito de outros usos existentes.

Cabral e Reis (2015) constaram que ambientes com vegetação predominante tiveram volume de sedimentos reduzidos, o que também pode ser observado na distribuição espacial dos Sólidos Dissolvidos Totais que apresentaram maiores resultados em regiões mais antropizadas.

Para a bacia do rio Pará, Oliveira *et al.* (2017) apontaram que os municípios de São Gonçalo do Pará e Nova Serrana foram os que apresentavam uma condição mais degradada de seus cursos d'água. Nos mapas de krigagem, a mesma porção da bacia, região central, apresentou os valores mais acentuados das variáveis estudadas. Em contrapartida, os rios mais bem conservados foram verificados nos municípios de Passa Tempo e Pitangui, ambos confirmados neste estudo em relação aos valores mais baixos das variáveis e o último em especial pelo significativo uso do solo com floresta nativa e plantada.

6.4 Geoestatística

6.4.1 Semivariograma

6.4.1.1 Período Seco

No período seco, foram modeladas 16 variáveis, incluindo a precipitação. O modelo que apresentou melhor ajuste para a maior parte das variáveis foi o exponencial, com representação de 93,7% dos casos modelados. O grau de dependência espacial (GDE) foi considerado forte para todas as variáveis, exceto o bário total, que apresentou fraco GDE (Tabela 4 e Figura 8, 9 e 10).

Todas as variáveis apresentaram efeito pepita igual a zero, exceto precipitação, bário total e coliformes termotolerantes, portanto, a maioria delas possui adequada amostragem espacial para representação da sua alteração dentro da bacia hidrográfica.

O ferro dissolvido apresentou o melhor ajuste do semivariograma para o período seco com valor do erro médio mais próximo de zero (-0,0073) e raiz quadrada do erro médio mais próximo de 1 (1,0011).

Para a precipitação, o modelo que melhor se ajustou foi o gaussiano, enquanto para todas as variáveis de qualidade da água o melhor modelo foi o exponencial (Figura 8).

Tabela 4 – Modelos selecionados, estimativas dos parâmetros dos semivariogramas isotrópicos ajustados (C_0 , C_1 e A), grau de dependência espacial (GDE) e indicadores de qualidade do ajuste (ME e RMSSE) referentes às variáveis do período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Variável	Modelo	C_0	C_1	A (m)	GDE (%)	Classe	ME	RMSSE
Precipitação	Gaussiano	67,79	821,177	141040	92	Forte	-0,0511	0,9610
Alumínio Dissolvido	Exponencial	0,0000	0,0002	53462,96	100	Forte	0,01171	0,9783
Bário Total	Exponencial	0,0005	0,0000	107440	0	Fraco	0,0289	1,1367
Chumbo Total	Exponencial	0,0000	0,0000	39693,39	100	Forte	-0,0329	0,9795
Cobre Dissolvido	Exponencial	0,0000	0,0000	49980,00	100	Forte	-0,0241	0,9159
Coliformes Termotolerantes	Exponencial	38×10^6	$21,310^8$	60776,04	98	Forte	-0,0353	1,1309
DBO	Exponencial	0,0000	241,9504	63856,18	100	Forte	-0,0398	1,0047
Ferro Dissolvido	Exponencial	0,0000	0,1282	41599,28	100	Forte	-0,0073	1,0011
Fósforo Total	Exponencial	0,0000	0,0498	44836,21	100	Forte	0,0659	1,0992
Manganês Total	Exponencial	0,0000	0,0036	25055,66	100	Forte	-0,0529	1,0145
Níquel Total	Exponencial	0,0000	0,0000	70476,30	100	Forte	-0,0358	0,9237
Nitrogênio	Exponencial	0,0000	11,1932	38670,34	100	Forte	-0,0425	1,0612
OD	Exponencial	0,0000	2,8069	26278,60	100	Forte	0,0494	1,0677
SDT	Exponencial	0,0000	10007,6427	63582,54	100	Forte	-0,0297	0,9849
Turbidez	Exponencial	0,0000	174,3812	25055,66	100	Forte	-0,0841	1,0761
Zinco Total	Exponencial	0,0000	0,0000	49120,70	100	Forte	-0,0240	1,0688

Fonte: Próprio Autor, 2020.

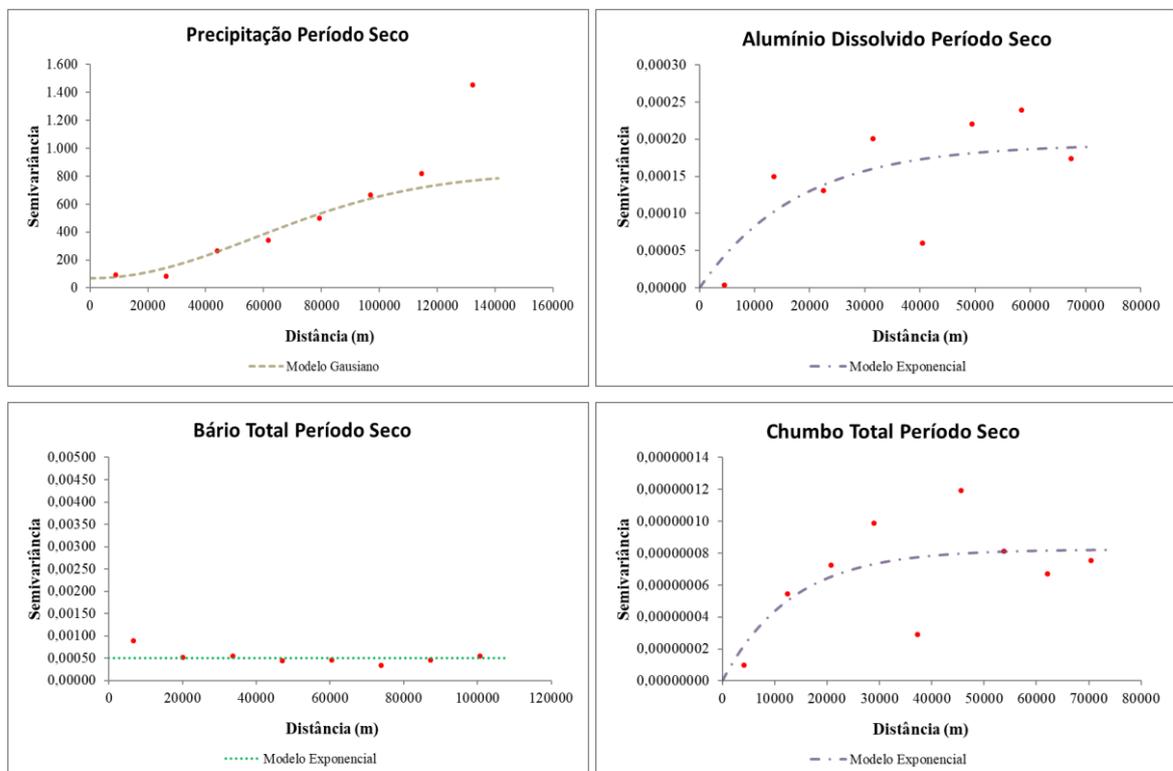


Figura 8 – Semivariogramas ajustados para precipitação, alumínio dissolvido, bário e chumbo total no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Abaixo são apresentados os semivariogramas ajustados para cobre, coliformes, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo, manganês e níquel e nitrogênio (Figura 9).

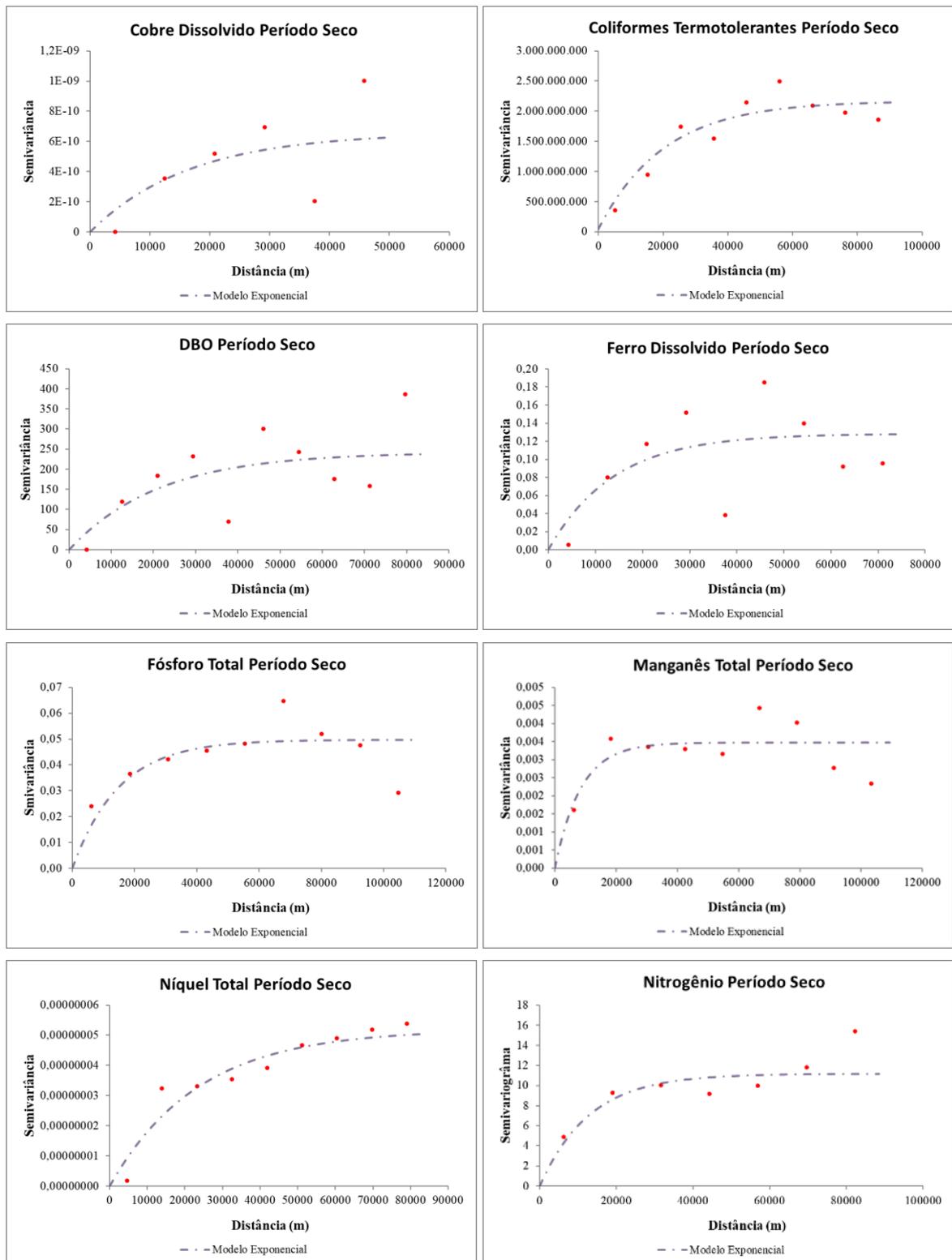


Figura 9 – Semivariogramas ajustados para cobre dissolvido, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, fósforo, manganês e níquel total e nitrogênio no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Abaixo são apresentados os semivariogramas ajustados para o oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, turbidez e zinco total (Figura 10).

