UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO – UFES

CENTRO TECNOLÓGICO – CT

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM REDE NACIONAL – PROFÁGUA

HENRIQUE DE OLIVEIRA GANEM

SIMULAÇÃO DE QUALIDADE DE ÁGUA COM INCORPORAÇÃO DE ANÁLISE DE INCERTEZA – ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NOVO

VITÓRIA - ES
2025

HENRIQUE DE OLIVEIRA GANEM

SIMULAÇÃO DE QUALIDADE DE ÁGUA COM INCORPORAÇÃO DE ANÁLISE DE INCERTEZA – ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NOVO

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos em Rede Nacional do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Gestão e Regulação dos Recursos Hídricos, na área de concentração de Instrumentos da Política de Recursos Hídricos.

Orientador:

Prof. Dr. José Antônio Tosta dos Reis

Vitória - ES
2025

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

GANEM, HENRIQUE, 1991-
G195s Simulação de qualidade de água com incorporação de análise de incerteza : Estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Novo / HENRIQUE GANEM. - 2025.
131 f. : il.

Orientador: José Antônio dos Reis.
Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos em Rede) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Modelagem matemática. 2. Método de Monte Carlo. 3. Gerenciamento de recursos hídricos. 4. Padrões de qualidade de água. I. dos Reis, José Antônio. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628

Ata da Vigésima (20ª) Sessão de Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do Programa Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua) do Centro Tecnológico (CT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), do aluno **Henrique de Oliveira Ganem**, candidato ao grau de Mestre.

Às oito horas do dia vinte e oito de março de dois mil e vinte e cinco (28/03/2025), na sala de reuniões do DEA, no prédio do CT-VIII/UFES, eu, Prof. José Antônio Tosta dos Reis, presidi a Sessão e dei início aos trabalhos, apresentando ao público presente ao aluno candidato ao título de Mestre, **Henrique de Oliveira Ganem**, bem como a Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso – TCC (Técnica), composta pelos seguintes membros: Prof. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça - Examinador Interno – ProfÁgua/UFES e Prof.ª Ana Silvia Pereira Santos – Examinadora Externa – UERJ/DESMA. Na sequência, passei a palavra ao candidato, que, em trinta minutos, apresentou seu TCC intitulado **"SIMULAÇÃO DE QUALIDADE DE ÁGUA COM INCORPORAÇÃO DE ANÁLISE DE INCERTEZA – ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NOVO".** Dando prosseguimento aos trabalhos de defesa do TCC, convidei o membro titular da Banca Examinadora para dirigir seus comentários e observações sobre o Trabalho, na forma de arguição do candidato. Seguindo, passei a palavra à Examinadora Externa do candidato para que tecesse seus comentários. Antes de encerrar esta parte da Sessão de Defesa, abri a palavra ao público presente. Dando sequência, convidei os membros da Banca Examinadora a reunir, em separado, para deliberação sobre a Defesa. Como resultado, informei ao candidato e aos demais presentes a decisão da Banca Examinadora; ou seja, a APROVAÇÃO do TCC. Por fim, alertei que ao candidato somente terá direito ao título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos após entrega à Secretária do Programa a versão final do seu TCC, em meio digital, com as correções apontadas pela Banca Examinadora, cumpridos todos os trâmites exigidos pelo Regimento do ProfÁgua, bem como a homologação do resultado da defesa pelo Colegiado Acadêmico do ProfÁgua/UFES. Por fim, declarada encerrada a Sessão, eu, José Antônio Tosta dos Reis, Professor do Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), do Centro Tecnológico, da UFES, lavrei a presente ata, que irá assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo mestrando.

gov.br Documento assinado digitalmente
JOSE ANTONIO TOSTA DOS REIS
Data: 01/04/2025 10:00:56-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. José Antônio Tosta dos Reis
Orientador - ProfÁgua/UFES

gov.br Documento assinado digitalmente
ANTONIO SERGIO FERREIRA MENDONCA
Data: 03/04/2025 22:26:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça
Examinador Interno – ProfÁgua/UFES

gov.br Documento assinado digitalmente
ANA SILVIA PEREIRA SANTOS
Data: 02/04/2025 06:11:58-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.ª Ana Silvia Pereira Santos
Examinadora Externa – UERJ/DESMA

gov.br Documento assinado digitalmente
HENRIQUE DE OLIVEIRA GANEM
Data: 01/04/2025 11:35:33-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Henrique de Oliveira Ganem
Mestrando

Vitória, 28 de março de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL
EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS
PROFÁGUA

SIMULAÇÃO DE QUALIDADE DE ÁGUA COM INCORPORAÇÃO DE ANÁLISE DE INCERTEZA – ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NOVO

Henrique de Oliveira Ganem

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
JOSE ANTONIO TOSTA DOS REIS
Data: 01/04/2025 10:00:56-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.ª José Antônio Tosta dos Reis
Orientador - ProfÁgua/UFES

Documento assinado digitalmente
ANTONIO SERGIO FERREIRA MENDONCA
Data: 03/04/2025 22:26:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça
Examinador Interno - ProfÁgua/UFES

Documento assinado digitalmente
ANA SILVIA PEREIRA SANTOS
Data: 02/04/2025 06:11:58-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.ª Ana Silvia Pereira Santos
Examinadora Externa – UERJ/DESMA

Diogo Costa Buarque
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória, ES, 28 de março de 2025

“A água de boa qualidade é como a saúde ou a liberdade: só tem valor quando acaba.”

João Guimarães Rosa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015. Agradeço o apoio técnico científico aportado até o momento.

AGRADECIMENTOS

Há um grande sentimento em mim de dever cumprido ao atingir mais esta etapa concluída.

Primeiramente agradeço a Deus por ter me permitido essa oportunidade incrível de terminar o curso e aprender muito durante ele.

Aos professores que tanto me proporcionaram conhecimento, em especial ao meu orientador Professor Dr. José Antônio Tosta dos Reis, pela disponibilidade e atenção desde a minha entrada no curso.

Aos meus pais, Julio e Célia, sem eles jamais seria possível, todos os meus passos são graças a eles. Agradeço ao meu pai por todo o conhecimento que me proporcionou ao longo de toda a vida, é muito orgulho ser filho de uma grande referência na engenharia!

À minha mãe, obrigada por todo o empenho, ser a base para todas as minhas realizações, e me mostrar que a dedicação e o estudo são o caminho para um futuro que desejo.

À minha irmã Lívia, que além de me dar grande suporte no trabalho para que eu conseguisse realizar este curso, sempre um exemplo de profissional e uma grande companheira. Com a chegada da tão esperada Manuela, tenho certeza, será também uma grande mãe.

À minha namorada Maria Izabel, exemplo de garra e determinação, uma mulher forte que me mostra todos os dias que os nossos objetivos estão ao alcance da nossa vontade.

À minha família e meus amigos.

RESUMO

Os modelos matemáticos de qualidade da água, ferramentas capazes de simular a capacidade de autodepuração dos cursos d'água, ganharam relevância no gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que podem auxiliar na prevenção de impactos futuros e no processo de tomada de decisões no âmbito de bacias hidrográficas. No entanto, a seleção dos parâmetros e coeficientes que conformam um modelo associa incertezas às simulações, uma vez que a sua obtenção pode ser complexa, principalmente em se tratando da avaliação da qualidade de água. Neste contexto, a associação entre análise de incertezas e modelagem matemática de qualidade de água superficiais pode constituir relevante ferramenta de apoio ao gerenciamento de recursos hídricos. O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a qualidade dos cursos d´água da bacia hidrográfica do rio Novo, importante sistema hídrico da porção sul do Estado do Espírito Santo, com incorporação da análise de incerteza conduzida por meio do método de Monte Carlo ao modelo matemático de qualidade da água QUAL-UFMG. Foram realizados grupos com 50, 100, 500, 1000, 2000 e 5000 simulações dos perfis dos parâmetros oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, fósforo inorgânico, fósforo orgânico, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e coliformes termotolerntes. Os resultados das simulações de qualidade de água com incorporação da análise de incerteza indicaram que o rio Pardo e o seu afluente córrego Piabinha não apresentam, ao longo da totalidade das suas extensões, concentrações compatíveis com os padrões de qualidade definidos para os parâmetros OD, DBO e coliformes termotolerantes em rios classe 2, conforme resolução n^0 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Adicionalmente, relevante observar que a quantidade de simulações conduzidas não afetou os resultados de maneira relevante, ainda que as curvas de frequências acumuladas tenham se apresentado mais próximas entre si com o aumento do número de simulações realizadas.

Palavras-chave: Modelagem matemática; método de Monte Carlo; gerenciamento de recursos hídricos; padrões de qualidade.

CONSIDERAÇÕES PARA O SISTEMA NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS (SINGREH) – SÍNTESE

Este trabalho enquadra-se na área de concentração de Instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, dentro da linha de pesquisa Ferramentas Aplicadas aos Instrumentos de Gestão do Recursos Hídricos, definidas para o programa de Pós-Graduação Stricto Senso em Gestão e Regulação dos Recursos Hídricos em Rede Nacional – ProfÁgua. O propósito deste trabalho é a análise da incorporação da metodologia da análise de incerteza ao processo de modelagem da qualidade da água.

A modelagem da qualidade da água é uma importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. O conhecimento dos impactos gerados isoladamente e pelo conjunto de usuários no âmbito de uma bacia hidrográfica garante a disponibilidade de água em quantidade e qualidade a todos os usuários.

Entretanto, a aleatoriedade do ambiente, os erros de amostragem e medição, a simplificação de processos hidrológicos, a incapacidade de se especificar valores exatos dos parâmetros do modelo e incertezas nos dados de calibração geram incertezas na entrada de dados. Neste contexto, processos determinísticos de modelagem não conseguem reproduzir todas essas aleatoriedades, o que pode gerar questionamentos sobre os resultados da modelagem.

Dessa forma, incorporando métodos de análise de incerteza à modelagem de qualidade de água é possível mitigar os referidos questionamentos, uma vez que todos esses pontos de incerteza são abrangidos pelo processo de modelagem. Com isso, os resultados não são mais determinísticos, mas resultados estatísticos dentro das condições simuladas em fronteiras de controle pré-estabelecidas.

Considerando essa abordagem, o presente trabalho optou por usar a bacia do Rio Novo, na região sul do Estado do Espírito Santo, Brasil, como área de estudo para realizar a modelagem de qualidade de água com a incorporação da análise de incerteza.

Como resultado, foi gerada uma planilha eletrônica amigável que poderá ser facilmente adaptada a quaisquer outras bacias, conformando um caminho para auxiliar a gestão dos recursos hídricos.

ABSTRACT

Mathematical models of water quality, which are tools capable of simulating the self-purification capacity of watercourses, have gained relevance in water resource management, as they can help prevent future impacts and support decision-making processes within watersheds. However, selecting the parameters and coefficients that make up a model introduces uncertainties into the simulations, as obtaining them can be complex, especially when evaluating water quality. In this context, the combination of uncertainty analysis and mathematical modeling of surface water quality can serve as a valuable tool for water resource management.

This study aims to assess the water quality of the Novo River watershed, an important water system in the southern region of the state of Espírito Santo, incorporating uncertainty analysis through the Monte Carlo method into the QUAL-UFMG water quality mathematical model. Groups of 50, 100, 500, 1000, 2000, and 5000 simulations were conducted for the profiles of the following parameters: dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, inorganic phosphorus, organic phosphorus, organic nitrogen, ammoniacal nitrogen, nitrite, nitrate, and thermotolerant coliforms.

The results of the water quality simulations incorporating uncertainty analysis indicated that the Pardo River and its tributary, the Piabinha stream, do not maintain concentrations compatible with the quality standards defined for DO, BOD, and thermotolerant coliforms in Class 2 rivers along their entire lengths, according to Resolution No. 357/2005 of the National Environmental Council. Additionally, it is noteworthy that the number of simulations conducted did not significantly affect the results, although the cumulative frequency curves became closer to each other as the number of simulations increased.

Key words: Mathematical modeling; Monte Carlo method; Water resource management; Quality standards.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa da bacia hidrográfica do rio Novo. 44

Figura 2: Diagrama Unifilar da bacia hidrográfica do Rio Novo. 46

Figura 3: Etapas para a condução da análise de incerteza pelo Método de Monte Carlo. Fonte: adaptado de Von Sperling (2007). 50

Figura 4: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o rio Novo. 55

Figura 5: Perfil da DBO simulada para o rio Novo. 56

Figura 6: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o rio Novo. 56

Figura 7: Perfil do nitrogênio simulado para o rio Novo. 56

Figura 8: Perfil do fósforo simulado para o rio Novo. 56

Figura 9: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o córrego Piabinha. 57

Figura 10: Perfil de DBO simulado para o córrego Piabinha. 57

Figura 11: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o córrego Piabinha. 57

Figura 12: Perfil de nitrogênio simulado para o córrego Piabinha. 58

Figura 13: Perfil de fósforo simulado para o córrego Piabinha. 58

Figura 14: Diagramas tipo Box-plot para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1000 simulações. 61

Figura 15: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1000 simulações. 61

Figura 16: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1000 simulações. 62

Figura 17: Histograma de frequência para OD no rio Novo para conjunto com 1000 simulações. 62

Figura 18: Histograma de frequência para DBO no rio Novo para conjunto com 1000 simulações. 63

Figura 19: Histograma de frequência para coliformes termotolerantes no rio Novo para conjuntos com 1000 simulações. 63

Figura 20: Histogramas de frequência para as concentrações de OD consideradas 50 (a), 100 (b), 500 (c), 1.000(d), 2.000(e) e 5000(f) simulações de qualidade de água. 66

Figura 21: Histogramas de frequência para as concentrações de DBO consideradas 50 (a), 100 (b), 500 (c), 1.000(d), 2.000(e) e 5.000(f) simulações de qualidade de água. 67

Figura 22: Histogramas de frequência para as concentrações de coliformes termotolerantes consideradas 50 (a), 100 (b), 500 (c), 1.000(d), 2.000(e) e 5.000(f) simulações de qualidade de água. 68
Figura 23: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o córrego Jacarati. 81
Figura 24: Perfil de DBO simulado para o córrego Jacarati. 81
Figura 25: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o córrego Jacarati. 82
Figura 26: Perfil de nitrogênio simulado para o córrego Jacarati. 82
Figura 27: Perfil de fósforo simulado para o córrego Jacarati. 82
Figura 28: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o rio Iconha. 83
Figura 29: Perfil de DBO simulado para o rio Iconha. 83
Figura 30: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o rio Iconha. 83
Figura 31: Perfil de nitrogênio simulado para o rio Iconha. 84
Figura 32: Perfil de fósforo simulado para o rio Iconha. 84
Figura 33: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o córrego Comporta. 84
Figura 34: Perfil de DBO simulado para o córrego Comporta. 85
Figura 35: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o córrego Comporta. 85
Figura 36: Perfil de nitrogênio simulado para o córrego Comporta. 85
Figura 37: Perfil de fósforo simulado para o córrego Comporta. 86
Figura 38: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o córrego Pau D´Álho. 86
Figura 39: Perfil de DBO simulado para o córrego Pau D´Álho. 86
Figura 40: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o córrego Pau D´Álho. . 87
Figura 41: Perfil de nitrogênio simulado para o córrego Pau D´Álho. 87
Figura 42: Perfil de fósforo simulado para o córrego Pau D´Álho. 87
Figura 43: Diagramas tipo *Box-plot* para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto de 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 88
Figura 44: Diagramas tipo *Box-plot* para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto de 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 88
Figura 45: Diagramas tipo *Box-plot* para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto de 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 89
Figura 46: Diagramas tipo Box-plot para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto de 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 89
Figura 47: Diagramas tipo Box-plot para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto de 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 90
Figura 48: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 90

Figura 49: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 91

Figura 50: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 91

Figura 51: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 92

Figura 52: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 92

Figura 53: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 93

Figura 54: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 93

Figura 55: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 94

Figura 56: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 94

Figura 57: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 95

Figura 58: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria..... 95

Figura 59: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria..... 96

Figura 60: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria..... 96

Figura 61: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 97

Figura 62: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 97

Figura 63: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 98

Figura 64: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria..... 98

Figura 65: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria..... 99

Figura 66: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria..... 99

Figura 67: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 100

Figura 68: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 100

Figura 69: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 101

Figura 70: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria..... 101

Figura 71: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria..... 102

Figura 72: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria..... 102

Figura 73: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 103

Figura 74: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 103

Figura 75: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 104

Figura 76: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria..... 104

Figura 77: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria..... 105

Figura 78: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria..... 105

Figura 79: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 106

Figura 80: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 106

Figura 81: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria..... 107

Figura 82: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 107

Figura 83: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 108

Figura 84: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 108

Figura 85: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria. ... 109

Figura 86: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. ... 109

Figura 87: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria. ... 110

Figura 88: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 110

Figura 89: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 111

Figura 90: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 111

Figura 91: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria. ... 112

Figura 92: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. ... 112

Figura 93: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria 113

Figura 94: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 113

Figura 95: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 114

Figura 96: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 114

Figura 97: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 115

Figura 98: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 115

Figura 99: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 116

Figura 100: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 116

Figura 101: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 117

Figura 102: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 117

Figura 103: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 118

Figura 104: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 118

Figura 105: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 119

Figura 106: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 119

Figura 107: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 120

Figura 108: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 120

Figura 109: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 121

Figura 110: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 121

Figura 111: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 122

Figura 112: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 122

Figura 113: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 123

Figura 114: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 123

Figura 115: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 124

Figura 116: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 124

Figura 117: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. 125

Figura 118: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 125

Figura 119: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 126

Figura 120: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 126

Figura 121: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 127

Figura 122: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 127

Figura 123: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 128

Figura 124: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria. 128

Figura 125: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria. 129

Figura 126: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria. 129

Figura 127: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 130

Figura 128: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 130

Figura 129: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria. 131

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de entrada dos afluentes para as simulações de qualidade de água na bacia do Rio Novo. 50

Tabela 2 – Dados de entrada dos lançamentos para as simulações de qualidade de água na bacia do Rio Novo. 51

Tabela 3 – Percentuais de variação a serem empregados para a geração aleatória dos dados de entrada do modelo. 53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Evolução histórica dos modelos de qualidade água. 31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 20

2 OBJETIVOS 23

3 REVISÃO DA LITERATURA 24

3.1 O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS 24

3.2 O CONTROLE DO LANÇAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS E A QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS 27

3.3 OS MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA 30

3.4 A ANÁLISE DE INCERTEZAS INCORPORADA AO MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA 39

4 METODOLOGIA 43

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 43

4.2 ÁREA DE ESTUDO 44

4.3 MODELO MATEMÁTICO DE QUALIDADE DE ÁGUA 46

4.4 MÉTODO DE ANÁLISE DE INCERTEZA 49

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 55

5.1 SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA 55

5.2 SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA COM A INCORPORAÇÃO DA ANÁLISE DE INCERTEZA 60

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE A MODELAGEM DETERMINÍSTICA E A SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA 69

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 71

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73

8 APÊNDICE I 81

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1960 a poluição dos cursos hídricos se tornou uma séria ameaça à saúde humana em todo o mundo. As principais causas desse problema são o crescimento populacional acelerado e o desenvolvimento econômico sem fundamentação nas premissas do desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, grandes quantidades de águas residuárias têm sido lançadas nos cursos d´água sem prévio tratamento, muitas vezes superando o potencial de autodepuração do sistema aquático atingido (REN et al., 2013).

Os modelos matemáticos de qualidade da água, ferramentas capazes de simular a capacidade de autodepuração dos cursos d'água, ganharam relevância no gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que podem prevenir impactos futuros e auxiliar no processo de tomada de decisões no âmbito de bacias hidrográficas. A seleção de um modelo, no entanto, requer uma correspondência com as características físicas do curso de água em estudo, a compreensão das suas limitações, a confiabilidade dos dados de entrada e a análise das correspondentes incertezas (MENEZES; OLIVEIRA; SALLA, 2016).

Segundo Lindim et al. (2011), a modelagem matemática como ferramenta complementar à gestão dos recursos hídricos se torna um instrumento amplamente aceito para o correto diagnóstico de problemas de qualidade da água e posterior desenvolvimento de estratégias de resolução.

Cho et al. (2004), por sua vez, observam que nas condições usuais de um país em desenvolvimento é difícil a realização de muitos investimentos sem a adequada avaliação dos seus resultados. Assim, técnicas de modelagem matemática podem ser utilizadas para desenvolver as estratégias da gestão ambiental.

Ainda que a modelagem matemática seja amplamente aceita pela comunidade científica, para que um modelo matemático de qualidade da água produza respostas satisfatórias, os parâmetros que descrevem o sistema hídrico modelado devem ser obtidos de forma a traduzir, da forma mais fiel possível, o sistema real (SALAS; SHIN, 1999). No entanto, a seleção dos referidos parâmetros associa incertezas às simulações, uma vez que a sua obtenção pode ser complexa, principalmente em se tratando de parâmetros de qualidade de água.

Segundo Renard et al. (2010), a modelagem hidrológica [incluindo-se aqui a modelagem da qualidade de água] é afetada por quatro fontes de incerteza: incerteza de entrada, como os erros de amostragem e medição nas estimativas de precipitação e vazão da bacia; incerteza de saída, como os erros que afetam as estimativas de escoamento; incerteza estrutural, que é decorrente da representação concentrada e simplificada de processos hidrológicos; e incerteza paramétrica, que reflete a incapacidade de se especificar valores exatos dos parâmetros do modelo devido ao comprimento finito e incertezas nos dados de calibração, compreensão imperfeita do processo, aproximações do modelo, etc.

Von Sperling (2007), por sua vez, observa que dentre os componentes responsáveis pela introdução de incerteza nos dados de entrada estão a própria medição, calibração ou análise de laboratório; erros na transcrição ou transferência de resultados de análise ou de medições; e erros na estimativa de dados de entrada futuros, no caso de um modelo simular condições futuras.

Nesse contexto, segundo Beven, Buytaert e Smith (2012), diante do conhecimento insuficiente e da aleatoriedade natural, a incerteza torna-se uma parte inerente da modelagem da qualidade de água em bacias hidrográficas. Dessa forma, em função da função da variabilidade, aleatoriedade e incertezas associadas ao emprego de modelos matemáticos, o comportamento de dados de entrada e os coeficientes de modelos de qualidade de água podem ser tratados estocasticamente, sujeitos à análise de incertezas.

Existem diferentes técnicas para a realização da análise de incerteza de modelos. Uma delas é o método de Monte Carlo, método por meio do qual são consideradas aleatoriamente diferentes variáveis de entrada num intervalo preestabelecido, simulando os valores de saída correspondentes.

Segundo Saisana, Saltelli, Tarantola (2005) e Clemen e Reilly (2013), com o método de Monte Carlo as incertezas sobre os fatores de entrada podem ser consideradas simultaneamente ou individualmente e as respostas geradas são então analisadas estatisticamente para quantificação das incertezas.

Conforme Von Sperling (2007), a análise de incerteza utilizando como ferramenta o método de Monte Carlo é simples, robusta e eficaz, permitindo uma análise

probabilística dos resultados do modelo, e não uma simples avaliação de valores determinísticos isolados.

Os trabalhos de Pastres e Ciavatta (2005), McIntyre et al. (2005), Lindenschmidt, Fleischbein e Baborowski (2007), Mannina e Viviani (2010), Jiang, Nan e Yang (2013), Holguin-Gonzalez et al. (2013), Shojaei, Nazif e Kerachian (2015), Fortunato et al. (2020) e Poton et al. (2023) constituem exemplos de aplicação do método de Monte Carlo como ferramenta de apoio ao processo de modelagem da qualidade de corpos d'água.

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a qualidade dos cursos d´água da bacia hidrográfica do rio Novo, importante sistema hídrico da porção sul do Estado do Espírito Santo. A referida avaliação será conduzida a partir da incorporação da análise de incerteza utilizando o método de Monte Carlo à modelagem matemática da qualidade da água.

Constituíram como objeto da análise as concentrações de oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coliformes termotolerantes, fósforo orgânico e inorgânico, nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. Estes parâmetros de qualidade de água são os mais relevantes para a avaliação da qualidade de água naquelas situações em que predomina a poluição a partir da disposição final de esgotos domésticos, condição da bacia hidrográfica do rio Novo e a mais usualmente encontrada em países no estágio de desenvolvimento socioeconômico similar ao brasileiro.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Simulação da qualidade dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo a partir da associação entre modelagem matemática e análise de incerteza.

2.2. Objetivos específicos

Para a consecução do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Simular a variação da qualidade dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo em condições determinísticas;
- Estabelecer ambiente computacional que permita a simulação da qualidade de água de rios com incorporação da análise de incerteza;
- Simular as condições de qualidade dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo com incorporação da análise de incerteza conduzida com o auxílio do método de Monte Carlo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 O gerenciamento de recursos hídricos

O Brasil, assim como diversos países do mundo, vem sofrendo constantemente com problemas relacionados à qualidade e quantidade da água. O aumento da demanda pela água, e a consequente ampliação da descarga de efluentes contaminados, tem ocasionado a diminuição da disponibilidade de água. Dentro desse contexto, abordagens abrangentes e consistentes para o gerenciamento dos recursos hídricos são fundamentais (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2011).

A legislação brasileira incorpora princípios do desenvolvimento sustentável, definindo a água como um recurso de disponibilidade limitada e dotado de valor econômico. Assim, busca-se assegurar a atual e futuras gerações a necessária disponibilidade da água, em padrões de qualidade adequados para diversos usos. Para isso, a legislação disponibiliza um conjunto de instrumentos jurídico-político-administrativos, com abertura de espaço para a sociedade por meio dos Comitês de Bacia Hidrográfica (SALIM, 2004).

Dentre os instrumentos de gestão instituídos por meio da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) – Lei nº 9.433, editada em 8 de janeiro de 1997 – estão o Plano de Recursos Hídricos, o enquadramento e a outorga dos direitos de uso, incluindo a outorga para efluentes. Entretanto, para a aplicação correta destes instrumentos é necessário o desenvolvimento de todo um ferramental técnico para apoiar a tomada de decisões. Modelos de simulação de quantidade e qualidade da água, juntamente com a construção de critérios para classificar os objetivos a serem alcançados, são exemplos de ferramentas a serem utilizadas (MACHADO; PORTO; KAVISKI, 2012).

O conceito de bacia hidrográfica como unidade territorial para a implementação da política e gerenciamento dos recursos hídricos, também instituído com a PNRH, auxilia no desenvolvimento e aplicação de novas ações. A bacia hidrográfica permite integrar ações de pesquisa e gerenciamento em uma unidade física estabelecida, podendo incorporar atividades multi e interdisciplinares e, desta forma, um gerenciamento integrado e participativo. Além disso, por ser um ecossistema hidrologicamente integrado, com componentes e subsistemas

interativos, a unidade torna mais fácil a resolução de conflitos e o estabelecimento de parcerias, garantindo o desenvolvimento econômico e a manutenção da qualidade do corpo hídrico (CRUZ; GODOY, 2016).

No contexto internacional, diferentes países apresentam políticas e diretrizes para a proteção dos recursos hídricos. Entretanto, nas últimas décadas, a preocupação com a qualidade e quantidade da água, assim como a necessidade de uma melhor abordagem do gerenciamento dos recursos hídricos, tem ganhado mais destaque e discussão nos países desenvolvidos e em desenvolvimento (GERLAK; MUKHTAROV, 2015).

A Comissão Europeia no ano de 2000 instaurou a *European Union Water Framework Directive* (WFD). A preocupação dos cidadãos europeus com a poluição dos corpos d'água foi um dos principais motivos da Comissão Europeia priorizar a proteção das águas. A WFD garantiu um crescimento no gerenciamento dos recursos hídricos nos países da Europa. Com ela, foi estabelecida a bacia hidrográfica como unidade territorial para planejamento de todos os Estados Membros, com a criação de planos de gestão para cada uma delas, juntamente à criação de regiões hidrográficas, nas quais as bacias estariam contidas. Além disso, posteriormente, também foi criado o *Water Information System for Europe* (WISE), que reúne as informações de todas as bacias hidrográficas da Europa e a sua gestão, incluindo dados de programas da qualidade da água dos Estados-Membros (EC, 2000; VEIGA; MAGRINI, 2013).

A Austrália, por sua vez, apresenta a característica singular de ser capaz de gerir os seus recursos hídricos sem a necessidade de considerar relações internacionais. Entretanto, o país é composto por estados independentes, cada um com seu próprio parlamento e conjunto de valores. Neste contexto, a gestão de recursos hídricos teve destaque na Bacia de Murray-Darling, a qual era controlada por jurisdições independentes e diferentes, e assim necessitava de um gerenciamento integrado.

Desde a década de 1990 as condições da bacia começaram a ser questionadas, levando ao reconhecimento da necessidade de um gerenciamento mais holístico. Dessa maneira, com a aceitação internacional dos princípios da Gestão Integrada de Recursos Hídricos (IWRM – International Water Resources Management), em

2008 foi formada a Comissão da Bacia Murray-Darling, a qual foi simplificada para se tornar a Autoridade da Bacia de Murray-Darling, responsável pela criação do Plano da Bacia. Consequentemente, pela primeira vez na Austrália o planejamento de recursos hídricos foi visto de forma integrada, considerando a bacia como um todo, ao invés de uma base territorial ou estatal (SULLIVAN, 2014).

Nos Estados Unidos numerosos programas de melhoria de qualidade da água dos mananciais hídricos vêm sendo implantados, os quais são baseados no *Clean Water Act*, que estabelece a estrutura básica para pesquisas e programas no país. Criado originalmente em 1948, sendo significativamente expandido e reconhecido em 1972, o *Clean Water Act* é base para regulamento da descarga de poluentes, assim como para os padrões de qualidade de águas superficiais (USEPA, 2016).

Dentre os regulamentos, destaca-se o TMDL (*Total Maximum Daily Load*), que se refere a uma carga máxima total diária (valor-limite) de um poluente que pode ser lançada em um corpo d'água sem que seus padrões de qualidade sejam violados. A estimativa considera todas as fontes contribuintes de poluentes, tanto pontuais quanto não pontuais.

O valor do TMDL representa a capacidade de suporte de um corpo d'água e deve orientar todas as ações de controle da poluição na bacia hidrográfica. O controle da fonte de poluição pontual pode ser feito por meio da redução da concentração ou da vazão da fonte poluidora, e o controle da fonte difusa pela diminuição da concentração, através das BMPs (*Best Management Practices*) (ANDRADE, 2012).

A necessidade de redução de carga faz surgir também um terreno gerencial propício ao mecanismo de cotas de emissão, em que um novo empreendimento poluidor, apesar de emitir dentro dos padrões previstos em lei, caso comprometa o valor do TMDL poderá investir na minimização de sua carga total diária, com a implantação, por exemplo, de uma estação de tratamento de efluentes. Dessa maneira, o TMDL é basicamente um instrumento de gestão ambiental, baseado na qualidade das águas, capaz de acionar e canalizar ações em uma bacia hidrográfica (SILVA; JARDIM, 2007).

Dos países em desenvolvimento, a China tem se destacado por mudanças e desafios no gerenciamento dos recursos hídricos devido ao elevado crescimento

populacional e desenvolvimento econômico que vem ocasionando conflitos entre oferta e demanda de água. Com uma ementa da *Water Law*, em 2002, foram estabelecidos comitês de bacias hidrográficas, agências de água, assim como planos de bacia, os quais determinavam direitos do uso e cobrança, a nível nacional, regional e da própria bacia hidrográfica (LIU; SPEED, 2009).

Em 2009, para se adaptar ao aumento do estresse hídrico, o governo chinês adotou a política SWRM (*Strictest Water Resource Management*). O objetivo principal do SWRM é cumprir três metas principais *a)* reduzir a quantidade total de uso da água; ***b)*** aumentar a eficiência do uso da água e ***c)*** controlar a poluição dos recursos hídricos.

Para alcançar as referidas metas, diferentes medidas vêm sendo tomadas pelo governo, como: *a)* complementação da legislação (Water Law); *b)* redução da fragmentação do gerenciamento de recursos hídricos a fim de integrar o sistema; *c)* fortalecimento do apoio da ciência e tecnologia; *d)* aumento da capacidade de alocação e controle dos recursos hídricos; *e)* melhoria da eficiência do uso da água e desenvolvimento de uma sociedade que promova a conservação da água e *f)* fortalecimento da proteção da água e conservação ecológica (WANG et al., 2018).

Contudo, o principal objetivo do gerenciamento dos recursos hídricos é possibilitar o adequado uso dos recursos hídricos para o seu conjunto de usuários, tendo como um dos principais aspectos a garantia da qualidade de água dos corpos d'água, viabilizando os diferentes usos aos quais os corpos d'água possam estar sujeitos (SANTOS, 2018).

3.2 O controle do lançamento de efluentes domésticos e a qualidade das águas superficiais

A gestão dos recursos hídricos no Brasil, fundamentada na PNRH, tem como princípio básico assegurar o uso múltiplo das águas. Para tanto, a qualidade de um corpo d’água deve atender aos requisitos específicos associados aos diferentes usos previstos, evidenciando-se a importância de implementação de medidas eficazes de controle da poluição hídrica.

No Brasil, o lançamento inadequado de efluentes é uma das principais fontes de poluição dos recursos hídricos, tanto pelo aporte de compostos antropogênicos quanto pelas alterações químicas que provoca na coluna d'água. O descarte inadequado de efluentes contamina o ambiente, expondo usuários a riscos de saúde, mesmo que, por outro lado, reduza o contato direto da população com agentes infecciosos ao remover os resíduos das residências (SODRÉ; GRASSI, 2007; MENDES; BARCELLOS, 2018).

O esgoto doméstico, além de rico em matéria orgânica, contém outros poluentes, como nitrogênio (em diferentes formas) e fósforo. Esses nutrientes, especialmente o nitrogênio, contribuem para problemas ambientais graves, como a eutrofização, além de consumir oxigênio dissolvido nos corpos d'água (BRINGER, 2017; FANTIN, 2016; SÁ, 2018; SANTORO; REIS; MENDONÇA, 2016; VON SPERLING, 2014).

Estima-se que no Brasil sejam gerados de cerca de 9,1 mil toneladas de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) por dia, considerando um valor per capita de 54 g DBO/habitante/dia. No entanto, apenas 52,2% do esgoto gerado é tratado antes do lançamento, sobrecarregando os corpos d'água com poluição e reduzindo os níveis de oxigênio dissolvido (SNIS, 2022).

Os 106 municípios brasileiros com mais de 250 mil habitantes são responsáveis por 48% do esgoto gerado no país (ANA, 2017). Contudo, a urbanização desordenada intensifica desigualdades nas cidades, concentrando infraestrutura adequada em áreas de maior valor imobiliário e deixando vastas regiões carentes de serviços básicos, como saneamento (DENALDI; FERRARA, 2018; COURY, 2020).

Neste contexto, o tratamento de esgoto a estratégia mais relevante para o controle do lançamento inadequado de efluentes em corpos d'água. A coleta e o tratamento de esgoto constituem serviços essenciais de saneamento básico, garantindo a saúde pública e promovendo a conservação dos corpos d'água. O objetivo principal do tratamento é reduzir a concentração de poluentes nos efluentes lançados, permitindo o cumprimento dos padrões de qualidade estabelecidos pela legislação ambiental brasileira (VON SPERLING, 2014; SNIS, 2021).

Segundo Oenning Junior e Pawlosky (2007), o tratamento de esgoto passa a ser não só importante para o lançamento direto na natureza, mas para uma nova estratégia que vem ganhando força em países com graves problemas na disponibilidade hídrica: o reúso. Países como a Namíbia, Israel, Jordânia, México, China e o estado da Califórnia nos Estados Unidos, vêm ampliando essa técnica para os diversos fins. Essas regiões que sofrem com frequentes secas prolongadas, conseguem fazer do reúso uma estratégia para enfrentar a crise hídrica (MOREIRA, 2020).

O Brasil ainda não possui uma legislação própria sobre a utilização da água de reúso, mas o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), publicou a Resolução nº 54/2005, que estabelece os critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água (FIRJAN, 2006).

Apesar de não haver legislação específica sobre a utilização da água de reúso no Brasil, a legislação brasileira, por meio das Resoluções nº 357/2005 e nº 430/2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabelece os padrões para o lançamento de efluentes nos corpos d'água. Essas normas determinam que os sistemas de tratamento devem assegurar que os efluentes tratados não comprometam as metas de qualidade previstas para os corpos receptores.

Desta forma, adequar a eficiência das ETEs existentes ou implantar novas estações capazes de alcançar os níveis de remoção necessários para atender aos usos desejados constitui uma prioridade na gestão de recursos hídricos e nos planos de ação das bacias hidrográficas (CARVALHO, 2019).

A seleção de tecnologias de tratamento demanda de uma análise conjunta de fatores ambientais, tecnológicos, operacionais e sociais associados aos sistemas de tratamento, além da avaliação da capacidade suporte dos cursos d'água que receberão a disposição final dos esgotos (SPAGNOL, 2023). Nesse contexto, os modelos de qualidade de água constituem importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos, uma vez que permitem estimar, a partir da avaliação da capacidade de autodepuração dos cursos d'água, os níveis mínimos de remoção dos poluentes nos diferentes pontos de disposição final de esgotos numa bacia hidrográfica.

3.3 Os modelos de qualidade de água como ferramenta de gestão da bacia hidrográfica

O emprego de modelos de qualidade de água no processo de avaliação ambiental de uma bacia constitui importante ferramenta de análise, uma vez que permite avaliar os efeitos das ações naturais e antrópicas integradas sobre diferentes seções de um sistema fluvial da bacia, em diferentes cenários de intervenção (LARENTIS; COLLISCHONN; TUCCI, 2008), incluindo-se aqui a avaliação dos níveis de tratamento de esgotos sanitários que garantam o atendimento dos padrões de qualidade ambiental.

Para realizar as referidas avaliações, os modelos de simulação da qualidade da água são compostos por expressões matemáticas que expressam os processos físicos, químicos e biológicos do corpo d'água. Grande parte dos modelos possui, em sua estrutura, equações de conservação de quantidade de movimento e massa. Selecionando-se uma variável de qualidade e os processos que a afetam, o balanço de massa poderá ser desenvolvido e envolverá a entrada do constituinte no volume de controle e as reações ocorridas que resultam no aumento ou decaimento da concentração do constituinte (ALBERTIN, 2008).

Em se tratando das vantagens da simulação da qualidade da água, a flexibilidade da ferramenta se torna sua característica principal. Um modelo matemático de qualidade de água permite que as características de um sistema sejam representadas a partir da resolução de um sistema de equações para um determinado instante de tempo, partindo-se do estado das variáveis no presente (SANTOS, 2007).

Além disso, a modelagem matemática de qualidade da água pode ser empregada em projetos de estação de tratamento de esgotos, na determinação da influência de obras hidráulicas na qualidade do meio aquático, na avaliação das consequências de derrames acidentais de resíduos tóxicos, para análise dos efeitos da variação de temperatura causada pelo processo de geração de energia termoelétrica, para o prognóstico de possíveis alterações aquáticas geradas pelo uso do solo em bacias hidrográficas, dentre outras situações passíveis de simulação (EIGER, 2003).

O primeiro modelo de simulação da qualidade da água foi desenvolvido por Harold Warner Streeter e Earle Bernard Phelps em 1925, a partir de estudos realizados no rio Ohio, nos Estados Unidos, e foi elaborado procurando auxiliar no controle da poluição das águas de abastecimento da população e no aumento da eficiência das ações a serem tomadas no controle da poluição. O referido modelo, universalmente conhecido como modelo de Streeter-Phelps, é constituído por equações diferenciais ordinárias de primeira ordem que descrevem o consumo de oxigênio dissolvido (OD) pela oxidação da matéria orgânica, o decaimento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a produção de oxigênio pela reaeração atmosférica. Além disso, nesse modelo, a fase nitrogenada da oxidação da matéria orgânica é desconsiderada (VON SPERLING, 2014; CALMON et al., 2016).

A partir da estrutura clássica de Streeter-Phelps, muitos outros modelos matemáticos de qualidade da água foram surgindo, aumentando o seu grau de complexidade (ZANDONADI, 2011). O Quadro 1 apresenta um breve histórico dos modelos de qualidade da água, estabelecidos a partir do modelo de Streeter-Phelps.

Quadro 1 - Evolução histórica dos modelos de qualidade água.

(continua)

Ano	Modelo	Características
1925	Streeter-Phelps	Modelo que apresenta o balanço entre OD e DBO definidos na forma de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem.
1963	Camp	Modelo de simulação de OD/DBO que modifica as equações originais adicionando os termos referentes à sedimentação e/ou ressuspensão, DBO do escoamento superficial e fotossíntese.
1964	Dobbins	Modelo de simulação no qual OD/DBO apresenta-se na forma de equações diferenciais de segunda ordem, considerando-se os efeitos da demanda bentônica, fotossíntese e respiração no acréscimo da taxa de OD.
1967	O'Connor	Modelo de simulação OD/DBO que utiliza equação onde os termos refe-rentes à DBO carbonácea e DBO nitrificante estão separados.
1970	Dosag I	Modelo proposto pelo Texas Water Development Board (TWDB), que mostra, de forma integrada, que a equação de Streeter Phelps é aplicável à sistemas unidimensionais sem considerar os efeitos da dispersão.
1970	Dosag III	Modelo criado pela Enviromental Protection Agency (EPA) que registra maior habilidade nos procedimentos de simulação e maior número de parâmetros simulados no Dosag I.
1970	QUAL-I	O modelo QUAL I, desenvolvido pelo F. D. Masch and Associates e TWDB, usa equações unidimensionais de dispersão-adevecção pela solução das diferenças finitas. Utiliza um elemento computacional padrão de um comprimento estabelecido através do sistema. Elementos computacionais com propriedades hidrológicas e físicas similares são agrupados no mesmo trecho.

Quadro 1 - Evolução histórica dos modelos de qualidade água – continuação.