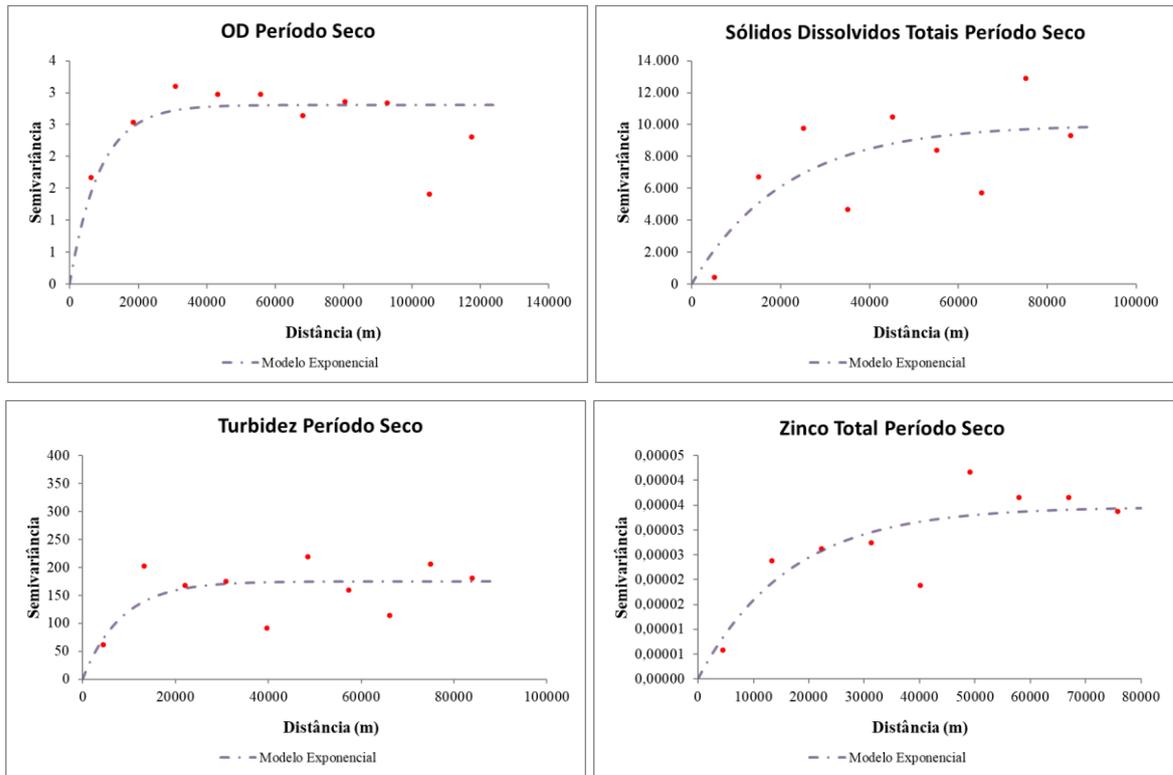


Figura 10 – Semivariogramas ajustados para oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, turbidez e zinco total no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

6.4.1.2 Período Chuvoso

No período chuvoso, foram modeladas 14 variáveis, incluindo precipitação, visto que os resultados do bário e manganês não permitiram modelagem neste período devido apresentarem um valor único, sempre inferior ao limite de detecção.

O modelo que apresentou melhor ajuste para maior parte das variáveis foi o exponencial, com representação de 78,6% dos casos modelados. O grau de dependência espacial (GDE) foi considerado forte para a maior parte das variáveis, exceto zinco total, fósforo total e alumínio dissolvido, considerados moderado, e chumbo total, que foi GDE fraco (Tabela 5, Figura 11, 12 e 13).

Todas as variáveis apresentaram efeito pepita igual a zero, exceto precipitação, alumínio dissolvido, coliformes termotolerantes e fósforo total, portanto, a maioria delas possui adequada amostragem espacial para representação da sua alteração dentro da bacia hidrográfica.

O teor de ferro dissolvido apresentou o melhor ajuste do semivariograma para o período chuvoso, de forma análoga ao seco, com valor do erro médio mais próximo de zero (0,0116) e raiz quadrada do erro médio mais próximo de 1 (1,0015).

Tabela 5 – Modelos selecionados, estimativas dos parâmetros dos semivariogramas isotrópicos ajustados (C_0 , C_1 e A), grau de dependência espacial (GDE) e indicadores de qualidade do ajuste (ME e RMSSE) referentes às variáveis do período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Variável	Modelo	C_0	C_1	A (m)	GDE (%)	Classe	ME	RMSSE
Precipitação	Gaussiano	67,5829	859,4086	1,34	92	Forte	-0,0486	0,9566
Alumínio Dissolvido	Exponencial	0,0012	0,0023	25055,66	66	Moderado	0,0740	1,2055
Chumbo Total	Exponencial	0,0000	0,0000	26278,60	15	Fraca	-0,0379	1,0823
Cobre Dissolvido	Exponencial	0,0000	0,0000	94230,00	100	Forte	-0,0204	1,3584
Coliformes Termotolerantes	Exponencial	$11,7 \times 10^7$	$2,44 \times 10^9$	77115,0	95	Forte	-0,0440	1,1073
DBO	Exponencial	0,0000	65,0355	33282,02	100	Forte	-0,0457	0,9902
Ferro Dissolvido	Exponencial	0,0000	0,0948	35614,38	100	Forte	0,0116	1,0015
Fósforo Total	Esférico	0,0077	0,0204	68298,45	73	Moderado	-0,0282	1,0931
Níquel Total	Exponencial	0,0000	0,0000	80370,00	100	Forte	-0,0210	1,0884
Nitrogênio	Exponencial	0,0000	5,2880	32473,21	100	Forte	-0,0348	1,0620
OD	Exponencial	0,0000	2,0622	25055,66	100	Forte	0,0422	1,0700
SDT	Exponencial	0,0000	4421,6661	43917,87	100	Forte	-0,0174	0,9773
Turbidez	Exponencial	0,0000	712,2428	29013,26	100	Forte	-0,0235	1,0868
Zinco Total	Gaussiano	0,0000	0,0000	101900,00	62	Moderado	-0,0071	1,0879

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Abaixo são apresentados os semivariogramas ajustados para precipitação e alumínio dissolvido (Figura 11).

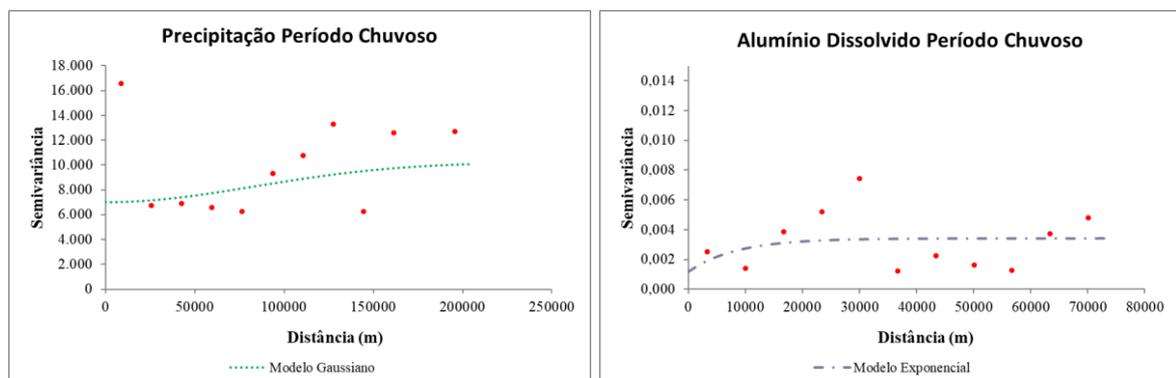


Figura 11 – Semivariogramas ajustados para precipitação e alumínio dissolvido no período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

O modelo exponencial foi o mais adequado para o teor de chumbo total, cobre dissolvido, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, ferro dissolvido,

níquel total e nitrogênio, enquanto o teor de fósforo total se ajustou melhor com o modelo esférico (Figura 12).

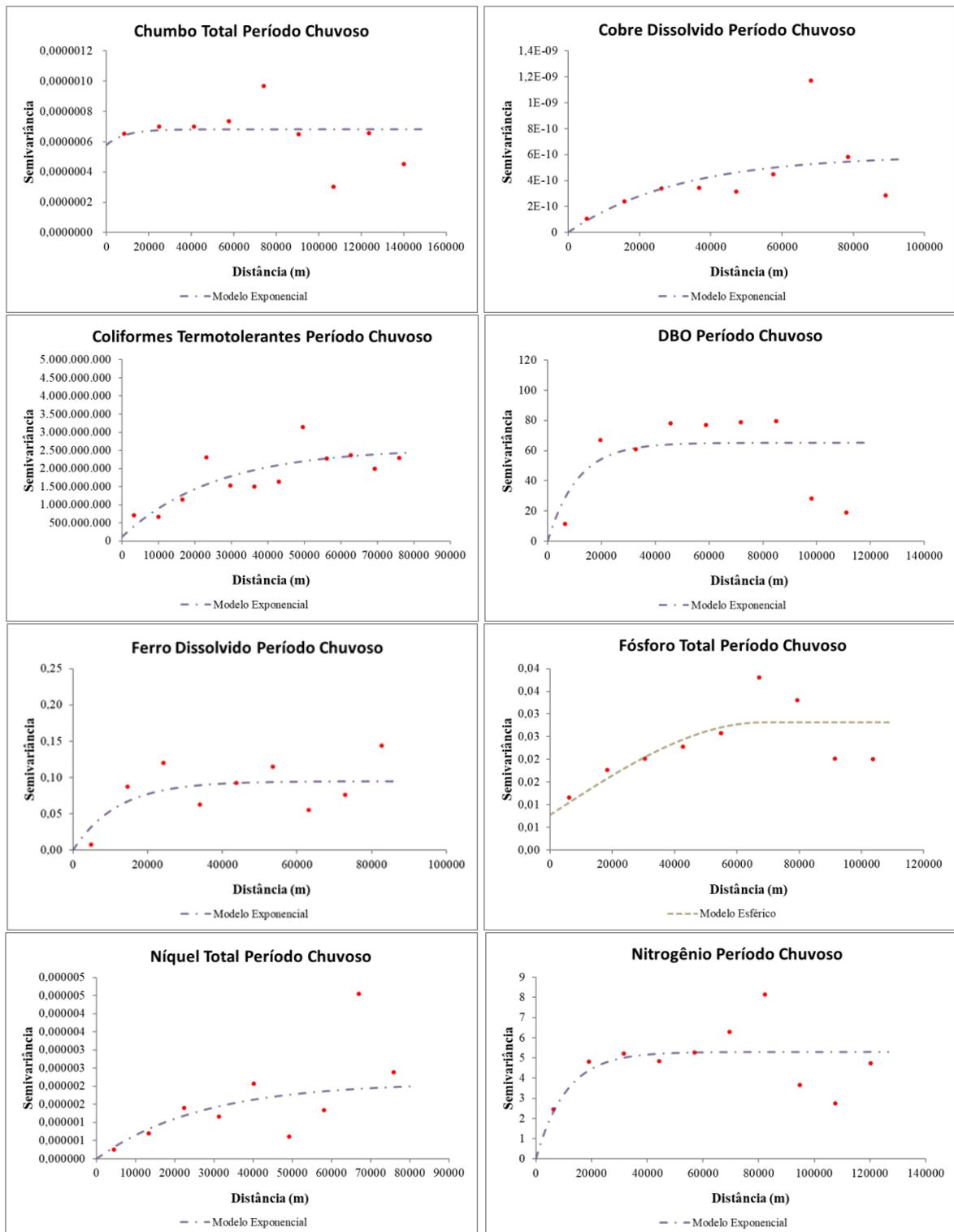


Figura 12 – Semivariogramas ajustados para chumbo total, cobre dissolvido, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, ferro dissolvido, fósforo total, níquel total e nitrogênio entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Abaixo são apresentados os semivariogramas ajustados para o oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, turbidez e zinco total (Figura 13).

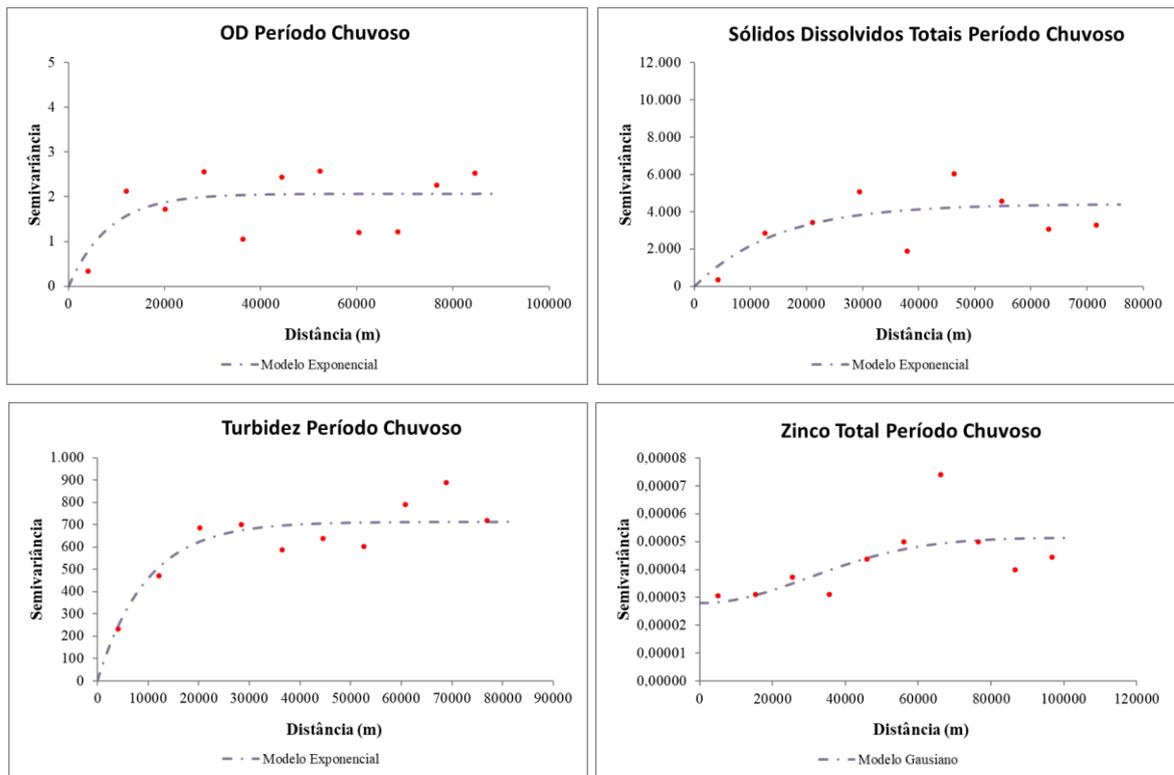


Figura 13 – Semivariogramas ajustados para oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, turbidez e zinco total no período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

6.4.2 Espacialização das variáveis analisadas por Krigagem

6.4.2.1 Período Seco

No período seco, a qualidade da água não foi influenciada significativamente pela precipitação, uma vez que praticamente não ocorreu chuva na região e conseqüentemente houve pouca influencia no escoamento dos cursos d'água da bacia. O maior acumulado de precipitação, aproximadamente 200mm, foi registrado na porção sul da bacia, enquanto na porção norte foi registrado valores acumulados máximos de 136mm. A precipitação apresentou redução gradativa da porção sul da bacia para a região norte (Figura 14 - a).

Os valores mais elevados de bário total concentraram-se na porção norte, porém, todos os registros encontravam-se enquadrados, em ambas as classes, com valores registrados abaixo de $0,7 \text{ mg L}^{-1}$. O valor máximo ($0,068 \text{ mg L}^{-1}$) foi obtido na região nordeste (Figura 14 - b). Não foi possível avaliar os resultados de bário em relação ao cádmio total, pois esta última, devido à baixa variação, não permitiu a execução da krigagem.

Na porção norte da bacia foi verificado redução da vegetação nativa que foi gradativamente substituída pela atividade agropecuária, fator que pode ter contribuído para o maior teor de bário total, bem como o acúmulo de sedimentos transportados ao longo da bacia para a região do exutório da bacia.

Os sólidos dissolvidos totais apresentaram valores mais expressivos na região central e norte, sentido ao exutório da bacia, sendo o maior valor de 450 mg L^{-1} , contudo, todos os dados registrados encontravam-se abaixo de 500 mg L^{-1} , dentro do VMP em ambas as classes. Enquadramento semelhante foi observado por Pieroni *et al.* (2015) na bacia do córrego Água Limpa (Pratápolis - MG). Os menores valores foram registrados na porção sul, com cerca de 73 mg L^{-1} (Figura 14 - c).

Os teores de sólidos mais elevados coincidiram com a áreas de atividades minerárias e de infraestrutura urbana, sendo a mineração fonte conhecida por contribuir na disponibilidade de sólidos na água, devido as atividades de escavação e transporte de minério, quando executados sem as medidas adequadas de controle ambiental previstas nos complexos processos de licenciamento.

Os menores valores de manganês total foram observados na região oeste e sul, com registros de $0,03 \text{ mg L}^{-1}$, e os maiores na região leste ($0,26 \text{ mg L}^{-1}$). A variável apresentou-se fora do limite do VMP em toda a região da bacia, com valores acima de $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 14 - d). Trindade *et al.* (2017) observaram em estudos conduzidos na bacia do rio das Velhas (MG) que o manganês apresentou tendência de redução em centros urbanos. O mesmo padrão foi observado nos pontos de concentração de infraestrutura urbana na bacia do presente estudo. A presença do manganês permaneceu dispersa na área da bacia, podendo levar a associação de sua presença com diversos usos que causam a exposição dos solos da bacia hidrográfica.

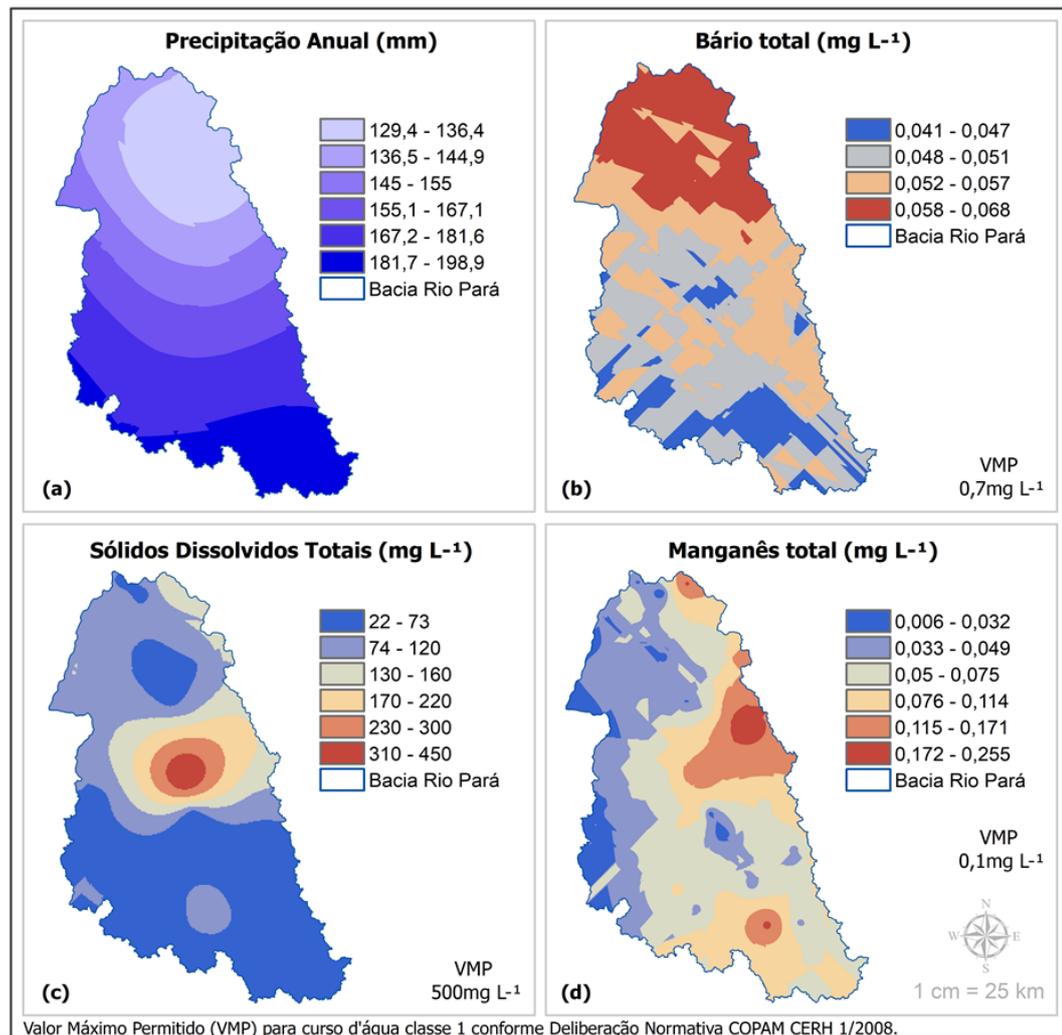


Figura 14 – Mapeamento da precipitação (a), bário total (b), sólidos dissolvidos totais (c) e manganês total (d) no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018
 Fonte: Próprio Autor, 2020.

As maiores concentrações de alumínio dissolvido foram observadas na região central da bacia, com valores máximos de $0,154 \text{ mg L}^{-1}$, sendo claramente observável a distribuição espacial. Os menores valores concentravam-se na região sul e norte, com registros de $0,091 \text{ mg L}^{-1}$. Cabe destacar o enquadramento da variável alumínio dissolvido, ou seja, os valores encontrados estão abaixo do valor máximo permitido ($0,1 \text{ mg L}^{-1}$) previsto na legislação vigente para as classes 1 e 2 na maior parte da bacia. Somente na porção central foi verificado desvio nos resultados, sendo observado valores acima deste limite (Figura 15 – a).

Houve uniformidade na região norte e sul da bacia para o cobre dissolvido, sendo estas áreas com valor fixo de $0,004 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto na região central houve um leve aumento em termos de valores absolutos. Observou-se distribuição espacial qualitativamente análoga à do alumínio dissolvido (Figura 15 – b). Toda a bacia está dentro do valor máximo permitido (VMP) de $0,009 \text{ mg L}^{-1}$.

O chumbo total apresentou maiores concentrações na região sul e central da bacia, com valores máximos de $0,0062 \text{ mg L}^{-1}$. Valores mínimos foram observados na região norte com cerca de $0,005 \text{ mg L}^{-1}$. Todos os registros estavam abaixo de $0,01 \text{ mg L}^{-1}$, portanto dentro dos VMP para ambas as classes estudadas. O comportamento espacial estava de acordo com o apresentado para os metais alumínio e cobre (Figura 15 – c).

Um comportamento espacial análogo foi observado para ferro dissolvido, com valores mais elevados registrados na porção central da bacia ($1,8 \text{ mg L}^{-1}$) e menores na porção sul e noroeste, com concentrações mínimas de $0,23 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 15 – d). As regiões central e nordeste apresentaram valores acima do VMP ($0,3 \text{ mg L}^{-1}$). Miranda *et al.* (2017) obtiveram valor máximo de 4 mg L^{-1} e mínimo de $0,30 \text{ mg L}^{-1}$ em estudos realizados na bacia do rio Parafuso Moju (Pará). Logo, existe maior concentração de ferro nesta bacia quando comparada à do rio Pará durante a estiagem.

Os metais alumínio, cobre, chumbo e ferro mantiveram a distribuição espacial equivalente e o níquel total manteve este padrão com valores máximos de $0,0047 \text{ mg L}^{-1}$ na porção central e extremo norte, e concentrações mínimas de $0,00399 \text{ mg L}^{-1}$ distribuídos na bacia, com maior área concentrada na porção sul e oeste (Figura 15 – e). Esta variável apresentou adequação ao VMP com valores abaixo de $0,025 \text{ mg L}^{-1}$.

O zinco total confirmou a distribuição espacial de todos os metais deste estudo, com valores máximos da porção central de $0,04 \text{ mg L}^{-1}$, e os menores valores na porção sul estendendo-se até a área central, com registros mínimos de $0,02 \text{ mg L}^{-1}$. Comportando-se de forma análoga ao níquel total, todos os valores de zinco total estavam abaixo do VMP de $0,18 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 15 – f).

Ao avaliar o comportamento espacial de todos os metais, é possível observar similaridade no padrão qualitativo identificado para todos eles, sendo as maiores concentrações na região central, reduzindo gradativamente em direção aos extremos norte e sul. Neste caso, também foi observada a relação entre o uso e a ocupação, visto que na área central da bacia estão concentrados os usos de infraestrutura urbana e nos extremos áreas menos alteradas.