(continuação)

Ano	Modelo	Características
1970	WASP	O modelo WASP (Water Analysis Simulation Program), desenvolvido pela EPA, permite simular os processos hidrodinâmicos e de qualidade de água em 1, 2 ou 3 dimensões para uma variedade de poluentes. Os processos de advecção, dispersão, fluxos de massa pontual e difusa, além de fluxos na fronteira de fundo são representados no modelo. O WASP também pode ser implementado com modelos de transporte hidrodinâmico e de sedimentos, os quais fornecem perfis de velocidade, temperatura, salinidade e fluxos de sedimentos. O WASP7, última versão lançada em 2013, é um aprimoramento do WASP original e contém a inclusão do modelo de diagênese sedimentar associado à modelo secundário avançado de eutrofização, que predita demanda de oxigênio pelo sedimento e fluxos de nutrientes a partir do sedimento de fundo.
Década de 70	MIKE 11	O modelo Mike 11 foi desenvolvido pelo DHI (Danish Hydraulic Institute) para simulação de escoamentos, qualidade da água e transporte de sedimentos em estuários, rios, sistemas de irrigação, canais e outros corpos d'água. O módulo hidrodinâmico (HD) é o núcleo do sistema de modelagem e constitui a base para a maioria dos módulos, incluindo a previsão de cheias, advecção-dispersão, qualidade da água e módulos de transporte de sedimentos não-coesivos.
Década de 70	ISIS	SIS é um simulador hidrodinâmico completo, desenvolvido no Reino Unido por Hydraulics Research Wallingford (HR-Wallingford) e Sir William Halcrow and Partners, para modelagem de fluxos e níveis água em canais abertos e estuários. O módulo de qualidade da água do programa ISIS (ISIS Quality Water) é capaz de modelar uma gama de variáveis e processos de qualidade da água simultaneamente, que incluem: poluentes conservativos e não conservativos; coliformes, sal, temperatura da água, sedimento; balanço de oxigênio (OD e DBO); interações de oxigênio (água/sedimento); fitoplancton; macrófitas; algas bentônicas, pH. A última versão lançada, ISIS v. 3.7, fornece uma série de novas funcionalidades e melhorias.
1972	QUAL-II	O modelo QUAL II é uma modificação do QUAL I desenvolvida pelo Water Resources Engineers, Inc. (WRE) sob contrato com a EPA. O modelo é aplicável para rios dendríticos e bem misturados. Pode simular variações temporais e espaciais de até treze parâmetros de qualidade de água em qualquer combinação desejada pelo usuário. O modelo assume que os principais mecanismos de transporte, advecção e dispersão, são significativos somente ao longo da direção principal do fluxo (eixo longitudinal do rio ou canal). Pode ser operado em regime permanente ou dinâmico.
1974	SIMOX	O modelo Simox (Dissolved Oxigen Simulation Model), desenvolvido pelo CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente) para simulação de oxigênio dissolvido, inclui OD/DBO, bactéria (Lei de Chick) e uma substância conservativa. A versão mais recente também simula o decaimento de primeira ordem de nitrogênio e fósforo para representar sedimentação, absorção e transformação.
1974-1978	WQRRS	O modelo WQRRS (Water Quality for River-Reservoir Systems), desenvolvido pela CEIWR-HEC, é baseado nos modelos Qual-II e CE-QUAL-W2. Fornece abrangente simulação da qualidade da água para rios e reservatórios. O modelo consiste em três módulos distintos, mas integrável: módulo reservatório, módulo hidráulico e módulo de qualidade. Os três programas podem ser integrados para uma completa análise de qualidade da água da bacia hidrográfica. Simula OD, DBO, nutrientes, biomassa algal, temperatura, bactérias indicadoras, constituintes conservativos e não conservativos, produtividade de algas e nutrientes no reservatório, bem como interações de fluxo e temperatura no reservatório.
1975	CE-QUAL-W2	O CE-QUAL- W2, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Portland, Estados Unidos, é um modelo bidimensional (longitudinal e vertical), hidrodinâmico e de qualidade da água para rios, estuários, lagos, reservatórios e sistemas de bacias hidrográficas. Inclui temperatura, salinidade, ciclo de OD/carbono, ciclos de nitrogênio, fósforo, fitoplanctons e bactérias. Vários níveis de complexidade são possíveis devido à organização modular das simulações de qualidade d'água.

Quadro 1 - Evolução histórica dos modelos de qualidade água – continuação.

(continuação)

Ano	Modelo	Características
1976	QUAL-II/ SE-MOG	O modelo QUAL-II / SEMOG é uma versão do QUAL-II desenvolvida pela WRE para o Conselho de Governos do Sudeste de Michigan (Southeast Michigan Council of Governments - SEMOG). Inclui modificações e aperfeiçoamentos feitos no modelo QUAL II desde o seu desenvolvimento original em 1972.
Final década 70	HSPF	O modelo HSPF (Hydrologic Simulation Program – Fortran) é um programa desenvolvido pela EPA para simulação hidrológica de bacia hidrográfica e de qualidade da água para poluentes orgânicos convencionais e tóxicos. O modelo combina as cargas de escoamento da bacia e cargas, transporte e transformação, nos rios, de OD/DBO, nutrientes, algas e pesticidas/tóxicos; e fornece histórico de tempo da taxa de vazão de escoamento, carga de sedimentos, concentrações de nutrientes e pesticidas, juntamente com histórico de tempo da quantidade e qualidade da água em qualquer ponto em uma bacia hidrográfica. O HSPF requer uma extensa gama de dados de entrada e coeficientes para parametrizar cada processo de qualidade e quantidade de água. As simulações detalhadas de ciclo de nutriente incluem nitrificação e desnitrificação, absorção de amônia e de ortofósforo, uptake (coletor ascendente de gás), vaporização e imobilização. As transformações de tóxicos no rio abrangem solubilidade, volatização, fotólises, oxidação e biodegradação. Somente a varia-ção em uma dimensão é considerada no corpo de água. O HSPF inclui três compartimentos de algas e considera a respiração, crescimento, assentamento e morte usando a cinética Michaelis-Menten.
Início década de 80	TOMCAT	O modelo TOMCAT (Temporaly Overall Model for CATchments) foi desenvolvido pela companhia concessionária de água do Reino Unido, Thames Water. A conceituação do TOMCAT é essencialmente idêntica à do modelo SIMCAT, isto é, modelo estocástico unidimensional estacionário, com abordagem da técnica de Monte Carlo, permitindo, contudo, correlações temporais mais complexas.
Década de 80	SIMCAT	SIMCAT (Simulated Catchments), desenvolvido pela Agência de Meio Ambiente do Reino Unido, é um modelo estocástico determinístico, unidimensional, em regime permanente, que faz uso de técnicas de análise de Monte Carlo para simular dados de descargas pontuais e difusas ao longo de uma rede de cursos de água. O oxigênio dissolvido é representado por uma relação envolvendo temperatura, reaeração e decaimento da DBO.
1982	CE-QUAL-RIV1	O modelo CE-QUAL-RIV1 foi originalmente desenvolvido pela Universidade Estadual de Ohio em 1982 para a EPA. A versão de 1990 reflete as modificações feitas após 1982 pela Universidade Estadual de Ohio e pelo Laboratório Ambiental da Estação Experimental de Corpos D'água (Waterways Experiment Station - WES) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (United States Army Corps of Engineers - USACE). O modelo é hidrodinâmico e de qualidade da água unidimensional (longitudinal) e permite a simulação de sistemas fluviais ramificados com várias estruturas de controle hidráulico, tais como, eclusa de navegação, represa, regulação de barragem. Constituintes de qualidade da água incluem temperatura, OD, DBO carbonácea, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrato, fósforo ortofosfato, bactérias coliformes, ferro e manganês dissolvidos. Os efeitos de algas e macrófitas também estão incluídos.
1985	QUAL2E	O QUAL2E, distribuído pela EPA, é um modelo unidimensional de estado permanente, usados frequentemente para simular os efeitos de descargas de poluição de fontes pontuais e não-pontuais na qualidade da água de rios. Ciclos detalhados de OD/DBO e de nutriente são simulados, considerando os efeitos de respiração de algas, reaeração e demanda de oxigênio de sedimentos. Os metais podem ser simulados arbitrariamente como constituintes conservativos ou não. Sua hidrodinâmica baseia-se na equação unidimensional de advecção-dispersão.
1985	MIKE BASIN	O modelo MIKE BASIN, desenvolvido pelo DHI, associa técnicas de simulação e modelagem em rede de fluxo e é estruturado em uma rede de arcos e nós digitalizada no ambiente do ArcView do Sistema de Informações Geográficas. A simulação das variáveis de qualidade da água é feita através de transporte no estado estacionário nos arcos do sistema. Dentre outras características do modelo, destacam-se seu rápido tempo de processamento e sua flexibilidade e facilidade na representação de sistemas hídricos. Para a solução da qualidade de água é considerado somente o transporte advectivo e o decaimento das concentrações pode ser modelado.

Quadro 1 - Evolução histórica dos modelos de qualidade água – continuação.

(continuação)

Ano	Modelo	Características
1987	SiSBaHiA	O SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) foi desenvolvido pela Coordenação de Programas de Pós-graduação em Engenharia (CO-PPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trata-se de um sistema de modelos computacionais para previsão do escoamento ou movimento das águas e também para a previsão da qualidade das águas ou transporte de grandezas escalares qualificadoras em corpos de água naturais. Em sua versão 3.6 e superiores, o SisBaHiA oferece recursos para modelamentos de corpos de água com superfície livre sem estratificação vertical significativa. Nesta classe de corpos de água de rios, canais, lagos, lagoas, reservatórios, estuários, baías e águas costeiras. Os Modelos de Qualidade de Água e Eutrofização (MQA) do SisBaHiA correspondem conjunto de modelos de transporte Euleriano, podendo ser aplicados para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D. Os MQA permitem simulação acoplada de até 11 parâmetros de qualidade da água e indicadores de eutrofização: sal, temperatura, OD-DBO, nutrientes compostos de nitrogênio e de fósforo e biomassa.
1989	DUFLOW	O modelo DUFLOW, desenvolvido pelo International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering (IHE) (atualmente denominado UNESCO-IHE Institute for Water Education), Rijkswaterstaat (Public Works Department), Delft University of Teclmology, Agricultural University of Wageningen, permite simulação de escoamento não permanente unidimensional e qualidade da água em sistemas de canais abertos, podendo ser inclusos controle de estruturas como diques, bombas, bueiros e sifões. O modelo possui diversas aplicações, tais como a propagação de ondas em estuários, ondas de cheias em rios e operação de sistemas de irrigação e drenagem e pode incluir parâmetros de qualidade da água. A parte de modelagem da qualidade da água foi incluído no DUFLOW em 1992, em sua versão 2.0.
Início década de 90	SWAT	Soil Water and Analysis Tools (SWAT), modelo físico desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (United States Department of Agriculture - USDA), teve sua origem no modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) - modificação do modelo hidrológico CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems). O SWAT pode ser usado na modelagem de bacias hidrográficas que não possuem dados de monitoramento disponíveis. O modelo opera em escala de tempo contínua e permite prognosticar o impacto de longo prazo das práticas de gestão de solo nos recursos hídricos e a produção de sedimentos e aplicação de produtos químicos nas plantações dentro dos grandes complexos de bacias hidrográficas. A última versão do modelo é a versão SWAT2012.
1991-1994	AQUASIM	O programa AQUASIM, desenvolvido pelo EAWAG (Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology), foi projetado para a identificação e simulação de sistemas aquáticos técnicos e naturais. O modelo realiza simulações, análises de sensibilidade, estimativa de parâmetros (usando dados medidos). O usuário pode especificar qualquer conjunto de variáveis de estado e processos de transformação do modelo.
1993	DELFT 3D	O modelo Delft 3D, desenvolvido pela WL Delft Hydraulics, permite uma abordagem multidisciplinar e cálculos em 3D para áreas costeiras, rios e estuários e pode realizar simulações de fluxos, transporte de sedimentos, ondas, qualidade da água, desenvolvimentos morfológicos e ecologia. O modelo é composto por um conjunto de módulos, agrupados em torno de uma interface mútua. Cada módulo pode ser executado de forma independente ou em combinação com um ou mais módulos. Em novembro/2015 será lançada uma nova marca do modelo, Delft3D Flexible Mesh Suite 2016, que incorpora inovações tecnológicas para simulações sobre malhas não estruturadas em 1D-2D-3D.
1995	HEC-HAS	O modelo HEC-HAS (Hydrological Engineering Center-River Analysis System), desenvolvido pelo HEC do USACE., possibilita a simulação unidimensional de escoamento em canais abertos, sob o regime permanente e não-permanente e também na condição de fundo móvel (transporte de sedimentos). A versão atual, HEC-HAS 5.0, lançada em 2015, permite a modelagem bidimensional do escoamento.

Quadro 1 - Evolução histórica dos modelos de qualidade água – continuação.

(continuação)

Ano	Modelo	Características
1995-2000	SOBEK	SOBEK-RE, versão original do SOBEK, desenvolvido pela WL | Delft Hydraulics em parceria com o Instituto de Gestão das Águas Interiores e Tratamento de Águas Residuais (Inland Water Management and Waste Water Treatment – RIZA) do governo da Holanda, constitui sistema de modelagem unidimensional projetado para sistemas fluviais simples e complexos e estuários. Pode ser usado para simular escoamento instável e constante, transporte de sedimentos, morfologia, intrusão salina e qualidade da água, com aplicações na resolução de problemas em matéria de navegação, previsão de inundações, estudos da poluição da água, estuários com água doce e salgada, estudos de mineração de areia, sedimento e morgologia. SOBEK 2 apresenta três linhas básicas de produtos, SOBEK-River, SOBEK-Rural e SOBEK-Urban, sendo cada uma composta por diferentes módulos para simular aspectos específicos do sistema de água, podendo funcionar separadamente ou em combinação. O SOBEK 3 é o sucessor agregado do SOBEK-River, DUFLOW e SOBEK-RE.
1996	BASINS 1, 2, 3 e 4	Desenvolvido pela USEPA (United States Environmental Protection Agency), BASINS (Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources) são sistemas de análise ambiental polivalentes que inte-gram a poluição de fontes pontuais e não pontuais. Foram desenvolvidos pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA para auxiliar na gestão de bacias hidrográficas e desenvolvimento de TMDL, integrando dados ambientais, ferramentas de análise e modelos de qualidade de água e bacias hidrográficas.
1997	PC-QUASAR	O modelo PC-QUASAR, desenvolvido pelo CEH (Center for Ecology & Hydrology), permite fácil comparação entre o estado existente do rio e que existiria depois de uma mudança planejada ou um evento não planejado que tivesse ocorrido na rede fluvial. O modelo descreve as mudanças na qualidade da água ao longo do tempo e permite monitorar episódios de poluição à jusante. O modelo apresenta dois modos de execução: modo de planejamento e modo de previsão dinâmica. O modo de planejamento pode produzir dados de frequência e distribuição cumulativas de vazão e qualidade em locais de interesse. O modo dinâmico (previsão) fornece perfis de vazão e qualidade da água ao longo do sistema fluvial ou contra o tempo em qualquer alcance de interesse. O modelo permite simular vazão do rio, pH, nitrato, temperatura, Escherichia Coli, DBO, OD, poluente conservativo ou traçador.
1997-2007	EFDC	O Instituto de Ciência Marinha da Virgínia desenvolveu o modelo EFDC. A EPA listou o modelo EFDC como uma ferramenta para o gerenciamento da qualidade da água em 1997. O modelo EFDC é adequado para simulação da qualidade da água em rios, lagos, reservatórios, estuários e áreas úmidas, incluindo modelos uni, bi ou tridimensionais. A versão atual disponível é a EPA versão 1.01, lançada em setembro de 2007.
1998	HSCTM2D	O Hydrodynamic, Sediment, and Contaminant Transport Model (HSCTM2D), desenvolvido pela EPA em 1998, consiste em um modelo de elementos finitos para simular o fluxo de água de superfície bidimensional verticalmente integrado (hidrodinâmica tipicamente ribeirinha ou estuarina), transporte de sedimentos e transporte de contaminantes. A versão atual é a versão 1.01.
2002-2018	AQUATOX	O AQUATOX é um modelo de simulação para sistemas aquáticos, desenvolvido pela EPA, que prevê o destino de nutrientes, sedimentos e produtos químicos orgânicos em corpos d'água, bem como os seus efeitos diretos e indiretos em organismos residentes. Simula a transferência de biomassa e produtos químicos a partir de um compartimento do ecossistema para outro. O modelo simula múltiplos estressores ambientais (incluindo nutrientes, cargas orgânicas, sedimentos, substâncias químicas tóxicas e temperatura) e seus efeitos sobre as comunidades de algas, macrófitas, invertebrados e peixes. AQUATOX pode ajudar a identificar e compreender as relações de causa e efeito entre a qualidade química da água, do ambiente físico e a vida aquática. Pode representar uma variedade de ecossistemas aquáticos, incluindo lagos verticalmente estratificadas, reservatórios e lagoas, rios e córregos e estuários. A versão 3.2 do modelo, lançada em 2018, contém várias melhorias em relação às versões anteriores que aprimoram a interface e utilidade do modelo.

Quadro 1 - Evolução histórica dos modelos de qualidade água – continuação.

(conclusão)

Ano	Modelo	Características
2003-2012	QUAL2K	O modelo QUAL2K é uma versão modernizada do modelo QUAL2E e apresenta na sua estrutura os seguintes novos elementos: modelo segmentado, especificação da DBO carbonácea, ambientes anóxicos, interações água-sedimento, algas inferiores, redução da luz, pH, patógenos, especificação de diversos parâmetros cinéticos e efeitos inerentes a barragens e cachoeiras.
2005	EDP-RIV1	O modelo EDP-RIV1, desenvolvido pela Divisão de Proteção Ambiental do Departamento de Recursos Naturais da Georgia e pela EPA, baseia-se no modelo CE-QUALRIV1. O modelo pode representar com sucesso sistemas de rios dendríticos ou ramificados e pode lidar com influências de marés de jusante, efeitos à jusante de lagos, captações de água dinâmicas, operações de vertedouro de barragem e eventos de tempestade. O modelo permite simular interações de 16 variáveis de estado, incluindo temperatura da água, espécies de nitrogênio (ou DBO nitrogenada), espécies de fósforo, OD, demanda de oxigênio carbonácea, algas, ferro, manganês, bactérias coliformes e dois componentes arbitrários. Além disso, o modelo pode simular os impactos de macrófitas sobre OD e ciclagem de nutrientes.
2007	QUAL-UFMG	O modelo QUAL-UFMG desenvolvido por Marcos Von Sperling da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) para o ambiente computacional da planilha Microsoft Excel, possibilita a modelagem de rios através da utilização de um modelo baseado no QUAL2-E (estrutura similar, porém não inclui as algas e todas suas inter-relações com os demais constituintes). O QUAL-UFMG permite a simulação dos parâmetros DBO, OD, nitrogênio total e suas frações, fósforo total e suas frações e coliformes termotolerantes.
2013	SIAQUA-IPH	O modelo SIAQUA-IPH é aplicável em grandes bacias e opera de forma completamente integrada com um Sistema de Informação Geográfica. Considera regime permanente de vazões, escoamento unidimensional, com mistura completa e instantânea dos poluentes lançados e seção retangular para calhas dos rios. O modelo permite a simulação dos parâmetros DBO, OD, Nitrogênio, Fósforo e Coliformes.
2013-2019	WMOST	O Watershed Management Optimization Support Tool (WMOST) é uma ferramenta de suporte à decisão que facilita o gerenciamento integrado da água na escala local ou em pequena bacia hidrográfica. O WMOST modela os efeitos e custos ambientais das decisões de gerenciamento. O modelo considera fluxos de água e qualidade da água. A otimização das opções de gerenciamento é resolvida usando programação não linear. Permite identificar soluções de menor custo para atender aos critérios de qualidade da água para lagos ou córregos/rios, metas de carregamento de poluentes e/ou minimização de lançamentos combinados de esgoto.
2017	SIGBAH-QUAL	O modelo SIGBAH-Qual é operacionalizado dentro de um Sistema de Informações Geográficas, simplificando a entrada de dados, a aquisição das informações hidráulicas dos trechos de rio, além da organização topológica de todo o sistema hídrico. A versão mais atual do sistema desenvolvido no grupo de Hidrologia de Grande Escala (HGE) propõe o desenvolvimento de um sistema integrado ao software MapWindow (SIG programável de código aberto, e livre distribuição na internet). Baseado nas formulações matemáticas do QUAL-UFMG, o modelo simula os parâmetros DBO, OD, nitrogênio total e suas frações, fósforo total e suas frações e coliformes.

Fonte: Almeida (2022).

Os modelos matemáticos mais empregados para quantificar o efeito do impacto de cargas poluidoras na qualidade da água de rios são unidimensionais, ou seja, modelos que consideram desprezíveis as variações das grandezas na direção transversal ao escoamento. Para o cálculo das reações físicas e bioquímicas adota-se, geralmente, a mistura completa e instantânea na seção transversal de disposição dos efluentes (VON SPERLING, 2014).

Dentre os modelos existentes, o modelo QUAL2E é mundialmente utilizado, principalmente em função da sua versatilidade e facilidade de compreensão e aplicação na simulação da qualidade da água em rios. O modelo QUAL2E foi desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (USEPA) e representa, em maior profundidade, os ciclos de oxigênio, nitrogênio e fósforo na água. Além disso, a disponibilidade gratuita na internet, juntamente com a extensa literatura disponível, favorece a sua ampla utilização (VON SPERLING, 2014; GASTALDINI; OPPA, 2011; MOURÃO JR., 2010; COX, 2003).

Entretanto, algumas limitações podem ser observadas no referido modelo, como a desconsideração da morte de algas como incremento da concentração da DBO, limitações no número máximo de trechos, elementos computacionais e junções, desconsideração da variação de OD causada pelos bentos e ausência do processo de desnitrificação. Tais limitações impulsionaram a criação de versões mais modernas do QUAL2E (PARK; LEE, 2002). Neste contexto, a USEPA desenvolveu a versão QUAL2K, implementada no ambiente Microsoft Windows e com interface gráfica feita em Excel, cujo principal objetivo foi criar um ambiente computacional mais amigável ao usuário, facilitando e popularizando assim a sua utilização.

Von Sperling (2007), por sua vez, apresentou o modelo QUAL-UFMG, também baseado no QUAL2E e desenvolvido no ambiente computacional da planilha Excel. O modelo é unidimensional e incorpora os fenômenos envolvidos no balanço de oxigênio dissolvido, considerando a sedimentação da matéria orgânica, o consumo de oxigênio dissolvido pela nitrificação, as cargas internas sem vazão e as cargas externas. O modelo também simula o comportamento dos compostos de nitrogênio, compostos de fósforo e coliformes termotolerantes.

Diversos estudos utilizaram o QUAL-UFMG e obtiveram resultados satisfatórios. Teodoro et al. (2013) simularam cenários hipotéticos de qualidade da água para estimar a capacidade de autodepuração e diluição de efluentes em um estudo de caso no Rio Taquarizinho, no estado de Mato Grosso. Os autores sugeriram que o modelo foi capaz de estimar as vazões de diluição requeridas pelos lançamentos e estimar os custos de tratamento associados aos diferentes lançamentos variando-se as vazões de referência, perspectivas de enquadramento e carga orgânica lançada no rio.

Carvalho, Gonçalves e Couto (2021) analisaram a capacidade de diluição do rio Piracicaba utilizando o modelo QUAL-UFMG. Para isso, realizaram o ajuste e a calibração do modelo por meio de dados hidrológicos e de qualidade da água provenientes das estações fluviométricas. A partir dos resultados da modelagem, os autores sugeriram que o modelo conseguiu representar adequadamente as condições de qualidade do rio estudado.

Freitas Martins, Couto e Marques (2021) utilizaram o modelo QUAL-UFMG com o objetivo de avaliar a capacidade de autodepuração do rio Araçuaí, em Minas Gerais. Os resultados indicaram que a utilização do modelo QUAL–UFMG para a avaliação da qualidade da água do rio Araçuaí foi adequada, com bom ajuste, já que valores da Raiz Quadrada da Média do Erro ao Quadrado (parâmetro RMEQ) apresentaram-se próximos a zero para os parâmetros OD e DBO, tanto na calibração quanto na validação.

Moreira (2021) utilizou o QUAL-UFMG para modelar a qualidade das águas da sub-bacia do Rio Siriri, no estado de Sergipe, simulando cenários futuros e buscando evidenciar fontes poluidoras para construir um diagnóstico da bacia. Para a condução do trabalho foram utilizados registros de qualidade de água para calibração, decorrentes de 24 campanhas de amostragem que compreendem o período de outubro de 2014 a setembro de 2016 e que foram analisados em campanhas distribuídas nos períodos seco e chuvoso do ano hidrológico. Além disso, também foram utilizados dados de vazão de duas estações fluviométricas disponibilizados pela Agência Nacional das Águas (ANA) para o mesmo período. Segundo o autor, o trabalho permitiu verificar que os corpos d´água da área de estudo atendem aos padrões de qualidade estabelecidos para rios classe 2 na resolução do CONAMA nº 357/2005, com exceção do parâmetro de coliformes termotolerantes, em que foram encontrados valores superiores aos permitidos para a referida classe de uso.

Gomides et al. (2024) utilizaram o modelo QUAL-UFMG para avaliação da qualidade das águas no exultório do Rio Grande, localizado na porção sul do estado de Minas Gerais, simulando os parâmetros de DBO e OD em diferentes cenários. Neste contexto, foram simulados os lançamentos de 30 municípios dentro da bacia com o propósito de se encontrar os tratamentos mais econômicos e eficazes para

se conseguir atender as demandas de qualidade exigidas. O trabalho conclui que essa metodologia de modelagem se mostrou uma ferramenta interessante para a gestão dos recursos hídricos, pela sua simplicidade de utilização e relativa pouca necessidade de parâmetros de entrada.

No entanto, é relevante observar que, em função de limitações sobre o conhecimento da dinâmica dos sistemas ambientais e da sua natural aleatoriedade, a incerteza torna-se uma parte inerente da modelagem de qualidade da água em bacias hidrográficas (BEVEN; BUYTAERT; SMITH, 2012). Neste contexto, função da variabilidade, aleatoriedade e incertezas associadas ao emprego de modelos matemáticos, o comportamento de dados de entrada e coeficientes de modelos de qualidade de água pode ser tratado como processo estocástico, sujeito a análise de incertezas, foco da seção subsequente.

3.4 A Análise de Incertezas incorporada ao modelo de qualidade de água

Dentre os componentes responsáveis pela introdução de incerteza nos dados de entrada de um modelo estão os erros na estimativa de um dado de entrada, baseado medição, calibração ou análise de laboratório; erros na transcrição ou transferência de resultados de análise ou de medições; e erros na estimativa de dados de entrada futuros, no caso de um modelo simular condições futuras (VON SPERLING, 2007). Além disso, os dados ambientais são passíveis de serem não aleatórios, dependentes, não homogêneos, não estacionários, sazonais, com ocorrência de eventos extremos, com impacto da urbanização e de outros fatores (Coelho et al., 2017).

Desta forma, pode-se observar que, mesmo dados tradicionalmente não questionados em um modelo (como medições e resultados de análise) estão sujeitos, em maior ou menor grau, a um componente de incerteza. No entanto, a variabilidade nos dados de entrada pode ser incorporada à interpretação dos resultados do modelo por meio da análise de incerteza, abordagem que permite a obtenção dos resultados expressos em termos probabilísticos, e não como simples valores únicos determinísticos (VON SPERLING, 2007).

Uma resposta típica dos formuladores de políticas públicas é reduzir e, de preferência, eliminar a incerteza, vista como um problema que complica o processo

de tomada de decisão. No entanto, trabalhar com a incerteza é inevitável na gestão de recursos hídricos. Desta forma, os formuladores de políticas devem empregar diferentes estratégias para lidar com esta questão e chegar a decisões aceitas pelos diversos atores (Warmink et al., 2017). Na prática, o gestor de água toma a decisão final sobre o nível de incerteza aceito (Kotamäki et al., 2019).

De acordo com Refsgaard et al. (2005), a atual legislação europeia recomenda fortemente que os novos planos de bacia considerem a influência das incertezas, principalmente nos bancos de dados e resultados de modelagem; no entanto, não apresenta de que maneira isto deve ser feito, havendo uma clara e urgente necessidade do desenvolvimento de novos conceitos, metodologias e ferramentas que possam auxiliar sua implementação.

Segundo Shimizu (1975), uma das formas de aplicação de incerteza é simulação simbólica que muitas das vezes é chamada de método de Monte Carlo. Historicamente, o método de Monte Carlo é considerado como uma técnica que faz uso de números randômicos ou pseudorrandômicos para a aplicação de um modelo. Números randômicos são essencialmente variáveis randômicas, independentes e uniformemente distribuídas no intervalo [0, 1].

Para Yoriyaz (2009) o método de Monte Carlo em si já é conhecido há séculos, mas passou a ser efetivamente utilizado somente nas últimas décadas. Em parte, este vertiginoso crescimento se deve diretamente ao rápido avanço tecnológico dos computadores, que traz benefícios tanto à velocidade de processamento quanto à capacidade de armazenamento de informações.

Qualquer aplicação do método de Monte Carlo é iniciada com a criação de um modelo que represente o sistema objeto de análise. A partir de então, simulam-se as interações das variáveis perturbadas com este modelo por meio de amostragens aleatórias que caracterizam o processo físico.

À medida que o número de simulações aumenta, melhora-se a qualidade do comportamento médio do sistema, caracterizado pela diminuição das incertezas estatísticas das grandezas de interesse. Entretanto, este método não permite que se obtenha a solução exata do problema, mas o que se espera é uma boa estimativa do valor exato à medida que um número suficientemente grande de

amostragens é processado. Este aspecto explica a relação do aumento do uso dessa técnica concomitantemente ao avanço tecnológico na área computacional (YORIYAZ, 2009).

Silva (2010) utilizou a análise de incerteza e de sensibilidade para identificar as incertezas originadas dos parâmetros mais sensíveis utilizados na calibração do modelo de qualidade de água de simulação com o *Soil and Water Assesment Tool* (SWAT). A pesquisa investigou a relação entre as incertezas no modelo, a natureza dos dados e os parâmetros calibrados. Os resultados decorrentes do trabalho indicaram que a representatividade dos dados é mais importante do que o tamanho da série utilizada no modelo. Na análise de incerteza, o aumento da quantidade de parâmetros ajustados levou ao aumento da probabilidade de realização de simulações consistentes.

Costa e Teixeira (2011) utilizaram o método de Monte Carlo para realizar a análise de incerteza em um modelo de qualidade da água e concluíram que o resultado estocástico é fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que os cenários simulados podem ser apresentados em termos de probabilidade de ocorrência.

Silva (2014), com o propósito de determinar o comportamento dos compostos de nitrogênio, utilizou o método de incerteza de Monte Carlo para gerar os dados de entrada para a simulação de qualidade do Rio Piracicaba utilizando o modelo QUAL-UFMG. A simulação da variação espacial dos compostos de nitrogênio, incorporando-se análise de incerteza conduzida com a geração aleatória dos dados de entrada com auxílio das distribuições Normal ou Uniforme, permitiu a indicação das faixas de concentração que, com maior probabilidade, deveriam ocorrer as concentrações máximas de nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato. Em função da natural diferença entre as distribuições Normal e Uniforme, os percentuais de ocorrência entre as diferentes faixas de valores de concentrações máximas variaram mais acentuadamente quando do emprego da distribuição Normal.

Mateus et al. (2015) conduziram um estudo em que inicialmente modelou-se a qualidade da Bacia do Rio Uberaba com dados de campo utilizando o modelo QUAL-UFMG e, posteriormente, aplicou o método de incerteza de Monte Carlo aos

dados de entrada para prever a probabilidade de o rio estudado conseguir atender determinado padrão de qualidade ambiental. Segundo os autores, a partir da análise dos resultados, a chance de o rio Uberaba atender ao padrão para classe 2, no período seco, é nula. A mesma análise possibilitou também a avaliação de ações de melhoria da qualidade da água, que devem ser direcionadas à recuperação ambiental do córrego das Lajes, demonstrando que a análise de incerteza se apresentou como uma ferramenta fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos, facilitando a interpretação dos resultados por parte dos gestores e tomadores de decisões.

Menezes et. al (2016) abordam a análise de incertezas em processos de engenharia, destacando métodos quantitativos para avaliar a variabilidade e os impactos das incertezas nos resultados de projetos. Os autores utilizaram 4 (quatro) campanhas de campo em que foram coletadas amostras em 11 (onze) pontos de amostragem na bacia do Ribeirão Vermelho no estado de Minas Gerais. Com o equacionamento matemático e os dados de campo, o modelo foi calibrado, estimando-se assim a faixa de variação de cada um dos parâmetros analisados.

Poton et al. (2023) utilizaram o método de Monte Carlo para gerar as variáveis hidrodinâmicas, as condições iniciais de qualidade e constantes cinéticas para a modelagem de qualidade de água da bacia do Rio Pardo, no estado do Espírito Santo, utilizando o modelo QUAL-UFMG. Essas variáveis foram geradas aleatoriamente com o auxílio das distribuições de probabilidade Normal e Uniforme. Para o rio Pardo, o emprego da geração aleatória de constantes cinéticas, variáveis hidrodinâmicas e concentrações dos parâmetros de qualidade de água não produziu variações consideradas relevantes para as concentrações mínimas de OD ou concentrações máximas de DBO. As concentrações de DBO, no entanto, superaram o padrão de qualidade ambiental a partir da disposição final do esgoto do município de Ibatiba, independentemente do conjunto de valores assumidos para as variáveis hidrodinâmicas, constantes cinéticas e condições qualidade de curso d'água e efluentes. A distribuição das frequências entre as diferentes classes de concentrações apresentou comportamento semelhante, ainda que com variações ligeiramente mais pronunciadas para os histogramas produzidos a partir do emprego da distribuição normal.

4 METODOLOGIA

4.1 Considerações gerais

Considerando que a principal perspectiva do presente trabalho é a avaliação da qualidade dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo com a incorporação da análise de incerteza, a metodologia, de forma simplificada, foi conformada por duas etapas:

1. Aplicação do modelo QUAL-UFMG para a avaliação da qualidade de água em condições determinísticas;
2. Incorporação do método de análise de incertezas de Monte Carlo ao modelo QUAL-UFMG, produzindo resultados de expressivo conjunto de simulações sob a forma de histogramas de frequência e diagramas tipo *Box-plot*.

Foram objetos da análise de incerteza as vazões, concentrações iniciais de oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo orgânico (P_{org}), fósforo inorgânico (P_{inorg}), nitrogênio orgânico (N_{org}), nitrogênio amoniacal (N_{amonr}), nitrito ($N_{nitritor}$), nitrato ($N_{nitrator}$), coliformes termotolerantes (C_{olir}), a temperatura (T), constantes cinéticas e os coeficientes das expressões que regulam as variações de velocidade e profundidade em função das vazões dos cursos d'água.

Também foram perturbadas pela análise de incerteza as concentrações de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), de fósforo orgânico (P_{org}), fósforo inorgânico (P_{inorg}), nitrogênio orgânico (N_{org}), nitrogênio amoniacal (N_{amonr}) e coliformes termotolerantes (Colir) nos lançamentos brutos ou tratados de esgotos domésticos.

Desta forma, após breve apresentação da área de estudo, serão sumariamente apresentados o modelo matemático de qualidade de água (modelo Qual-UFMG) e o método de análise de incertezas (método de Monte Carlo) empregados para a condução da dissertação.

4.2 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Novo constitui a área de estudo da presente pesquisa. A bacia está localizada na região sul do estado do Espírito Santo e possui área de drenagem de aproximadamente 776,9 km². Abrange em sua totalidade os municípios de Rio Novo do Sul e Iconha e, parcialmente, os municípios de Vargem Alta, Itapemirim e Piúma, reunindo uma população de cerca de 96.095 habitantes (SPAGNOL, 2023).

A bacia tem como característica a predominância por atividades rurais, em especial a criação de gado. O mapa apresentado por meio da figura 1 indica a localização da área de estudo.

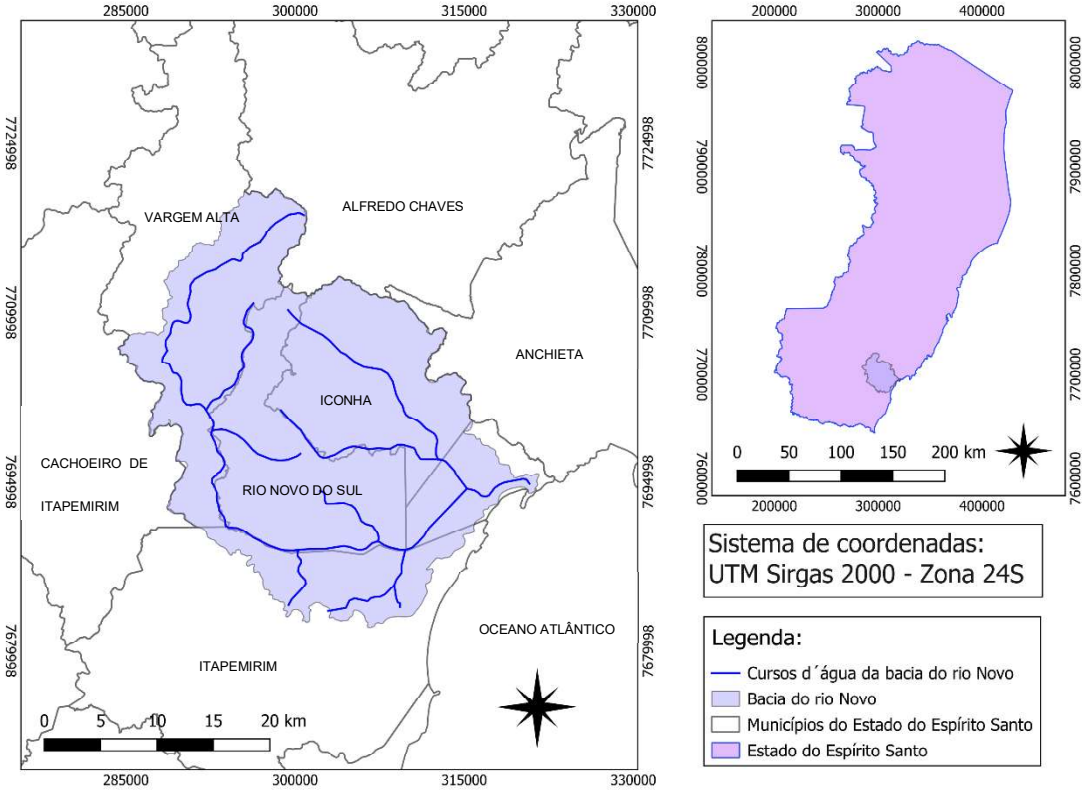

Figura 1: Mapa da bacia hidrográfica do rio Novo.
Fonte: Autoria própria.

O rio Novo é o principal curso d'água da bacia, com aproximadamente 90 km de extensão. Nasce na Serra do Richmond, no interior do município de Vargem Alta, a uma altitude de aproximadamente 800 m. Seu principal afluente é o rio Iconha, que nasce da confluência dos rios Ribeirão Inhaúma, Ribeirão Monte Alegre e o Ribeirão São Pedro.

A bacia hidrográfica estudada apresenta variações nos valores registrados para precipitações. O total anual precipitado oscila entre 1.121 mm e 1.742 mm, com valor médio de aproximadamente 1.431 mm. Quando comparada à média de precipitação anual para o estado do Espírito Santo (1.219 mm), observa-se uma alta incidência de chuva sobre essa região, principalmente, pela topografia bastante acidentada (AGERH, 2018).

O sistema hídrico objeto do estudo é composto pelo rio Novo, seus principais afluentes e diferentes contribuições pontuais e distribuídas. As fontes pontuais são constituídas pelos principais tributários do rio Novo e os efluentes domésticos de nove núcleos urbanos situados na bacia.

A bacia possui um amplo conjunto de instalação de ETEs em funcionamento, atendendo todas as sedes municipais, com exceção do município de Vargem Alta. As ETEs estão distribuídas por toda a bacia, com destaque para o rio Iconha, que acomoda a maior parte das estações de tratamento da região (SPAGNOL, 2023).

Observa-se, ainda, pontos onde há disposição final de esgotos brutos. Esses pontos estão presentes nos distritos de Itaipava, Piabanha do Norte, Aghá, Princesa, Jaciguá e no município de Vargem Alta (SPAGNOL, 2023).

O trecho considerado nas simulações de qualidade de água possui 89,5 km de extensão e abrangeu a porção do rio Novo desde a sua nascente até a foz. O trecho é o mesmo considerado na elaboração do Plano de Bacia e de Enquadramento da Bacia do rio Novo. O diagrama unifilar do trecho simulado pode ser observado na Figura 2.

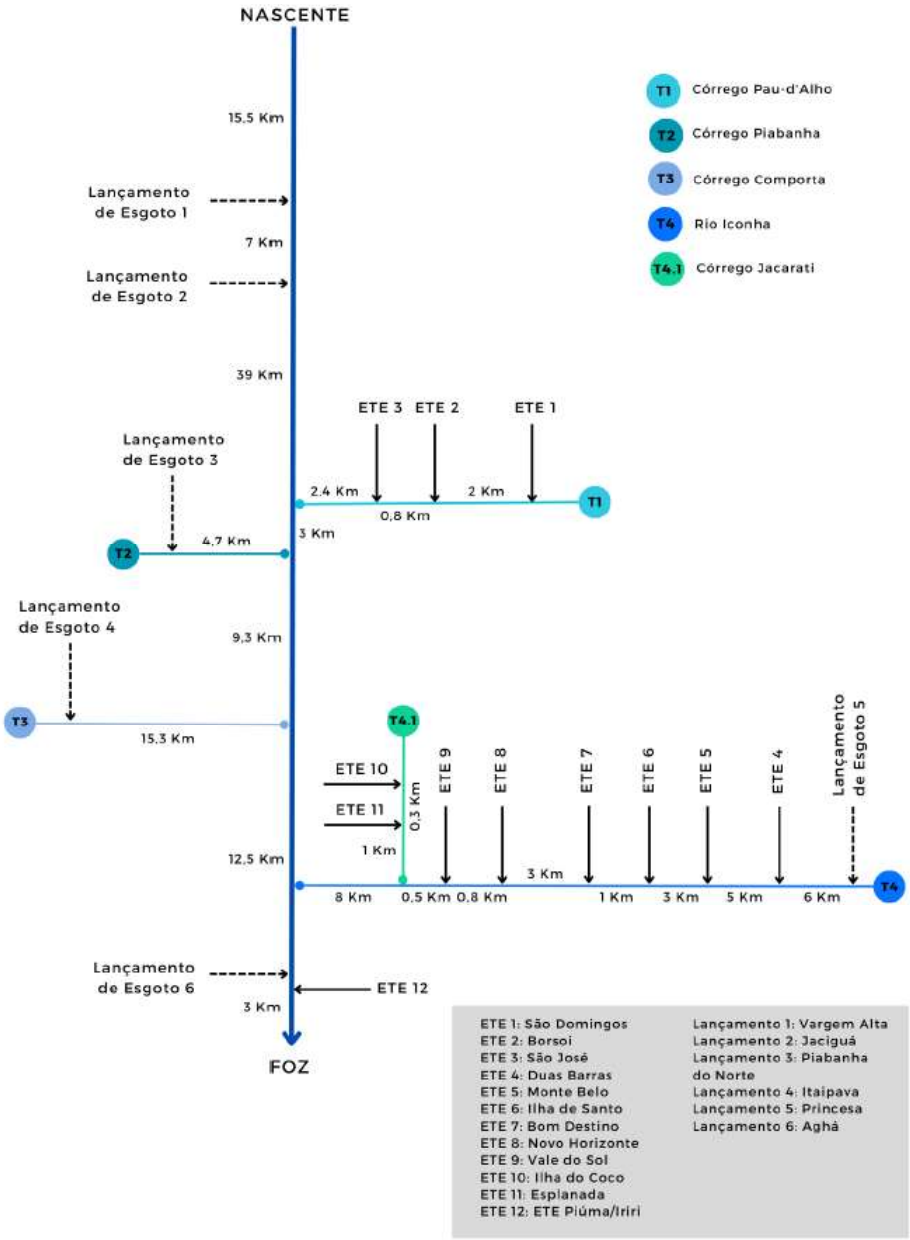

Figura 2: Diagrama Unifilar da bacia hidrográfica do Rio Novo.
Fonte: Spagnol (2023).