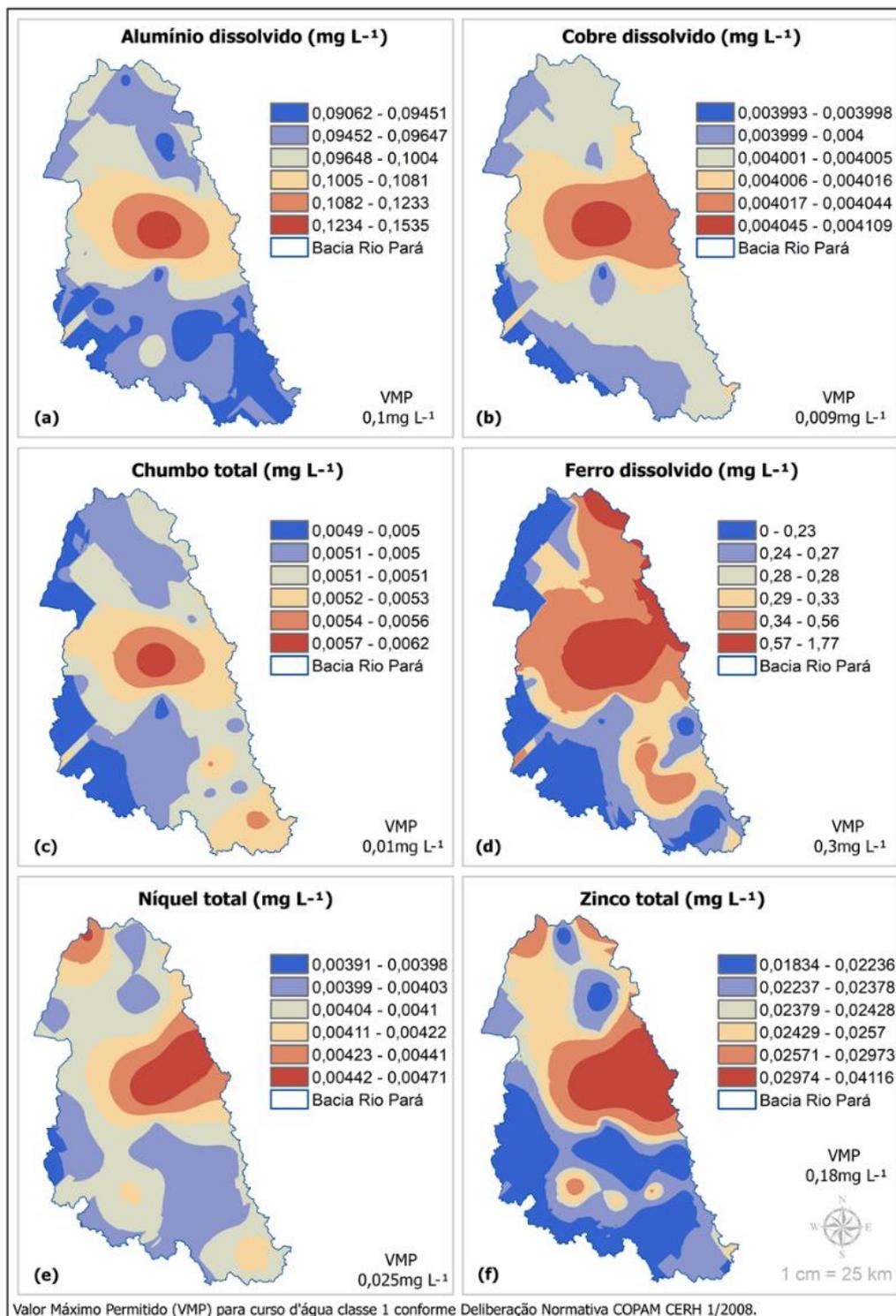


Figura 15 – Krigagem para alumínio dissolvido (a), cobre dissolvido (b), chumbo total (c), ferro dissolvido (d), níquel total (e) e zinco total (f) no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

O nitrogênio apresentou na região central da bacia valores máximos de $11,7 \text{ mg L}^{-1}$ e mínimos na porção sul e oeste com $0,09 \text{ mg L}^{-1}$. Esta variável não foi avaliada quanto ao VMP

devido à necessidade de identificação do pH para cada leitura realizada, pois esta última variável não foi avaliada neste estudo (Figura 16 - a).

Um comportamento muito próximo ao nitrogênio foi apresentado para fósforo total, com concentração máxima de 0,82 mg L⁻¹ na porção central e leste e mínima na porção norte, com 0,05 mg L⁻¹ (Figura 16 - b). Estas concentrações foram confirmadas por estudos desenvolvidos por Oliveira *et al.* (2018), que observaram que a maior parte dos valores se encontravam abaixo de 1 mg L⁻¹. Para a análise desta variável, todos os ambientes foram considerados como intermediários para definição de VMP de 0,025 mg L⁻¹, e foi verificado que praticamente toda a bacia encontrava-se acima deste limite.

Uma distribuição espacial similar à do nitrogênio e à do fósforo foi apresentada pelos coliformes termotolerantes, com valor na porção central máximo de 143.000 UFC e mínimo de 2.000 UFC, com destaque para a porção sul e noroeste. Ao avaliar estes dados em relação à legislação vigente, as referências são distintas por classe, sendo que, para classe 1, o VMP é de 200 mg L⁻¹ e, para classe 2, de 1.000 mg L⁻¹. Portanto, a bacia encontra-se desenquadrada em toda sua extensão (Figura 16 - c). Na bacia metropolitana do Açude Acarape do Meio (Ceará), foi observada a mesma distribuição de valores concomitantes de fósforo e coliformes termotolerantes observadas na bacia do rio Pará (LIMA *et al.*, 2018).

A demanda bioquímica de oxigênio repetiu os comportamentos de espacialidade registrados pelas variáveis nitrogênio, fósforo total e coliformes termotolerantes, sendo o valor máximo de 63,5 mg L⁻¹ e mínimo de 0,6 mg L⁻¹, com destaque de valores mais altos para região central e sul, respectivamente. Em relação ao VMP, há distinção entre as classes, sendo o limite para classe 1 de 3 mg L⁻¹ e para classe 2 de 5 mg L⁻¹. Destaca-se que esta variável apresentou valores acima do VMP apenas nas porções central e nordeste da bacia (Figura 16 - d).

Variação espacial análoga às demais variáveis foi constatada para o oxigênio dissolvido, porém, com valores inversos, tendo em vista que menores concentrações desta variável, abaixo de 6 mg L⁻¹ para classe 1 e 5 mg L⁻¹ para classe 2, são consideradas resultados de qualidade em desconformidade com o padrão legal. Neste sentido, a porção central apresentou piores resultados, com registros de até 1,27 mg L⁻¹, e valor máximo de até 8,9 mg L⁻¹, sendo destacada na porção sul, sudoeste e pequena porção da região norte (Figura 16 - e). Oliveira *et al.* (2018) em estudo conduzido na mesma bacia constaram valores mínimos de OD variando entre 0,5 e 9,5 mg L⁻¹, valores considerados próximos aos obtidos neste estudo, considerando as metodologias utilizadas.

Verificou-se uma espacialização difusa no período seco para a variável turbidez, porém, coincidente com as demais variáveis estudadas na porção central, com valor máximo de 62,4

mg L⁻¹ e menor índice de 7,6 mg L⁻¹, distribuído na bacia (Figura 16 - f). Verificou-se ainda o enquadramento em praticamente toda a bacia para classe 1 (40 mg L⁻¹) e classe 2 (60 mg L⁻¹).

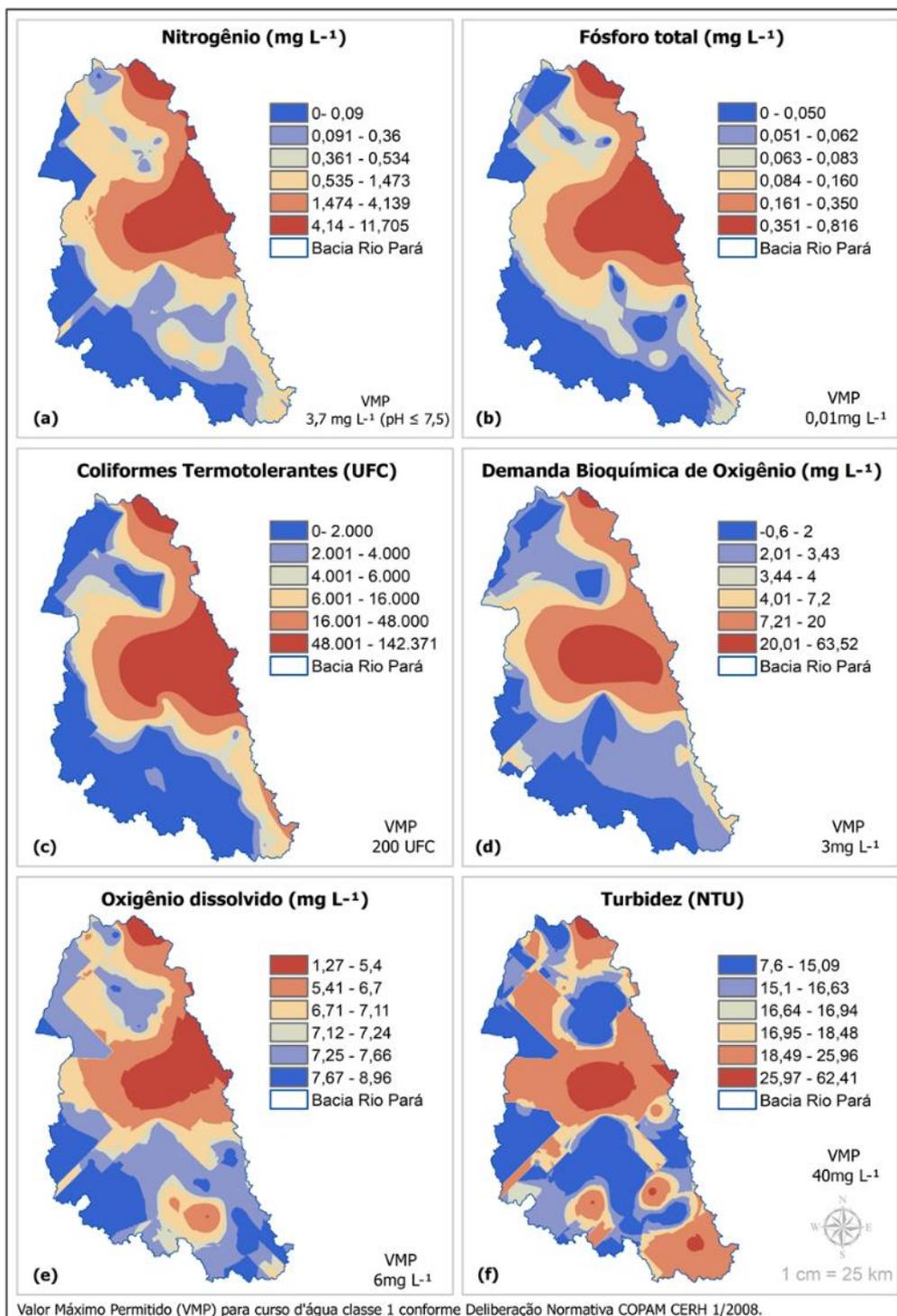


Figura 16 – Krigagem para nitrogênio (a), fósforo total (b), coliformes termotolerantes (c), demanda bioquímica de oxigênio (d), oxigênio dissolvido (e) e turbidez (f) no período seco entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

6.4.2.2 Período Chuvoso

No período chuvoso, o menor volume acumulado de precipitação foi de 1.080 mm na porção norte, com aumento gradativo no sentido da porção sul, com pico de 1.196 mm. A variação do comportamento espacial apresentado pela precipitação na estação chuvosa foi considerada pequena, não sendo verificado comportamento similar nas demais variáveis estudadas (Figura 17 - a). A distribuição espacial da chuva verificada na bacia do rio Pará, no período seco e chuvoso, foi similar à encontrada por Mello e Oliveira (2016), com as maiores precipitações registradas nas regiões de maiores altitudes (efeito da orografia), correspondentes à porção da nascente do rio.

A porção central da bacia apresentou os maiores valores de sólidos dissolvidos totais, com valores máximos de 345 mg L⁻¹, estendendo-se com valores intermediários na porção norte. Já na região sul, foram observados os menores registros, 41 mg L⁻¹, todavia, em ambos os casos, os valores encontravam-se dentro do VMP, que é de 500 mg L⁻¹ (Figura 17 - b). A distribuição espacial foi semelhante em ambos os períodos, com menores concentrações no período chuvoso.

Pode-se inferir que a precipitação contribuiu para o aumento do fluxo superficial e escoamento de base, que por sua vez, atuaram na diluição das concentrações desta variável. Soma-se a estes fatores a condição de maior preservação da porção sul que permitiu menor aporte de sedimentos, como observado por Cabral e Reis (2015), em estudos conduzidos na bacia Jacarecica (Alagoas), visto que a cobertura vegetal promove a interceptação do escoamento e redução do aporte de sedimentos.

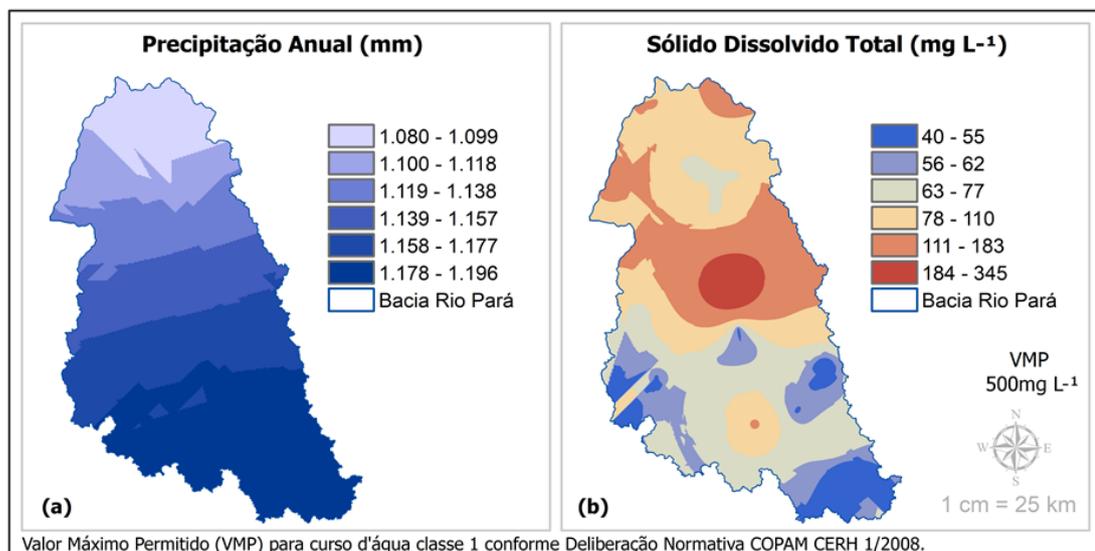


Figura 17 – Krigagem para precipitação (a) e sólidos dissolvidos totais (b) no período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Valores acima do VMP de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ foram observados para o alumínio total em toda a bacia durante o período chuvoso, com maiores registros na região centro-sul estendendo até o norte, com destaque para registros máximos de até $0,320 \text{ mg L}^{-1}$ nesta porção (Figura 18 – a). Na comparação com o período seco, somente na porção central houve desvio em relação ao VMP.

Isso demonstra que há contribuição das chuvas na dispersão e elevação desta variável no ambiente, devido ao aumento do escoamento superficial que aumenta a vazão dos cursos d'água. Oliveira e Cunha (2014) encontraram na bacia do rio Jari (Amapá) resultados de diluição semelhantes para o alumínio, com valores médios máximos de aproximadamente $0,07 \text{ mg L}^{-1}$ no período chuvoso e aproximadamente $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ na estiagem.

A precipitação praticamente não promoveu alteração nas concentrações do cobre dissolvido, sendo os valores máximos muito próximos daqueles observados no período seco, com cerca de $0,0041 \text{ mg L}^{-1}$. Em ambas as estações, a bacia apresentou enquadramento ao VMP ($0,009 \text{ mg L}^{-1}$). Observa-se uma pequena redução de valores absolutos na porção central da bacia durante as chuvas, e sua maior concentração na região leste (Figura 18 – b).

Um comportamento espacial análogo ao cobre dissolvido foi apresentado para o chumbo total, com leve deslocamento das concentrações nas áreas mais altas, na porção leste, com picos de $0,00743 \text{ mg L}^{-1}$ verificados nesta região, somado ao aumento observado na porção sul da bacia (Figura 18 – c). Menores valores foram aferidos na porção sudoeste da bacia, com concentrações mínimas de $0,00413 \text{ mg L}^{-1}$. Todos os registros foram considerados dentro do VMP, que é de $0,01 \text{ mg L}^{-1}$. Em ambas as estações, houve um comportamento espacial similar ao do cobre, demonstrando a influência da precipitação com aumento absoluto de cerca de $0,0012 \text{ mg L}^{-1}$ nas concentrações observadas.

O ferro dissolvido indicou ser afetado pela ocorrência de chuvas, assim houve difusão dos valores máximos na região sudoeste e manteve a tendência de maior concentração para o centro da bacia, com valores máximos de $1,7 \text{ mg L}^{-1}$ nestes pontos, enquanto valores mínimos, de $0,28 \text{ mg L}^{-1}$, apresentaram leve aumento em relação ao período seco. Durante as chuvas, a maior parte da bacia apresentou-se fora do VMP estabelecido para a variável, que é $0,3 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 18 – d). Na bacia do rio Parafuso Moju, para a estação chuvosa foram registrados por Miranda *et al.* (2017) concentrações mínimas de $0,10 \text{ mg L}^{-1}$ e máximas de $0,80 \text{ mg L}^{-1}$, indicando quando ocorre diluição do ferro nesta bacia, oposto do observado no rio Pará, que manteve valores muito próximos em ambos os períodos.

O padrão de distribuição espacial apresentado para o cobre dissolvido no período chuvoso foi relativamente similar ao do níquel total com leve tendência de deslocamento das

maiores concentrações, em torno de $0,0105 \text{ mg L}^{-1}$, para a porção nordeste da bacia. Os menores valores desta variável mantiveram-se na porção sudoeste, com registro mínimo de $0,0036 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 18 – e). Em termos absolutos, foi observado que os valores se encontravam abaixo do VMP, que é de $0,025 \text{ mg L}^{-1}$, sendo que as concentrações mínimas foram mantidas, enquanto as máximas apresentaram grande elevação, $0,00576 \text{ mg L}^{-1}$, equivalente a cerca de 45% se comparado ao período seco, porém, com mesmo comportamento espacial para a variável nos dois períodos, na porção sudoeste.

Todos os valores de zinco total encontravam-se abaixo de $0,18 \text{ mg L}^{-1}$ e enquadrados nas duas classes em ambos os períodos, sendo observada leve tendência de aumento na região norte em relação ao período seco. Registros máximos foram observados na porção leste, $0,05 \text{ mg L}^{-1}$, e mínimos nas regiões sul e oeste, com valores de $0,013 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 18 – f).

Ao avaliar o comportamento espacial dos metais alumínio dissolvido, cobre dissolvido, chumbo total, ferro dissolvido, níquel total e zinco total é possível observar que as áreas mais preservadas da bacia, porção sul, apresentaram os menores valores absolutos. Na porção sudoeste, onde foram medidas as maiores concentrações estão localizados os maiores centros urbanos da bacia, bem como áreas não vegetadas e atividades minerárias.

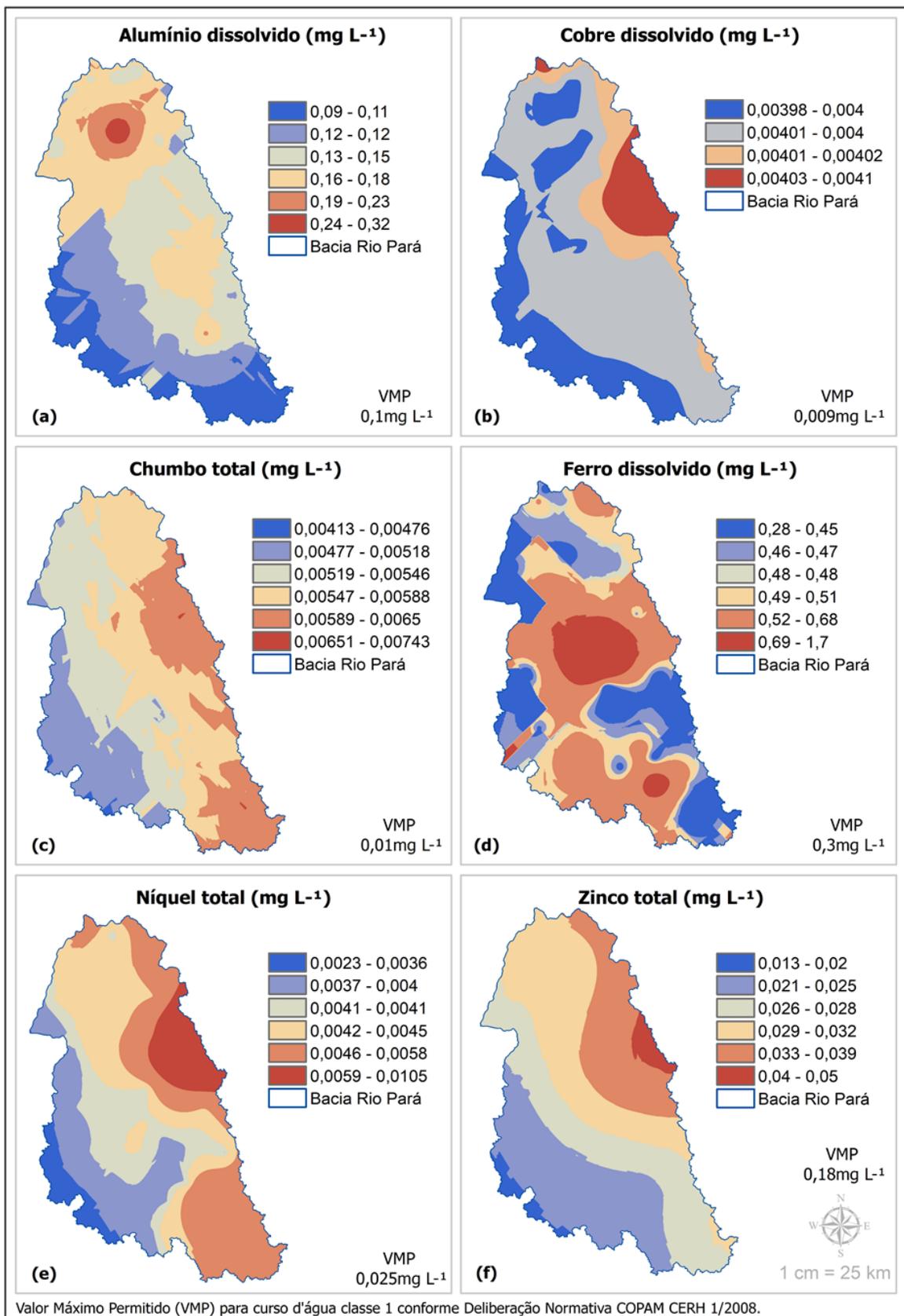


Figura 18 – Krigagem para alumínio dissolvido (a), cobre dissolvido (b), chumbo total (c), ferro dissolvido (d), níquel total (e) e zinco total (f) no período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

O nitrogênio apresentou comportamento análogo ao do fósforo na bacia, com distribuição espacial semelhante à observada no período seco (Figura 19 - a). As chuvas contribuíram para a diminuição dos valores máximos absolutos do nitrogênio, concentrados na porção centro e nordeste da bacia, com redução de cerca de $3,25 \text{ mg L}^{-1}$, com registros em torno de $8,455 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto os valores mínimos observados foram de $0,0154 \text{ mg L}^{-1}$, com leve aumento se comparados aos valores mínimos do período seco.

A variação espacial manteve-se para o fósforo total se comparado ao período seco, com concentrações máximas nos mesmos pontos, enquanto a diluição ocasionada pelas chuvas foi pequena, com valores máximos de $0,62 \text{ mg L}^{-1}$ e mínimos de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 19 - b). Em relação ao VMP, o nitrogênio não foi avaliado novamente devido a sua dependência da observação do pH, não disponíveis, e o fósforo total apresentou desvio nas regiões de concentrações mais altas, acima de $0,025 \text{ mg L}^{-1}$.

As chuvas provocaram aumento significativo nos índices de coliformes termotolerantes, com aumento de aproximadamente 8.000 UFC, com picos máximos de 150.000 UFC e mínimos de 3.258 UFC. Desta forma, é possível constatar que a maior parte da bacia se manteve com valores acima do VMP estabelecido para classe 1 (200 mg L^{-1}) e para classe 2 (1.000 mg L^{-1}), destacados nas porções central e nordeste (Figura 19 - c). Estudos conduzidos por Oliveira *et al.* (2018) na bacia do rio Pará demonstraram variações nas concentrações máximas de aproximadamente 500.000 NMP. A diferença entre os números pode ser devido à metodologia utilizada no estudo atual, que utilizou uma unidade de medida mais precisa.

Apesar de apresentar um comportamento espacial qualitativamente análogo ao dos coliformes totais, com predominância de valores máximos na porção central e nordeste, a DBO apresentou redução em torno de $27,3 \text{ mg L}^{-1}$ se comparada ao período seco, com registros máximos de $36,2 \text{ mg L}^{-1}$, e mínimos de $1,8 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 19 - d). A DBO ficou acima do VMP para classe 1, de 3 mg L^{-1} , e para classe 2, de 5 mg L^{-1} , nas áreas com registros máximos.

Na maior parte dos registros, o oxigênio dissolvido apresentou valores acima de 5 mg L^{-1} o que representa condições adequadas ao VMP para a classe 1 (6 mg L^{-1}) e classe 2 (5 mg L^{-1}), comportamento espacial análogo ao observado no período seco foi verificado no período chuvoso conforme a Figura 19 - e. Valores não conformes foram verificados em distribuição muito próxima às variáveis anteriormente citadas para o OD, confirmando a distribuição análoga das variáveis nitrogênio, fósforo total coliformes termotolerantes, DBO e OD na bacia.

Britto *et al.* (2018) em estudos conduzidos no baixo curso do rio São Francisco (Bahia) observaram valores fora do padrão, classe 2, para os parâmetros de OD e coliformes termotolerantes no período seco e chuvoso. Em relação a distribuição espacial e sua relação

com uso do solo Baggio, Freitas e Araújo (2016) verificaram que os valores mais baixos de oxigênio dissolvido estão relacionados aos usos do solo de áreas agrícolas e urbano industrial.