4.3 Modelo matemático de qualidade de água

O modelo matemático empregado neste estudo foi o QUAL-UFMG, modelo detalhadamente apresentado e descrito por Von Sperling (2014). O modelo QUAL-UFMG permite simular concentrações de OD, DBO, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato, fósforo orgânico, fósforo inorgânico e coliformes termotolerantes, isoladamente ou em quaisquer combinações.

Esse modelo possui como limitações a não incorporação da modelagem de algas e todas as suas relações com os demais constituintes da qualidade da água; a não

incorporação do efeito da dispersão longitudinal; e a demanda por cuidadosa discretização do sistema hídrico, por conduzir a integração das equações diferenciais ordinárias que descrevem a variação dos parâmetros de qualidade de água pelo método de Euler (VON SPERLING, 2014).

Foram simuladas as concentrações individualmente para cada um dos cursos d´água da bacia. Os resultados encontrados dos corpos d´água afluentes foram utilizados como dados de entrada nos pontos de confluência do rio em que desagua, seguindo o diagrama unifilar apresentado na Figura 2.

No modelo QUAL-UFMG, as variações das concentrações ao longo dos cursos d'água são estimadas, considerando-se o sistema hídrico em regime permanente, por meio das equações de (1) a (9).

$$\frac{dL}{dt} = -K_D \times L - K_S \times L + L_{rd} \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = K_2 \times (C_S - C) - K_D \times L - S_D + F - R - R_{02amon} \times (f_{nitr} \times K_{an}) \times N_{amon} \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = -K_b \times N \quad (3)$$

$$\frac{dN_{org}}{dt} = -K_{oa} \times N_{org} - K_{so} \times N_{org} \quad (4)$$

$$\frac{dN_{amon}}{dt} = K_{oa} \times N_{org} - K_{an} \times N_{amon} + \frac{S_{Namon}}{H} \quad (5)$$

$$\frac{dN_{nitri}}{dt} = K_{an} \times N_{amon} - K_{nn} \times N_{nitri} \quad (6)$$

$$\frac{dN_{nitra}}{dt} = K_{nn} \times N_{nitri} \quad (7)$$

$$\frac{dP_{org}}{dt} = -K_{oi} \times P_{org} - K_{spo} \times P_{org} \quad (8)$$

$$\frac{dP_{inorg}}{dt} = K_{oi} \times P_{org} + \frac{S_{inorg}}{H} \quad (9)$$

Nas equações de (1) a (9):

- K_D: coeficiente de decomposição da matéria orgânica no rio (d^{-1});
- K_S: coeficiente de remoção de $DBO_{5,20}$ por sedimentação (d^{-1});
- L: concentração de DBO última em um tempo qualquer (mg/L);
- L_{rd}: taxa de entrada de $DBO_{5,20}$ última difusa na massa líquida (g/m³.d);
- C: concentração de oxigênio dissolvido em um tempo t qualquer (mg/L);
- C_s: concentração de saturação do OD (mg/L);
- N_{org}: concentração de N-orgânico em um tempo de percurso t qualquer (mg/L);
- N_{amon}: concentração de N-amônia em um tempo de percurso t qualquer (mg/L);
- N_{itri}: concentração de N-nitito em um tempo de percurso t qualquer (mg/L);
- P_{org}: concentração de P-orgânico em um tempo de percurso t qualquer (mg/L);
- P_{inorg}: concentração de P-inorgânico em um tempo de percurso t qualquer (mg/L);
- K_2: coeficiente de reaeração (d^{-1});
- S_d: demanda de oxigênio pelo sedimento (g O_2/m³.d);
- F: taxa de produção de oxigênio por fotossíntese (g O_2/m³.d);
- R: taxa de consumo de oxigênio pela respiração (g O_2/m³.d);
- R_{O2amon}: relação entre o oxigênio consumido por cada unidade de amônia oxi-dada a nitrito (mg O_2/mg N_{amon});
- f_{nitr}: fator de correção do coeficiente de nitrificação em função do OD (adimen-sional);
- K_{so}: coeficiente sedimentação do nitrogênio orgânico (d^{-1});
- K_{oa}: coeficiente de conversão do nitrogênio orgânico em amônia(d^{-1});
- K_{an}: coeficiente de conversão da amônia a nitrito (d^{-1});
- K_{nn}: coeficiente de conversão da do nitrito em nitrato (d^{-1});
- S_{amon}: fluxo de liberação da amônia pelo sedimento de fundo (adimensional);
- K_b: coeficiente de decaimento bacteriano (d^{-1});
- N: número de coliformes termotolerantes (NMP/100mL).
- K_{oi}: coeficiente conversão do fósforo orgânico em inorgânico (d^{-1});

- K_{spo}: coeficiente sedimentação do fósforo orgânico (d^{-1});
- S_{Pinorg}: fluxo de liberação do fósforo inorgânico pelo sedimento de fundo (adimensional);
- t: tempo (d).

É relevante observar que, ainda que as equações permitam, as simulações de qualidade dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo não consideraram sedimentação, demanda bentônica, fotossíntese e respiração.

Segundo Von Sperling (2014), a desconsideração do fenômeno de sedimentação da matéria orgânica apresenta-se a favor da segurança dos resultados, uma vez que a modelagem não consideraria o decréscimo da DBO em decorrência da sedimentação. Von Sperling (2014) observa, adicionalmente, que os processos de fotossíntese e respiração têm taxas aproximadamente iguais, podendo se equivaler para simulações de qualidade de água que assumem escoamento permanente.

O referido autor também indica que, quanto à desconsideração da demanda bentônica, os estudos para quantificação do coeficiente que descreve a dinâmica do referido processo são laboriosos e caros, demandando vultoso levantamento de campo e análises laboratoriais. A eventual utilização de dados médios de literatura, por sua vez, é difícil de se generalizar, função da complexidade da interação de todos os fatores que podem influenciar a demanda bentônica, como composição e textura do lodo, porcentagem de matéria orgânica, idade, profundidade, temperatura e OD, dentre outros.

4.4 Método de análise de incerteza

Para a análise de incerteza das diferentes variáveis e coeficientes associados à simulação das condições de qualidade dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo foi empregado o método de Monte Carlo. A aplicação do Método envolveu a execução de um elevado número de simulações sendo gerados, para cada uma das simulações, diferentes valores para as variáveis de entrada e coeficientes cinéticos do modelo de qualidade de água. A Figura 3 reúne, num fluxograma, as diferentes etapas associadas à análise de incerteza conduzida com emprego do método de Monte Carlo. A etapa da análise de incerteza foi conduzida com o auxílio

da planilha eletrônica Microsoft Excel, mesmo ambiente computacional no qual foi desenvolvido o modelo de qualidade de água QUAL-UFMG.

Figura 3: Etapas para a condução da análise de incerteza pelo Método de Monte Carlo. Fonte: adaptado de Von Sperling (2007).

Os dados de entrada utilizados neste trabalho estão reunidos na Tabela 1. As vazões e condições de qualidade dos cursos d'água estão associadas à simulação determinística, no entorno das quais foram realizadas as simulações com incorporação de incertezas.

Tabela 1 – Dados de entrada dos afluentes para as simulações de qualidade de água na bacia do Rio Novo.

(continua)

Dado de entrada	Simbologia	Unidade	Curso d´água					
			Rio Novo	C. Pau d´Álho	C. Piabinha	C. Comporta	Rio Iconha	C. Jacarati
Vazão	Q	m³/s	5,84	0,36	0,34	1,06	2,06	0,16
Oxigênio dissolvido	OD	mg/L	8,17	7,29	3,42	6,73	7,02	7,32
Demanda bioquímica de oxigênio	DBO	mg/L	2,43	1,7	16,1	2,6	1,8	3
Nitrogênio orgânico	N_{orgr}	mg/L	0,6	0,61	1,79	0,72	0,68	0,88
Nitrogênio amoniacal	N_{amonr}	mg/L	0,01	0,16	1,82	0,44	0,47	0,47
Nitrito	$N_{nitritor}$	mg/L	0,01	0,02	0,15	0,07	0,08	0,02
Nitrato	$N_{nitrator}$	mg/L	0,47	0,45	0,43	0,46	0,46	0,44

Tabela 1 - Dados de entrada dos afluentes para as simulações de qualidade de água na bacia do Rio Novo – conclusão.

(conclusão)

Dado de entrada	Simbologia	Unidade	Curso d´água					
			Rio Novo	C. Pau d´Álho	C. Piabinha	C. Comporta	Rio Iconha	C. Jacarati
Fósforo orgânico	P_{org}	mg/L	0,006	0,01	0,11	0,02	0,02	0,0274
Fósforo inorgânico	P_{inorg}	mg/L	0,01	0,01	0,29	0,05	0,05	0,06
Coliformes	Colir	NMP/100ml	170	81	19901	1451	566	218
Temperatura	T	ºC	23,88	23,88	23,88	23,88	23,88	23,88
Coeficiente a de velocidade	a	-	0,2401	0,2401	0,2401	0,2401	0,2401	0,2401
Coeficiente b de velocidade	b	-	0,3564	0,3564	0,3564	0,3564	0,3564	0,3564
Coeficiente c de profundidade	c	-	0,2117	0,2117	0,2117	0,2117	0,2117	0,2117
Coeficiente d de profundidade	d	-	0,5584	0,5584	0,5584	0,5584	0,5584	0,5584
Coeficiente de desoxigenação	K1	dia^{-1}	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Coeficiente de decomposição da matéria orgânica	KD	dia^{-1}	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Coeficiente de reaeração	K2	dia^{-1}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Fonte: AGERH (2018).

As vazões e condições de qualidade iniciais associadas aos efluentes, por sua vez, estão reunidos na tabela 2.

Tabela 2 – Dados de entrada dos lançamentos para as simulações de qualidade de água na bacia do Rio Novo.

(continua)

Pontos de disposição	Vazão tratada (m^3/s)	$DBO_{5,20}$ (mg/l)	Nitrogênio orgânico (mg/l)	Nitrogênio amoniacal (mg/l)	Fósforo orgânico (mg/l)	Fósforo inorgânico (mg/l)	Coliformes (nmp/100ml)
ETE Esplanada	0,00024	81,13	18,03	23,18	1,55	3,61	8,585E+03
ETE Ilha do Coco	0,0021	76,49	18,03	23,18	1,55	3,61	8,585E+03
ETE Novo Horizonte	0,00183	57,95	18,03	23,18	1,55	3,61	8,585E+03
ETE Vale do Sol	0,00086	71,86	18,03	23,18	1,55	3,61	8,585E+03
ETE Duas Barras	0,00052	81,13	18,03	23,18	1,55	3,61	8,585E+03
Itaipava	0,00482	699,48	45,34	58,29	3,89	9,07	1,295E+06
Piabinha do norte	0,00017	380,71	24,68	31,73	2,12	4,94	7,050E+05

Tabela 2 – Dados de entrada dos lançamentos para as simulações de qualidade de água na bacia do Rio Novo - conclusão.

(conclusão)

Pontos de disposição	Vazão tratada (m^3/s)	$DBO_{5,20}$ (mg/l)	Nitrogênio orgânico (mg/l)	Nitrogênio amoniacal (mg/l)	Fósforo orgânico (mg/l)	Fósforo inorgânico (mg/l)	Coliformes (nmp/100ml)
ETE Piúma / Iriri	0,03298	37,44	9,1	11,7	0,78	1,82	4,333E+03
Aghá	0,2362	233,97	15,16	19,5	1,3	3,03	4,333E+05
ETE São José	0,00007	123,73	14,81	19,04	1,27	2,96	7,050E+03
ETE São Domingos	0,00003	123,73	14,81	19,04	1,27	2,96	7,050E+03
ETE Borsoi	0,00003	123,73	14,81	19,04	1,27	2,96	7,050E+03
Princesa	0,00984	463,6	30,05	38,63	2,58	6,01	8,585E+05
Vargem Alta	0,00717	699,48	45,34	58,29	3,89	9,07	1,295E+06
Jaciguá	0,00461	699,48	45,34	58,29	3,89	9,07	1,295E+06
ETE Monte Belo	0,00034	81,13	18,03	23,18	1,55	3,61	8,585E+03
ETE Bom Destino	0,00105	62,59	18,03	23,18	1,55	3,61	8,585E+03
ETE Ilha de Santo Inácio	0,00144	67,22	18,03	23,18	1,55	3,61	8,585E+03

Fonte: AGERH (2018).

Neste trabalho, quando da condução da análise de incerteza, os coeficientes e dados de entrada para cada simulação de qualidade de água foram gerados aleatoriamente dentro de um intervalo pré-estabelecido, reproduzindo abordagem empregada por Menezes et el. (2016).

A geração aleatória dos coeficientes e dados de entrada foi conduzida com auxílio da função “Aleatório” da planilha eletrônica Microsoft Excel, função que permite, com igual probabilidade de ocorrência, a geração de um valor aleatório entre 0 e 1. Dessa forma, para cada uma das variáveis perturbadas, o valor de entrada da variável correspondeu ao seu limite inferior acrescido de um valor aleatório correspondente à parcela do intervalo de variação pré-estabelecido para a variável, conforme expressões (10), (11) e (12).

$$\text{Variável} = \text{Limite inferior} + \text{ valor aleatório} \times (\text{Limite superior} - \text{Limite inferior}) \qquad (10)$$

$$\text{Limite inferior} = \text{Valor médio } \times (1 - \frac{\text{percentual de variação}}{100}) \qquad (11)$$

$$\text{Limite superior} = \text{Valor médio } \times (1 + \frac{\text{percentual de variação}}{100}) \quad (12)$$

Os valores dos dados de entrada perturbados pelo método de Monte Carlo foram obtidos a partir dos percentuais de variação sugeridos por Menezes et al. (2016) e sumarizados na tabela 3.

Tabela 3 – Percentuais de variação a serem empregados para a geração aleatória dos dados de entrada do modelo.

Dado de entrada	Simbologia	Unidade	% de variação em torno do valor médio
Vazão	Q	m³/s	10
Demanda bioquímica de oxigênio	DBO	mg/L	10
Oxigênio dissolvido	OD	mg/L	10
Nitrogênio orgânico	N_{orgr}	mg/L	10
Nitrogênio amoniacal	N_{amonr}	mg/L	10
Nitrito	$N_{nitritor}$	mg/L	10
Nitrato	$N_{nitrator}$	mg/L	10
Fósforo orgânico	P_{org}	mg/L	10
Fósforo inorgânico	P_{inorg}	mg/L	10
Coeficiente de desoxigenação	K_1	dia^{-1}	10
Coeficiente de decomposição da matéria orgânica	K_D	dia^{-1}	20
Coeficiente de reaeração	K_2	dia^{-1}	80
Coliformes termotolerantes	N	NMP/100ml	10
Coeficientes das relações funcionais entre vazões, velocidades e profundidades	-	-	10
Temperatura	T	ºC	5

Fonte: Menezes et al (2016).

Para este trabalho foi escolhida a distribuição Uniforme de probabilidades, em que os valores aleatórios são igualmente distribuídos em um determinado intervalo de variação pré-estabelecido. Como não existem séries históricas robusta dos parâmetros de qualidade de água objetos de análise, nem para pontos do rio principal nem para seus tributários, não foi possível analisar qual a distribuição de probabilidade melhor se adequa ao comportamento de cada um deles.

Segundo Poton et al. (2023), a distribuição de frequências acumuladas é fortemente afetada pelo tamanho da amostra da variável objeto de análise. Ainda que a ampliação do tamanho da amostra reduza a intensidade do ruído amostral, os referidos autores não observaram variações relevantes na conformação da distribuição de frequências acumuladas para conjunto com mil simulações ou mais,

independentemente do parâmetro de qualidade analisado ou distribuição empregada quando da condução da análise de incerteza com auxílio do método de Monte Carlo.

No presente trabalho, reproduzindo abordagem empregada por Poton et al. (2023), foram produzidos resultados baseados em conjuntos de 50, 100, 500, 1000, 2000 e 5000 simulações de qualidade de água. Assim como os referidos autores, buscou-se avaliar a diferença dos ruídos nas frequências acumuladas com a ampliação do número de simulações.

Resultados dos diferentes conjuntos de simulações foram apresentados sob a forma de histogramas de frequência e diagramas tipo *Box-plot*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Simulação determinística da qualidade da água

As simulações iniciais de qualidade de água foram realizadas em condições determinísticas a partir das diretrizes metodológicas estabelecidas no Capítulo 5.

A partir das informações reunidas nas Tabela 1 e Tabela 2 foram simuladas as condições de qualidade nos cursos d'água da bacia do rio Novo com auxílio do modelo QUAL-UFMG. Os perfis para as concentrações de OD, DBO, coliformes termotolerantes, compostos de nitrogênio, compostos de fósforo e amônia livre no rio Novo, para condições determinísticas, estão reunidas nas figuras de 4 a 8. Perfis similares, produzidos para córrego Piabinha, estão apresentados por meio das figuras de 9 a 13. Os perfis associados aos demais cursos d'água da bacia (córregos Pau D'Alho, Comporta, Jacarati e rio Iconha) estão reunidos no Apêndice I.

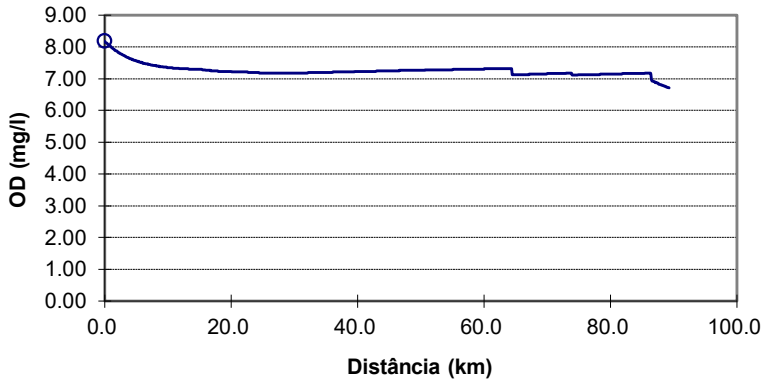

Figura 4: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o rio Novo.
Fonte: Autoria própria.

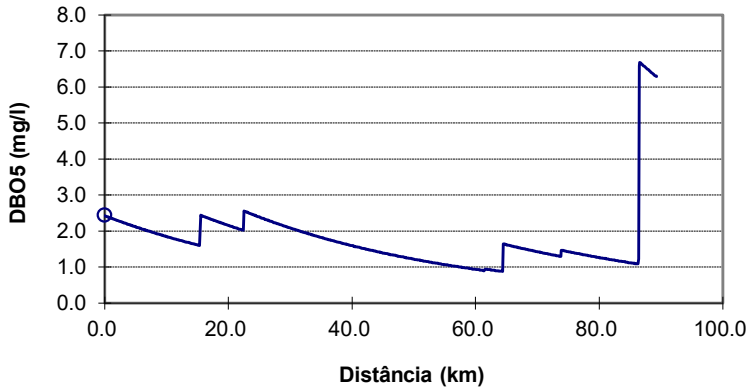

Figura 5: Perfil da DBO simulada para o rio Novo.
Fonte: Autoria própria.

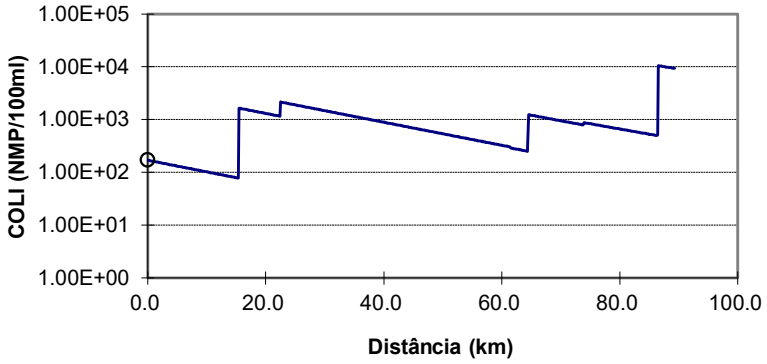

Figura 6: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o rio Novo.
Fonte: Autoria própria.

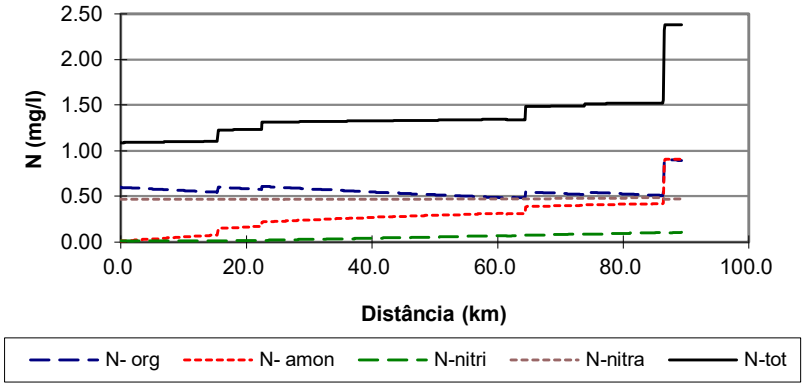

Figura 7: Perfil do nitrogênio simulado para o rio Novo.
Fonte: Autoria própria.

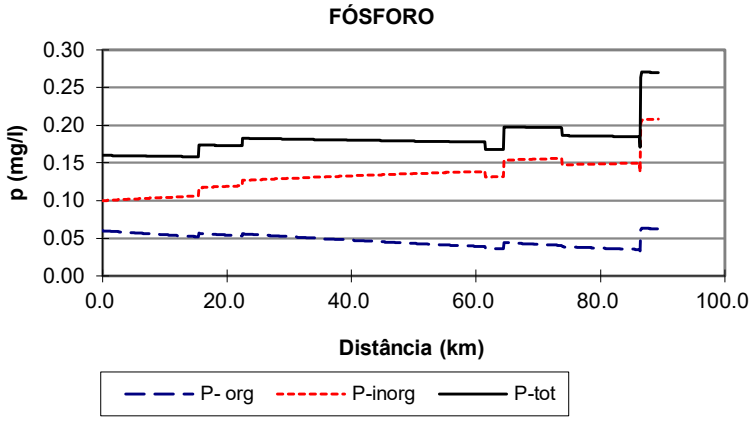

Figura 8: Perfil do fósforo simulado para o rio Novo.
Fonte: Autoria própria.

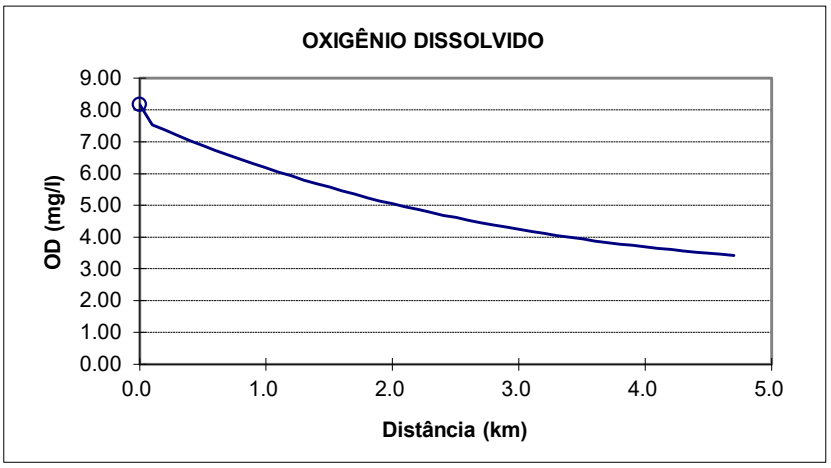

Figura 9: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o córrego Piabinha.

Fonte: Autoria própria.

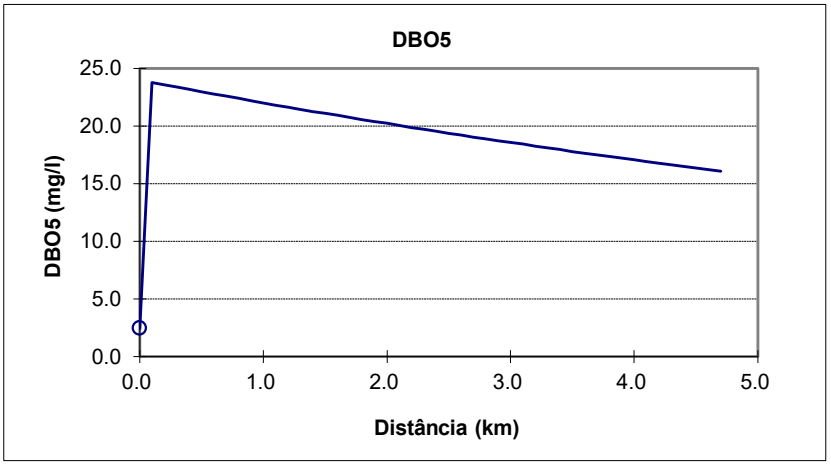

Figura 10: Perfil de DBO simulado para o córrego Piabinha.

Fonte: Autoria própria.

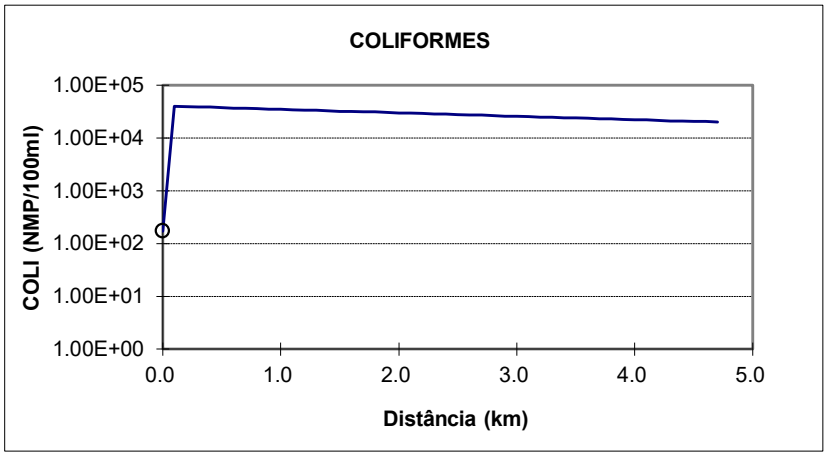

Figura 11: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o córrego Piabinha.

Fonte: Autoria própria.

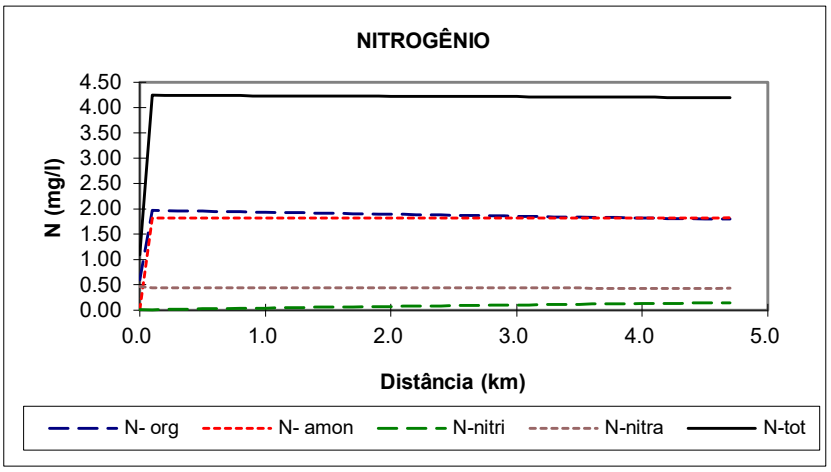

Figura 12: Perfil de nitrogênio simulado para o córrego Piabinha.

Fonte: Autoria própria.

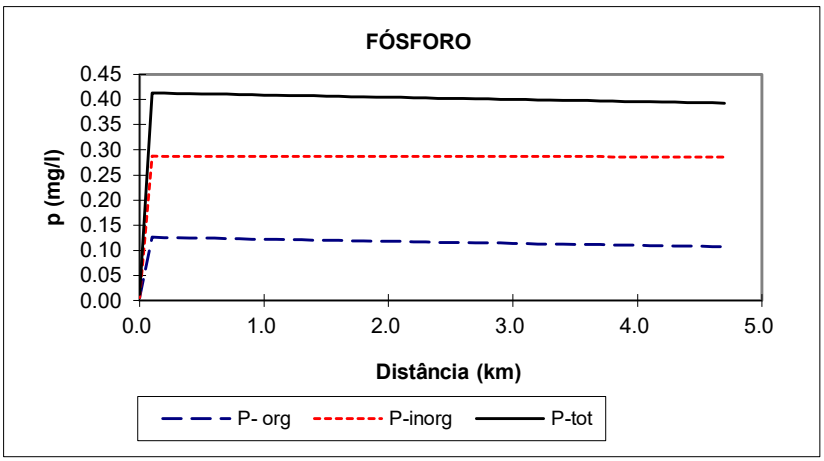

Figura 13: Perfil de fósforo simulado para o córrego Piabinha.

Fonte: Autoria própria.

A partir da simples inspeção dos perfis de concentração produzidos a partir de simulações determinísticas da qualidade da água para o rio Novo (figuras de 4 a 8), córrego Piabinha (figuras de 9 a 13) e para os demais cursos d'água da área de estudo (com perfis reunidos no Apêndice I), foram consideradas relevantes as seguintes observações:

- As concentrações estimadas de OD atenderam ao padrão determinado pela resolução CONOMA nº 357/2005 para rios classe 2 (mínimo de 5 mg/L) em toda a extensão do rio Novo. No córrego Piabinha, da sua porção intermediária até a confluência com o rio Novo, o padrão de qualidade estabelecido para rios classe 2 não foi atendido. Nos demais

afluentes do rio Novo, as concentrações de OD foram invariavelmente superiores a 5 mg/L;

- Na maior parte da extensão simulada do rio Novo, as concentrações estimadas de DBO atenderam ao padrão determinado pela resolução CONAMA nº 357/2005 para rios classe 2 (máximo de 5 mg/L); no entanto, no entorno do quilômetro 86, onde ocorre a confluência com o rio Iconha, o lançamento de esgoto do Aghá e a disposição do efluente tratado da ETE Piúma/Iriri, o referido padrão não foi atendido. Concentrações de DBO superiores ao padrão de qualidade ambiental em rios classe 2 também foram estimadas para as porções iniciais dos córregos Piabinha e Comporta;
- No rio Novo, as concentrações de coliformes termotolerantes não atendem ao padrão determinado pela resolução CONAMA nº 357/2005 para rios classe 2 (máximo de 1000 NMP/100 mL) nos seguintes trechos: ***a)*** após o lançamento de esgoto do Jaciguá até trecho no entorno do quilômetro 40; ***b)*** na região de confluência do córrego Pau D´Álho e ***c)*** próximo ao quilômetro 86, onde ocorre a confluência com o rio Iconha, o lançamento de esgoto do Aghá e a disposição do efluente tratado da ETE Piúma/Iriri. O padrão ambiental estabelecido para coliformes termotolerantes também foi superado no rio Iconha e nos córregos Piabinha e Comporta, em trechos subsequentes à disposição final de esgotos brutos que ocorre nas porções superiores desses cursos d'água;
- Os compostos de fósforo apresentam expressivos aumentos de concentrações no trecho final do curso d´água do rio Novo, no entorno do quilômetro 86, onde ocorre a confluência com o rio Iconha, o lançamento de esgoto do Aghá e a disposição do efluente tratado da ETE Piúma/Iriri; à jusante desta seção, o padrão de qualidade estabelecido pela resolução CONAMA nº 357/2005 para fósforo total em corpos d'água lóticos classe 2 (0,1 mg/L) não foi atendido. O padrão para fósforo total também é superado ao longo de toda a extensão do córrego Comporta. Nos demais cursos d'água da bacia, as concentrações estimadas para o fósforo total apresentaram substancialmente inferiores ao padrão de qualidade estabelecido para corpos d'água lótico classe 2;

- Os padrões de qualidade associados aos compostos de nitrogênio são estabelecidos pela resolução CONAMA nº 357/2005 em função dos valores de pH dos cursos d'água. Em rios classe 2 que apresentem valores de pH de até 7,5 (condição característica dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo), as concentrações de nitrogênio amoniacal total não devem exceder 3,7 mg/L. No conjunto de cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo objetos de análise, nenhum deles apresentou concentrações de nitrogênio amoniacal total superiores ao referido padrão de qualidade;
- Os resultados das simulações determinísticas de qualidade de água indicam condições para os cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo similares àquelas descritas pelo relatório do Diagnóstico e Prognóstico das Condições de Uso da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Novo, apresentado pela Agência Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo (AGERH, 2018).

5.2 Simulação da qualidade da água com a incorporação da Análise de Incerteza

A partir dos resultados das simulações em condições determinísticas, o método de análise de incertezas de Monte Carlo foi associado ao modelo de qualidade de água QUAL-UFMG, variando dados de entrada a partir da combinação das expressões (10), (11) e (12), considerados os percentuais de variação sumarizados na tabela 3 e originalmente propostos por Menezes et al (2016).

Os diagramas tipo *Box-plot* para os parâmetros OD, DBO e coliformes termotolerantes estão apresentados nas figuras 14, 15 e 16, respectivamente. Os histogramas de frequência para valores extremos das concentrações dos referidos parâmetros no rio Novo, por sua vez, são apresentados por meio das figuras de 17 (OD), 18 (DBO) e 19 (coliformes termotolerantes). Relevante observar que as figuras de 14 a 19 foram estabelecidas a partir de conjuntos de 1.000 (mil) simulações de qualidade de água. O Apêndice I reúne gráficos similares produzidos para os compostos de nitrogênio (nitrogênio orgânico, amônia total, nitrito e nitrato) e fósforo (fósforo orgânico e fósforo inorgânico).

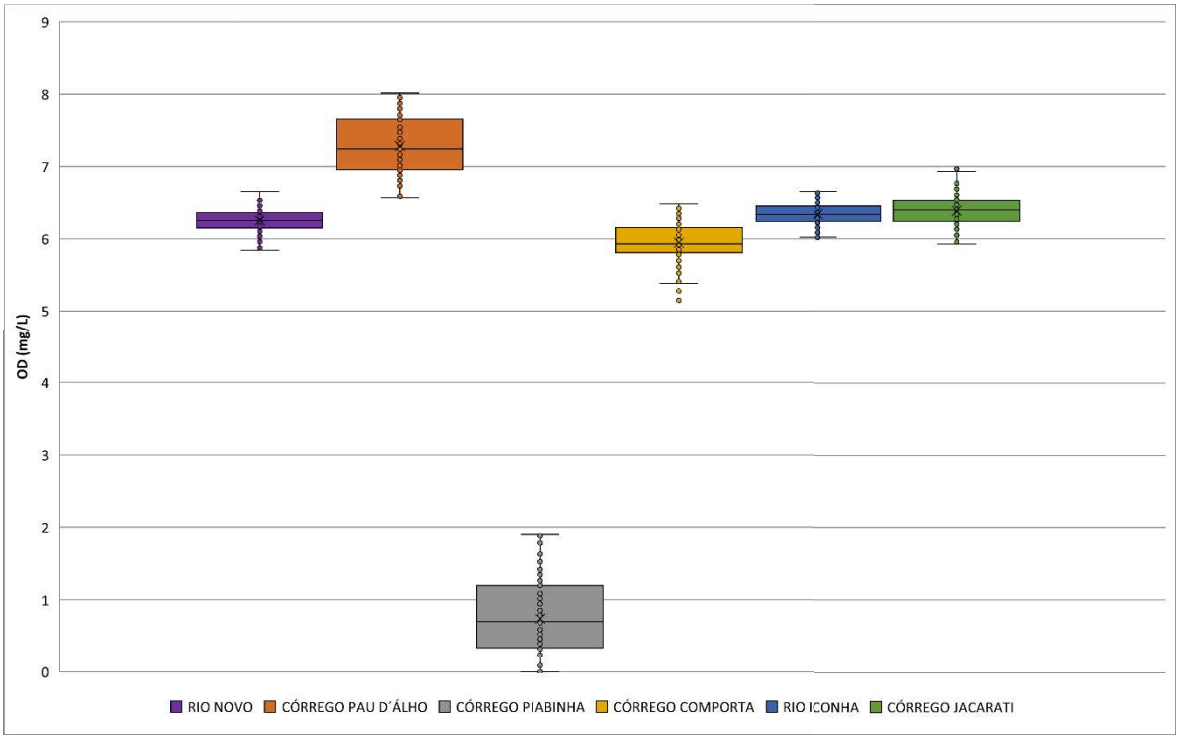

Figura 14: Diagramas tipo Box-plot para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1000 simulações.
Fonte: Autoria própria.

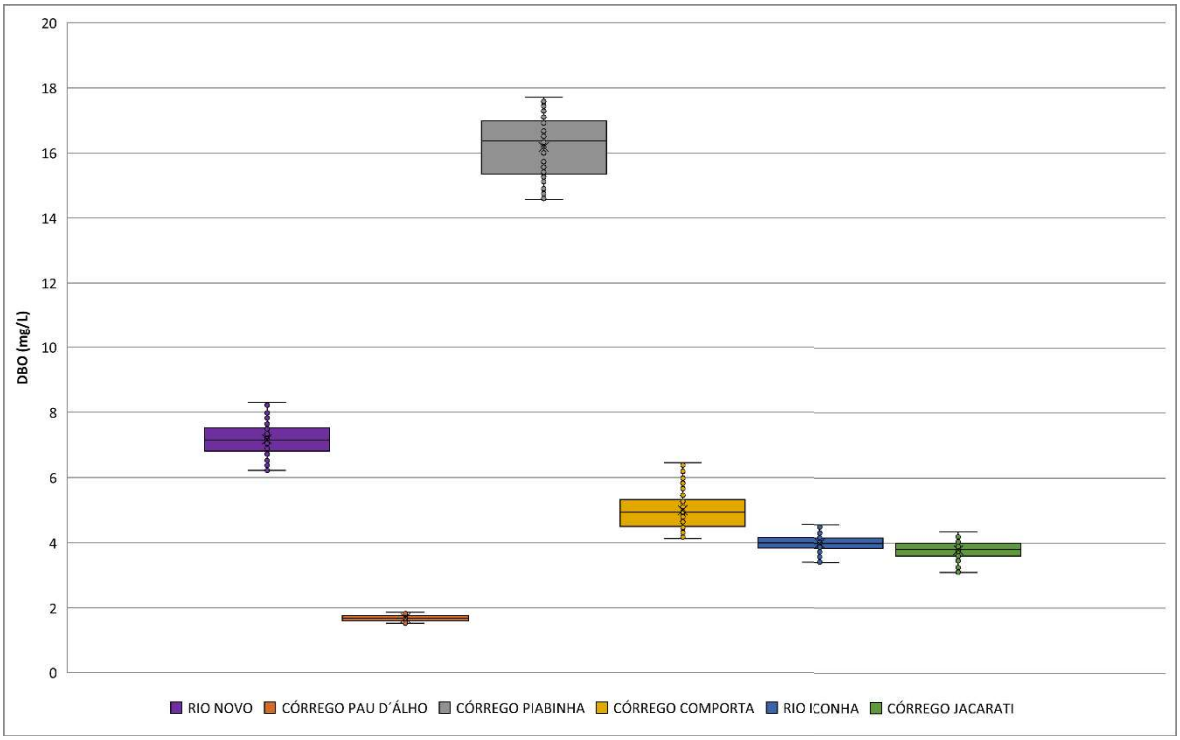

Figura 15: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1000 simulações.
Fonte: Autoria própria.

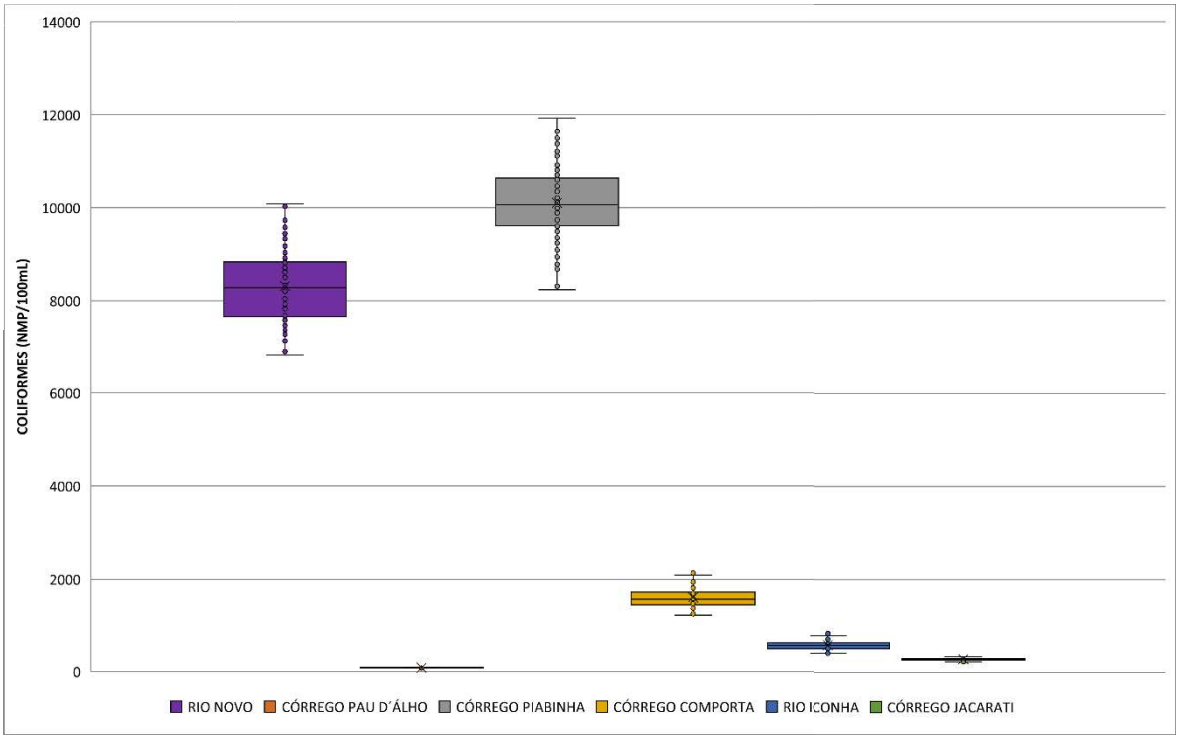

Figura 16: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1000 simulações.
Fonte: Autoria própria.

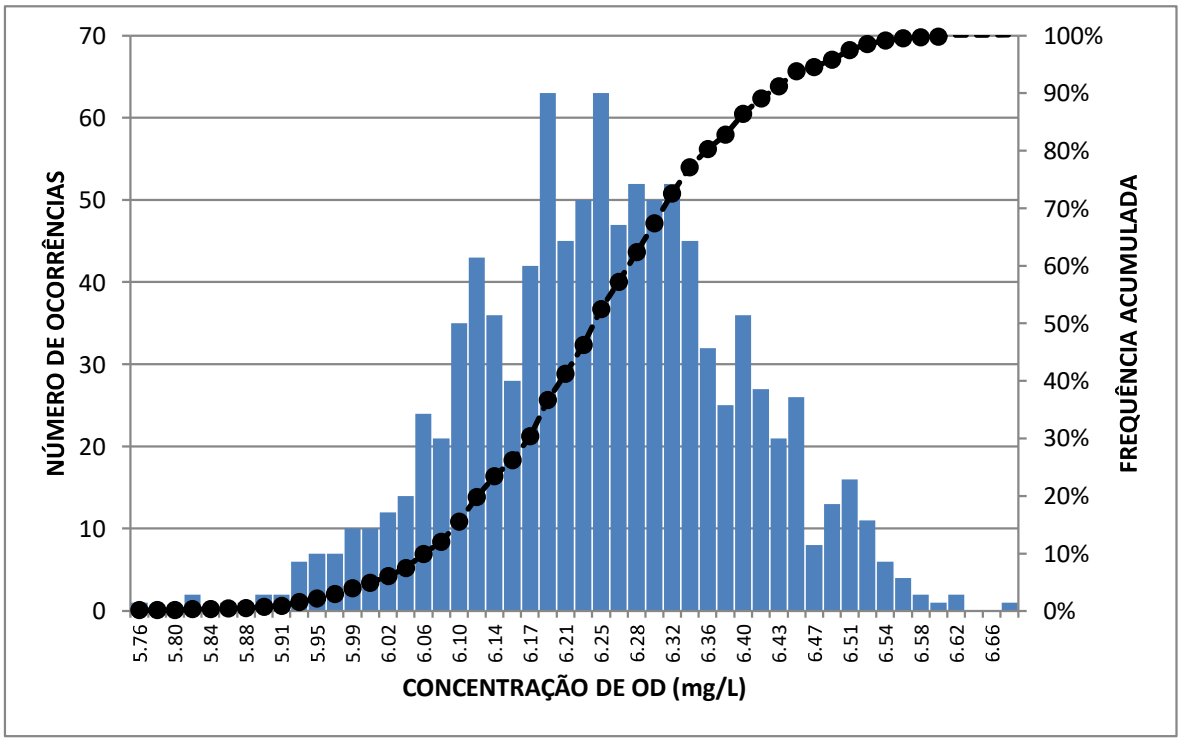

Figura 17: Histograma de frequência para OD no rio Novo para conjunto com 1000 simulações.
Fonte: Autoria própria.

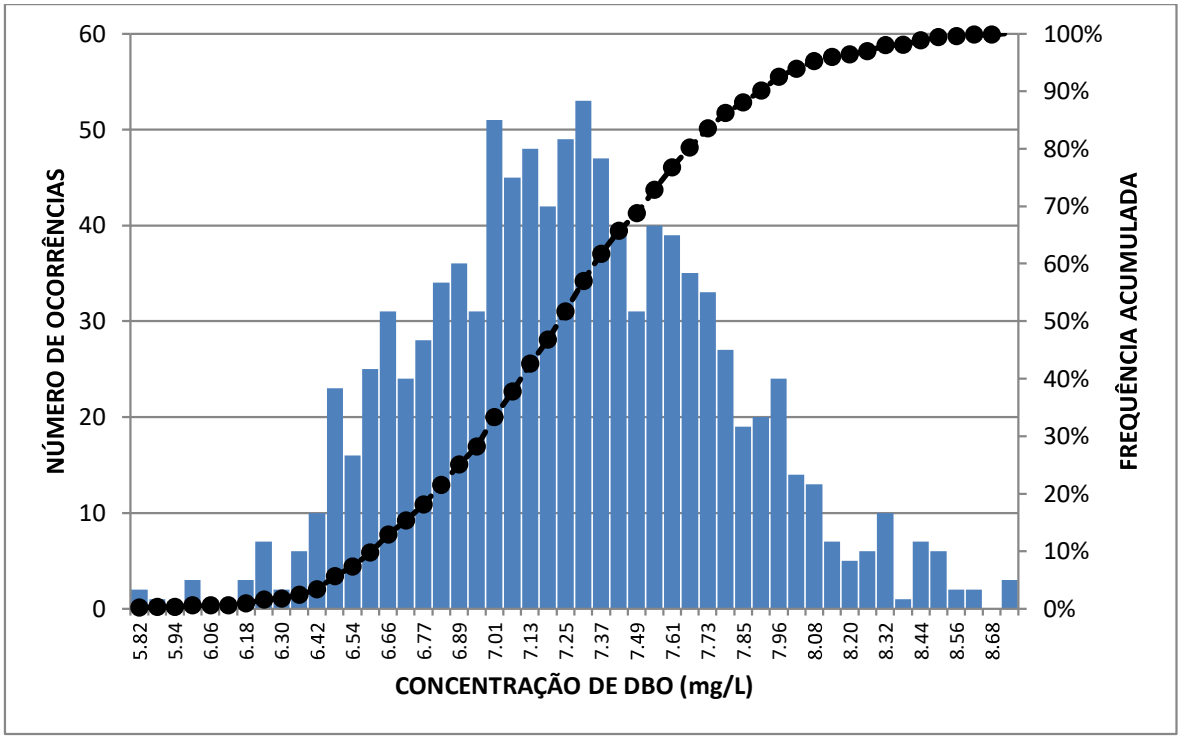

Figura 18: Histograma de frequência para DBO no rio Novo para conjunto com 1000 simulações.
Fonte: Autoria própria

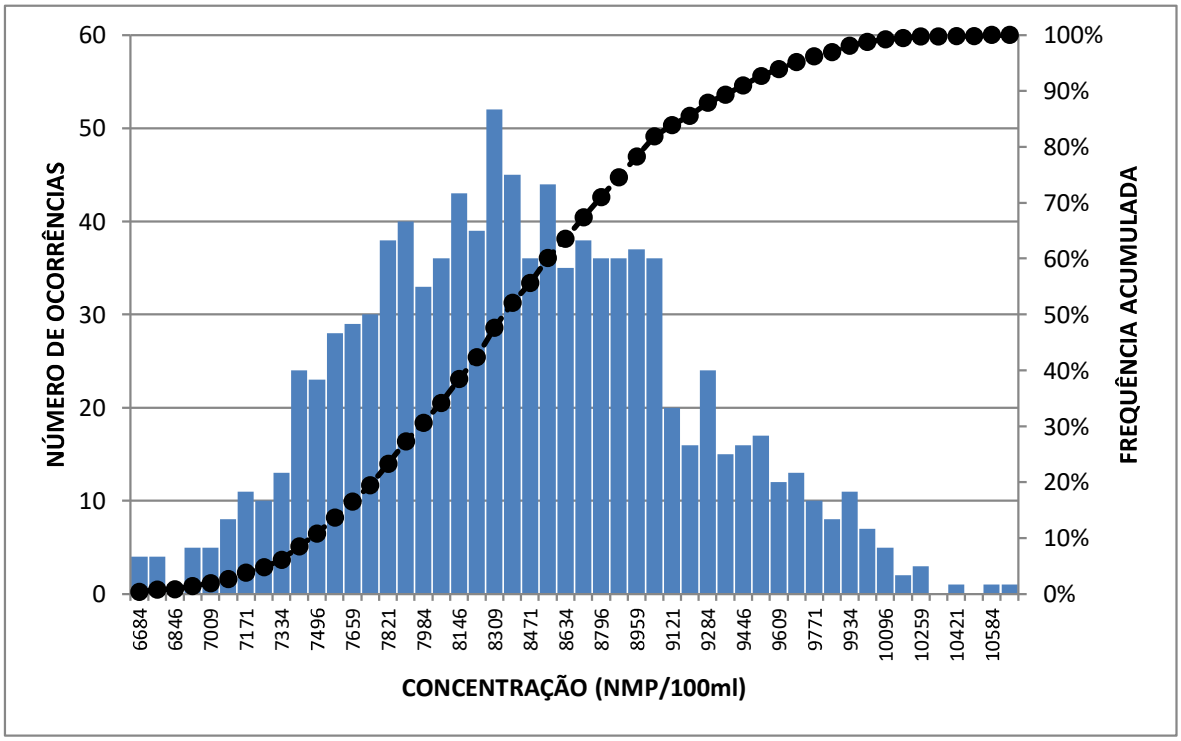

Figura 19: Histograma de frequência para coliformes termotolerantes no rio Novo para conjuntos com 1000 simulações.
Fonte: Autoria própria.

A partir da simples inspeção das figuras dos gráficos reunidos nas figuras de 14 a 19, bem como das figuras similares para os compostos de nitrogênio e fósforo

reunidas no Apêndice I, foram entendidas como relevantes as seguintes considerações:

- As concentrações mínimas de OD atenderam ao padrão de qualidade estabelecido para rios classe 2 (5 mg/L) em todos os cursos d'água objetos de análise, exceto para o córrego Piabinha, onde em nenhuma das simulações realizadas a concentração superou 4 mg/L. No rio Novo, principal curso d´água da bacia, as concentrações recorrentemente superaram 6 mg/L, conservando-se acima deste valor em mais de 95% (95,9%) das simulações realizadas;
- O padrão de qualidade para a DBO em rios classe 2 (concentração máxima de 5 mg/L) foi invariavelmente superado no córrego Piabinha. No conjunto de simulações realizadas, as concentrações máximas de DBO no córrego Piabinha conservaram-se acima de 14,5 mg/L. O referido padrão de qualidade para a DBO também foi superado no rio Novo, com concentrações máximas de DBO superiores a 6,0 mg/L. Já no córrego comporta, Concentrações distribuídas entre a mediana e o quartil superior também ultrapassaram a concentração de 5,0 mg/L. Nos demais cursos d'água da área de estudo, as concentrações máximas de DBO mantiveram-se abaixo do padrão de qualidade ambiental assumido como referência para a discussão;
- No rio Novo e nos córregos Comporta e Piabinhas, as concentrações máximas de coliformes termotolerantes invariavelmente superaram o padrão de qualidade definido para rios classe 2 (1.000 NMP/100ml). Relevante observar, adicionalmente, que nos conjuntos de simulações realizadas, independentemente das incertezas incorporadas ao modelo de qualidade de qualidade de água, as concentrações máximas de coliformes termotolerantes no córrego Piabinha superaram 8.000 NMP/100 ml. No rio Novo, as concentrações máximas de coliformes termotolerantes invariavelmente superaram 6.500 NMP/100 ml, com aproximadamente 70% delas (68,2%) superando 8.000 NMP/100 ml. Nos demais cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo, as concentrações máximas de coliformes não superaram 1.000 NMP/100ml;

- Nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo, as concentrações máximas de nitrogênio amoniacal total apresentaram-se invariavelmente inferiores a 3,7 mg/L, padrão de qualidade ambiental estabelecido para rios classe 2 associado à valores de pH iguais ou inferiores a 7,5. No rio Iconha e córregos Pau D'Alho, Comporta e Jacarati, o padrão para classe 2 continuaria a ser atendido, mesmo que os valores do pH nesses cursos d'água fosse elevado para 8,0, condição na qual são admitidas concentrações de nitrogênio amoniacal total de 2,0 mg/L. Concentrações máximas inferiores a 2,0 mg/L também foram estimadas para o córrego Piabinha, excluindo-se apenas as concentrações que conformaram o quartil superior;
- Para o conjunto de cursos d'água da área de estudo, as concentrações máximas de nitrato apresentaram-se invariavelmente ao padrão de qualidade ambiental estabelecido para cursos d'água classe 2 (10 mg/L);
- As concentrações de fósforo total apresentaram-se superiores ao padrão de qualidade ambiental estabelecido para rios (ambientes lóticos) classe 2 (0,1 mg/L) independentemente do curso d'água objeto de análise;

Para avaliar o impacto do aumento do número de simulações nos resultados da modelagem da qualidade da água, foram realizadas da modelagem de qualidade com incorporação da análise de incertezas com 50 (cinquenta), 100 (cem), 500 (quinhentas) e 1.000 (mil) simulações. Os resultados obtidos em cada um desses conjuntos de simulações foram sumarizados em diagramas tipo *Box-plot* e histogramas de frequência.

As figuras 20, 21 e 22, respectivamente associadas aos parâmetros OD, DBO e Coliformes termotolerantes, apresentam os histogramas de frequência produzidos para os diferentes conjuntos de simulações de qualidade de água do rio Novo. Ainda que os histogramas para 1.000 (mil) simulações já tenham sido apresentados anteriormente, serão repetidos com o propósito de facilitar a análise comparativa ante os histogramas de frequência produzidos. Os diagramas tipo *box-plot* para todos os parâmetros de qualidade de água e cursos d'água estão reunidos no Apêndice I, assim como os histogramas de frequência para os compostos de nitrogênio e fósforo associados ao rio Novo.

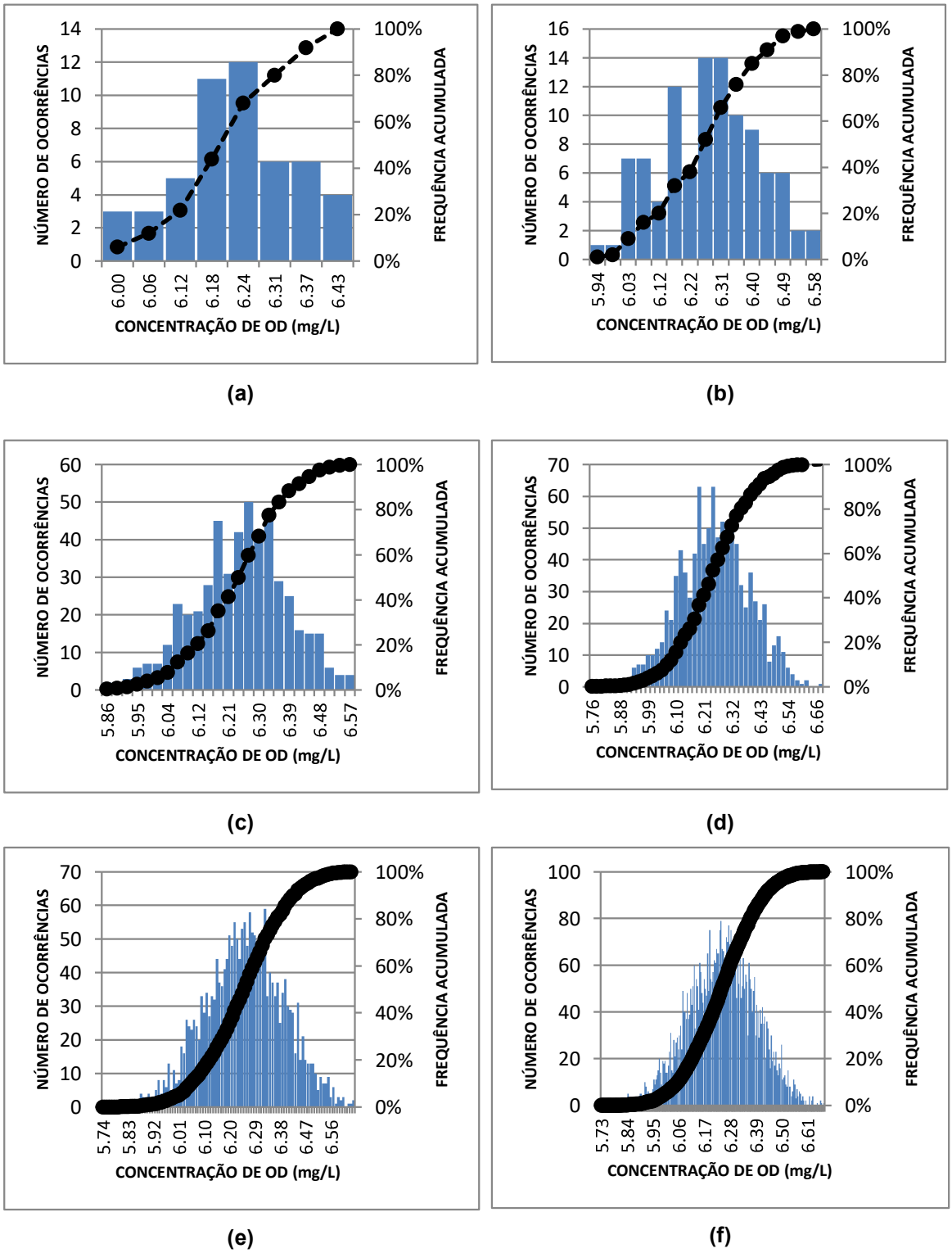

Figura 20: Histogramas de frequência para as concentrações de OD consideradas 50 (a), 100 (b), 500 (c), 1.000(d), 2.000(e) e 5000(f) simulações de qualidade de água.

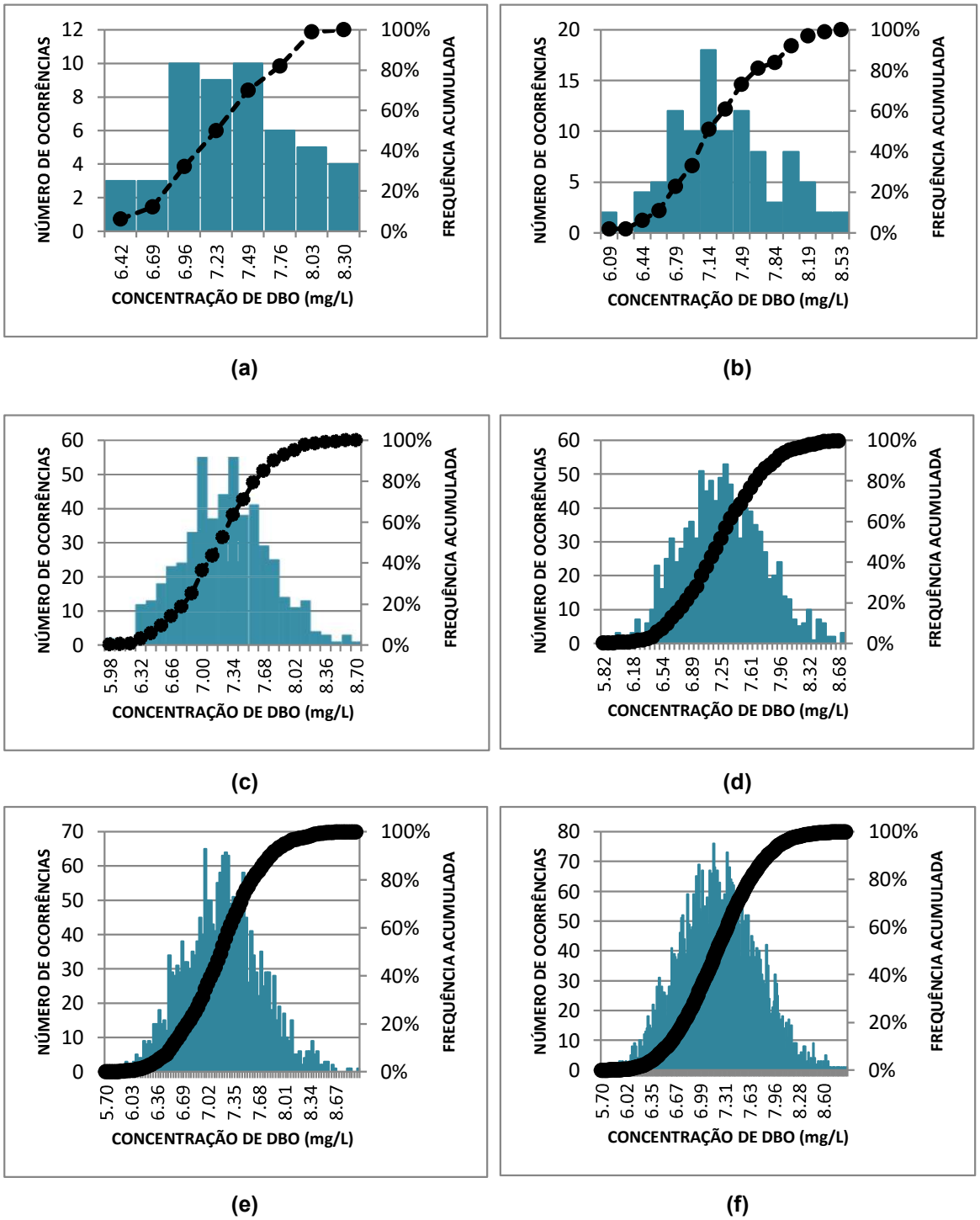

Figura 21: Histogramas de frequência para as concentrações de DBO consideradas 50 (a), 100 (b), 500 (c), 1.000(d), 2.000(e) e 5.000(f) simulações de qualidade de água.

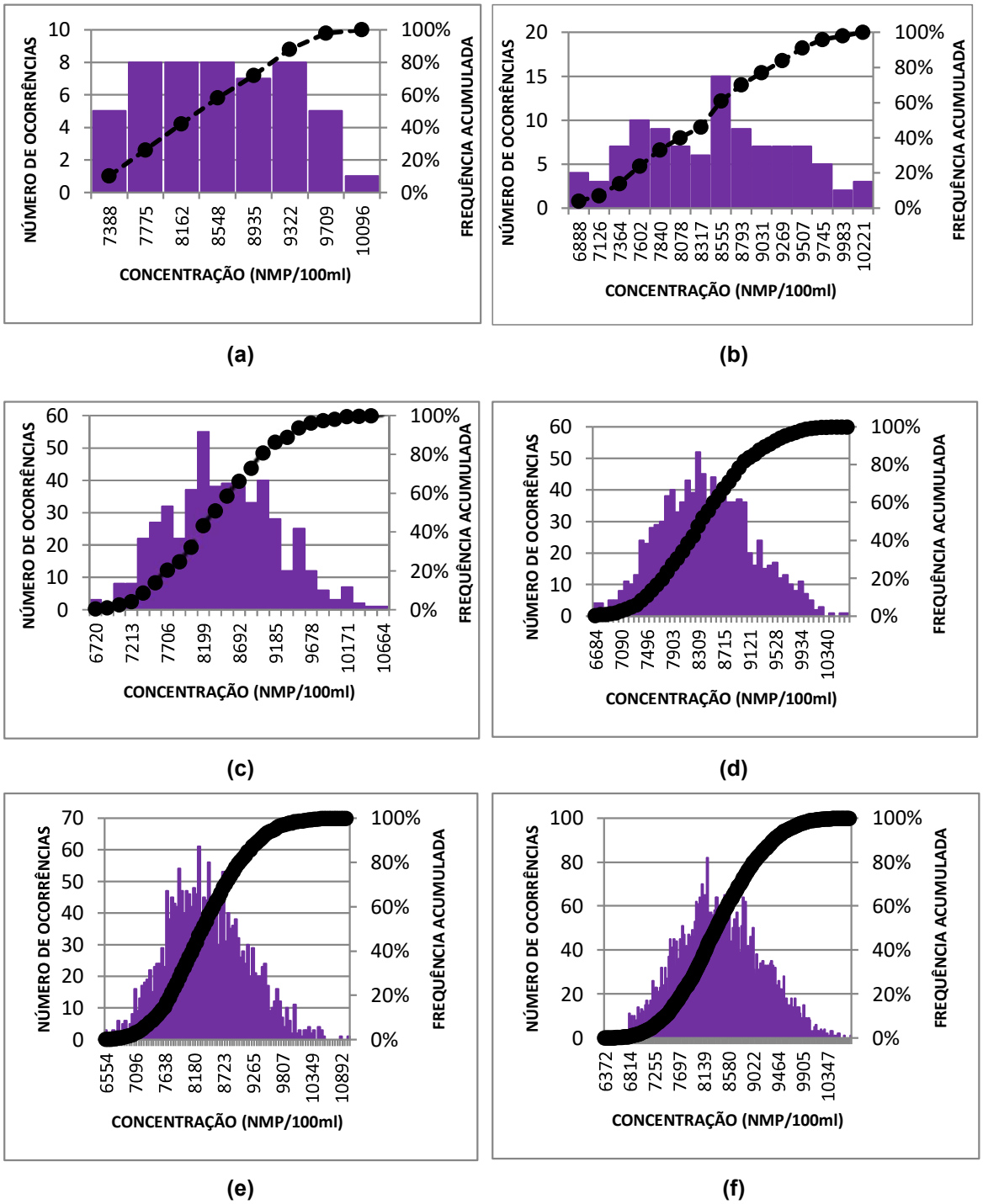

Figura 22: Histogramas de frequência para as concentrações de coliformes termotolerantes consideradas 50 (a), 100 (b), 500 (c), 1.000(d), 2.000(e) e 5.000(f) simulações de qualidade de água.

A partir da análise dos histogramas de frequência apresentados por meio das figuras 20, 21 e 22, bem como do conjunto de diagramas tipo box-plot e demais histogramas de frequência reunidos no Apêndice I, são consideradas relevantes as seguintes observações:

- Independentemente do número de simulações conduzidas para a avaliação das concentrações máximas dos parâmetros de qualidade de água nos diferentes cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo, os resultados sumarizados por meio de box-plot apresentaram-se similares, reproduzindo tendência das condições de qualidade dos corpos d´água da área de estudo;
- Assim como observado por Poton et al. (2023), a curva da frequência acumulada apresentou variações pouco relevantes a partir de 500 simulações. Desta forma, o aumento do número de simulações computacionais para sistemas hídricos complexos pode não representar melhorias significativas nos resultados, a despeito do aumento do custo computacional;
- Os conjuntos com 50 (cinquenta) ou 100 (cem) simulações apresentam elevado ruído, afetando a forma da curva de frequência acumulada. Neste contexto, avaliações das condições críticas de qualidade dos cursos d'água a partir de histogramas de frequência produzidos a partir de limitado número de simulações pode, eventualmente, alterar ou comprometer possíveis tomadas de decisão.

5.3 Comparação entre a modelagem determinística e a simulação estocástica

As simulações determinísticas e estocásticas apresentam resultados de formas diferentes, que podem ser mais ou menos apropriadas dependendo do objetivo do modelador. Enquanto as simulações determinísticas apresentam as concentrações críticas (mínimas ou máximas) dos parâmetros de qualidade de água, as simulações estocásticas permitem a produção de histogramas de frequência que indicam faixas de valores de concentrações (máximas ou mínimas) e as correspondentes probabilidades de ocorrência nas condições de simulação assumidas.

Com o propósito de comparar os resultados das simulações determinísticas com aqueles decorrentes das simulações estocásticas, foram considerados os resultados associados aos parâmetros OD, DBO e coliformes termotolerantes (parâmetros para os quais foram observadas as alterações mais pronunciadas no

rio Novo) e o conjunto com 1000 (mil) simulações. Nesta etapa do trabalho foram consideradas relevantes as seguintes observações:

- Na simulação determinística, o pico de DBO apresentada no rio Novo foi de 6,6 mg/L. Nas simulações com incorporação de análise de incerteza, aproximadamente 78% (785 de 1000 simulações) das concentrações máximas de DBO apresentaram-se superiores a 6,8 mg/L. Relevante observar que em 58 simulações (aproximadamente 6,0%) as concentrações máximas de DBO no rio Novo superaram 8,0 mg/L;
- O valor crítico de OD estimado a partir da simulação determinística no rio Novo foi de 6,7 mg/L. No entanto, nas simulações com incorporação da análise de incerteza, em apenas 3% (33 simulações) as concentrações mínimas superaram 6,5 mg/L, com aproximadamente 50% delas concentrando-se entre 6,2 e 6,4 mg/L. É relevante observar que, quando da incorporação da análise de incerteza às simulações de qualidade de água, assumiu-se percentual de variação de 80% para a geração aleatória do coeficiente de aeração, constante cinética que condiciona fortemente os níveis de oxigênio dissolvido num curso d'água;
- Na simulação determinística, a concentração máxima de coliformes termotolerantes no rio Novo foi de aproximadamente 10.000 NMP/100ml. Nas simulações com incorporação da análise de incerteza, os resultados apontaram que apenas em 2% das simulações (16 simulações) foram estimadas concentrações máximas de coliformes termotolerantes acima de 10.000 NMP/100ml. Adicionalmente, relevante observar que em aproximadamente metade das simulações (487 de 1000 simulações) as concentrações máximas situaram-se entre 8.000 NMP/100ml e 9.000 NMP/100ml, com aproximadamente 18% (17,9%) dos valores de concentrações máximas reunidos entre 9.000 NMP/100ml e 10.000 NMP/100ml.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As simulações determinísticas de qualidade de água indicaram que parte relevante dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo atende aos padrões de qualidade estabelecidos pela resolução CONAMA nº 357/2005 para os parâmetros objetos de simulação. O não atendimento do padrão estabelecido para OD foi observado apenas nas porções intermediária e final do córrego Piabinha. Para a DBO, o padrão de qualidade não foi atendido no trecho final do rio Novo e nas porções iniciais dos córregos Comporta e Piabinha. Já as concentrações máximas aceitáveis para os coliformes termotolerantes foram superadas em trechos dos rios Novo e Iconha e nos córregos Comporta e Piabinha. O padrão estabelecido para o fósforo total, por sua vez, foi superado no trecho final do rio Novo e no córrego Comporta.

O ambiente computacional da simulação de qualidade de água, estabelecido com a incorporação da análise de incerteza, demonstrou-se de utilização simples, flexível e facilmente adaptável para quaisquer bacias hidrográficas, proporcionando simulações mais robustas e com potencial para eventualmente auxiliar na gestão de recursos hídricos.

Os resultados decorrentes da incorporação da análise de incerteza conduzida com auxílio do método de Monte Carlo indicaram tendência similar àquela apresentada pelas simulações determinísticas, ainda que com variações nos valores críticos (máximos ou mínimos) das concentrações dos parâmetros de qualidade objetos das simulações.

Avaliações decorrentes da incorporação da análise de incerteza também indicaram que a variação na distribuição dos valores críticos (mínimos ou máximos) de concentrações, em função do número de simulações, se mostrou relevante até 500 simulações; a partir desta quantidade de simulações, as variações na curva de frequência acumulada dos valores críticos de concentrações apresentaram-se pouco relevantes.

Como recomendação para trabalhos futuros:

- Ampliar as condições de entrada, incluindo as vazões distribuídas que não foram objeto da análise de incerteza conduzida neste trabalho;

- Avaliar a influência dos percentuais de variação no entorno dos valores médios dos dados de entrada sobre os resultados decorrentes da incorporação da análise de incertezas à modelagem matemática da qualidade da água;
- Ampliar a automatização do ambiente computacional de simulação tornando a planilha eletrônica mais visual e amigável à usuários que não tenham experiência prévia com programação e facilitando a adaptação à diferentes bacias hidrográficas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (AGERH). Plano de Bacias Hidrográficas do Estado do Espírito Santo. Diagnóstico e prognóstico das condições de uso da água na Bacia Hidrográfica do Rio Novo. 2018.

ANDRADE, L. N. Modelo de otimização multiobjetivo para outorga de diluição de efluentes e enquadramento de corpos d'agua. 2012. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

ALBERTIN, L. L. Técnica de gerenciamento da qualidade hídrica superficial baseada na otimização multiobjetivo. 191 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

ALCÂNTARA, G. M. Modelagem dos impactos hidrológicos decorrentes de alterações do uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica rural. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2018.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas / Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. ANA, 2017. 88 p.

ARAS, E; TOGAN, V; BERKUN, M. River water quality management model using genetic algorithm. Enviromental Fluidic Mechanical, v. 7, p. 439-450, 2007.

BALDOCHI, M. A. Utilização do Modelo QUAL2E como apoio ao gerenciamento da qualidade das águas da bacia do Córrego dos Bagres. 2002. 196 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 145, de 12 de dezembro de 2012. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2011.

BRINGER, L. M. Seleção de sistemas de tratamento de esgotos no âmbito de bacias hidrográficas a partir do emprego de modelagem de qualidade, otimização e da análise multiobjetivo. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. 2017.

BEVEN, K.; BUYTAERT, W.; SMITH, L. A. On virtual observatories and modelled realities (or why discharge must be treated as a virtual variable). Hydrological Processes, v. 26, n. 12, p. 1905-1908, 2012. https://doi.org/10.1002/hyp.9261

CALMON, A. P. S.; SOUZA, J. C. S.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, p. 118-133, 2016. https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p118-133

CARVALHO, S. L. Sistema de suporte a decisão para planejamento, controle e redução de cargas difusas e pontuais em bacias hidrográficas. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória. 2019.

CARVALHO, V. R.; GONÇALVES, J. A. C.; COUTO, E. A. Obtenção de vazão de diluição de efluentes utilizando o modelo de qualidade de água QUAL-UFMG. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 4, p. 737-753. 2021.

CHO, J. H.; SUNG, K. S.; HA, S. R. A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment using a genetic algorithm. Journal of Environmental Management, v.73, n.3, p. 229-242, 2004.

CLEMEN, R.T.; REILLY, T. Makin hard decisions with decision tools. Mason: Cengage Learning, 2013.

COELHO, M. et al. Statistical validity of water quality time series in urban watersheds. RBRH, 22, p. 1–13, 2017.

COURY, G. C. Sistemas descentralizados de tratamento de esgoto em assentamentos precários urbanos: Proposta de um modelo multicritério de apoio à decisão. 100 f. Dissertação (Mestrado – Mestrado Acadêmico em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, 2020.

COX, B. A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. The Science of the Total Environment, v. 314-316, p. 335–377, 2003.

CRUZ, R. C.; GODOY, V. N. Autogestão dos Recursos Hídricos – Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria - RS. Ciência e Natura, v. 38, n. 2, p. 980-997, 2016.

DENALDI, R; FERRARA, L. N. The environmental dimension of slum upgrading. Ambiente & Sociedade, v. 21, p. 1-20, 2018.

EC - European Commission. Directive 2000D 60D EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. Oficial Journal. 22 December 2000, L 327D 1. European Commission, Brussels. 2000.

EIGER, S. 2-D Advective-Difusive Transport of Dissolved Oxigen in Channels. Jornal of Enviromental Engeneering. V. 21, n. 9, p. 668-670, 1995.

FANTIN, L. L. D. Proposta metodológica para a pré-seleção de sistemas de tratamento de esgoto no âmbito de uma bacia hidrográfica. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

FIRJAN. Manual de conservação e reúso da água na indústria. Rio de Janeiro, FIRJAN, 2006. http://firjan.org.br.

FORTUNATO, T.C.S.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F.; SILVA, F.G.B. Nitrogen compounds behavior simulation in rivers with Uncertainty Analysis. Revista Ambiente e Água, v. 15, n. 3, p. 1-15, 2020. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2449

FREITAS MARTINS, G. M.; COUTO, E. A.; MARQUES, G. M. Modelagem matemática como suporte à gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Araçuaí (MG). Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 11, p. 335-348, 2021.

GASTALDINI, M. C. C.; OPPA, L. F. Análise de Alternativas de Enquadramento do Rio Vacacaí Mirim Utilizando Modelo Matemático de Qualidade da Água. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 16, n. 1, p. 17-27. 2011.

GERLAK, A. K.; MUKHTAROV, F. 'Ways of knowing' water: integrated water resources management and water security as complementary discourses. International Environmental Agreements, v. 15, n. 3, p. 257-272, 2015.

GOMIDES, C. E.; MATOS, M. P.; FIA, R.; FONSECA, A. R. Estimativa da qualidade das águas das vertentes do Rio Grande – Brasil em diferentes cenários: modelagem das variáveis DBO e OD utilizando o Qual-UFMG. Revista de Geociências do Nordeste, v. 10, n. 2, p.551-568. Caicó, 2024.

HOLGUIN-GONZALEZ, J.E.; EVERAERT, G.; BOETS, P.; GALVIS, A.; GOETHALS, P.L. Development and application of an integrated ecological modelling framework to analyze the impact of wastewater discharges on the ecological water quality of rivers. Environmental Modelling & Software, v. 48, p. 27-36, 2013. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.06.004

JIANG, Y.; NAN, Z.; YANG, S. Risk assessment of water quality using Monte Carlo simulation and artificial neural network method. Journal of Environmental Management, v. 122, p. 130-136, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.015

JOHNSSON, R. M. F. et al. A construção do pacto em torno da cobrança pelo uso

da água na bacia do rio Paraíba do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15, 2003, Curitiba. Anais... Rio de Janeiro: ABRH, 2003.

KOTAMÄKI, N. et al. A practical approach to improve the statistical performance of surface water monitoring networks. Environ Monit Assess, v. 191, n. 318, p. 11-16 2019.

LARENTIS, D. G.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação da qualidade de água em grandes bacias: Rio Taquari-Antas, RS. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 13, n. 3, p. 5-22, 2008.

LINDENSCHMIDT, K.; FLEISCHBEIN, K.; BABOROWSKI, M. Structural uncertainty in a river water quality modelling system. Ecological Modelling, v. 204, n. 3-4, p. 289-300, 2007. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.01.004

LINDIM, C.; PINHO, J.L; VIEIRA, J.M.P. Analysis of spatial and temporal patterns in a large reservoir using water quality and hydrodynamic modeling. Ecological Modelling, Volume 222, Issue 14, p. 2485-2494. 2011,
ISSN 0304-3800, https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.07.019.

LIU, B.; SPEED, R. Water Resources Management in the People's Republic of China. International Journal of Water Resources Development, v. 25, n. 2, p.193 – 208, 2009.

MACHADO, E. S.; PORTO, M. F. A.; KAVISKI, E. Otimização do planejamento de sistemas regionais de tratamento de efluentes através de simulação Monte Carlo e da metaheurística do recozimento simulado. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n.3, p. 29-38, 2012.

MANNINA, G.; VIVIANI, G. Water quality modelling for ephemeral rivers: Model development and parameter assessment. Journal of Hydrology, v. 393, n. 3-4, p. 186-196, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.08.015

MATEUS, M. V.; GONÇALVES, J. C. S. I.; LOPES JÚNIOR, G. B.; OKURA, M. H. Análise de incerteza e modelagem de qualidade da água do rio Uberaba, Minas Gerais. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, nº 37, 2015, ISSN Eletrônico 2176-9478.

MCINTYRE, N.; JACKSON, B.; WADE, A.J.; BUTTERFIELD, D.; WHEATER, H.S. Sensitivity analysis of a catchment-scale nitrogen model. Journal of Hydrology, v. 315, p. 71-92, 2005. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.010

MENDES, T. M.; BARCELLOS, C. A dimensão territorial do esgotamento sanitário: o caso do Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brasil. Ciência & Saúde Coletiva, v. 23, p. 647-658, 2018.

MENEZES, J. P. C.; OLIVEIRA, L.F.C.; SALLA, M.R. Incertezas sobre a modelagem matemática de qualidade da água em curso de água urbano. Ciência & Engenharia, v. 25, p. 01-08, 2016. https://doi.org/10.14393/198340

MOREIRA, C. C. B. Potencial de reúso agrícola de efluentes líquidos gerados na estação de tratamento de água no Município de Várzea Alegre - CE. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Gestão e Regulação em Recursos Hídricos (PROFÁGUA) da Universidade Federal de Campina Grande. Sumé, 2020. 132 p. http://dx.doi.org/10.55449/conresol.5.22.V-013.

MOREIRA, K. S. V. Modelagem da qualidade da água da sub-bacia do rio Siriri em Sergipe, utilizando o modelo QUAL-UFMG. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2021. 84 p.

MOURÃO JR., P. R. Aplicação do modelo de autodepuração de qualidade das águas QUAL-UFMG [manuscrito]: estudo de caso sub-bacia do rio Piracicaba. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010. 144 p.

NEVES, A. R. Análise da evolução temporal da qualidade da água de mananciais superficiais utilizados para abastecimento público na bacia hidrográfica do Rio Jucu. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA) da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2018. 134 p.

OENNING JÚNIOR, A.; PAWLOSKY, U. Avaliação de tecnologias avançadas para o reúso de água em indústria metal-mecânica. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, 2007, p. 305 – 316.

PANAGOPOULOS, Y.; MAKROPOULOS, C.; MIMIKOU, M. Decision support for diffuse pollution management. Environmental Modelling & Software, v. 30, p. 57-70, 2012. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.

PARK, D. K.; KO, N. Y; LEE, K. K. Optimal groundwater remediation design considering effects of natural attenuation processes: pumping strategy with enhanced-natural-attenuation. Geoscience Journal, v. 11, n. 4, p. 377-385, 2007.

PASTRES, R.; CIAVATTA, S. A Comparison between the uncertainties in model parameters and in forcing functions: its application to a 3D waterquality model. Environmental Modelling & Software, v. 20, p. 981-989, 2005. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.09.010

POTON, I.; REIS, J. A.; ALMEIDA, K.; RODRIGUES, M.; MENDONÇA, A.; SILVA, F. Simulação da qualidade da água do rio Pardo com incorporação de análise de incerteza. Eng Sanit Ambient, v. 28, 2023. https://doi.org/10.1590/S1413-415220220157

REFSGAARD, J. C; HENRIKSEN, H. J; HARRAR, W. G; SCHOLTEN, H; KASSAHUN, A. Quality assurance in model based water management – review of existing practice and outline of new approaches. Environmental Modelling & Software, v. 20, p. 1201-1215, 2005. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.07.006

REN, Z.; ZENG, Y.; FU, X.; ZHANG, G.; CHEN, L.; CHEN, J.; CHOM, T.; WANG, Y.; WEI, Y. Modeling macrozooplank-ton and water quality relationships after wetland construction in the Wenyuhe River Basin, China. Ecological Modelling, v. 252, n.1, p.97-105, 2013.

RENARD, B.; KAVETSKI, D.; KUCZERA, G.; THYER, M.; FRANKS, S.W. Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. Water Resources Research, v. 46, n. 5, 2010. https://doi.org/10.1029/2009WR008328

SÁ, G. D. L. N. Estimativa de eficiências mínimas de remoção de nitrogênio em sistemas de tratamento de esgotos – uma abordagem para o âmbito de bacias hidrográficas. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal Do Espírito Santo. Vitoria, 2018.

SANTOS, A. R. Análise de localização de emissários de efluentes com uso de Modelagem de qualidade de água e otimização – estudo de caso. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2018. 155 p.

SANTOS, V. S. Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2007.

SAISANA, M.; SALTELLI, A.; TARANTOLA, S. Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators. Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society), v. 168, n. 2, p. 307-323, 2005. https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2005.00350.x

SALAS, J.D.; SHIN, H. Uncertainty analysis of reservoir sedimentation. Journal of Hydrological Engineering, v. 125, n. 4, p. 339-350, 1999. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:4(339)

SALIM, F. P. C. Desenvolvimento de sistema de suporte à decisão para o gerenciamento da qualidade das águas em rios considerando múltiplas fontes de poluição pontual. 2004. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

SANTORO, M. C.; REIS, J. A. T. dos; MENDONÇA, A. S. F. Performance evaluation of optimization models in the determination of wastewater treatment efficiencies inside watersheds. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, p. 694-706, 2016.