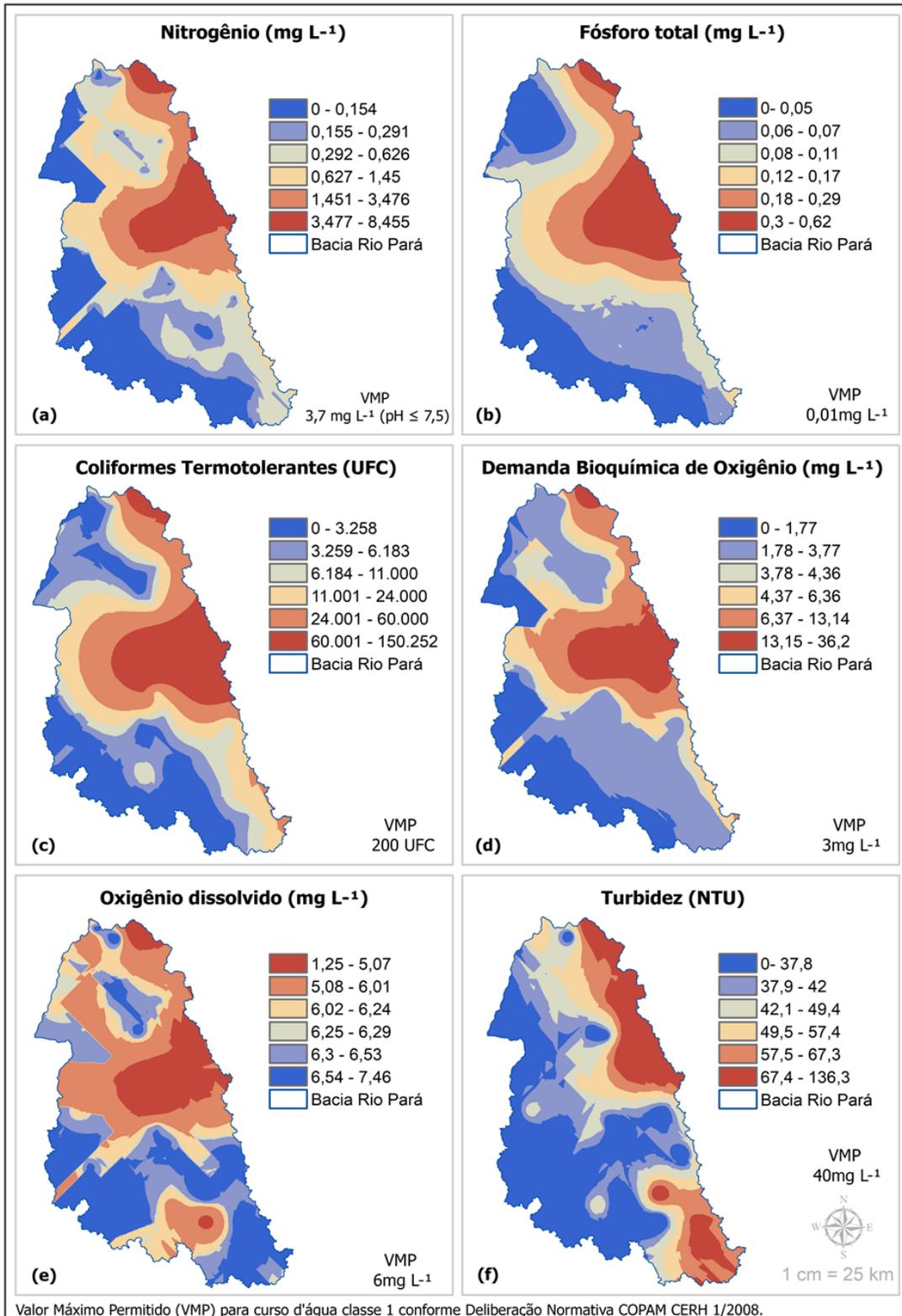


Figura 19 – Krigagem para nitrogênio (a), fósforo total (b), coliformes termotolerantes (c), demanda bioquímica de oxigênio (d), oxigênio dissolvido (e) e turbidez (f) no período chuvoso entre janeiro de 1997 a dezembro de 2018

Fonte: Próprio Autor, 2020.

A turbidez apresentou picos na porção leste e norte, variando a distribuição espacial em relação ao período seco, com aumento substancial dos valores mínimos, cerca de $22,7 \text{ mg L}^{-1}$, com mínimos de $37,8 \text{ mg L}^{-1}$ e máximos de $136,3 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 19 - f), ressalta-se ainda que praticamente toda a porção sudoeste da bacia encontrava-se com resultados acima do VMP para classe 1 (40 mg L^{-1}) e classe 2 (60 mg L^{-1}). A elevação da turbidez no período chuvoso em relação ao período seco também foi observada por Rocha e Pereira (2016) em estudos desenvolvidos em bacia localizada em Juiz de Fora (Minas Gerais).

6.5 Correlações entre variáveis nos períodos seco e chuvoso

No período seco, foi observada a maior quantidade de correlações forte e muito forte, sendo 34,3% do total de pares de parâmetros comparados. Por outro lado, no período chuvoso apenas 11,9% das variáveis apresentaram este tipo de correlação. Assim, pode-se inferir que as chuvas tendem a falsear a análise dos resultados reais das mesmas. Em contrapartida, na porção central da bacia foram encontrados os piores resultados de qualidade, fato confirmado por De Paula *et al.* (2016).

O bário total não apresentou correlação no período chuvoso com nenhum parâmetro e, no período seco, somente com o cádmio total (forte correlação). Esta condição foi representada na espacialização da krigagem, visto que a mesma foi completamente aleatória. Também não foi observada influência do uso do solo com o bário total.

Os sólidos dissolvidos totais apresentaram comportamento espacial similar à maior parte das variáveis, com as maiores concentrações na região central da bacia, em ambos os períodos. Fato confirmado pela correlação de Pearson, considerado forte ou muito forte em 60% das variáveis estudadas no período seco e 25% no chuvoso. As correlações observadas foram positivas para todas as variáveis, isto é, DBO, turbidez, nitrogênio, coliformes termotolerantes, alumínio, chumbo total, cobre dissolvido, ferro dissolvido, níquel total e zinco total, exceto para o oxigênio dissolvido, que apresentou correlação negativa, visto que a variável indica piores resultados de qualidade quando seus teores são menores. Para a bacia do Canela Tamandaí (Rio Grande do Sul), não foi observada correlação entre os sólidos dissolvidos totais e DBO (-0,26), coliformes termotolerantes (0,02) e zinco total (-0,27), conforme resultados obtidos por Santos *et al.* (2018), oposto ao verificado neste estudo, fato que pode ser explicado pela não separação do estudo dos referidos autores em período seco e chuvoso.

A análise dos coeficientes de Pearson demonstrou correlação positiva do manganês total com o nitrogênio e com o fósforo, e negativa com o oxigênio dissolvido, no período seco. A

distribuição espacial confirmou esta correlação, visto a similaridade entre as variáveis citadas. Na estação chuvosa, não foi executada krigagem devido à não existência de correlação forte e muito forte para o manganês total.

O alumínio dissolvido apresentou deslocamento do centro de maiores valores, passando da região central, no período seco, para sul, no período chuvoso. Este fato pode ser explicado pelo carreamento de sedimentos promovido pelas chuvas e aumento da turbidez com mesmo comportamento espacial. Esta variável apresentou correlação com 55% das variáveis no período seco, considerada muito forte positiva com a DBO, chumbo e cobre, enquanto na chuvosa, não houve correlação.

O cobre dissolvido manteve uma distribuição espacial similar ao do alumínio e apresentou 60% de correlações forte e muito forte na bacia, sendo esta última para as variáveis DBO, SDT, alumínio e chumbo. Já no período chuvoso, foi verificada correlação forte entre a turbidez e o níquel. Santos *et al.* (2018) não observaram correlação entre o cobre e o chumbo (-0,25).

O comportamento espacial foi mantido pelo chumbo total similar aos demais metais, com correlação muito forte de 50% das variáveis na estiagem (alumínio e cobre) e exatamente a mesma correlação apresentada pelo cobre dissolvido na estação chuvosa, o que confirma a distribuição espacial.

O ferro apresentou correlação positiva muito forte com a DBO e SDT na estiagem, enquanto que durante as chuvas, a correlação passou a ser forte para estas variáveis e também para o OD, porém, esta última com correlação negativa. Rocha *et al.* (2016) observaram no manancial de Juiz de Fora (MG) correlação baixa entre o ferro, DBO (0,297) e OD (0,468).

Maiores concentrações de níquel total foram observadas no período chuvoso, influenciadas pela turbidez. A correlação de Pearson foi considerada como forte em relação ao SDT, alumínio, cobre dissolvido e zinco total, na estiagem, ao passo que para o período chuvoso, além das duas últimas variáveis também foi observada forte correlação para o chumbo total e turbidez.

O zinco total não sofreu influência significativa das chuvas, apresentando comportamento similar ao do ferro, referente à espacialização e à não variação abrupta das concentrações. Correlações fortes em relação a DBO, turbidez, SDT, nitrogênio, fósforo, coliformes, alumínio, chumbo total, cobre dissolvido, ferro dissolvido, níquel total e OD, sendo a última negativa, também observada por Souza *et al.* (2014). No período chuvoso, houve correlação positiva entre níquel e fósforo. Santos *et al.* (2018) não encontraram correlação forte entre zinco e as variáveis temperatura, turbidez, sólidos totais, sólidos solúveis totais, sólidos

dissolvidos totais, pH, condutividade elétrica, demanda bioquímica de oxigênio, coliformes termotolerantes, *Escherichia coli*, cobre, níquel e chumbo.

A variação espacial foi idêntica para as variáveis coliformes termotolerantes (CT), nitrogênio, fósforo total e oxigênio dissolvido (OD), sendo a última com valores inversos às demais variáveis, visto que as concentrações menores de OD estão nas porções de maiores teores das demais variáveis. Esta condição também foi verificada na aplicação da correlação de Pearson, no período seco, que indicou forte correlação negativa entre o OD e CT e muito forte com as duas outras. O fósforo e nitrogênio apresentaram correlação positiva muito forte (0,093) e ambos indicaram correlação forte em relação ao CT.

A DBO apresentou no período seco correlação positiva muito forte com SDT, alumínio, cobre dissolvido e ferro dissolvido e no período chuvoso, em relação ao CT. A distribuição espacial similar entre DBO, CT e SDT confirmou os resultados da correlação de Pearson. Souza *et al.* (2014) verificaram baixa correlação entre SDT e DBO (0,60) para a bacia Menino de Deus II (Rio Grande do Sul).

Por fim, a turbidez apresentou variação espacial entre as estações confirmadas pela correlação de Pearson, que apresentou 55% de correlação na estiagem e apenas 15% nas chuvas, sendo forte em relação a metais, chumbo dissolvido, cobre e níquel total.

Ao observar os resultados do coeficiente de Pearson de forma ampla, no período seco praticamente não apresentou correlação forte e muito forte, visto que as chuvas aumentam o escoamento superficial e de base dos cursos d'água, gerando maiores vazões que podem diluir as variáveis em estudo, como foi verificado por Sousa *et al.* (2014), Rocha *et al.* (2016) e Santos *et al.* (2018). Soma-se a esta condição a divergência entre os ambientes estudados em que foi aplicado o coeficiente, sendo uma represa no caso de Santos *et al.* (2018) e no presente estudo um curso d'água.

Foi observado que os valores mais elevados de coliformes termotolerantes, nitrogênio e fósforo total, em ambos os períodos, correlacionaram-se com o uso de infraestrutura urbana. Já o oxigênio dissolvido apresentou os melhores resultados para as regiões com uso do solo do tipo floresta plantada, vegetação nativa e na região da cabeceira da bacia. Esses resultados estão de acordo com outros já relatados na literatura (BRITTO *et al.*, 2018; BAGGIO; FREITAS; ARAÚJO, 2016).

O estudo demonstrou ainda que metais como alumínio, cobre e ferro dissolvidos e chumbo total, no período seco, apresentaram maior concentração na região central da bacia, com comportamento espacial análogo, com uso e ocupação predominante da infraestrutura

urbana em detrimento ao minerário. A distribuição espacial dos sólidos dissolvidos totais apresentou maiores valores vinculados às regiões mais antropizadas.

Oliveira e Cunha (2014) constataram elevação das variáveis alumínio dissolvido e turbidez nos meses chuvosos, condição análoga à averiguada no presente estudo e também observada por Rocha e Pereira (2016).

Pontes, Marques e Marques (2012) observaram que a incidência de precipitação contribuiu para a degradação dos parâmetros da DBO. O oposto ocorreu na bacia do rio Pará, já que a variável apresentou melhor qualidade na estação chuvosa. Ressalta-se que a variação de uso e ocupação do solo ao longo dos anos estudados pode ter afetado o comportamento desta variável.