SHIMIZU, R; KATAOKA, Y; MATSUKAWA, T; IKUTA, T; MURATA, K; HASHIMOTO, H. Energy distribution measurements of transmitted electrons and Monte Carlo simulation for kilovolt electron. Journal of Physis D: Applied Physics, v. 8, 1975.

SHOJAEI, M.; NAZIF, S.; KERACHIAN, R. Joint uncertainty analysis in river water quality simulation: a case study of the Karoon River in Iran. Environmental Earth

Sciences, v. 73, n. 7, p. 3819-3831, 2015. https://doi.org/10.1007/s12665-014-3667-x

SILVA, G. S.; JARDIM, W. F. Aplicação do método da carga máxima total diária (CMTD) para a amônia no Rio Atibaia, região de Campinas/Paulínia – SP. Engenharia Sanitária Ambiental, v. 12, n.2, p. 160-168, 2007.

SILVA, L. R. S. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília. Brasília, 2010. 241 p.

SILVA, T. C. Aplicação do método de Monte Carlo para análise de incerteza na simulação do comportamento dos compostos de nitrogênio em rios. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2014. 119 p.

SOUZA, J. R.; MORAES, M. E. B.; SONODA, S. L.; SANTOS, H. C. R. A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: caso Rio Almada, sul da Bahia, Brasil. REDE -Revista Eletrônica do Prodema, v. 8, n. 1, p. 26-45, 2014.

SPAGNOL, I. T. Avaliação das condições de tratamento de esgoto a partir do emprego de modelo de qualidade de água, técnica de otimização e análise multicritério – estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Novo, Espírito Santo. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2023. 97 p.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico Temático: Serviços de Água e Esgoto, Visão Geral. Brasília: SNIS, 2021.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico Temático: Serviços de Água e Esgoto, Visão Geral. Brasília: SNIS, 2022.

STREETER, H. W., PHELPS, E. B. A study of the natural purification of the Ohio River. Public Health Bulletin 146, U.S.Washington: Public Health Service, 1925.

SULLIVAN, C. A. Planning for the Murray-Darling Basin: Lessons from transboundary basins around the world. Stochastic Environmental Researchand Risk Assessment, v. 28, n.1, p. 123-136, 2014.

TEODORO, A.; IDE, C. N.; RIBEIRO, M. L.; BROCH, A. O.; DA SILVA, J. B. Implementação do conceito Capacidade de Diluição de Efluentes no modelo de qualidade da água QUAL-UFMG: estudo de caso no Rio Taquarizinho (MS). Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 18, n. 3, p. 275-288, 2013.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. Recursos hídricos no século XXI. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). TMDL Case study: The Lower Minnesota River. EPA841-F-92-011. Washington: EPA, 1992.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). Summary of the Clean Water Act. Disponível em < https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act >. Acesso em: 18 nov. 2024.

VEIGA, L. B. E., MAGRINI, A. The Brazilian Water Resources Management Policy: Fifteen Years of Success and Challenges. Water Resources Management, v. 27, p. 2287–2302, 2013.

VON SPERLING, M. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios. Belo Horizonte: Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG. 2007.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 472 p.

YORIYAZ, H. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. Revista Brasileira de Física Médica, v. 3, n. 1, p. 141-150, 2009.

WANG, X.; ZHANG, J.; GAO, J.; SHAHID, S.; XIA, X.; GENG, Z.; TANG, L. The new concept of water resources management in China: ensuring water security in changing environment. Environment, Development and Sustainability, v. 20, p.897-909, 2018.

WARMINK, J.J. et al. Coping with Uncertainty in River Management: Challenges and Ways Forward. Water Resour. Manag., v. 31, n. 14, 4587–4600, 2017.

ZANDONADI, Lorenza Uliana. Análise de Metodologias de Estimativas de Vazão de Diluição para Subsídio a Processos de Análise de Outorgas de Lançamento de Efluentes. 2011. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo.

ZORZAL, R. Sistema de suporte à Decisão para Análise de Outorga de Lançamento de Efluentes de Fontes Pontuais em Rios. 2009. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

8 APÊNDICE I

Inicialmente são apresentadas as condições de qualidade simuladas através das condições determinísticas com a planilha QUAL-UFMG, apresentado como resultados os perfis para as concentrações de OD, DBO, coliformes termotolerantes, compostos de nitrogênio, compostos de fósforo e amônia livre nos demais corpos d´água simulados na bacia.

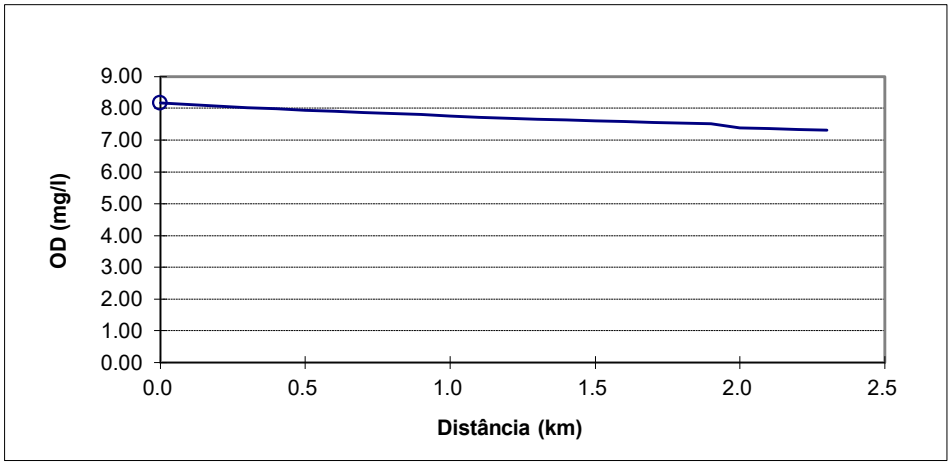

Figura 23: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o córrego Jacarati.

Fonte: Autoria própria.

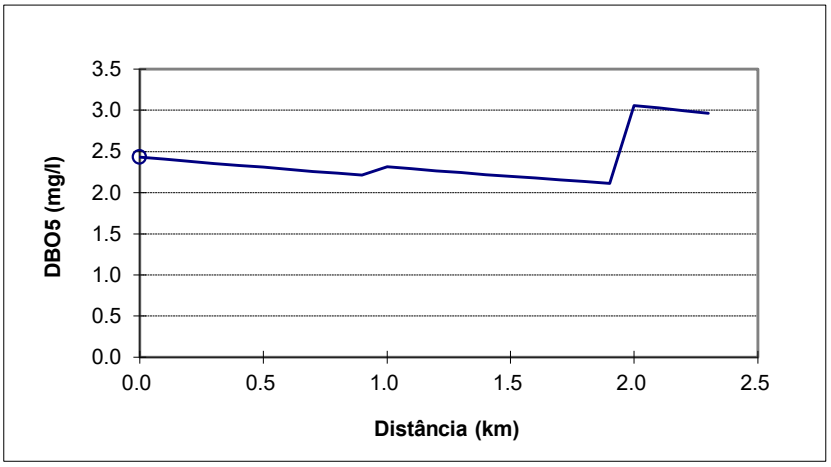

Figura 24: Perfil de DBO simulado para o córrego Jacarati.

Fonte: Autoria própria.

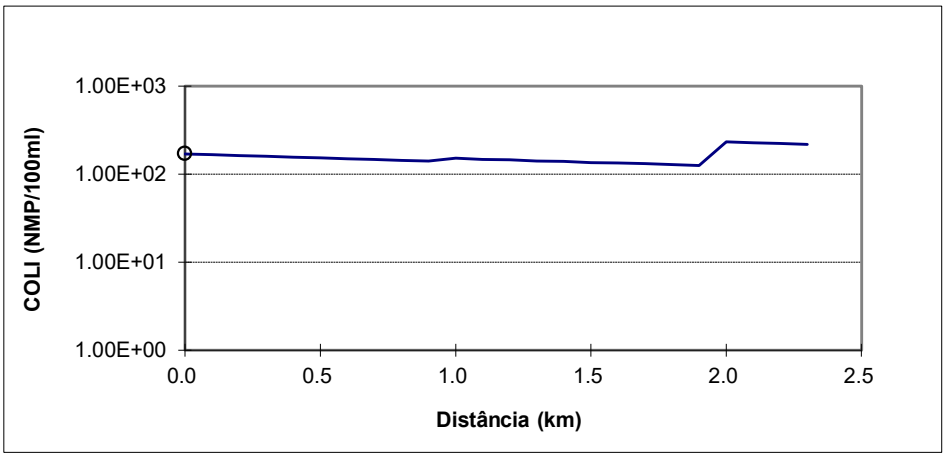

Figura 25: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o córrego Jacarati.

Fonte: Autoria própria.

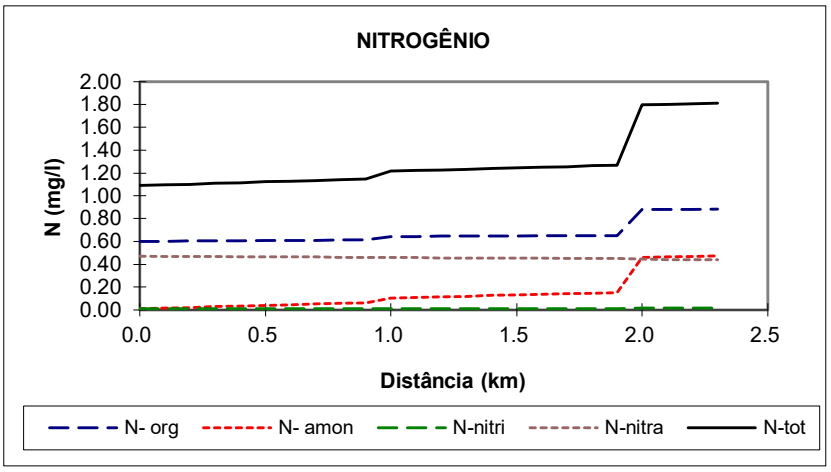

Figura 26: Perfil de nitrogênio simulado para o córrego Jacarati.

Fonte: Autoria própria.

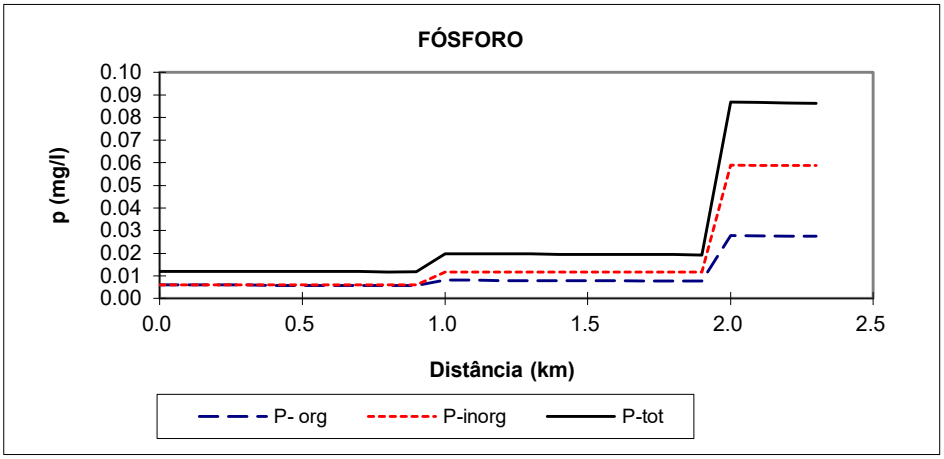

Figura 27: Perfil de fósforo simulado para o córrego Jacarati.

Fonte: Autoria própria.

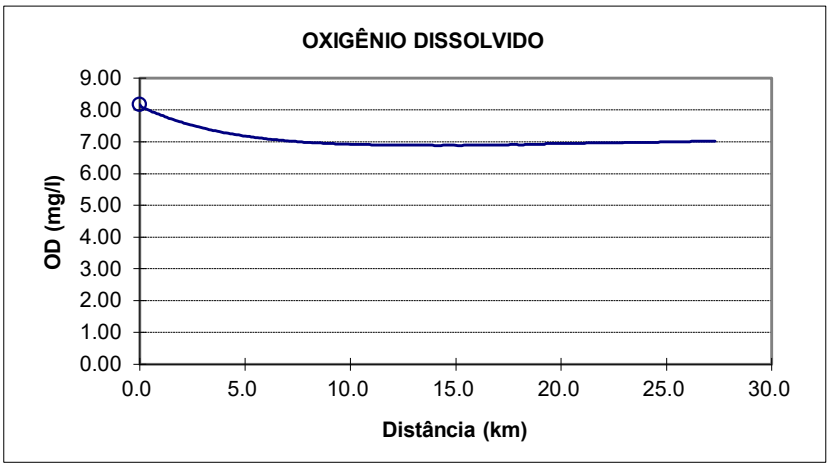

Figura 28: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o rio Iconha.

Fonte: Autoria própria.

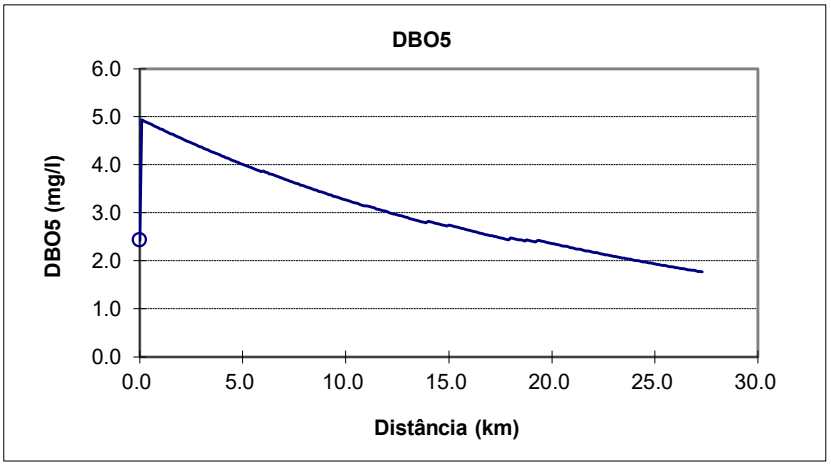

Figura 29: Perfil de DBO simulado para o rio Iconha.

Fonte: Autoria própria.

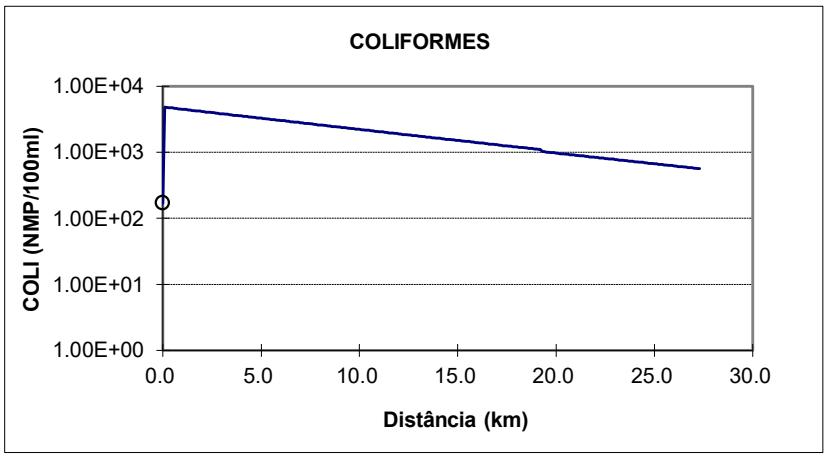

Figura 30: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o rio Iconha.

Fonte: Autoria própria.

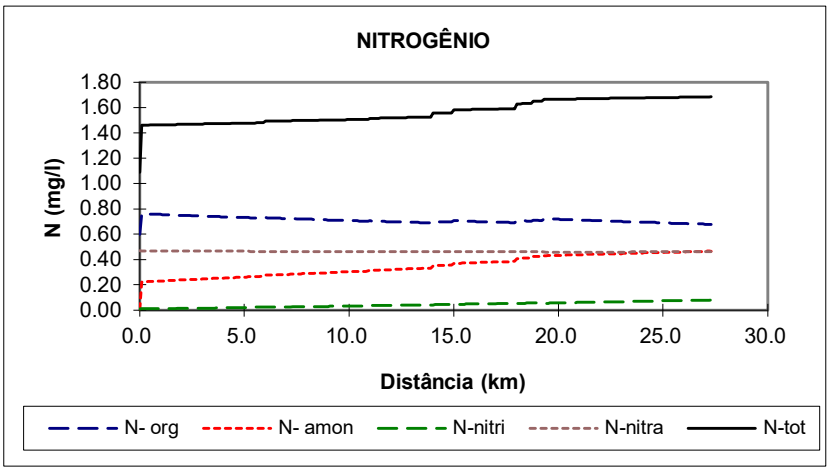

Figura 31: Perfil de nitrogênio simulado para o rio Iconha.

Fonte: Autoria própria.

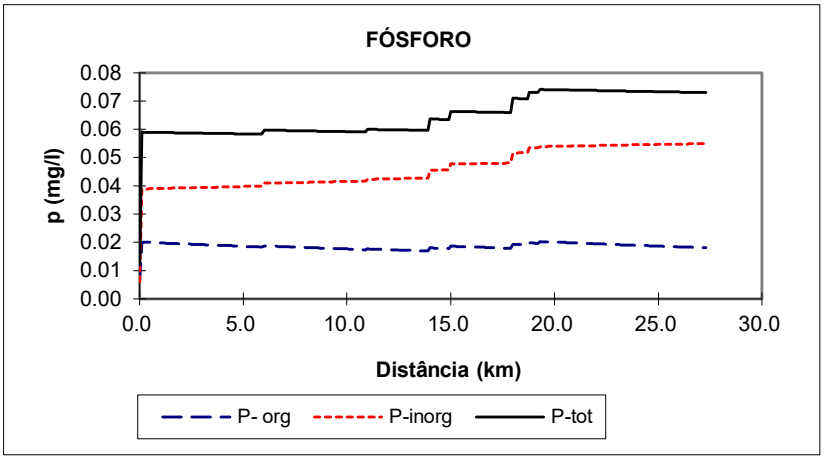

Figura 32: Perfil de fósforo simulado para o rio Iconha.

Fonte: Autoria própria.

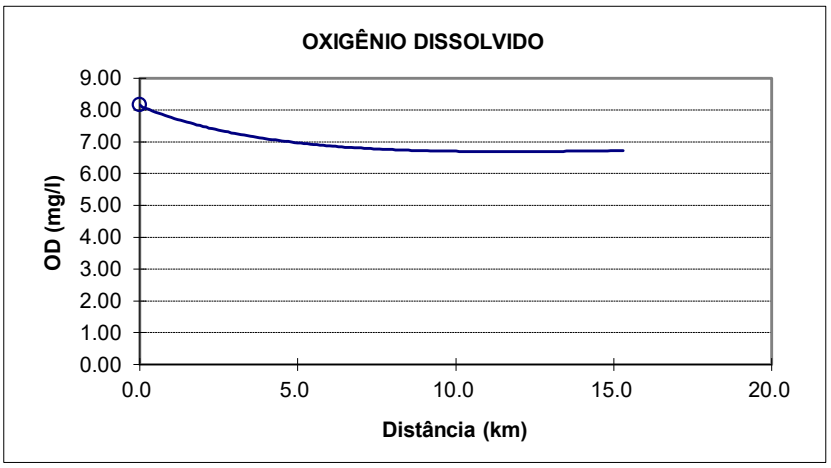

Figura 33: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o córrego Comporta.

Fonte: Autoria própria.

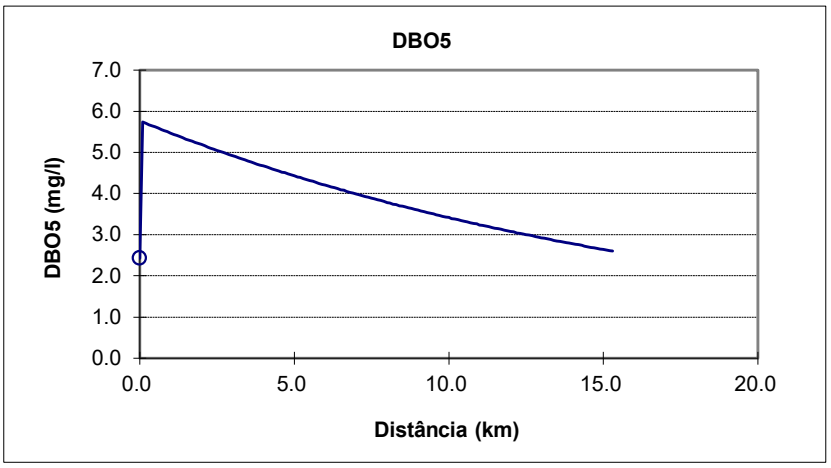

Figura 34: Perfil de DBO simulado para o córrego Comporta.

Fonte: Autoria própria.

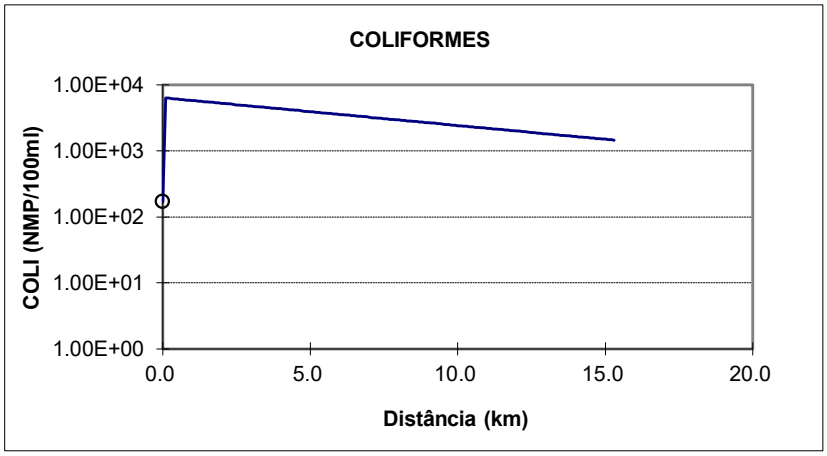

Figura 35: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o córrego Comporta.

Fonte: Autoria própria.

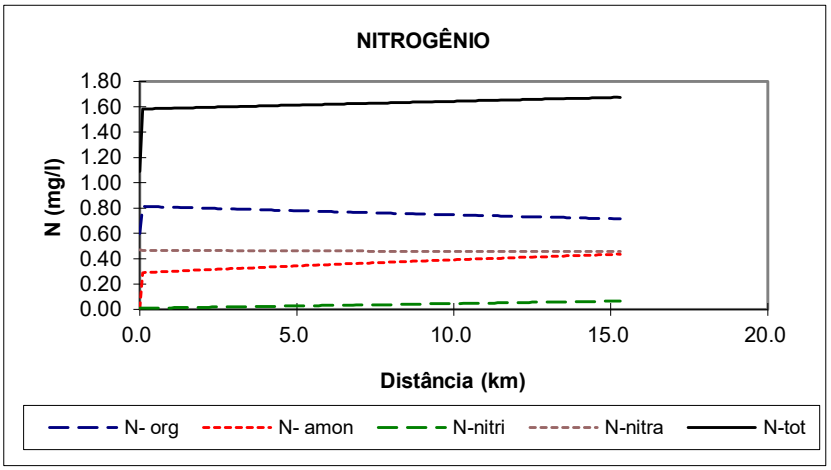

Figura 36: Perfil de nitrogênio simulado para o córrego Comporta.

Fonte: Autoria própria.

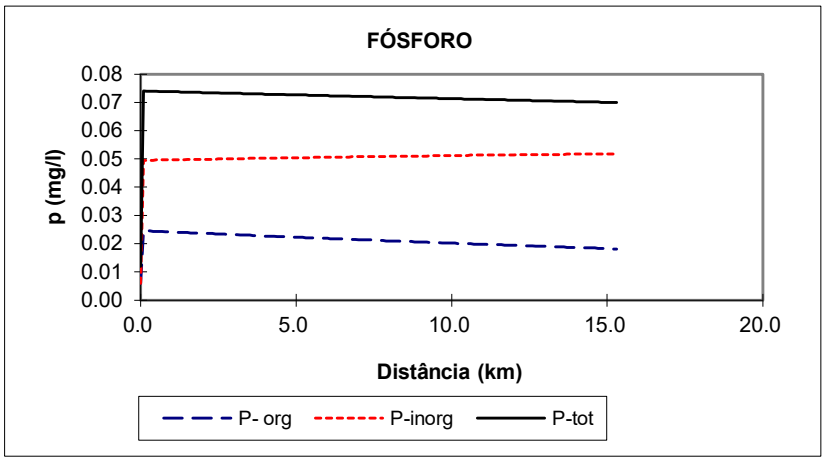

Figura 37: Perfil de fósforo simulado para o córrego Comporta.

Fonte: Autoria própria.

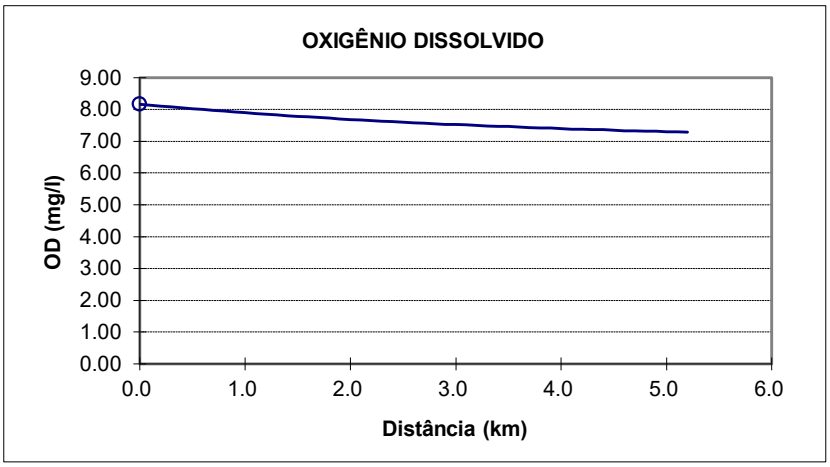

Figura 38: Perfil de oxigênio dissolvido simulado para o córrego Pau D´Álho.

Fonte: Autoria própria.

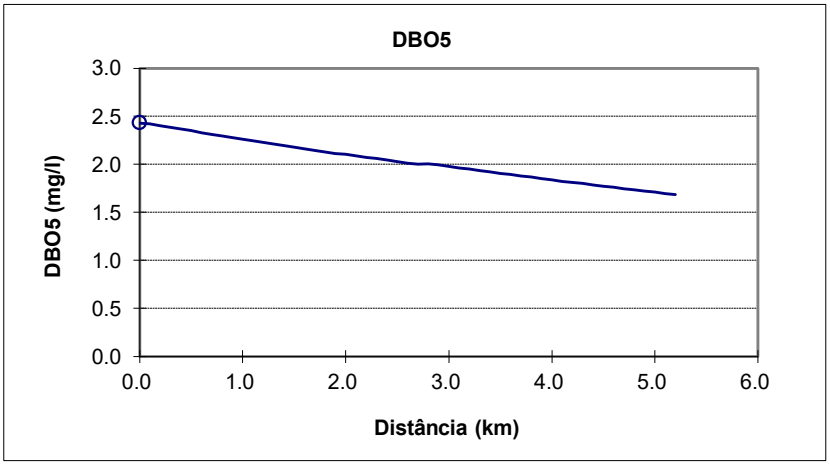

Figura 39: Perfil de DBO simulado para o córrego Pau D´Álho.

Fonte: Autoria própria.

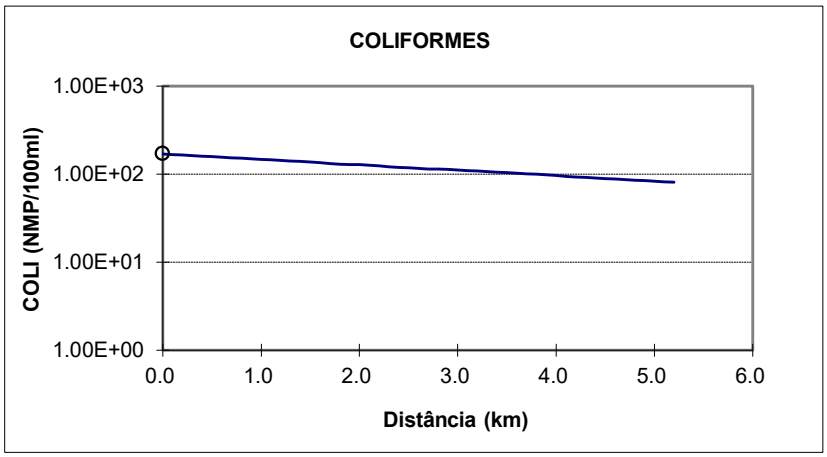

Figura 40: Perfil de coliformes termotolerantes simulado para o córrego Pau D´Álho.

Fonte: Autoria própria.

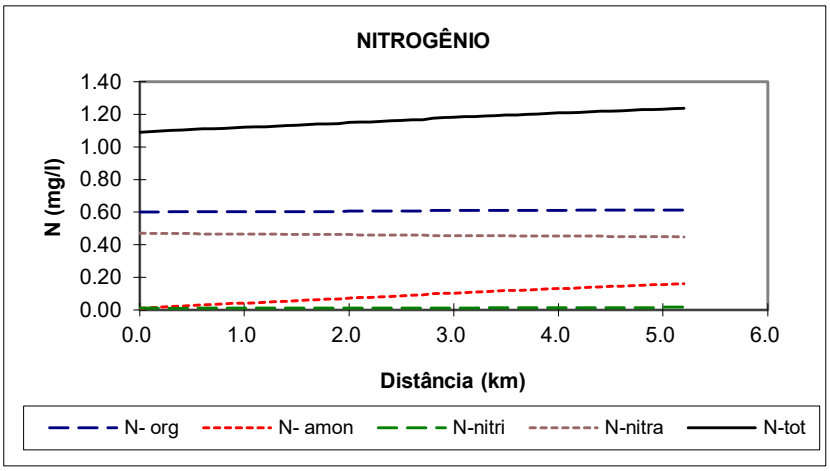

Figura 41: Perfil de nitrogênio simulado para o córrego Pau D´Álho.

Fonte: Autoria própria.

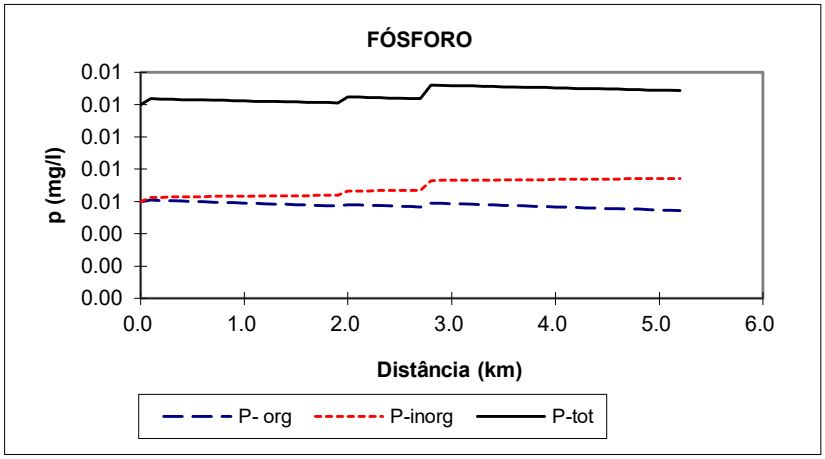

Figura 42: Perfil de fósforo simulado para o córrego Pau D´Álho.

Fonte: Autoria própria.

Na sequência desse apêndice são apresentados os gráficos de Box-plot dos resultados das simulações de todos os parâmetros simulados em todos os cursos d´água da bacia e histogramas de frequência dos parâmetros simulados no rio

principal, nas simulações com conjuntos de 50, 100, 500, 1.000, 2.000 e 5.000 rodadas.

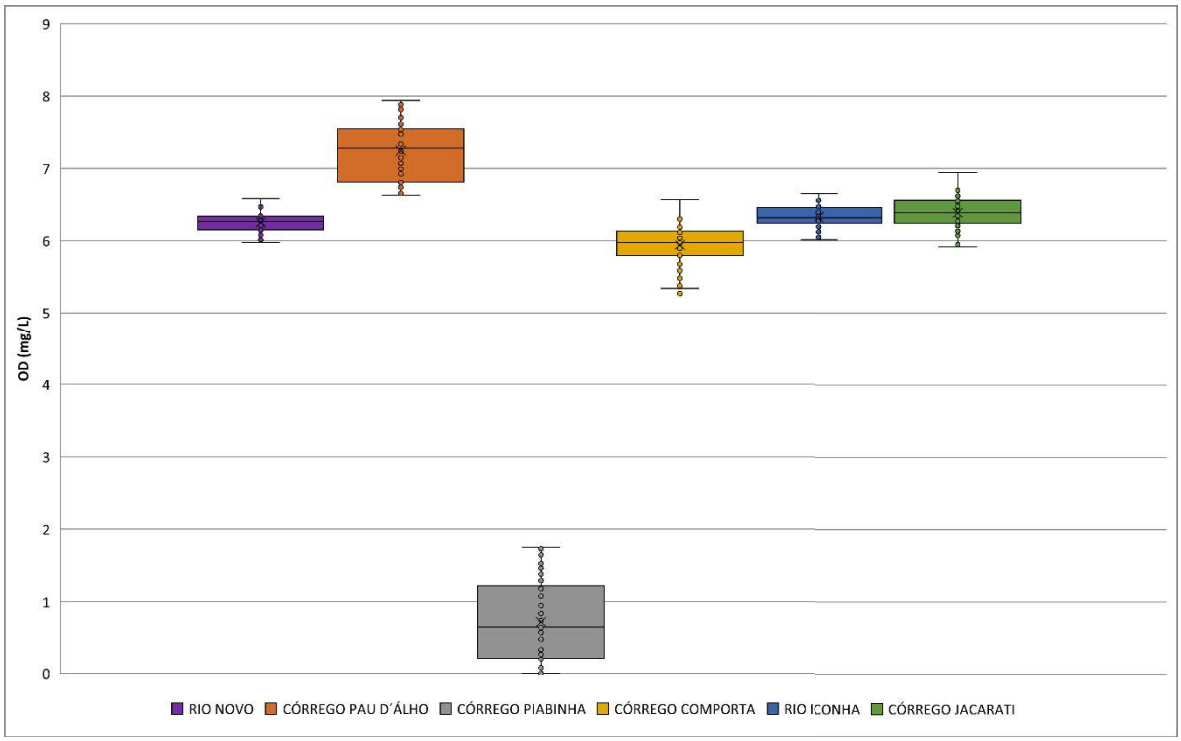

Figura 43: Diagramas tipo *Box-plot* para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto de 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

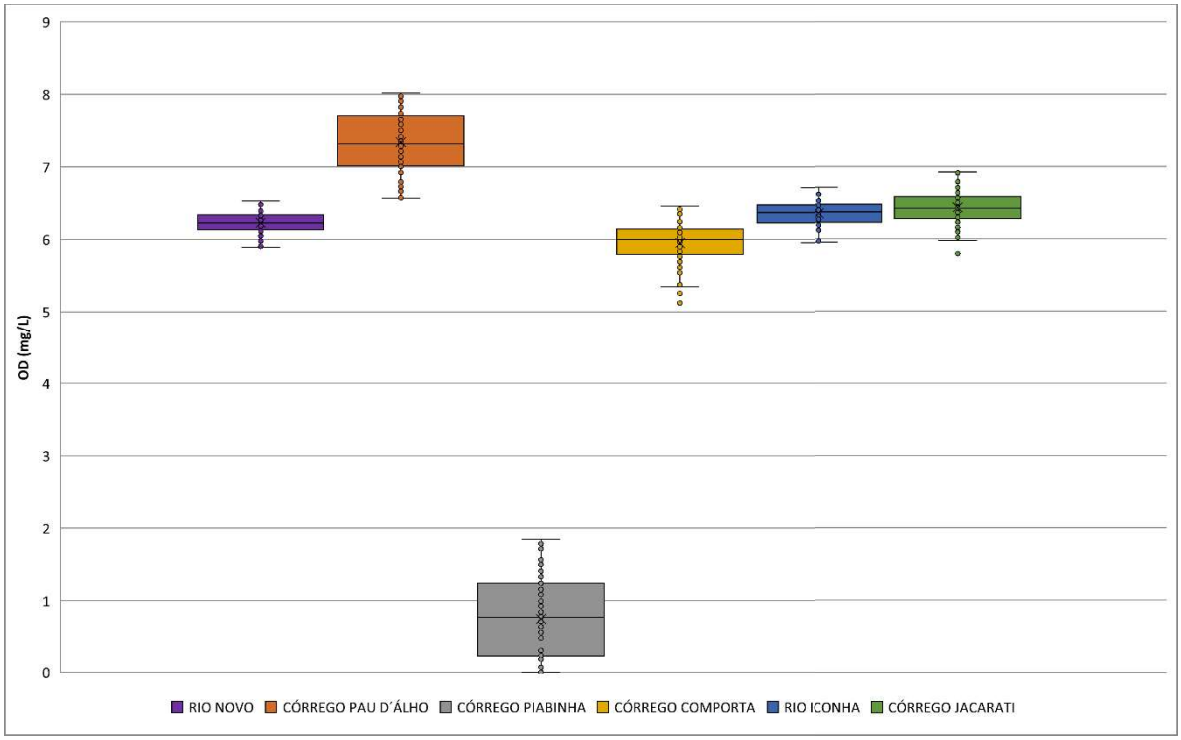

Figura 44: Diagramas tipo *Box-plot* para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto de 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

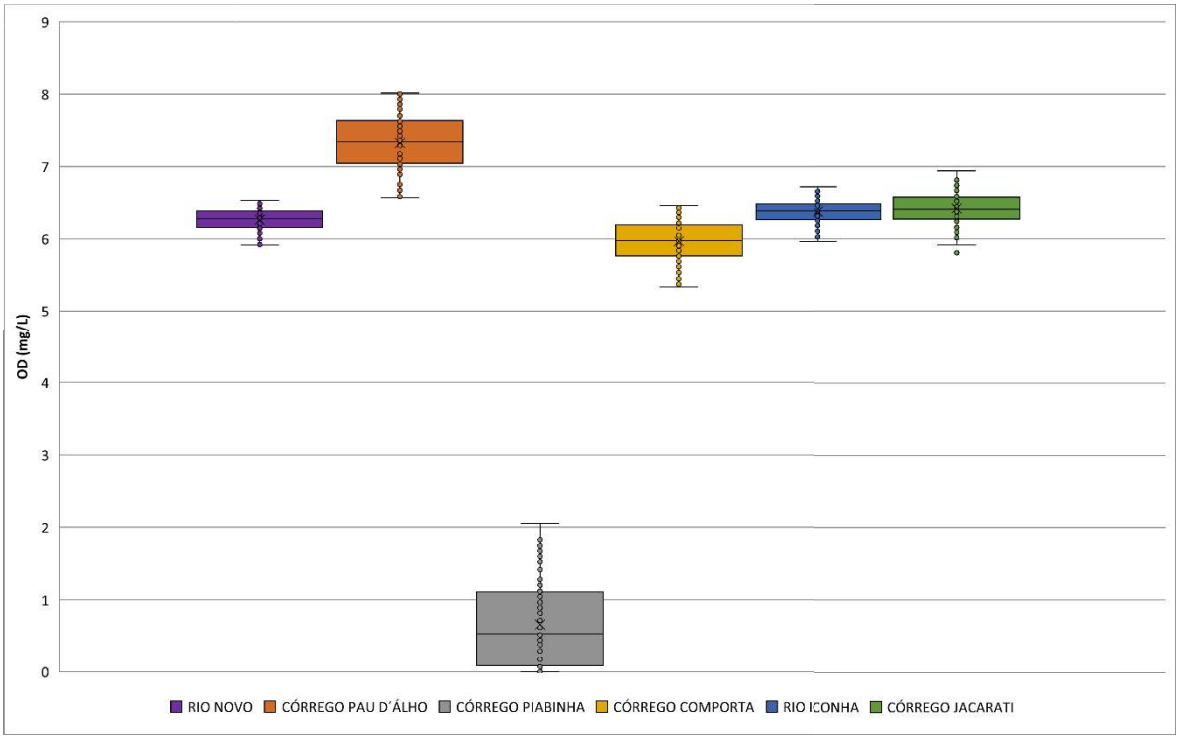

Figura 45: Diagramas tipo *Box-plot* para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto de 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

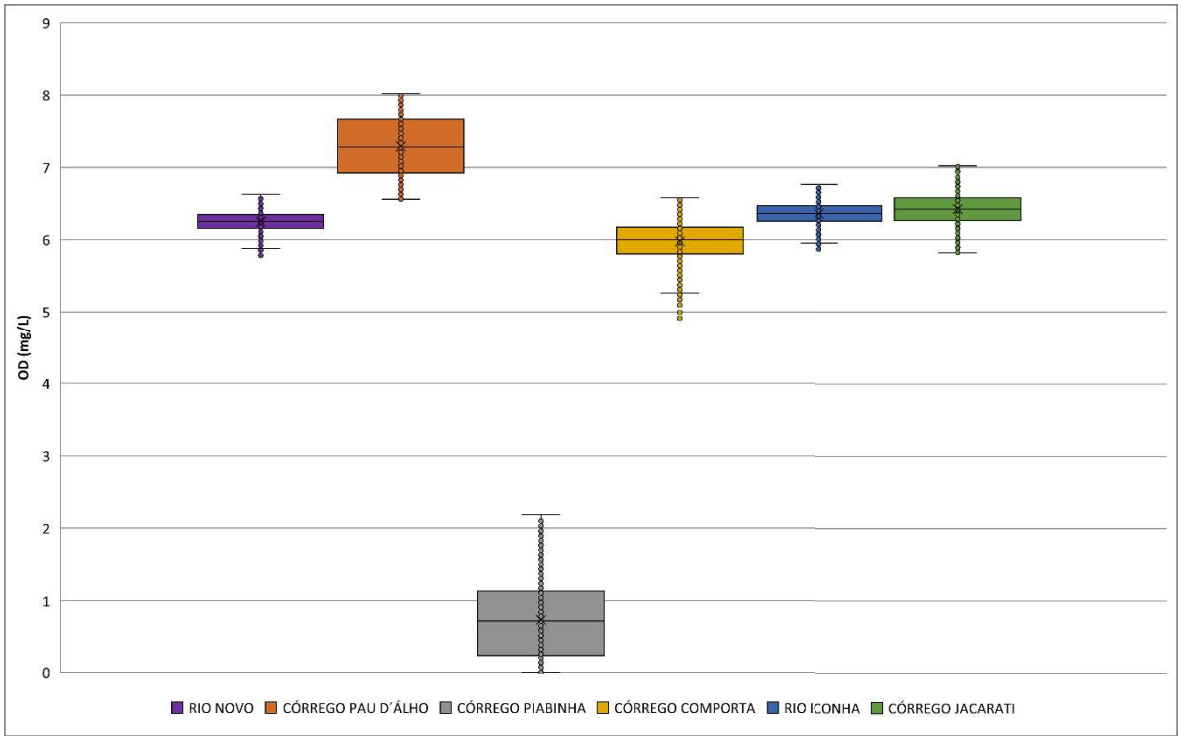

Figura 46: Diagramas tipo Box-plot para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto de 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