7 CONCLUSÃO

A correlação de Pearson, conforme metodologia de Feil, Strasburg e Spilki (2017), foi adequada para o estudo da bacia do rio Pará. Houve maior número de correlações muito forte e forte no período seco, correspondendo a 5,7 e 28,6%, respectivamente, enquanto no período chuvoso juntas somaram apenas 12%. Esta situação foi evidenciada pela variação do coeficiente de Pearson, que demonstrou a influência da precipitação na bacia, indicando que esta atua na diluição da maioria das variáveis, devido ao aumento do escoamento superficial e consequente alteração da vazão dos cursos d'água.

A aplicação do coeficiente de Pearson, em recursos hídricos, é influenciada pelo tipo de curso d'água, com as características regionais do ambiente e com o uso e ocupação do solo da bacia.

O modelo de semivariograma que apresentou melhor ajuste para a maior parte das variáveis foi o exponencial. O grau de dependência espacial (GDE) foi considerado forte para 86,7% das variáveis estudadas.

A krigagem explicou adequadamente o comportamento espacial das variáveis estudadas, e permitiu fazer correlação das mesmas com o uso e ocupação do solo e com os limites legais aplicáveis no estado, por meio da apresentação de mapas com grande detalhamento das variáveis que poderão auxiliar na gestão da bacia hidrográfica do rio Pará.

Os mapas de krigagem demonstram que o grupo dos metais alumínio, cobre, chumbo, ferro, níquel e zinco apresentaram distribuição espacial qualitativamente comparáveis, com maior concentração nas porções central e oeste da bacia. Já para os teores de bário e manganês total, os índices mais expressivos situaram-se na porção nordeste. As concentrações de nitrogênio, fósforo, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais e turbidez foram mais elevadas em toda a porção central, de leste a oeste, em especial no período seco. As concentrações mais elevadas das variáveis coincidiram com o uso de infraestrutura urbana, por outro lado, os valores mais baixos foram constatados nas áreas com cobertura vegetal.

Por fim, ressaltasse que os dados usados neste trabalho possuem frequência de monitoramento em sua maioria trimestral, indica-se que quando possível, tais análises devem ser executadas com dados que possuam frequência mensal.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2018. **Resultados de monitoramento de precipitação da bacia hidrográfica do rio Pará**. <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>.
- ALVES, Sueli Martins Freitas de; *et al.* Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo usando técnicas de análise de componentes principais e Geoestatística. **Biosci J.** v. 30, n. 1, 22-30, 2014.
- ALMEIDA, Rafael Alvarenga; COELHO, Gilberto; ALMEIDA, Isabela Alvarenga; COSTA, Jéfferson de Oliveira. Geoestatística aplicada na estimativa de chuvas máximas diárias no estado de Minas Gerais. **Nativa.** v. 6, n. 6, 675-680, 2018.
- BAGGIO, Hernando; FREITAS, Mariana de Oliveira; ARAÚJO, Amanda Dias. Análise dos parâmetros físico-químicos oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico e temperatura, no baixo curso do Rio das Velhas – MG. **Caminhos de Geografia.** v. 17, n. 60, 2105-117, 2016.
- BENESTY J., CHEN J., HUANG Y., COHEN I. **Pearson Correlation Coefficient.** In: Noise Reduction in Speech Processing. Springer Topics in Signal Processing, vol 2. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- BONNET, Bárbara Rocha Pinto; FERREIRA, Laerte Guimarães; CARNEIRO LOBO, Fabio. Relação entre qualidade da água e uso do solo em Goiás: uma análise à escala da bacia hidrográfica. **Revista Árvore.** v. 32, n. 2, 311-322, 2008.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems: spatial information systems and geostatistics.** 2. ed. Oxford: Oxford University, 1998. 333 p.
- BRITTO, Fabio Brandão; *et al.* Surface water quality assessment of the main tributaries in the lower São Francisco River, Sergipe. **Brazilian Journal of Water Resources.** v.23, n. 28, 1-11, 2018.
- CABRAL, Samuellson Lopes; REIS, Rosângela Sampaio. Influência do uso e ocupação do solo na produção de sedimentos na bacia do rio Jacarecica. **Revista de Geografia.** v.32, n. 2, 147-157, 2015.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of American Journal,** v.58, p.1501-1511, 1994.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo.** [recurso eletrônico]. São Paulo: CETESB, 2018. 1 arquivo de texto (301 p.) : il. color., PDF ; 37 MB. 2017.
- CUNHA, Alexson de Mello; *et al.* Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** v. 48. n. 9, 1179-1191, 2013.

DAMASCENO, Maria da Conceição Silva; RIBEIRO, Hebe Morganne Campos; TAKIYAMA, Luís Roberto; DE PAULA, Manuel Tavares. Avaliação sazonal da qualidade das águas superficiais do Rio Amazonas na orla da cidade de Macapá. **Revista Ambiente & Água**. v. 10, n. 3, 598-611, 2015.

DE PAULA, Makele Rosa; BENEDETTI, Ana Carolina Pain; PEREIRA FILHO, Waterloo. Influência do Uso e Cobertura da Terra Aliado a Precipitação Pluviométrica na Qualidade da Água da Bacia Hidrográfica do Rio Ingaí – RS/Brasil. **Revista do Departamento de Geografia Universidade de São Paulo**. v. 32. n. 1, 143-152, 2016.

FEIL, Alexandre André; STRASBURG, Virgílio José; SPILKI, Fernando Rosado. Variáveis Intervenientes na existência de comitês de bacias hidrográficas no Brasil. **Revista Ambiente & Água**. v. 12, n. 2, 340-350, 2017.

FERNANDES, Luciana Alves; GOMES, José Mário Matsumura. Relatórios de pesquisa nas ciências sociais: características e modalidade de investigação. **ConTexto**, v. 3, n.4, 1-23, 2003.

FINKLER, Nicolas Reinaldo; *et al.* Qualidade da Água Superficial por meio de análise de componente principal. **Revista Ambiente & Água**. v. 10, n. 4, 782-792, 2015.

FRANCO, Gustavo Barreto; *et al.* Avaliação da qualidade sanitária da água na bacia hidrográfica do rio Almada – BA. **Caminhos de Geografia**. v. 16, n. 54, 254-262, 2015.

FREITAS, Aurivan Soares de. **Sigatoka-Amarela da bananeira em função da nutrição mineral em solução nutritiva e da distribuição espacial da fertilidade do solo**. 2013. 80 f. Tese (Mestrado em Agronomia (Fitopatologia)) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

GRAY, David E. **Pesquisa no mundo real**. 2 ed. São Paulo: Editora Penso, 2012. 242 p.

LADIM, Paulo M. Barbosa. Geoestatística e mapas. **Terrae Didática**. v. 2. n. 1, 19-33, 2006.

LIMA, berthyer Peixoto; MAMEDE, George Leite; LIMA NETO, Iran Eduardo. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 23. n.1, 125-135, 2018.

MANUEL, Lourenço; *et al.* Estudo de variabilidade Espacial da concentração de cobre e cádmio ao longo da margem do rio Meuse. **Pubvet**. v. 11. n. 8, 802-807, 2017.

MAPBIOMAS, 2019. **Projeto de mapeamento anual da cobertura e uso do solo do Brasil**. <http://mapbiomas.org/pages/about/about>.

MELLO, Yara Rúbia de; OLIVEIRA, Therezinha Maria Novais de. Análise Estatística e Geoestatística da precipitação média para o município de Joinville (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 31. n. 2, 229-239, 2016.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM/CERH nº 1 de 05 de maio de 2008. Classificação de corpos de águas e diretrizes para enquadramento. **Diário Oficial de Minas Gerais**, 05 maio. 2008.

MIRANDA, Cláudia; *et al.* Uso e qualidade da água na microbacia hidrográfica do rio Parafuso (Moju, Pará, Brasil). **Revista Recursos Hídricos**. v. 38, n. 2, 51-62, 2017.

NASCIMENTO, Thays Valente; FERNANDES, Lindemberg Lima. Mapeamento de uso e ocupação do solo em uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia. **Ciência e Natura**. v. 39, n. 1, 170-178, 2017.

OLIVEIRA, Brunna Stefanny Sangel de; CUNHA, Alan Calvalcanti de. Correlação entre qualidade da água e a variabilidade da precipitação no sul do estado do Amapá. **Revista Ambiente & Água**. v. 9 n. 2, 261-275, 2014.

OLIVEIRA, Josiani Cordova de; *et al.* Análise da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Pará – MG. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH)**, 20, 2017, Santa Catarina. Florianópolis: ABRH, Artigos, p.1-8.

PIERONI, Juan Pedro; RODRIGUES BRANCO; Karina Grisólia; INACHVILI, Irakli; FERREIRA, Gilda Carneiro. Monitoramento sazonal da qualidade da água, na sub-bacia hidrográfica do Córrego Água Limpa, em seu trecho afetado pela mineração de níquel, no município de Pratápolis, Minas Gerais. **Geociências**, v. 34, n. 3, 402-410, 2015.

PONTES, Patrícia Procópio; MARQUES, Andréa Rodrigues; MARQUES, Guilherme Fernandes. Efeito do uso e ocupação do solo na qualidade da água na micro bacia do Córrego Banguelo – Contagem. **Revista Ambiente & Água**. v. 7. n. 3, 183-194, 2012.

RITTER, L.G; *et al.* Manejo da micro bacia do Lajeado Pardo. **Holos**. v. 6, n. 31, 123-130, 2015.

ROCHA, César Henrique Barra; PEREIRA, Amanda Maria. Análise multivariada para seleção de parâmetros de monitoramento em manancial de Juiz de Fora, Minas Gerais. **Revista Ambiente & Água**. v. 11, n. 1, 2016.

SANTOS, S.A; GASTALDINI, M.C.C; PIVETTA, G.G; SCHMIDT FILHO, O. Qualidade da água na bacia hidrográfica urbana Cancela Tamandaí, Santa Maria/RS. **Sociedade e Natureza**. v.30. n. 2, 23-44, 2018.

SANTOS, G.O; HERNANDEZ, F.B.T. Uso do solo e monitoramento dos recursos hídricos no córrego Ipê, Ilha Solteira, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.17. n. 1, 60-68, 2012.

SOUZA, Marielle Medeiros; GASTALDINI, Maria do Carmo Cauduro. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 19. n.3, 263-274, 2014.

SILVA, Humberson Rocha. **Sistema de alerta e relação de variáveis ambientais com o progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro**. 2018. 162 f. Tese (Doutorado em Agronomia (Fitopatologia)) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SILVA, V. R. *et al.* Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, 2003.

TECNOLOGIA EM SISTEMAS ESPACIAIS LTDA. **Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Pará**. Minas Gerais, 2006. 107 p.

TRINDADE, Ana Laura Cerqueira; *et al.* Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, estado de Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 22. n. 1, 13-24, 2017.

VANZELA, L. S; HERNANDEZ, F.B.T; FRANCO, R.A.M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14. n. 1, 55-64, 2009.

YAMAMOTO, Jorge Kazuo; LANDIM, Paulo M. Barbosa. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 216p.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Precipitação média nos períodos seco e chuvoso (mm) com base no monitoramento entre 1997 e 2018

Estação	Período Chuvoso	Período Seco	Total
EP01	1185,8	188,8	1374,6
EP02	1223,2	184,7	1407,9
EP03	1212,4	174,0	1386,4
EP04	1274,7	173,7	1448,4
EP05	1223,1	160,2	1383,3
EP06	1128,9	146,6	1275,6
EP07	1136,3	165,1	1301,4
EP08	1180,2	178,0	1358,1
EP09	1091,9	135,6	1227,4
EP10	1276,0	136,1	1412,1
EP11	965,3	129,3	1094,6
EP12	1025,1	142,3	1167,5
EP13	1052,2	130,1	1182,3
EP14	1208,6	203,0	1411,5
EP15	1155,7	171,5	1327,2

APÊNDICE B – Valores médios das variáveis de caracterização da qualidade da água no período seco (referência: 1997 a 2018)

Ponto Amostragem	pH	Temperatura	DBO	OD	Turbidez	SDT	Nitrogenio	Fosforo	Coliformes Termotolerantes	Aluminio	Arsenio	Bario total	Cadmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cromo total	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercurio total	Niquel total	Zinco total
PA001	6,77	17,89	2,00	8,17	31,35	32,69	0,12	0,03	1663,91	0,0944	0,0005	0,0631	0,0005	0,0053	0,0040	0,0400	0,1691	0,0587	0,2000	0,0041	0,0234
PA002	6,39	18,61	2,46	5,20	13,64	61,23	0,84	0,08	909,47	0,0961	0,0005	0,0837	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,4213	0,1950	0,2000	0,0040	0,0200
PA003	6,88	20,39	2,00	7,74	30,66	46,50	0,11	0,04	1960,80	0,0946	0,0005	0,0679	0,0005	0,0053	0,0040	0,0400	0,2345	0,0700	0,2000	0,0040	0,0263
PA004	6,64	18,82	2,06	7,24	11,29	52,25	0,18	0,12	772,00	0,0948	0,0005	0,0333	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,2269	0,0595	0,2000	0,0040	0,0204
PA005	6,79	22,86	2,00	7,27	7,40	40,07	0,11	0,03	1423,33	0,0966	0,0005	0,0608	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,2498	0,0243	0,2000	0,0040	0,0225
PA007	6,88	20,49	3,40	7,13	14,12	65,68	0,87	0,17	63230,77	0,0937	0,0005	0,0754	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,3249	0,0798	0,2000	0,0041	0,0261
PA009	6,82	21,28	21,08	6,35	20,69	98,52	2,21	0,45	134569,23	0,1056	0,0005	0,0717	0,0005	0,0052	0,0040	0,0400	0,2922	0,0752	0,2000	0,0041	0,0338
PA010	7,27	20,90	12,52	4,26	21,59	188,35	8,66	0,69	59963,64	0,0963	0,0007	0,0494	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,5308	0,2577	0,2000	0,0046	0,0339
PA011	7,10	22,51	2,97	6,91	7,75	99,93	0,44	0,18	1696,25	0,0953	0,0005	0,0625	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,3590	0,0513	0,2000	0,0041	0,0238
PA013	7,17	23,50	2,12	7,73	7,40	57,72	0,16	0,08	624,17	0,0987	0,0005	0,0623	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,2850	0,0294	0,2000	0,0041	0,0236
PA015	7,00	20,79	2,00	7,72	19,16	55,04	0,11	0,04	334,33	0,0968	0,0005	0,0756	0,0005	0,0050	0,0040	0,0429	0,2452	0,0251	0,2000	0,0040	0,0248
PA017	7,25	20,96	2,00	6,64	20,67	108,37	0,13	0,03	245,42	0,0974	0,0005	0,0697	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,1738	0,0657	0,2000	0,0045	0,0289
PA019	7,25	23,45	2,06	7,69	10,15	60,04	0,12	0,04	172,63	0,0992	0,0006	0,0669	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,1987	0,0279	0,2000	0,0044	0,0271
PA020	6,97	17,75	26,53	2,06	38,71	159,44	11,75	0,81	99411,54	0,0985	0,0006	0,0999	0,0005	0,0051	0,0040	0,0400	0,9193	0,1824	0,2000	0,0040	0,0276
PA021	7,32	19,82	2,00	7,50	15,24	117,00	0,14	0,05	1178,33	0,0958	0,0006	0,0408	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,1525	0,0414	0,2000	0,0040	0,0235
PA022	6,67	22,21	2,00	7,07	16,76	56,28	0,16	0,09	588,31	0,0964	0,0006	0,0647	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,2671	0,0350	0,2000	0,0040	0,0203
PA023	7,00	19,50	2,00	7,70	10,01	50,78	0,10	0,02	DI	0,0905	0,0010	0,0274	0,0005	0,0050	0,0040	0,0500	0,3999	0,0411	0,2000	0,0040	0,0200
PA025	7,16	21,93	3,15	6,51	10,72	106,67	0,96	0,09	DI	0,0928	0,0010	0,0883	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,3007	0,0981	0,2000	0,0040	0,0254
PA026	6,76	19,59	2,40	7,81	15,08	54,57	0,27	0,06	7740,00	0,0927	0,0006	0,0313	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,2879	0,0502	0,2000	0,0040	0,0212
PA028	6,68	21,90	2,00	7,62	9,39	45,57	0,12	0,03	4734,44	0,0998	0,0006	0,0267	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,2396	0,0191	0,2000	0,0040	0,0200
PA029	7,08	18,67	2,18	7,88	8,65	52,33	0,12	0,04	#DIV/0!	0,0938	0,0010	0,0291	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,3848	0,0435	0,2000	0,0040	0,0200
PA031	6,92	20,24	2,00	7,83	13,01	59,00	0,10	0,05	1557,14	0,0940	0,0006	0,0327	0,0005	0,0050	0,0040	0,0467	0,2097	0,0864	0,2000	0,0041	0,0278
PA032	6,93	22,77	2,00	7,63	27,64	65,29	0,11	0,04	3412,50	0,0993	0,0006	0,0453	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,2325	0,0436	0,2000	0,0041	0,0226
PA034	6,80	22,09	63,94	1,20	63,09	456,00	11,66	0,75	146000,00	0,1540	0,0007	0,0535	0,0005	0,0062	0,0041	0,0414	1,7853	0,1618	0,2000	0,0047	0,0413
PA036	6,64	21,34	2,00	7,95	10,76	34,36	0,11	0,03	347,50	0,0943	0,0006	0,0176	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,1853	0,0400	0,2000	0,0040	0,0200
PA040	6,70	20,70	2,00	7,88	15,56	44,50	0,11	0,03	1100,00	0,0929	0,0006	0,0298	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,2143	0,0396	0,2000	0,0040	0,0200
PA042	7,10	18,23	2,04	7,64	10,37	64,07	0,10	0,03	766,25	0,0929	0,0006	0,0222	0,0005	0,0050	0,0040	0,0437	0,4948	0,0493	0,2000	0,0040	0,0200
PA044	7,18	20,83	2,00	7,97	7,59	63,43	0,10	0,02	433,75	0,0935	0,0006	0,0122	0,0005	0,0050	0,0040	0,0427	0,2356	0,0207	0,2000	0,0040	0,0200

Média corrigida com menos de doze dados

DI Dado indisponível

APÊNDICE C – Valores médios das variáveis de caracterização da qualidade da água no período chuvoso (referência: 1997 a 2018)

Ponto Amostragem	pH	Temperatura	DBO	OD	Turbidez	SDT	Nitrogenio	Fosforo	Coliformes Termotolerantes	Alumínio	Arsenio	Bario total	Cadmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cromo total	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercurio total	Niquel total	Zinco total
PA001	6,66	21,97	2,00	7,49	81,69	40,47	0,11	0,03	4304,38	0,1009	0,0006	0,0618	0,0005	0,0079	0,0040	0,0400	0,2740	0,1103	0,2000	0,0052	0,0310
PA002	6,42	23,14	2,63	4,19	20,78	65,41	0,51	0,07	2439,58	0,1031	0,0005	0,1001	0,0005	0,0053	0,0040	0,0400	0,8598	0,3894	0,2000	0,0050	0,0255
PA003	6,84	24,10	2,04	6,98	87,35	53,92	0,10	0,06	5714,24	0,2343	0,0005	0,0785	0,0006	0,0076	0,0040	0,0400	0,4030	0,1094	0,2000	0,0056	0,0286
PA004	6,63	23,62	2,05	6,47	36,83	60,72	0,22	0,12	2457,92	0,1087	0,0005	0,0579	0,0005	0,0056	0,0040	0,0400	0,4568	0,1707	0,2000	0,0042	0,0241
PA005	6,73	26,20	2,00	6,49	24,60	53,49	0,11	0,03	2106,33	0,1662	0,0007	0,0656	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,3428	0,0431	0,2000	0,0041	0,0299
PA007	6,97	24,84	3,00	6,45	44,23	75,49	0,63	0,16	63928,13	0,1408	0,0005	0,0859	0,0005	0,0057	0,0040	0,0400	0,5161	0,1238	0,2000	0,0042	0,0355
PA009	6,84	24,97	18,56	5,61	25,85	105,57	1,76	0,38	132906,25	0,1607	0,0005	0,0720	0,0005	0,0052	0,0040	0,0400	0,3888	0,1017	0,2000	0,0043	0,0401
PA010	7,22	24,69	11,71	4,69	137,48	151,31	6,33	0,61	72434,62	0,1463	0,0007	0,0711	0,0005	0,0084	0,0041	0,0400	0,4618	0,2516	0,2000	0,0105	0,0508
PA011	7,00	26,20	3,06	5,85	30,44	101,94	0,29	0,18	5220,65	0,1152	0,0008	0,0785	0,0005	0,0059	0,0040	0,0400	0,4997	0,0963	0,2000	0,0053	0,0388
PA013	7,04	27,09	2,10	6,88	32,61	71,00	0,15	0,09	3660,33	0,1428	0,0007	0,0725	0,0005	0,0056	0,0040	0,0400	0,5046	0,0629	0,2000	0,0046	0,0279
PA015	6,97	25,15	2,05	6,89	51,50	67,06	0,12	0,05	1091,40	0,4109	0,0005	0,0891	0,0005	0,0059	0,0040	0,0400	0,4277	0,0509	0,2000	0,0043	0,0289
PA017	7,10	25,27	2,01	5,22	56,56	113,91	0,15	0,04	1784,33	0,1054	0,0006	0,0708	0,0005	0,0056	0,0040	0,0400	0,5198	0,1420	0,2000	0,0047	0,0372
PA019	7,15	27,26	2,16	6,77	48,71	71,16	0,12	0,06	1751,67	0,2051	0,0007	0,0779	0,0005	0,0055	0,0040	0,0400	0,4300	0,0814	0,2000	0,0049	0,0279
PA020	6,95	22,77	21,53	2,46	92,80	148,56	8,39	0,54	103250,00	0,1039	0,0006	0,1087	0,0005	0,0061	0,0040	0,0400	0,5858	0,2084	0,2000	0,0047	0,0387
PA021	7,10	24,05	2,00	6,13	31,73	130,84	0,18	0,07	3461,54	0,1022	0,0006	0,0606	0,0005	0,0051	0,0040	0,0400	0,3455	0,0889	0,2000	0,0041	0,0289
PA022	6,71	25,43	2,30	6,07	46,96	66,17	0,19	0,12	18176,92	0,1081	0,0006	0,0818	0,0005	0,0057	0,0040	0,0400	0,3823	0,0632	0,2000	0,0040	0,0218
PA023	6,94	23,30	2,01	6,80	51,62	64,00	0,10	0,04	3300,00	0,1342	0,0010	0,0350	0,0005	0,0050	0,0040	0,0443	0,5755	0,0961	0,2000	0,0041	0,0206
PA025	7,21	26,07	3,61	5,70	19,65	119,40	0,58	0,09	DI	0,1000	0,0010	0,0764	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,4194	0,0897	0,2000	0,0040	0,0211
PA026	6,77	23,94	2,49	6,81	71,82	74,69	0,28	0,09	19888,89	0,1047	0,0006	0,0474	0,0005	0,0053	0,0040	0,0400	0,4877	0,1122	0,2000	0,0049	0,0215
PA028	6,72	24,89	2,00	6,67	29,21	56,13	0,14	0,04	5903,33	0,1764	0,0006	0,0364	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,3182	0,0551	0,2000	0,0040	0,0223
PA029	7,09	23,14	2,19	6,58	58,64	75,73	0,19	0,06	7900,00	0,1008	0,0010	0,0419	0,0005	0,0054	0,0040	0,0410	0,6216	0,1000	0,2000	0,0047	0,0239
PA031	6,93	25,27	2,03	6,63	33,78	68,47	0,12	0,05	4528,57	0,1223	0,0007	0,0418	0,0005	0,0050	0,0040	0,0414	0,6103	0,1707	0,2000	0,0040	0,0255
PA032	7,01	27,23	2,00	6,61	50,58	73,81	0,10	0,07	11077,78	0,1254	0,0006	0,0543	0,0005	0,0054	0,0040	0,0400	0,5500	0,0897	0,2000	0,0040	0,0229
PA034	6,81	25,65	36,53	1,18	52,97	347,46	8,53	0,49	160000,00	0,1495	0,0005	0,0449	0,0005	0,0053	0,0040	0,0421	1,7119	0,1282	0,2000	0,0041	0,0309
PA036	6,81	25,76	2,00	7,11	23,49	44,88	0,10	0,02	4259,00	0,1000	0,0006	0,0227	0,0005	0,0050	0,0040	0,0589	0,3809	0,0683	0,2000	0,0040	0,0203
PA040	6,68	24,54	2,00	6,77	30,24	52,81	0,12	0,04	2329,00	0,1050	0,0006	0,0383	0,0005	0,0050	0,0040	0,0400	0,4279	0,0703	0,2000	0,0040	0,0226
PA042	6,88	23,11	2,00	6,44	72,14	74,19	0,12	0,03	3523,75	0,1206	0,0006	0,0391	0,0005	0,0052	0,0040	0,0400	0,4595	0,1626	0,2000	0,0044	0,0244
PA044	7,10	25,13	2,00	7,02	27,23	81,38	0,11	0,03	2492,22	0,1000	0,0006	0,0138	0,0005	0,0050	0,0040	0,0436	0,4711	0,0488	0,2000	0,0040	0,0235

Média corrigida com menos de doze dados

DI Dado indisponível