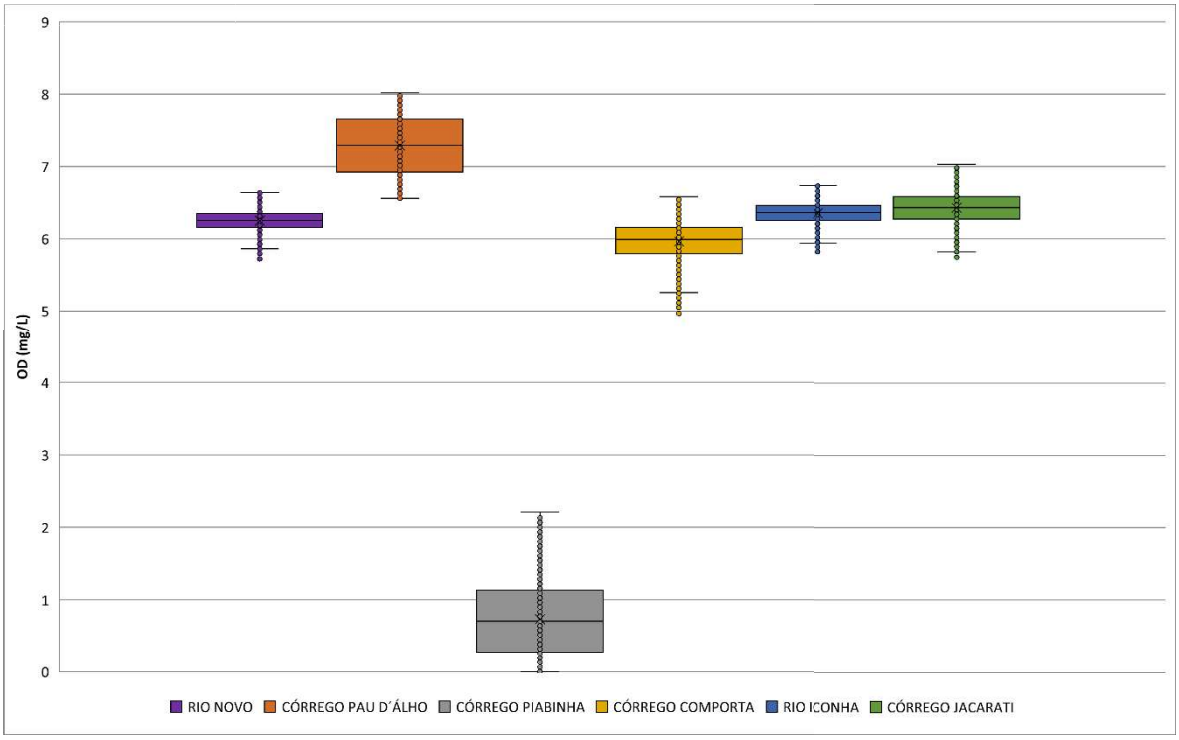

Figura 47: Diagramas tipo Box-plot para OD nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto de 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

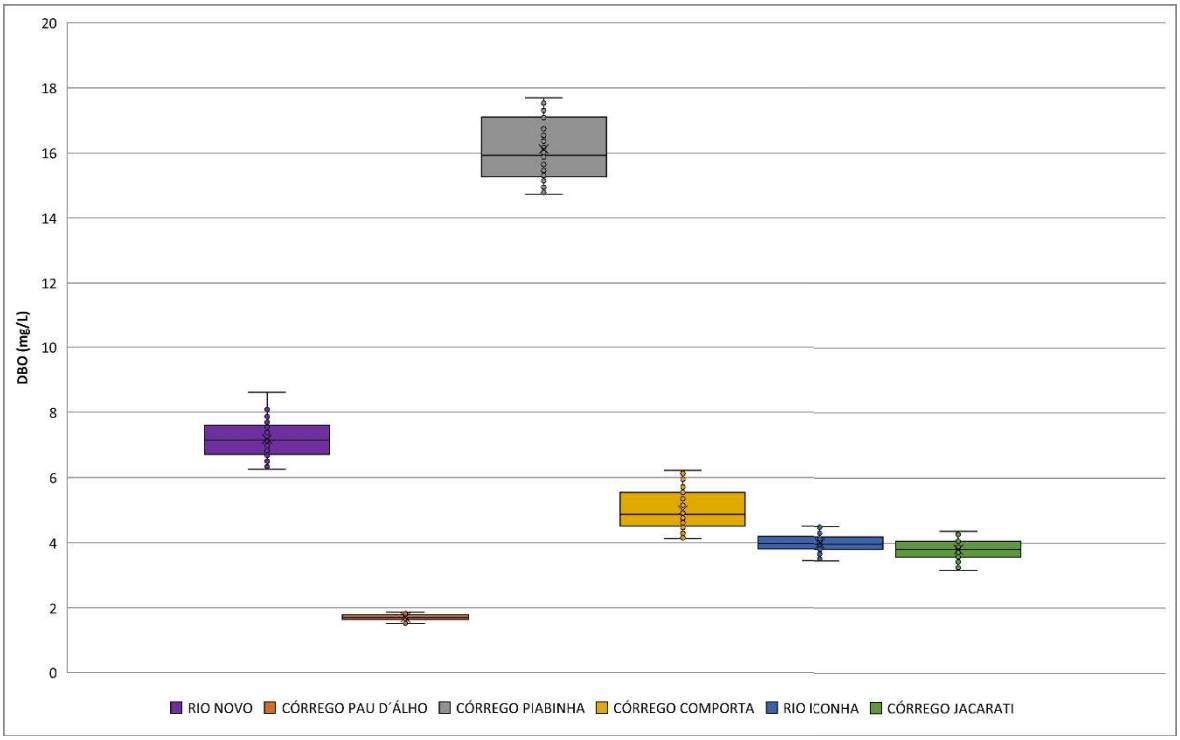

Figura 48: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

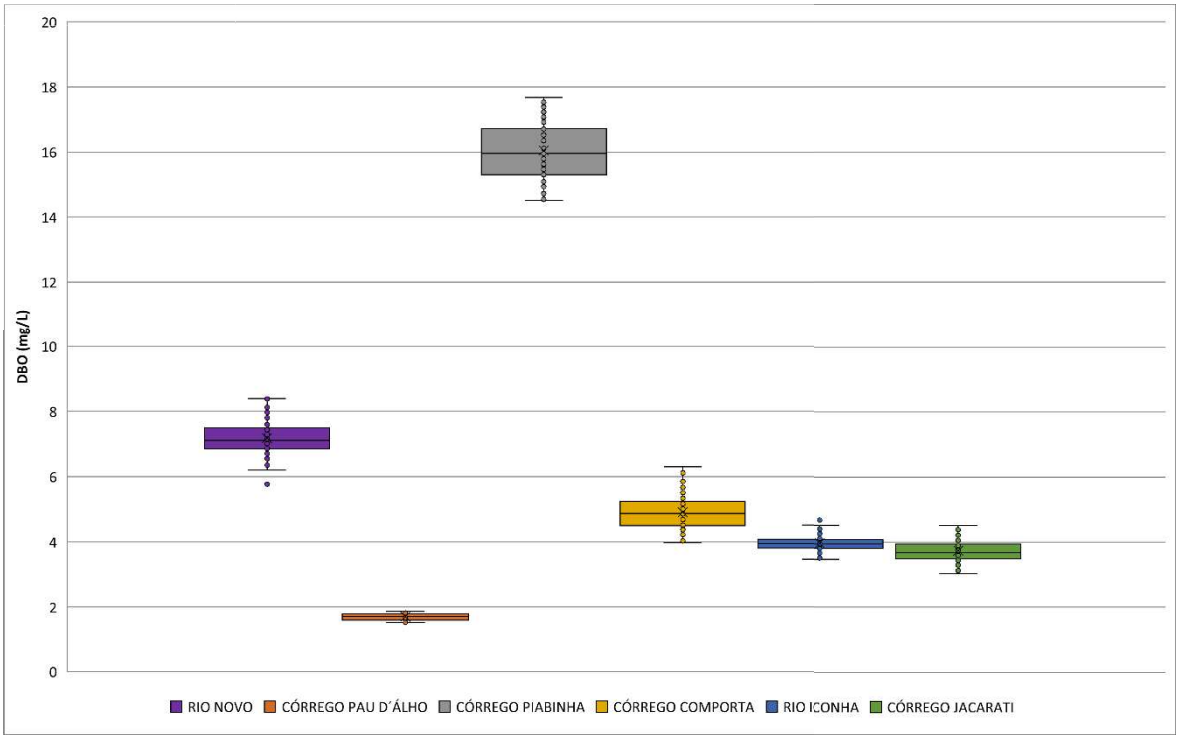

Figura 49: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

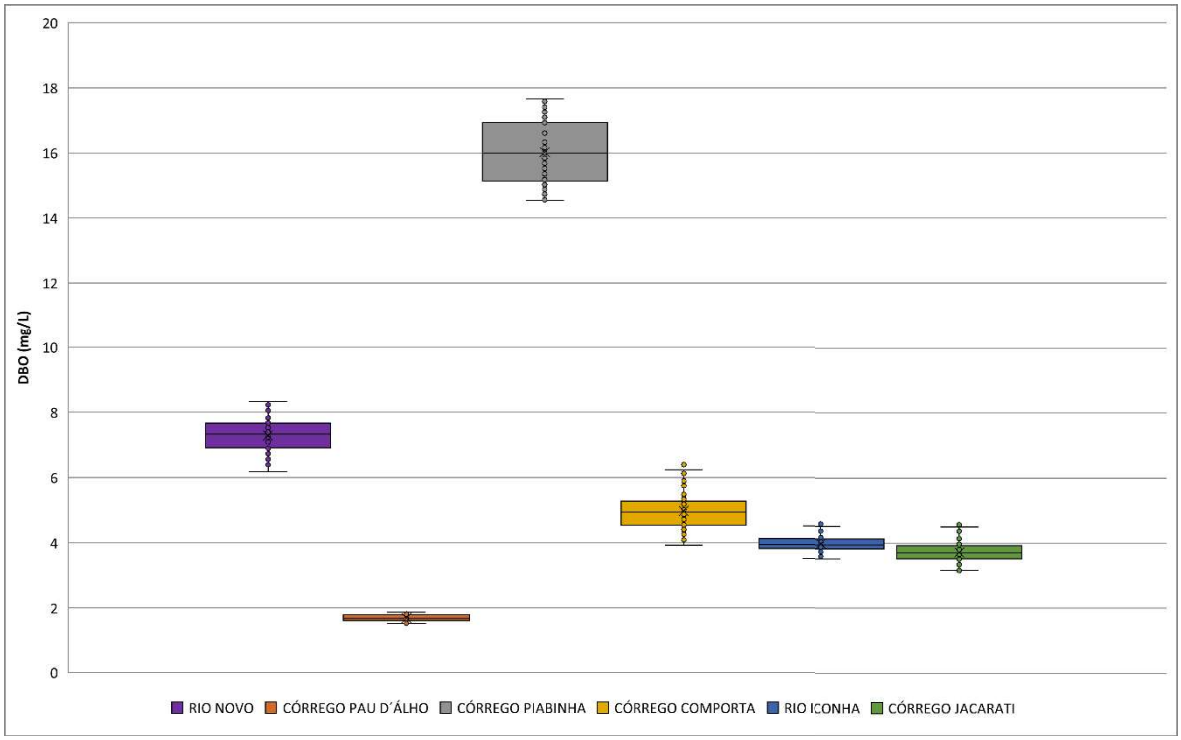

Figura 50: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

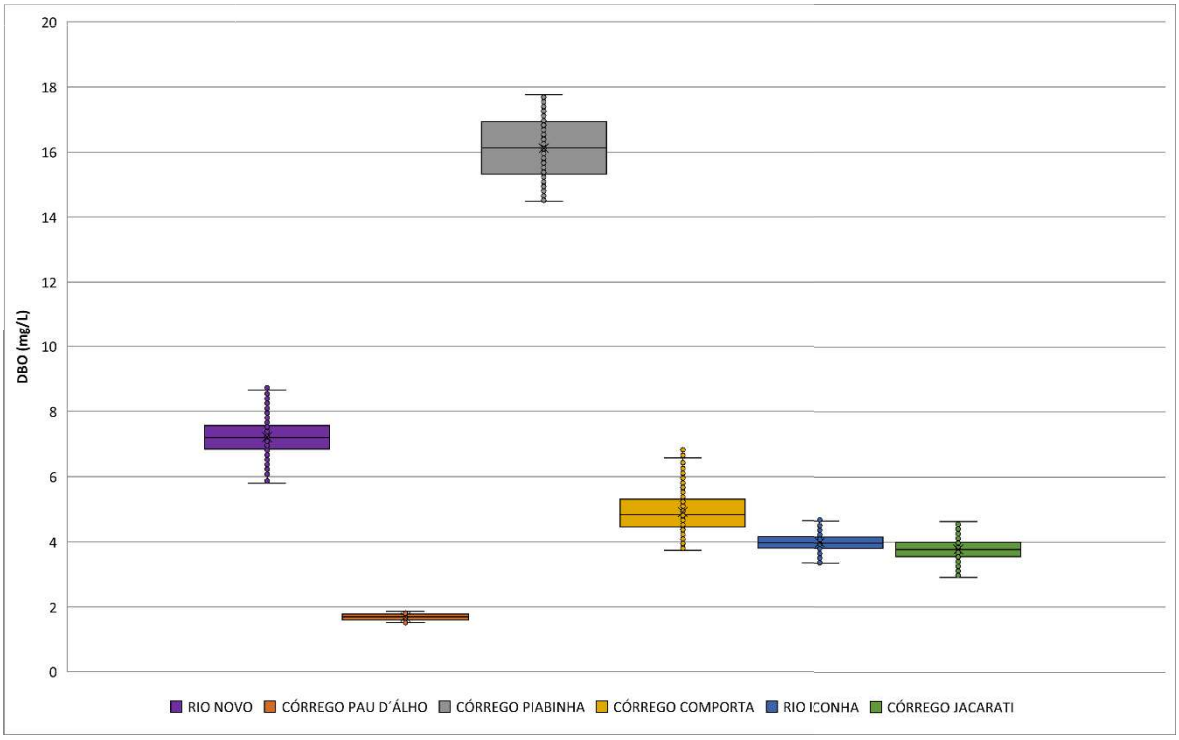

Figura 51: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

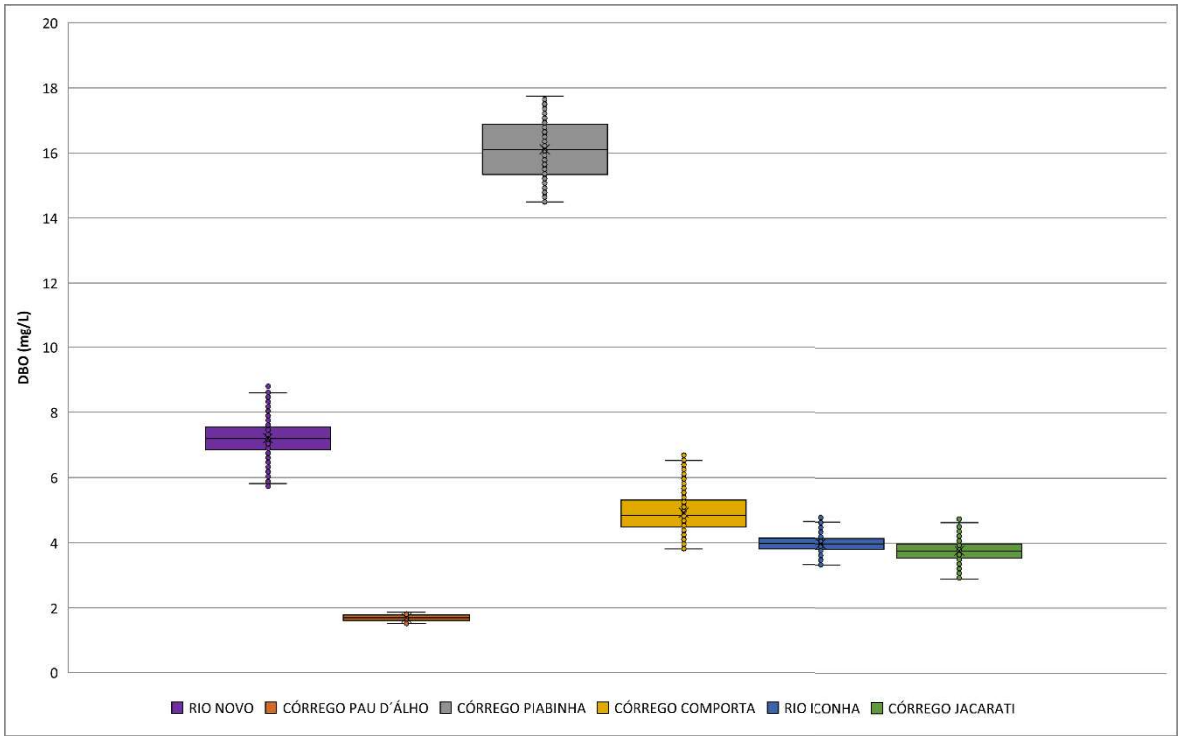

Figura 52: Diagramas tipo Box-plot para DBO nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

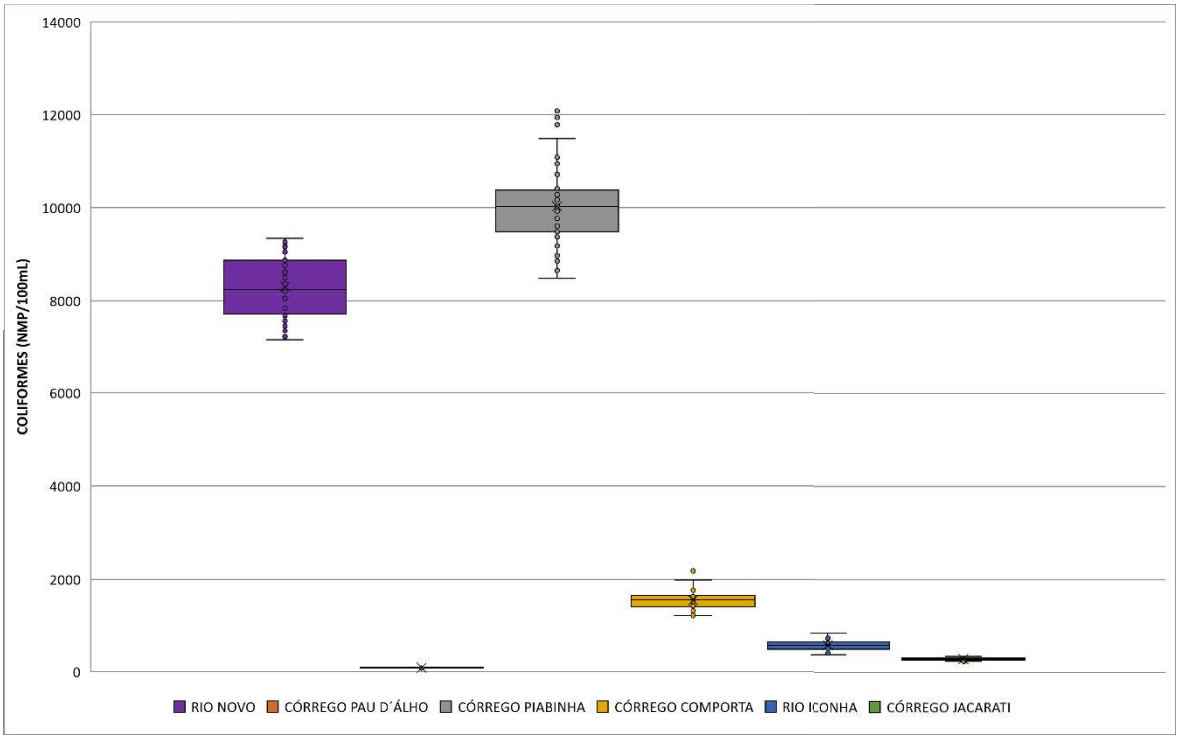

Figura 53: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

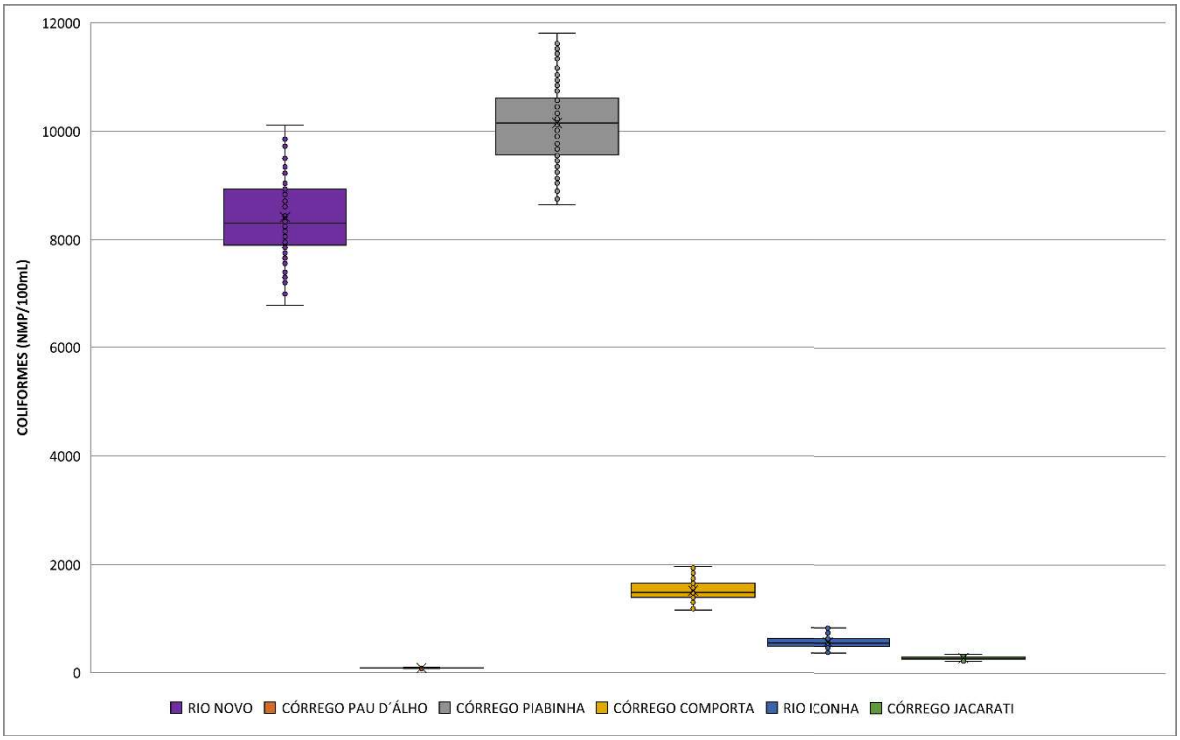

Figura 54: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

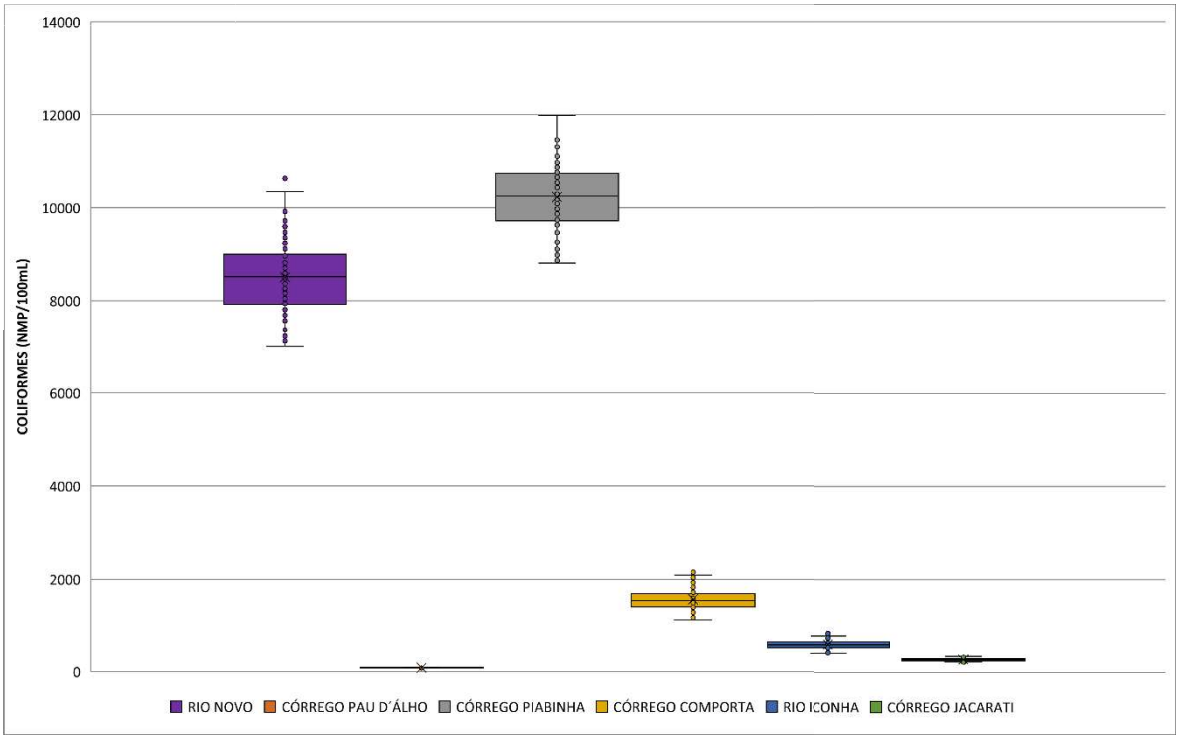

Figura 55: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

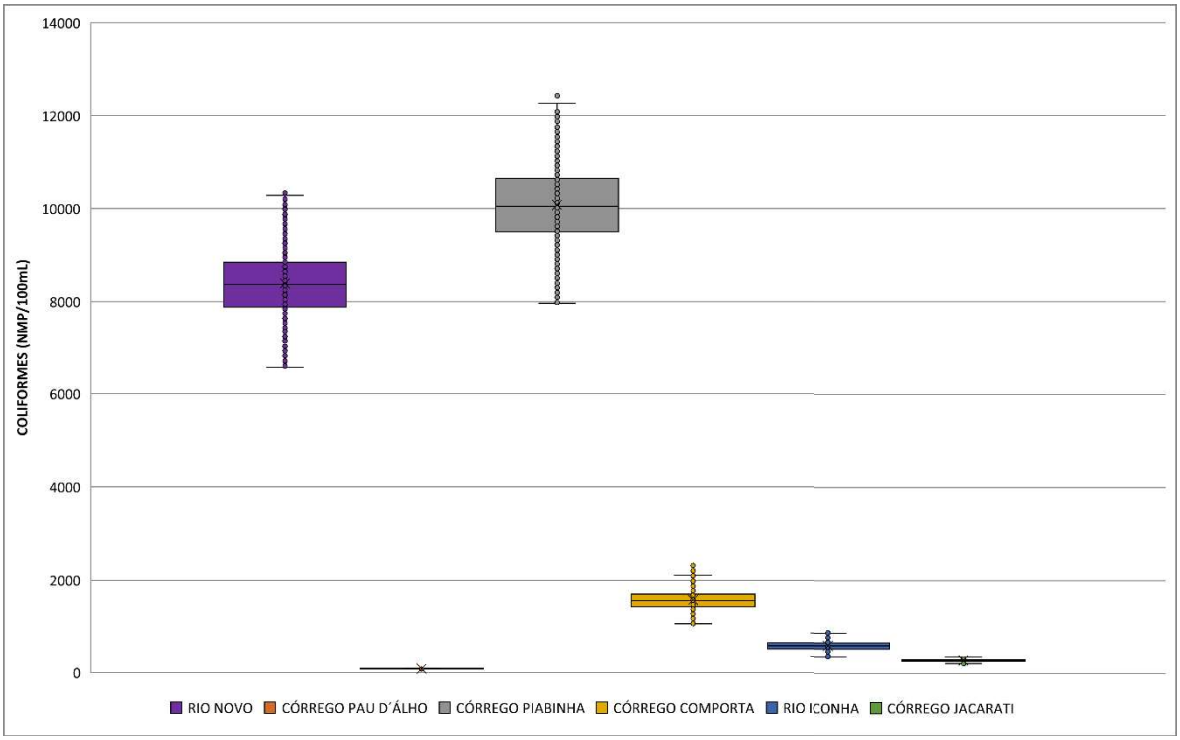

Figura 56: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

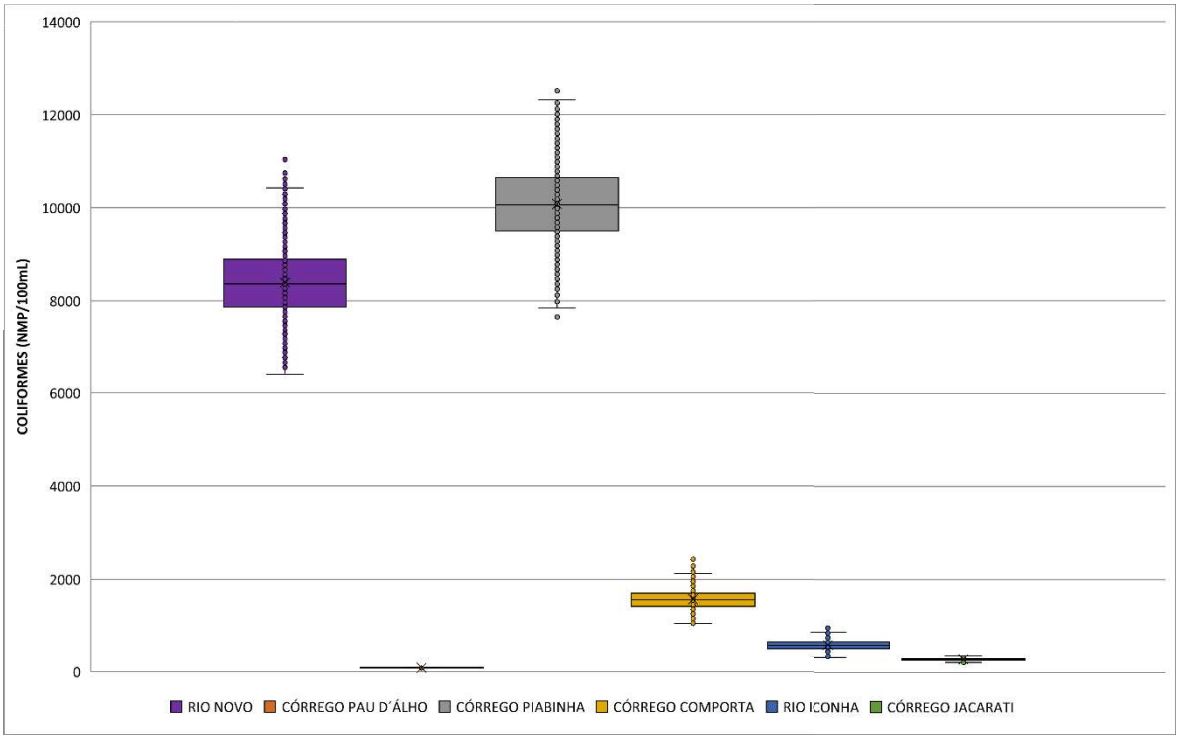

Figura 57: Diagramas tipo Box-plot para coliformes termotolerantes nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

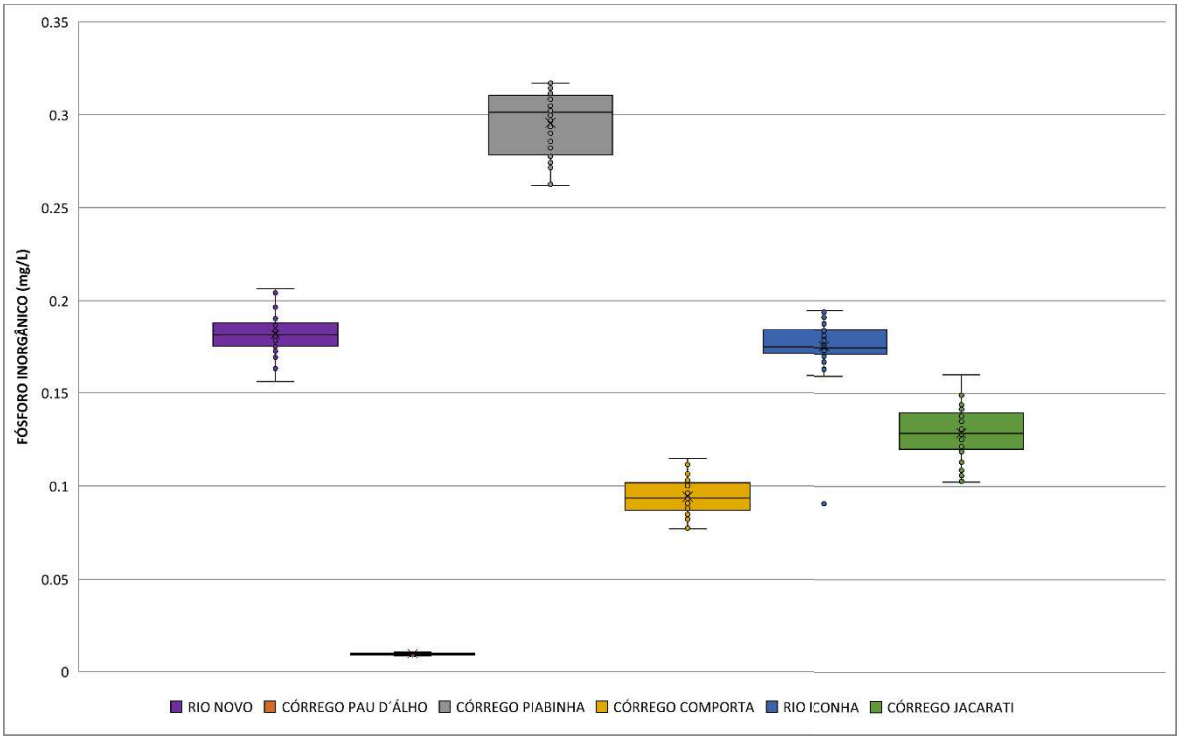

Figura 58: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

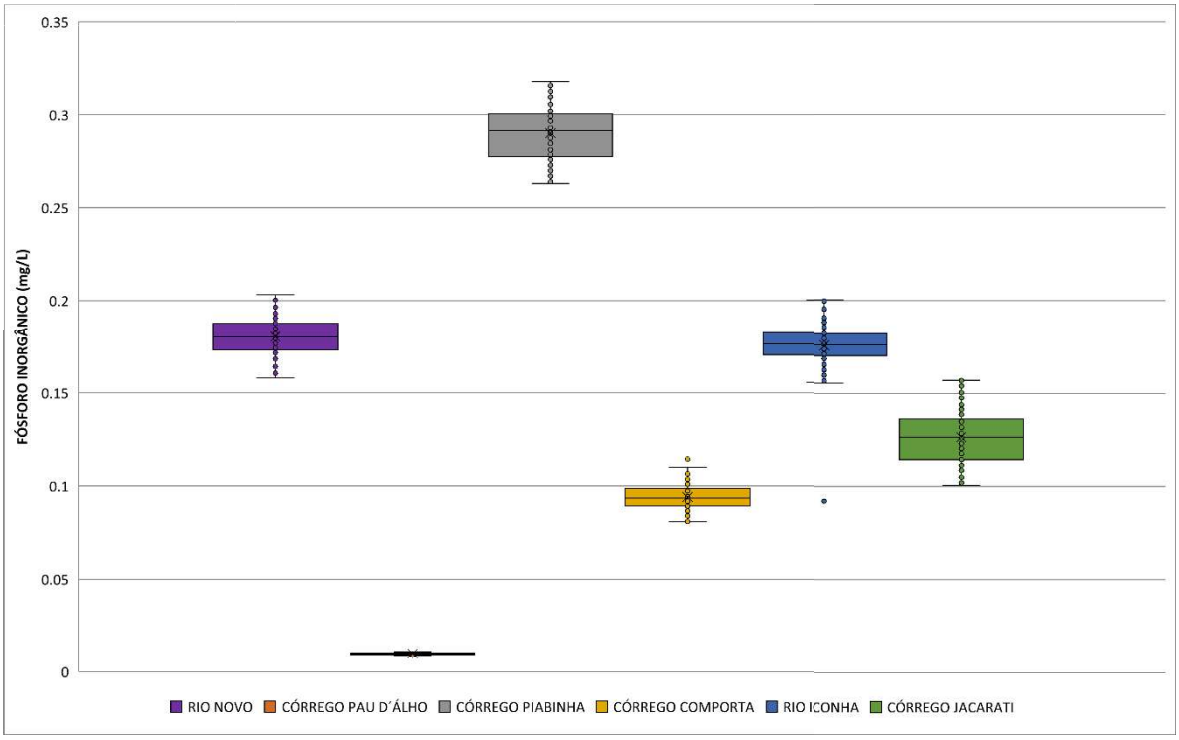

Figura 59: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

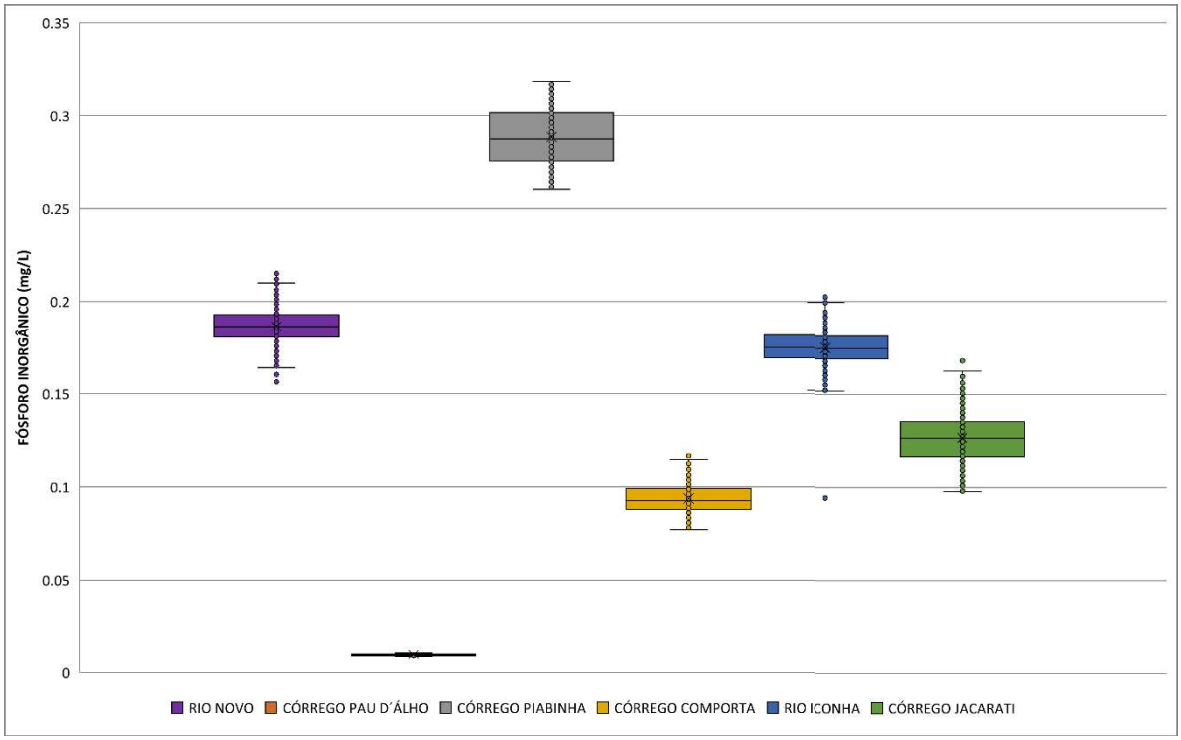

Figura 60: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

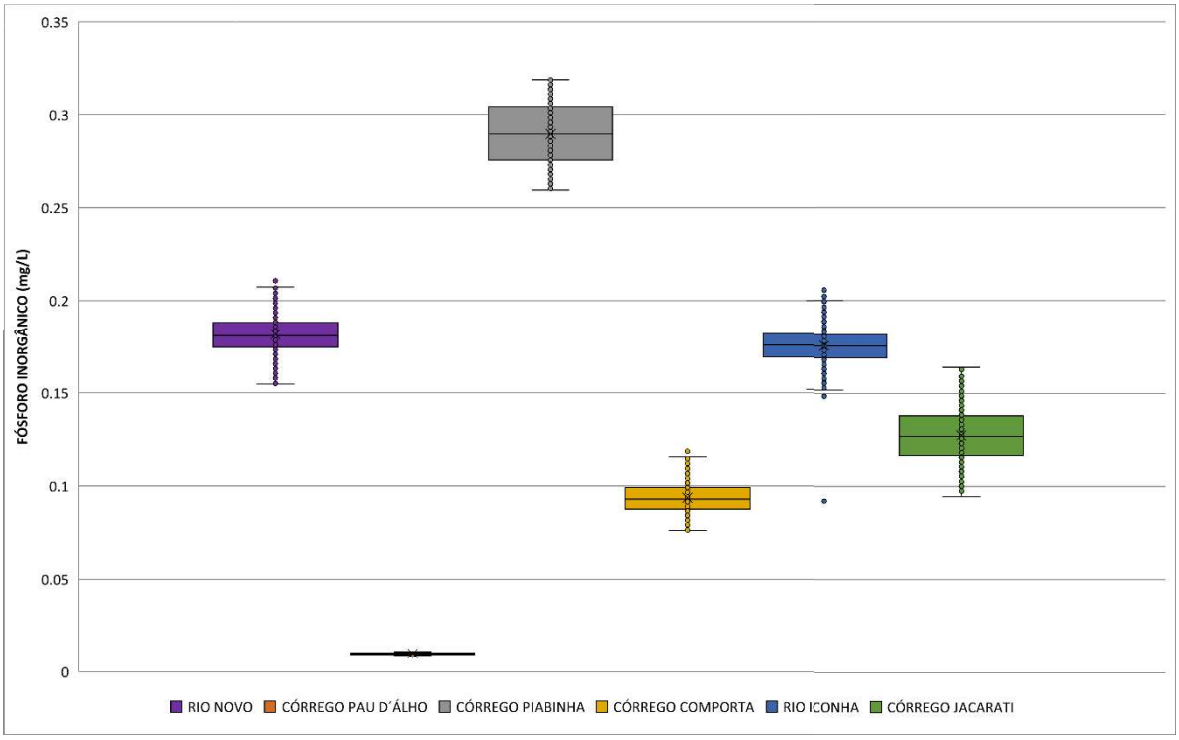

Figura 61: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

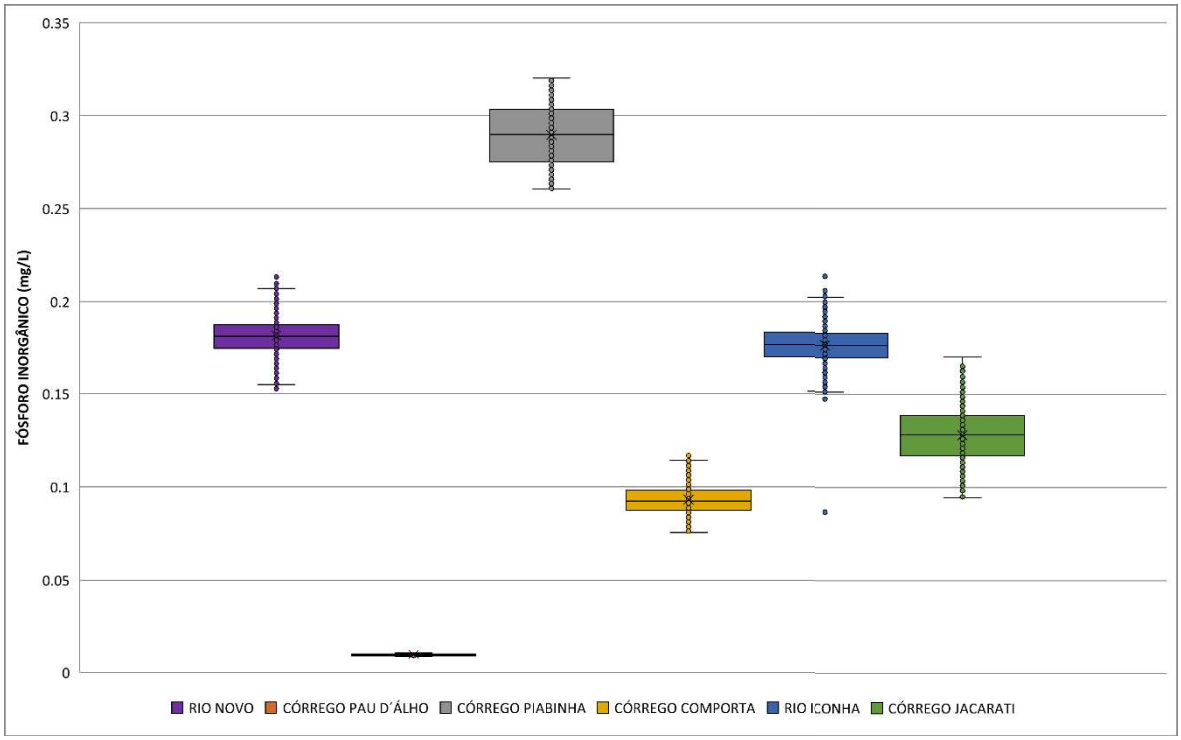

Figura 62: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

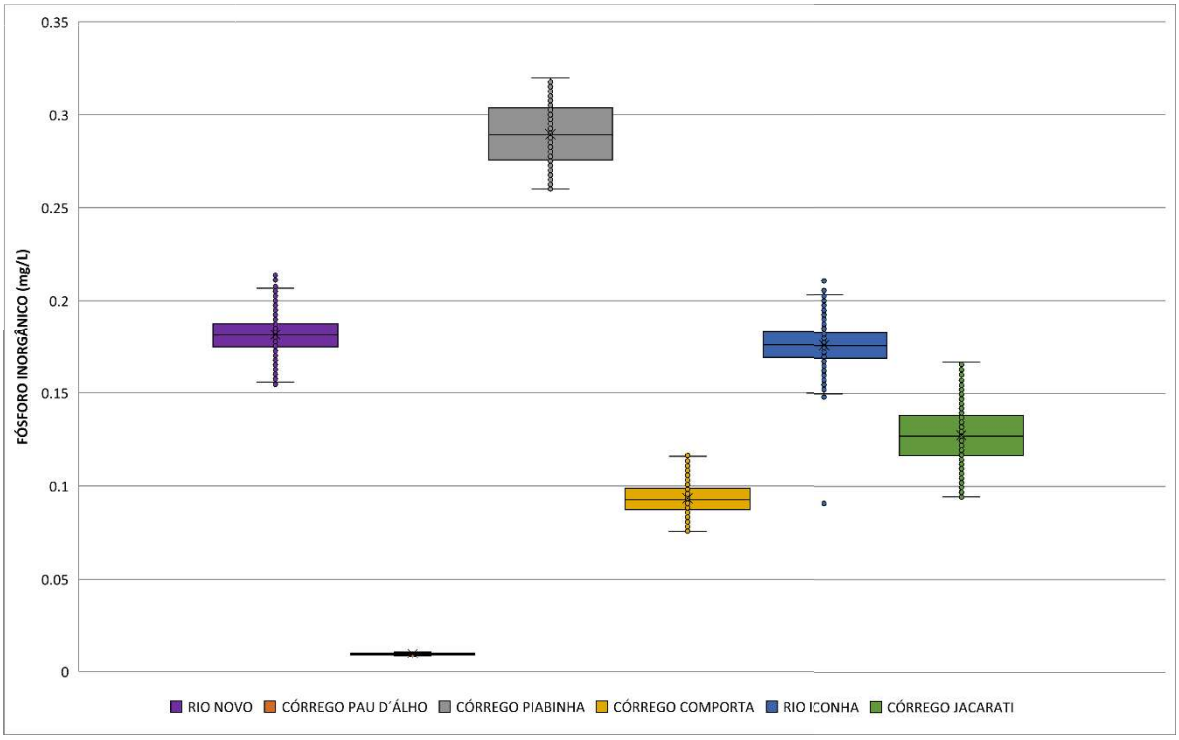

Figura 63: Diagramas tipo Box-plot para fósforo inorgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

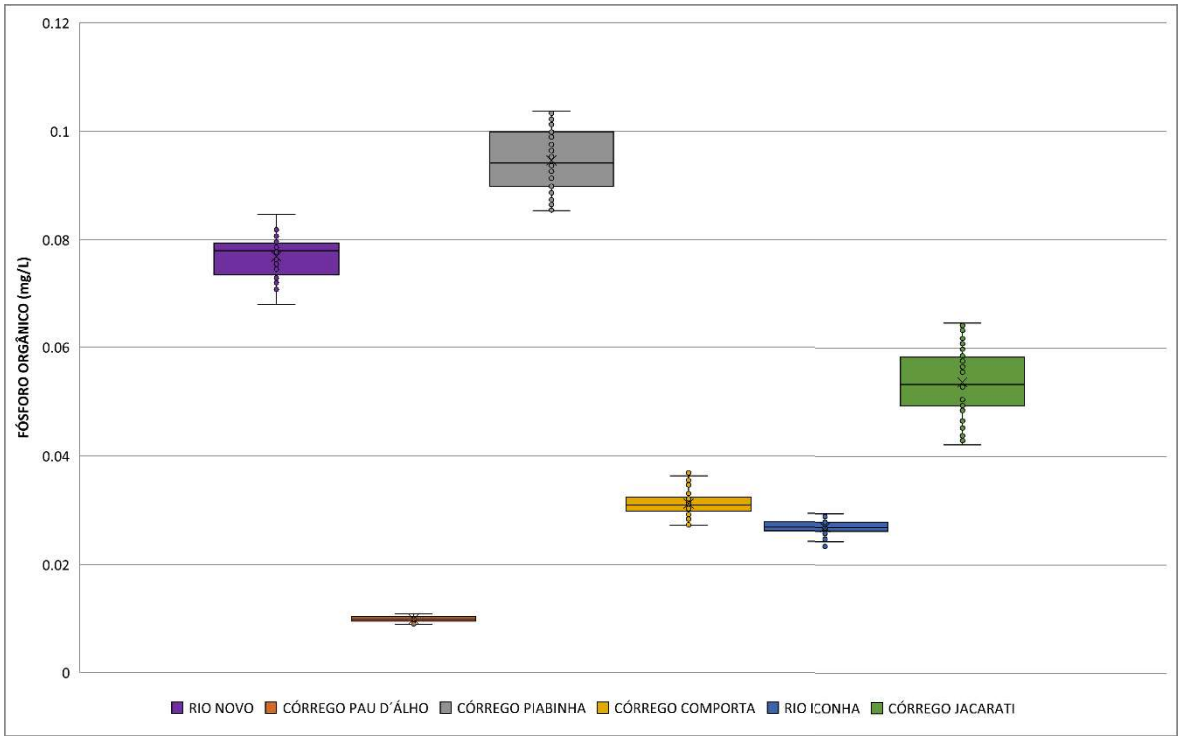

Figura 64: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

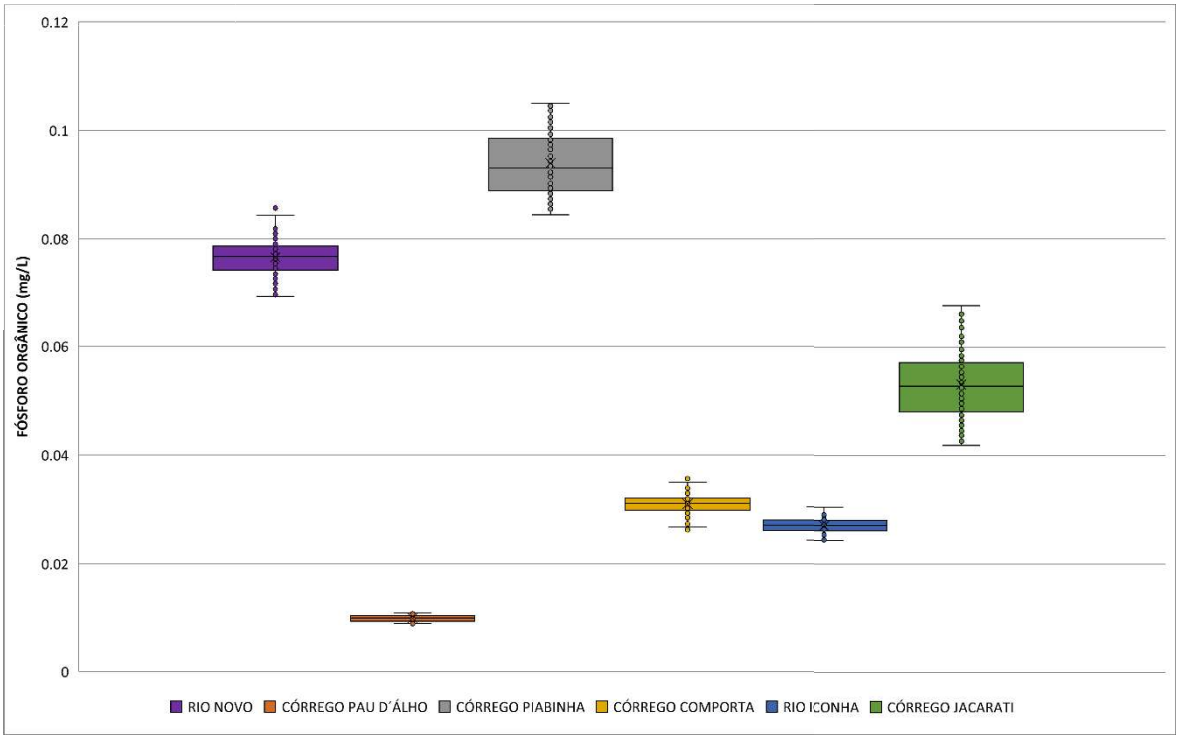

Figura 65: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

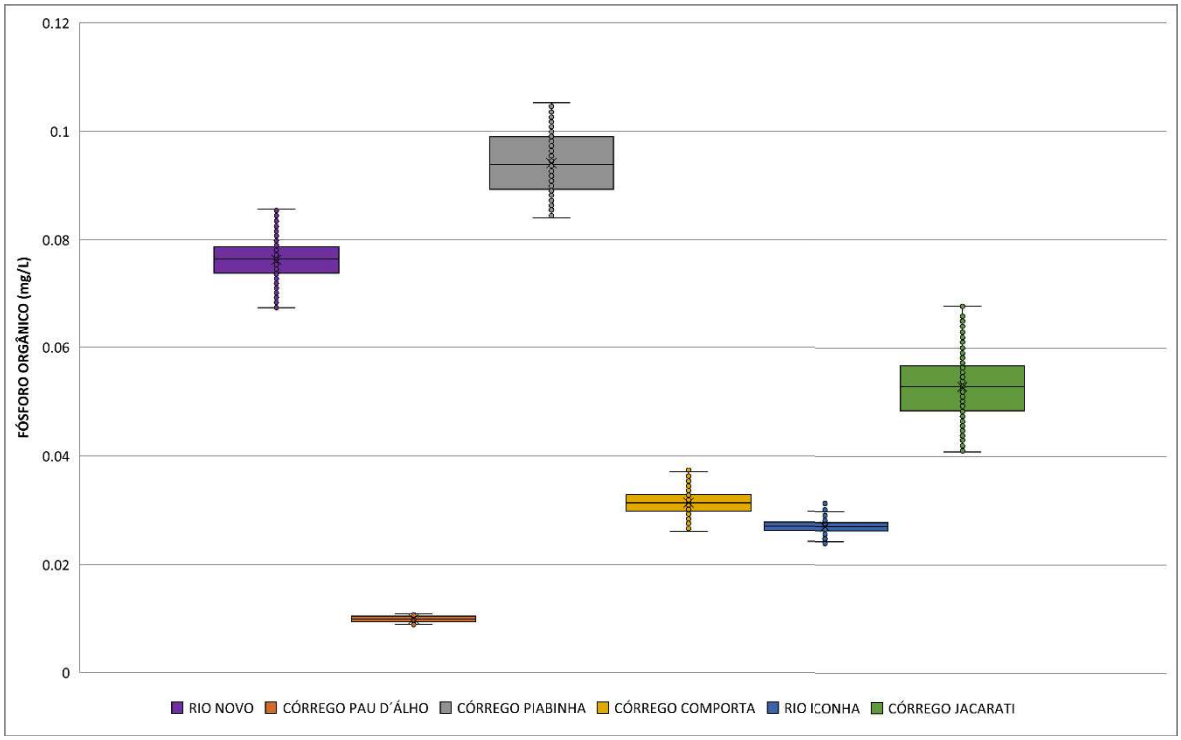

Figura 66: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

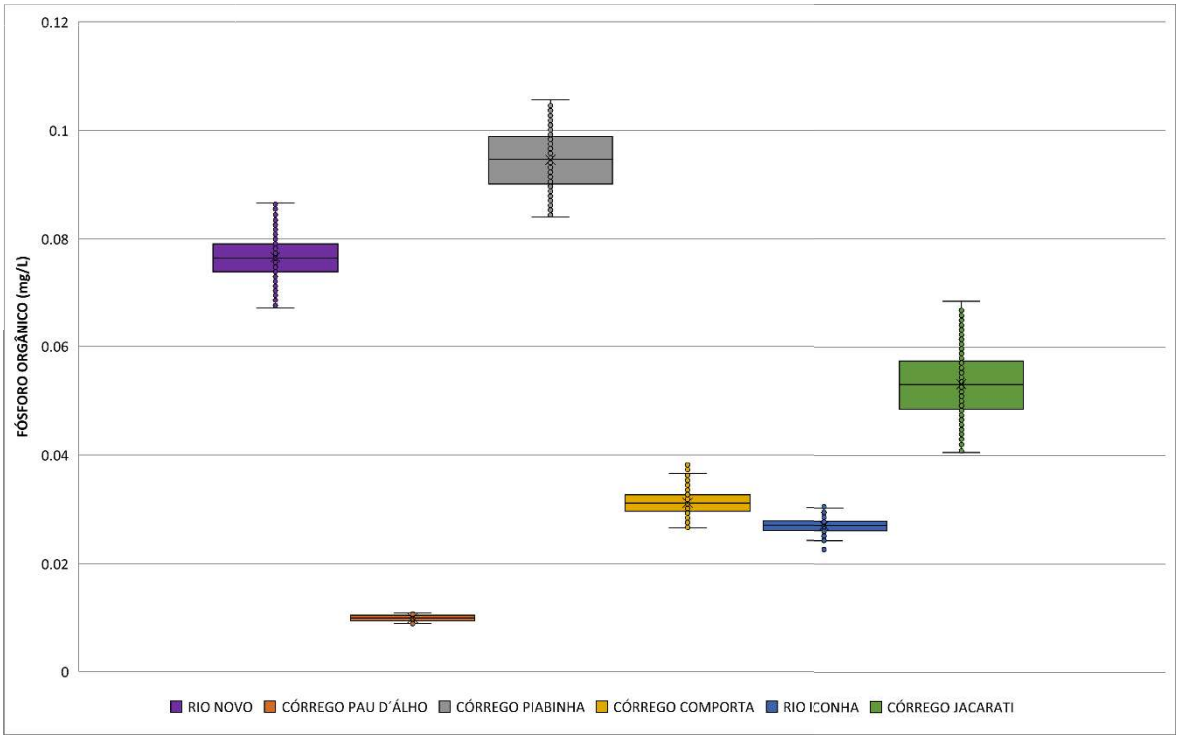

Figura 67: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

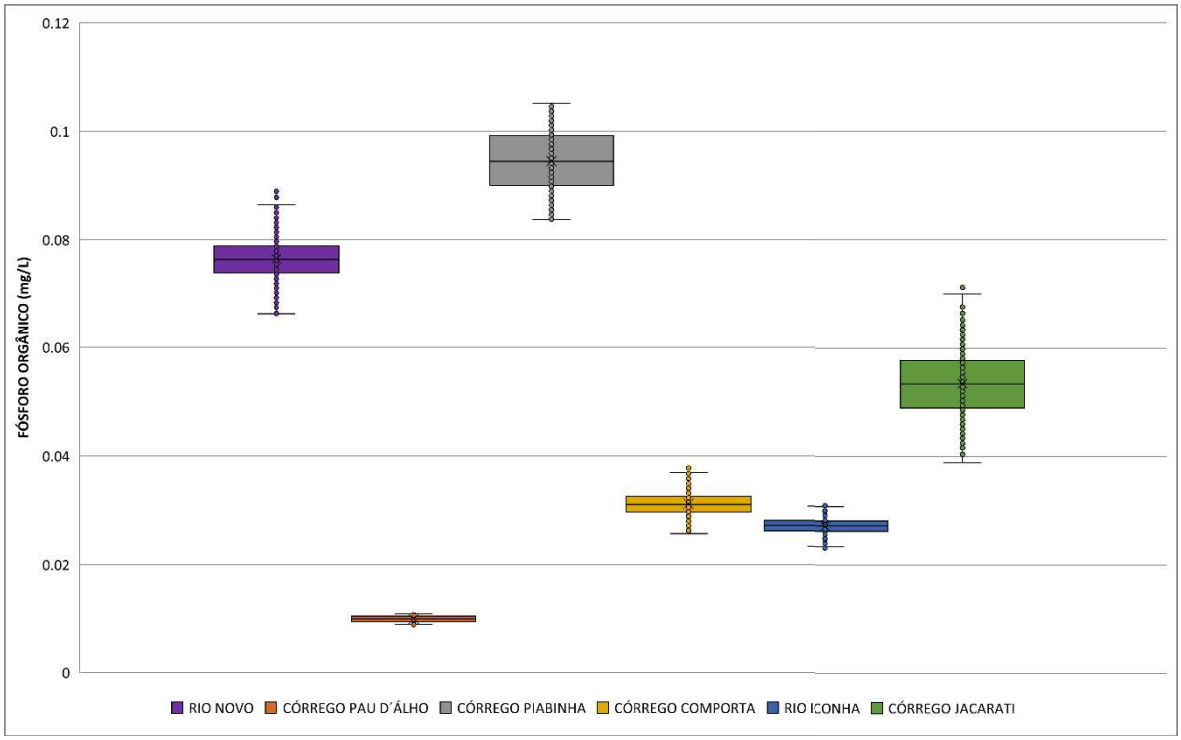

Figura 68: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

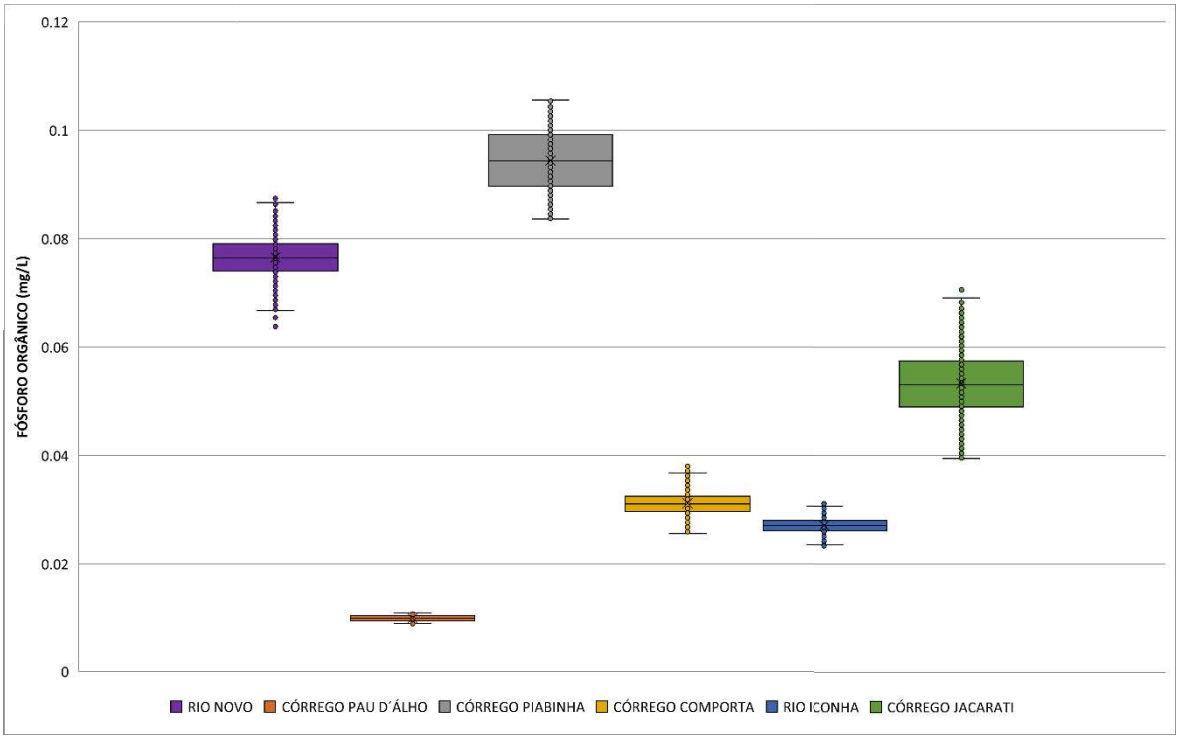

Figura 69: Diagramas tipo Box-plot para fósforo orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

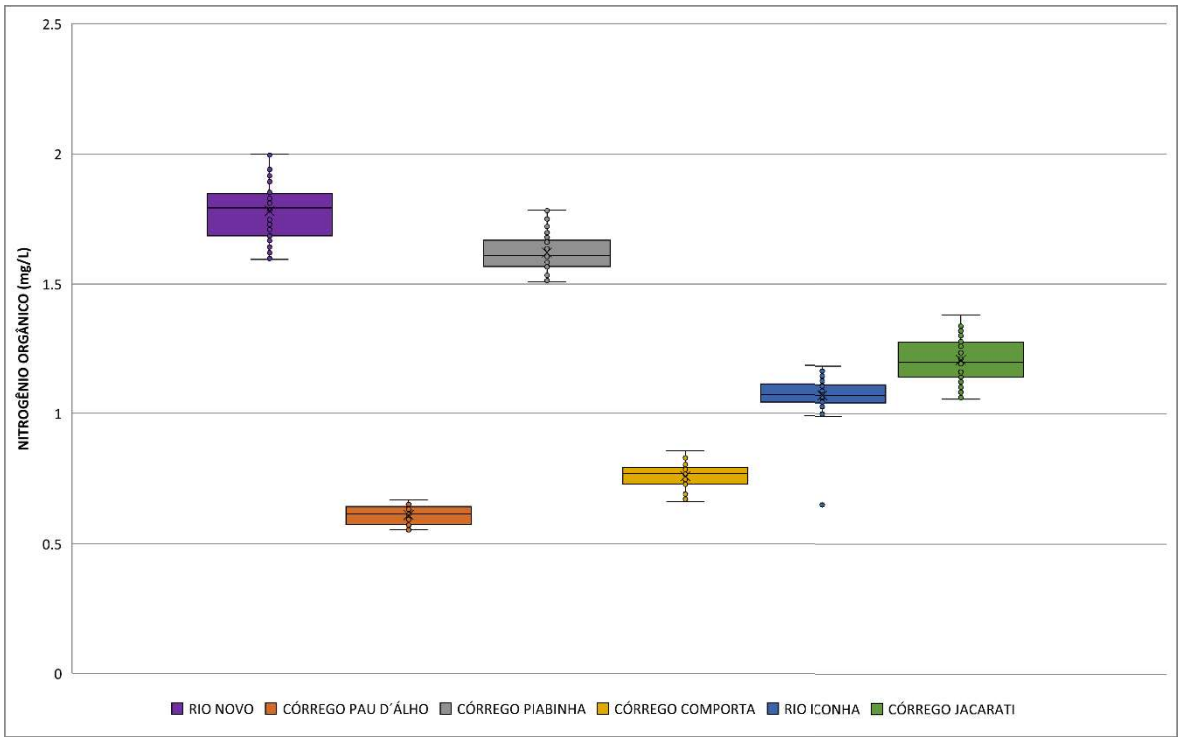

Figura 70: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

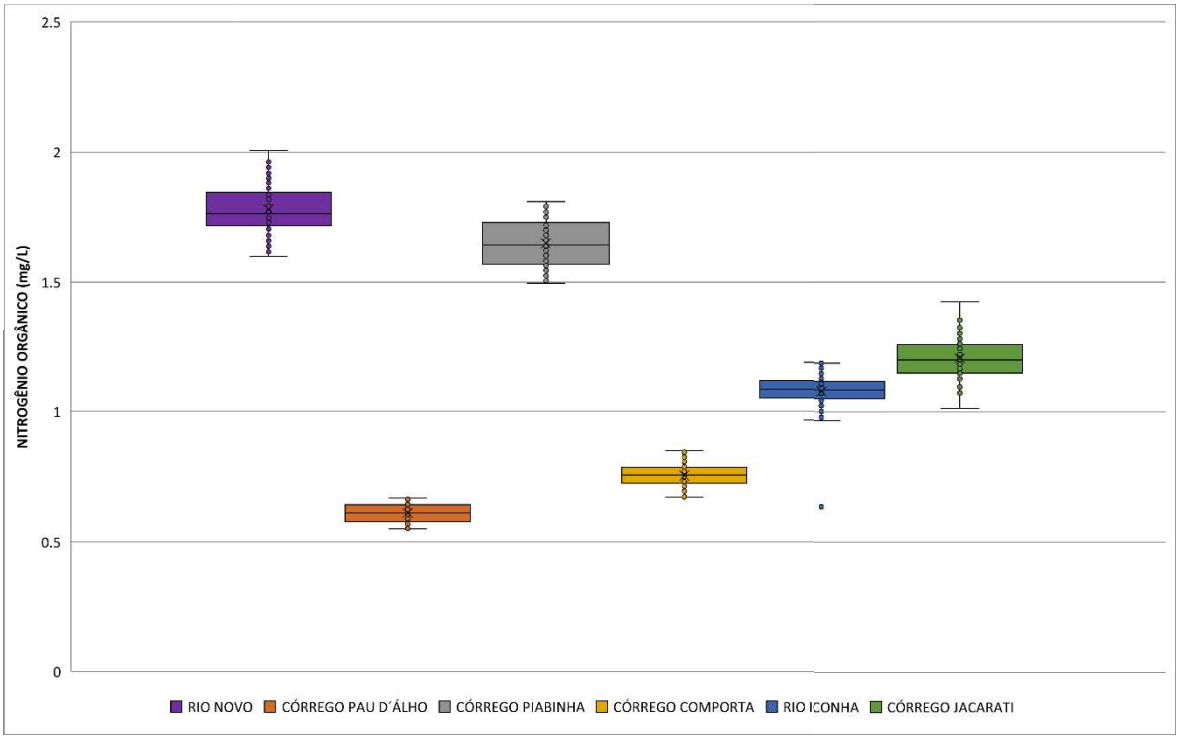

Figura 71: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

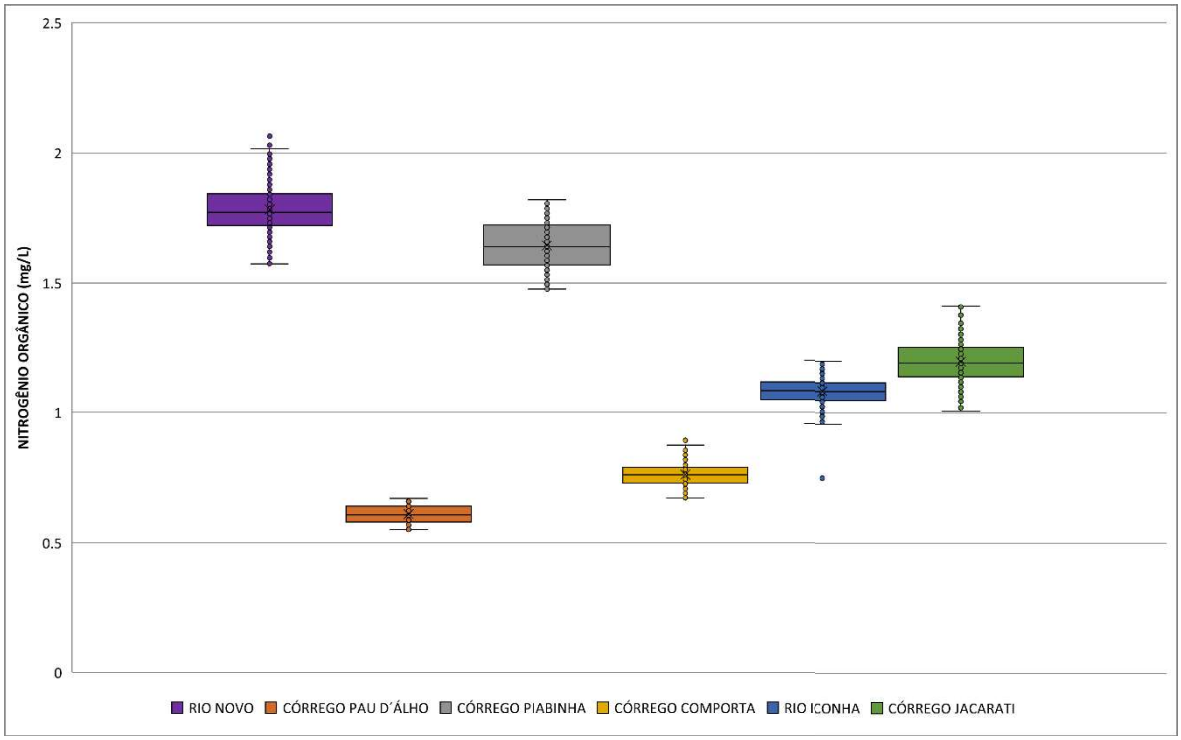

Figura 72: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

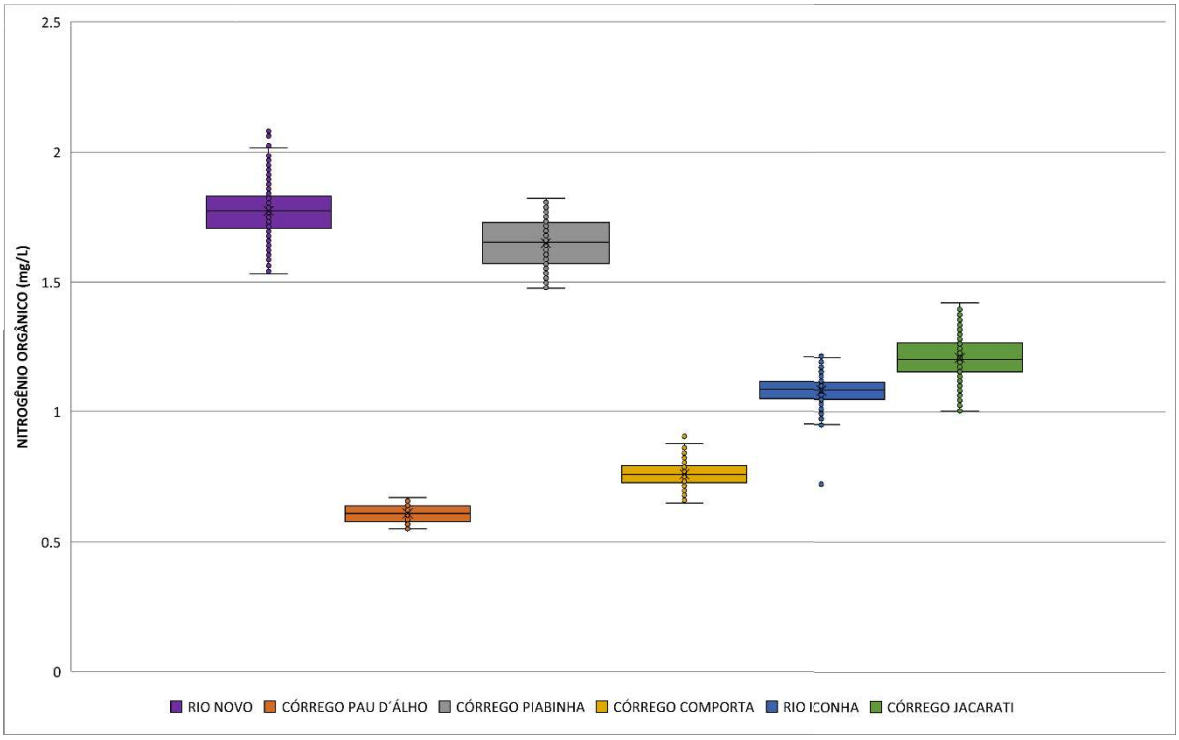

Figura 73: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

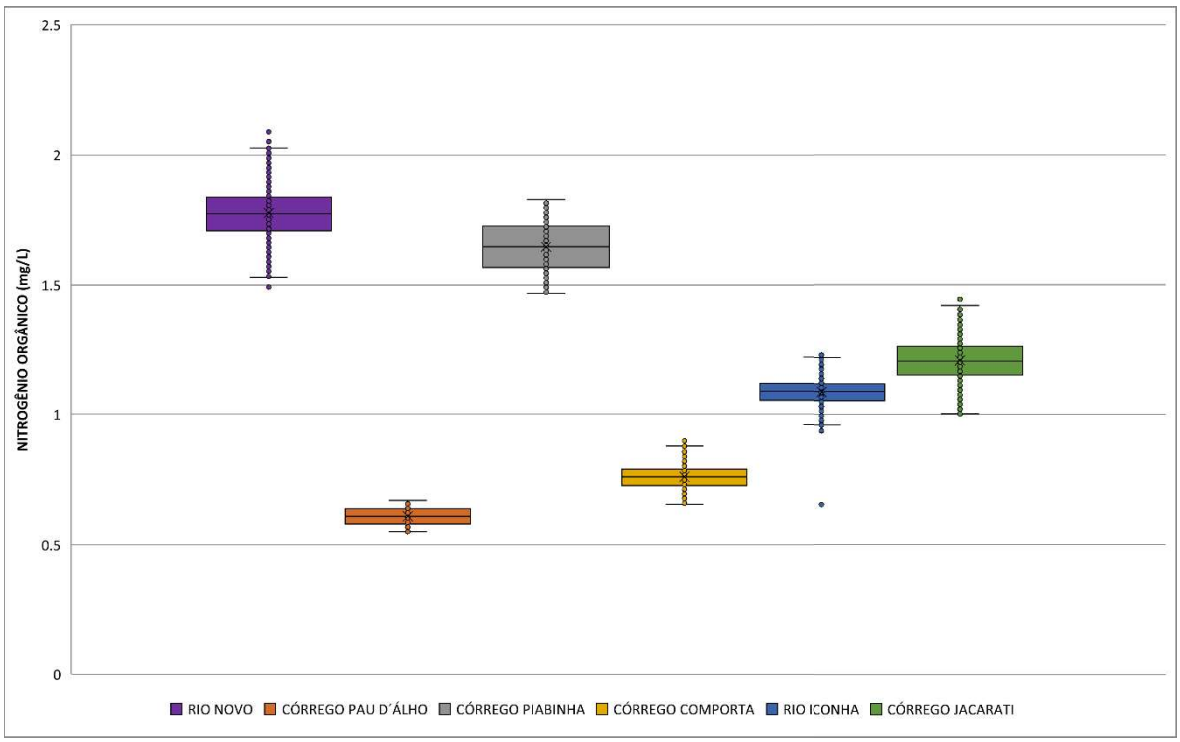

Figura 74: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

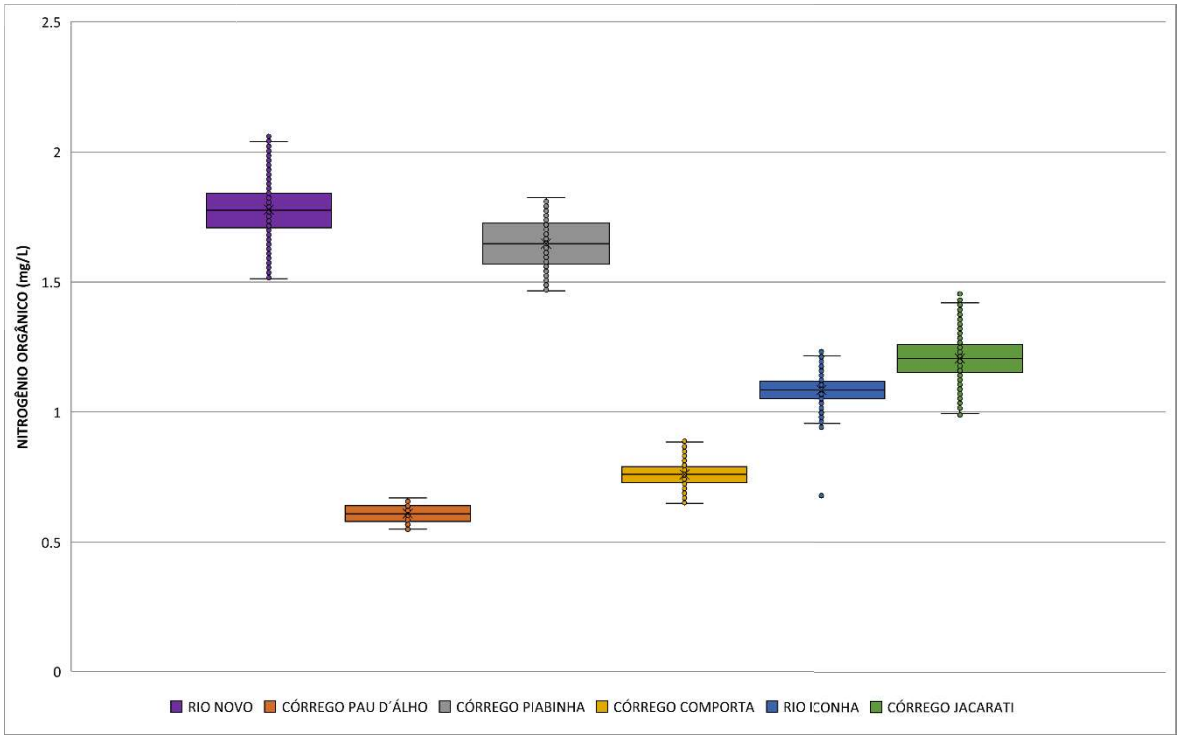

Figura 75: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio orgânico nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

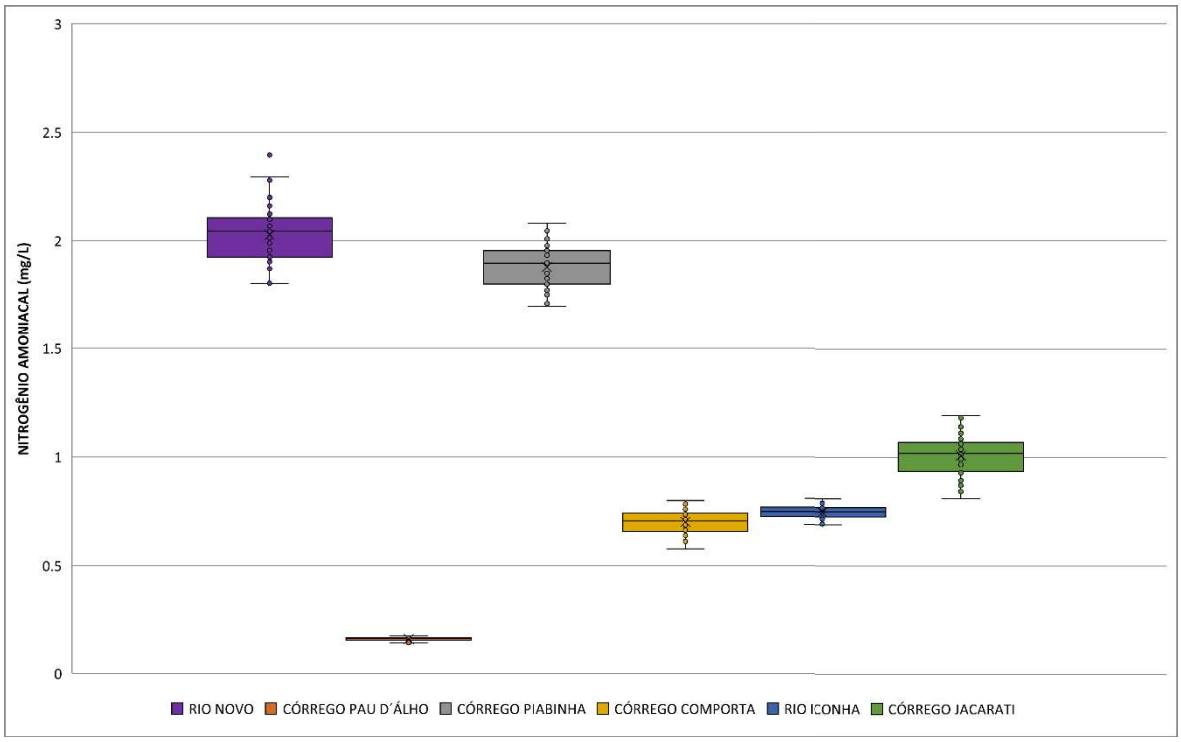

Figura 76: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

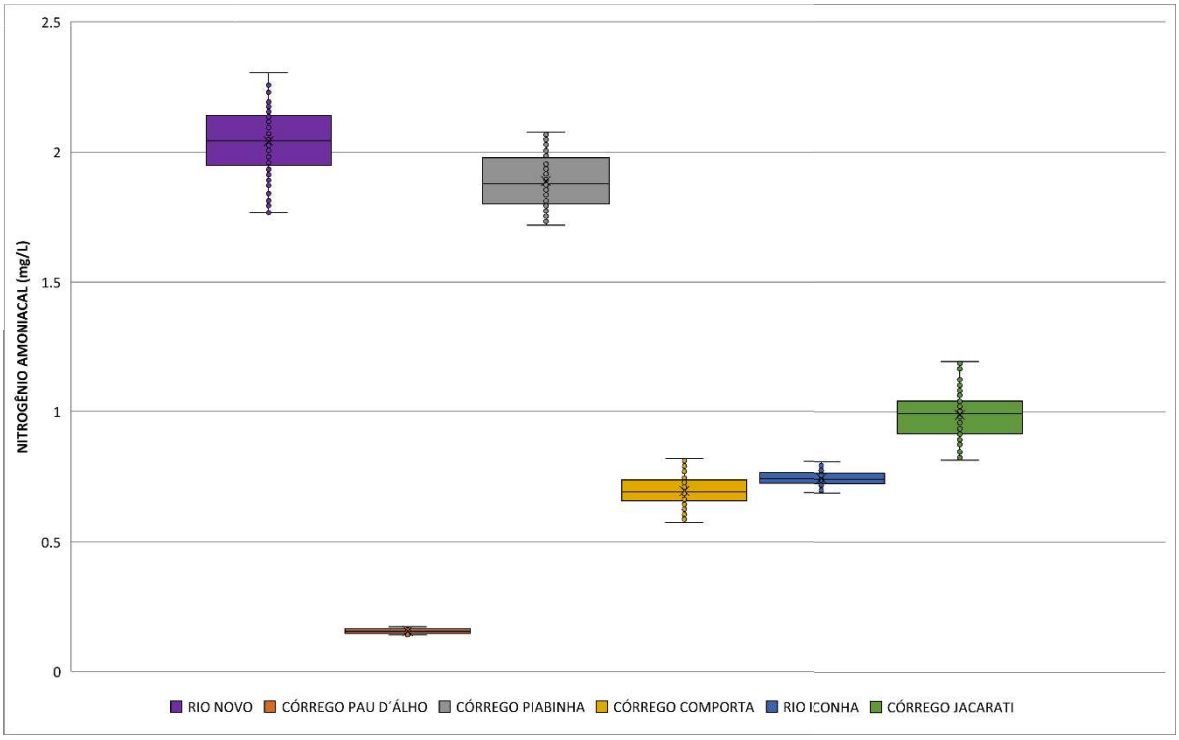

Figura 77: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

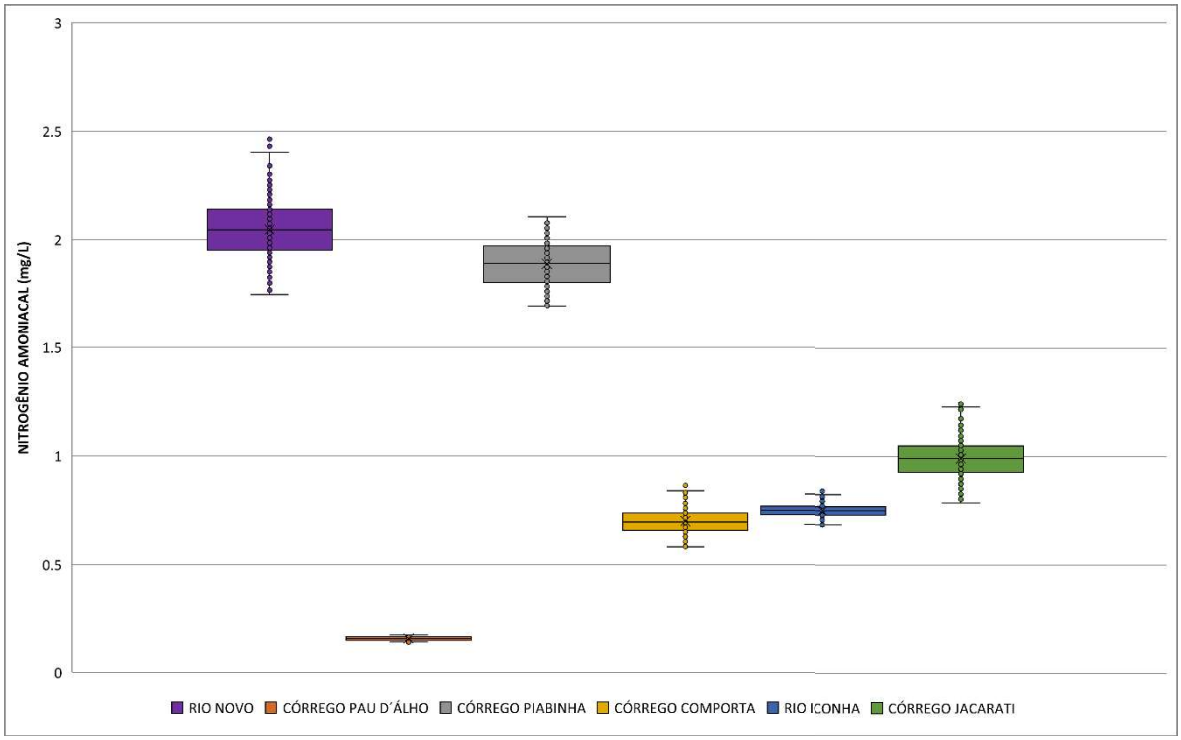

Figura 78: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

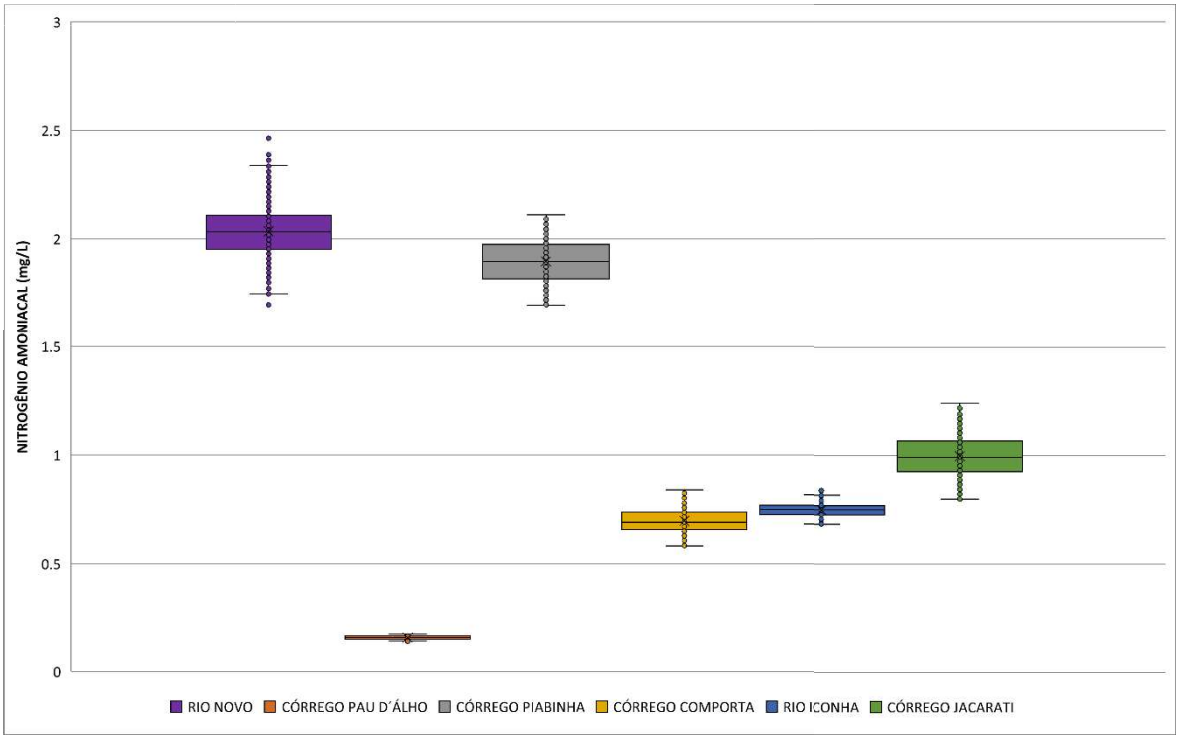

Figura 79: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

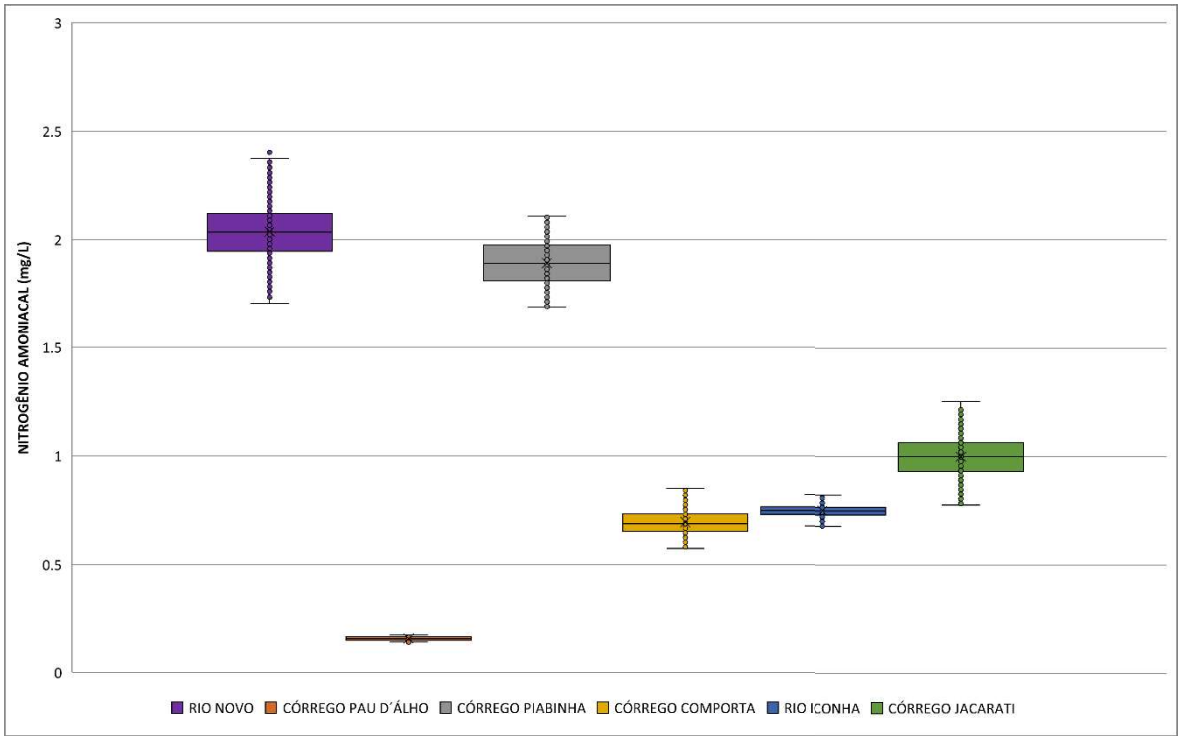

Figura 80: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

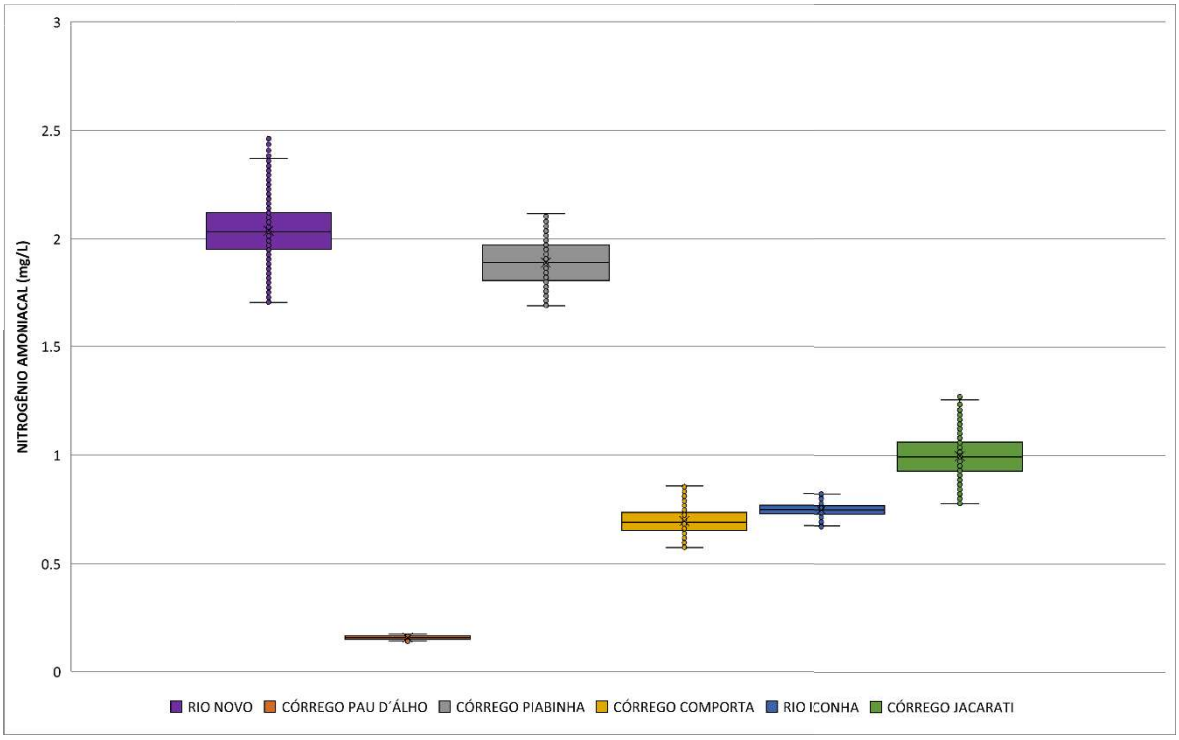

Figura 81: Diagramas tipo Box-plot para nitrogênio amoniacal nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

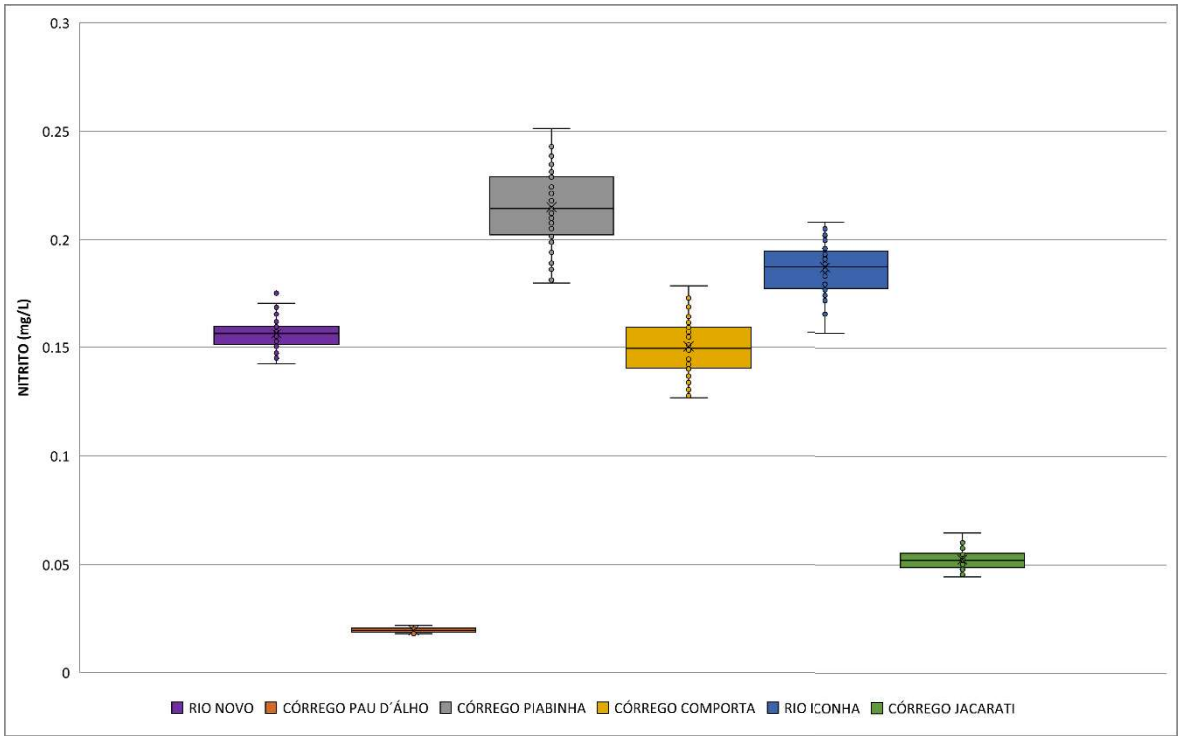

Figura 82: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

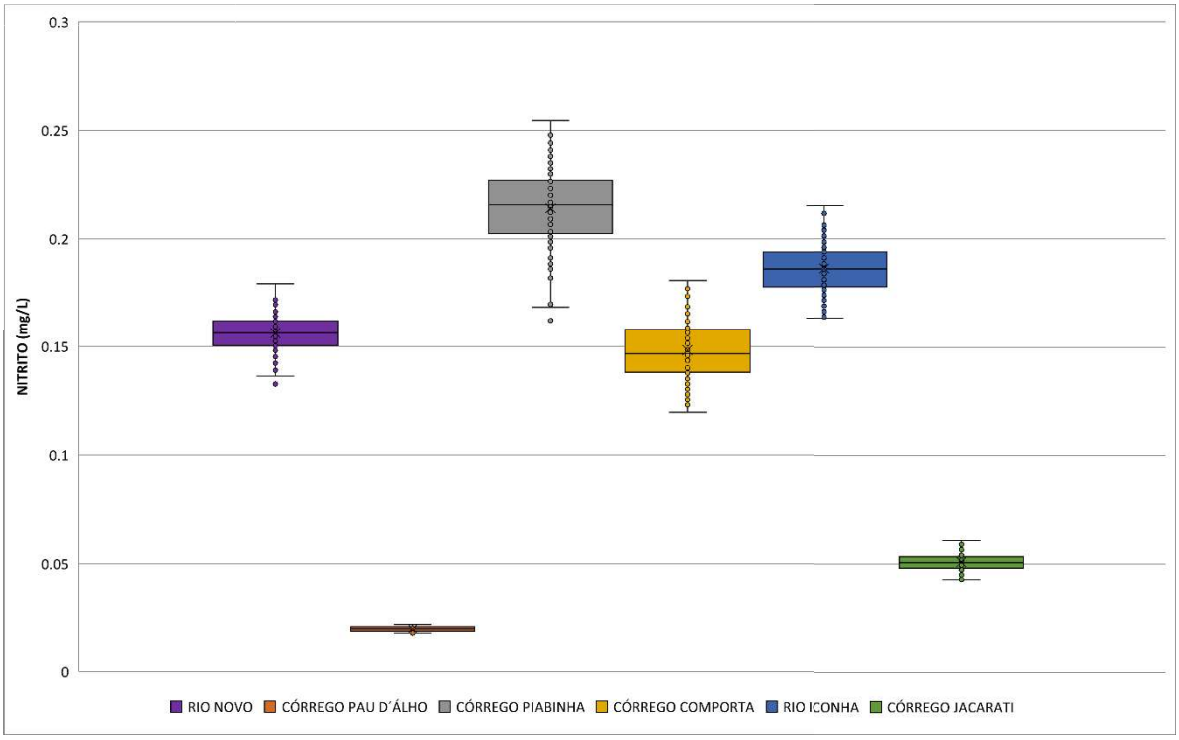

Figura 83: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

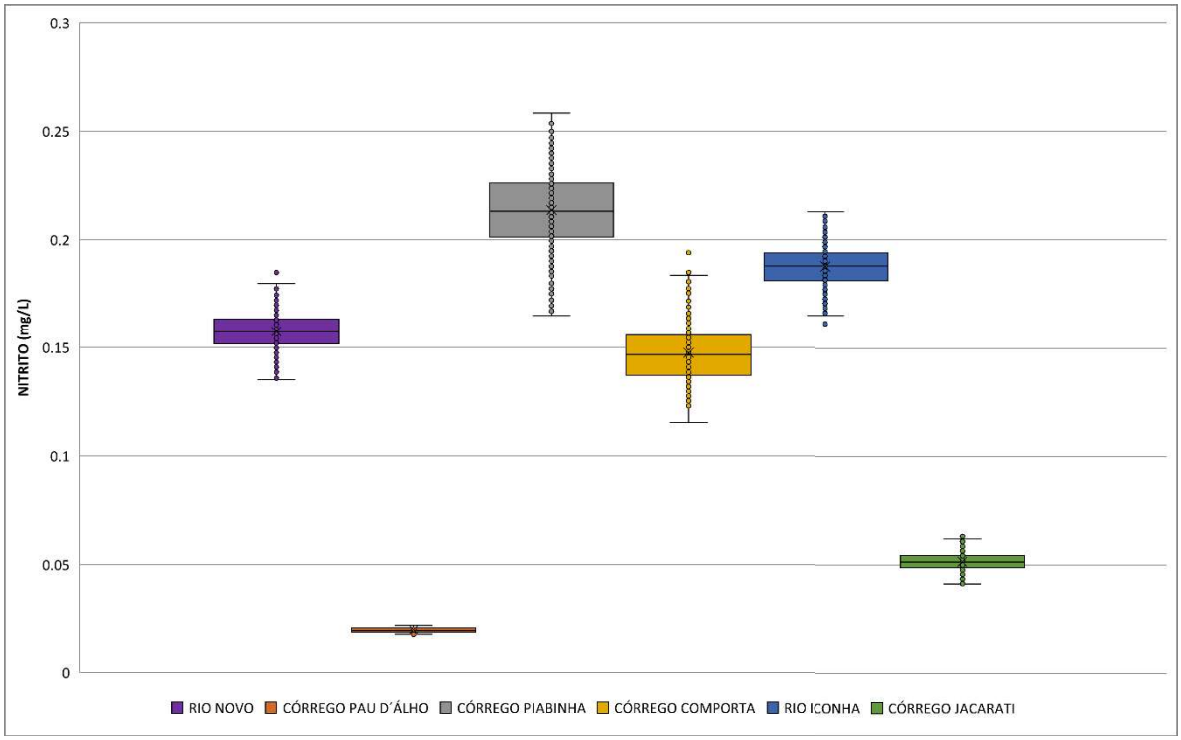

Figura 84: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

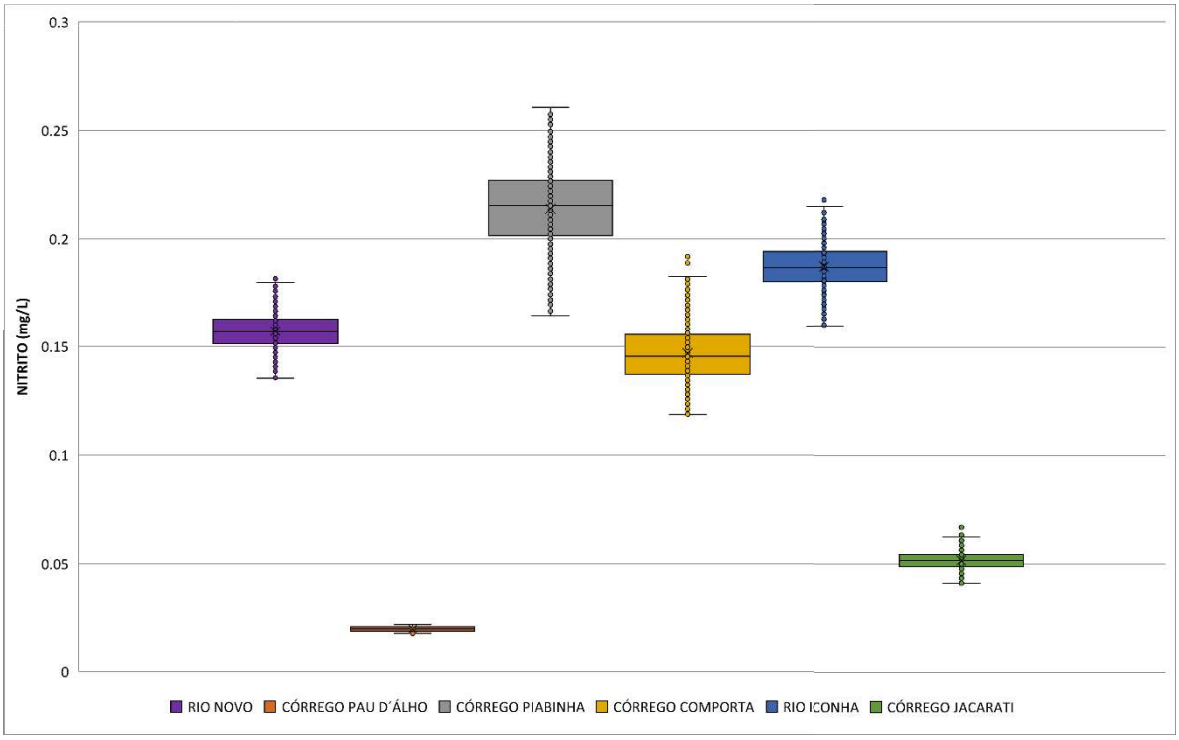

Figura 85: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

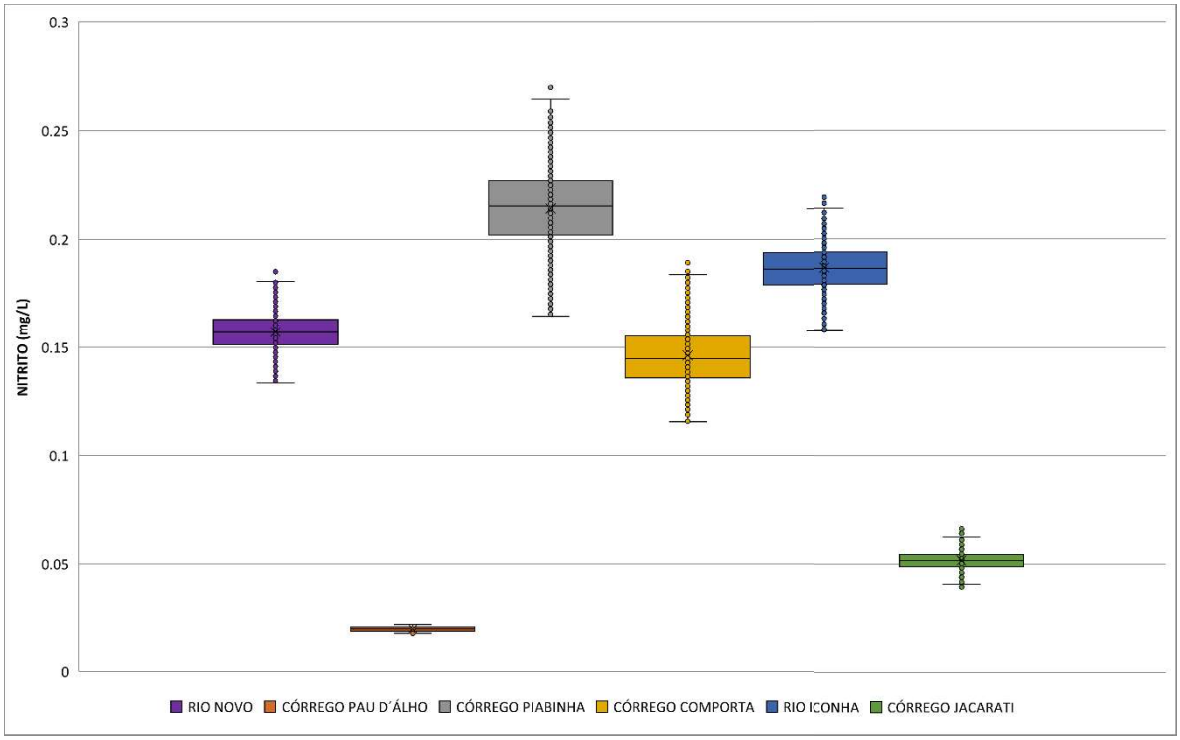

Figura 86: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

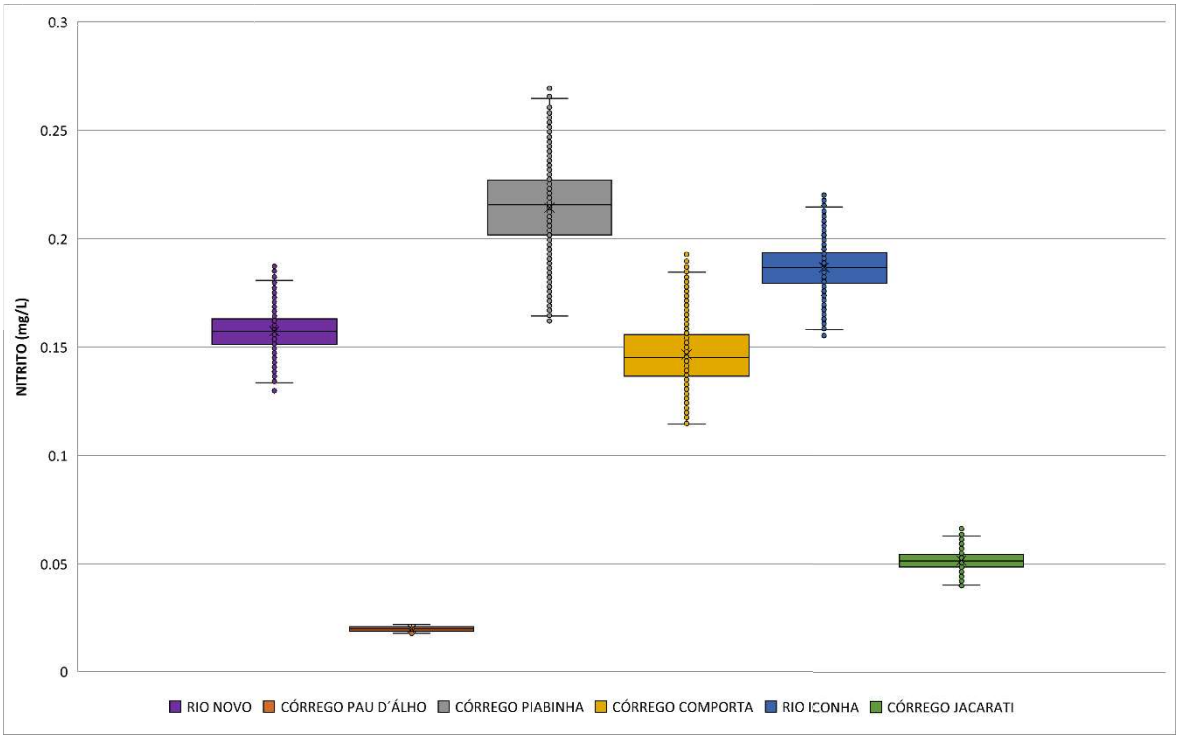

Figura 87: Diagramas tipo Box-plot para nitrito nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

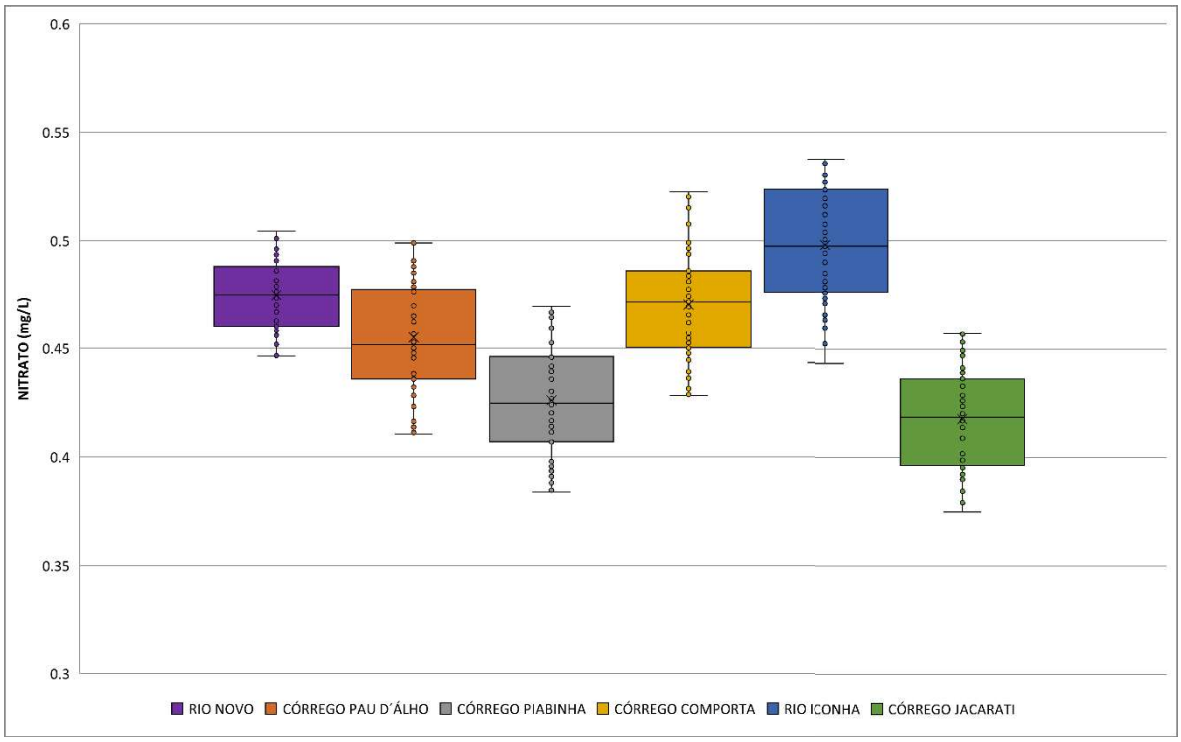

Figura 88: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

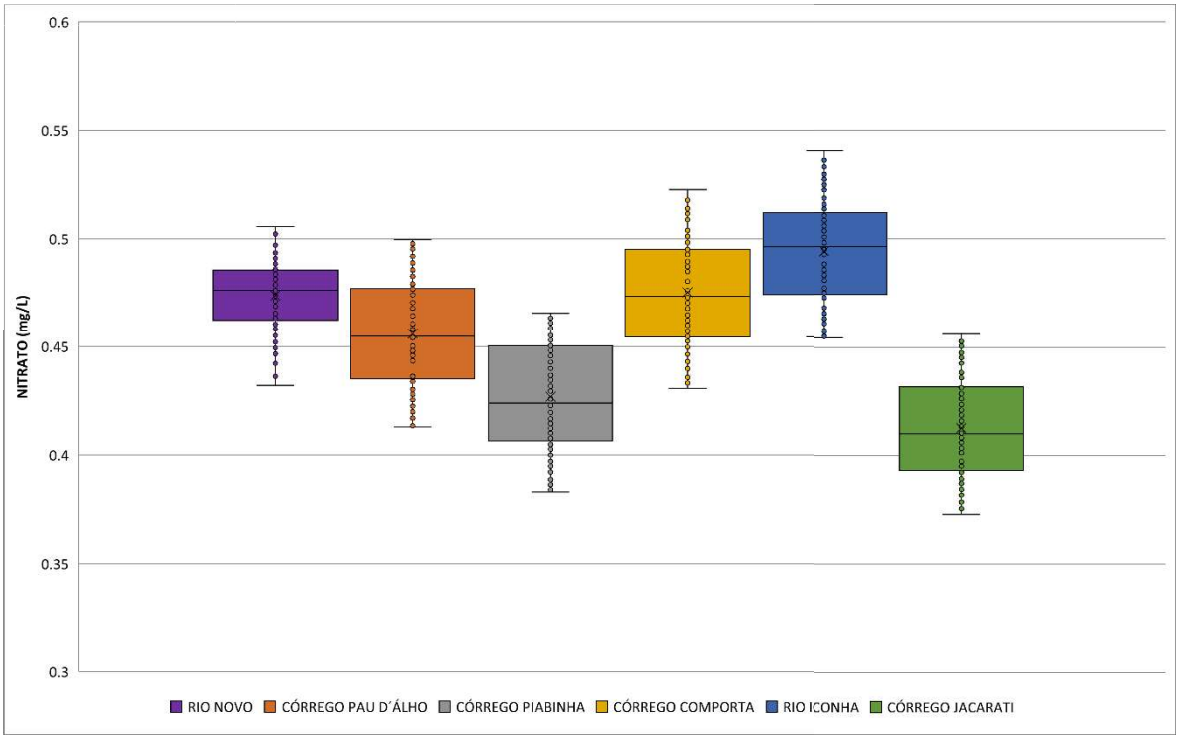

Figura 89: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

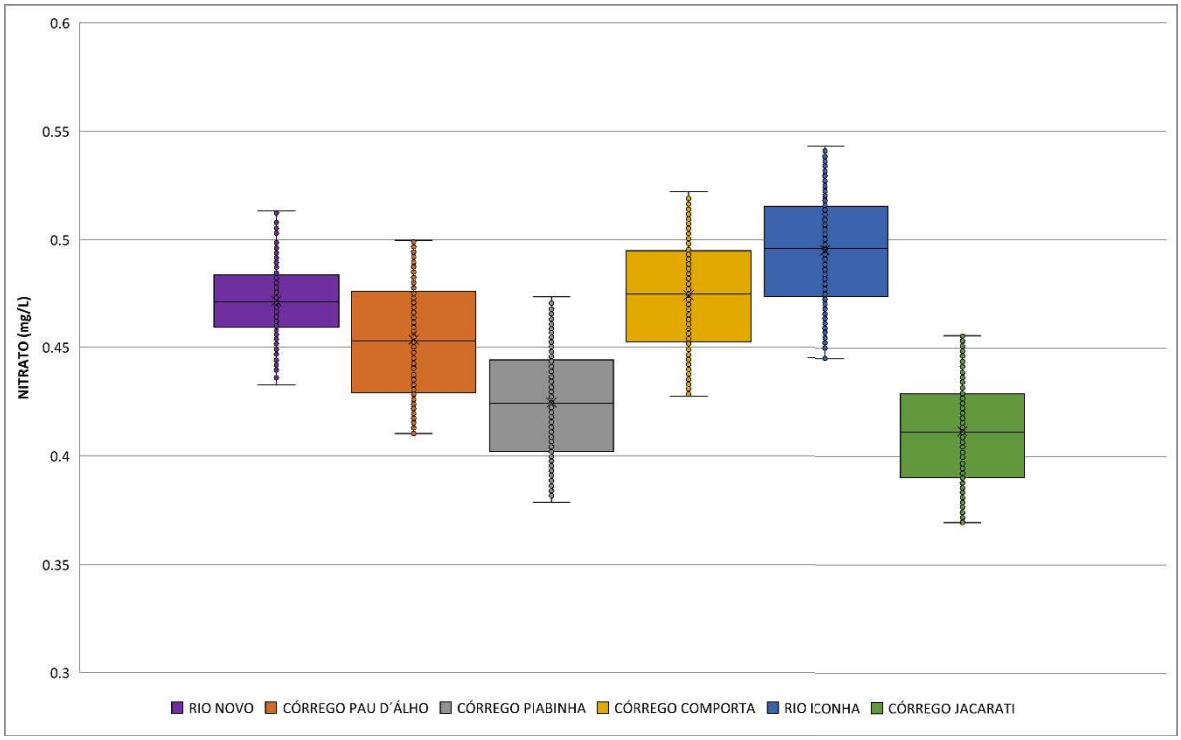

Figura 90: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

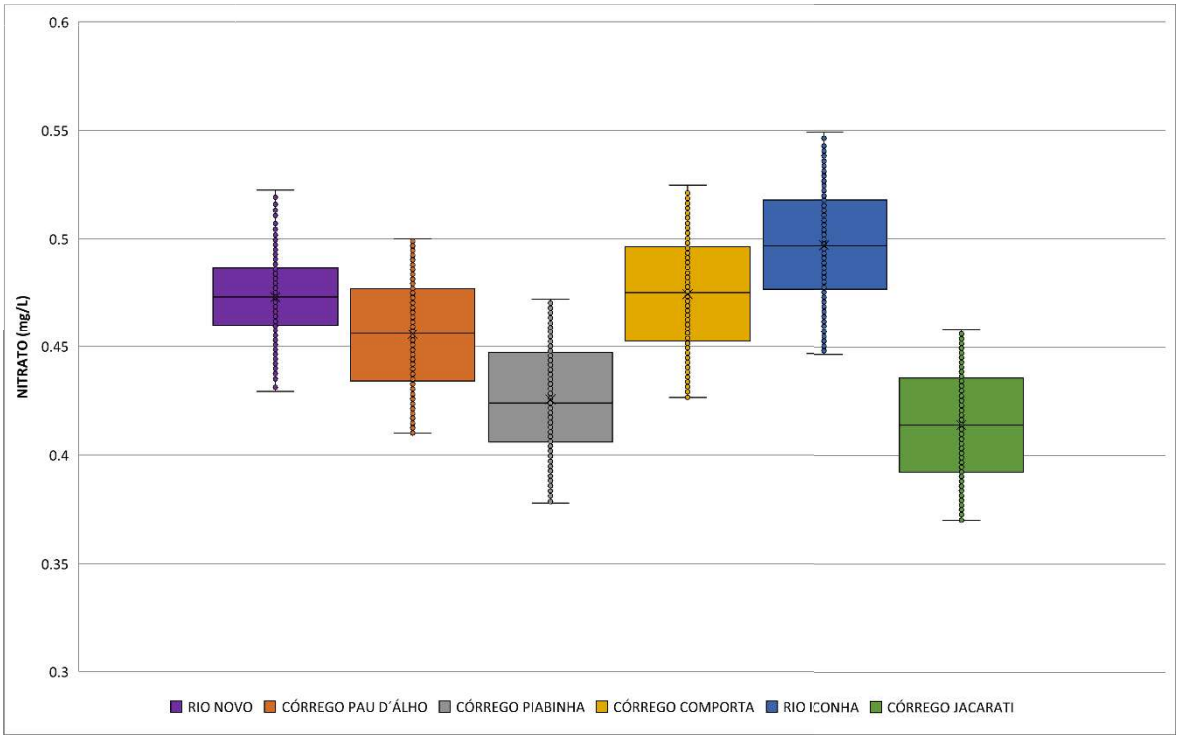

Figura 91: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

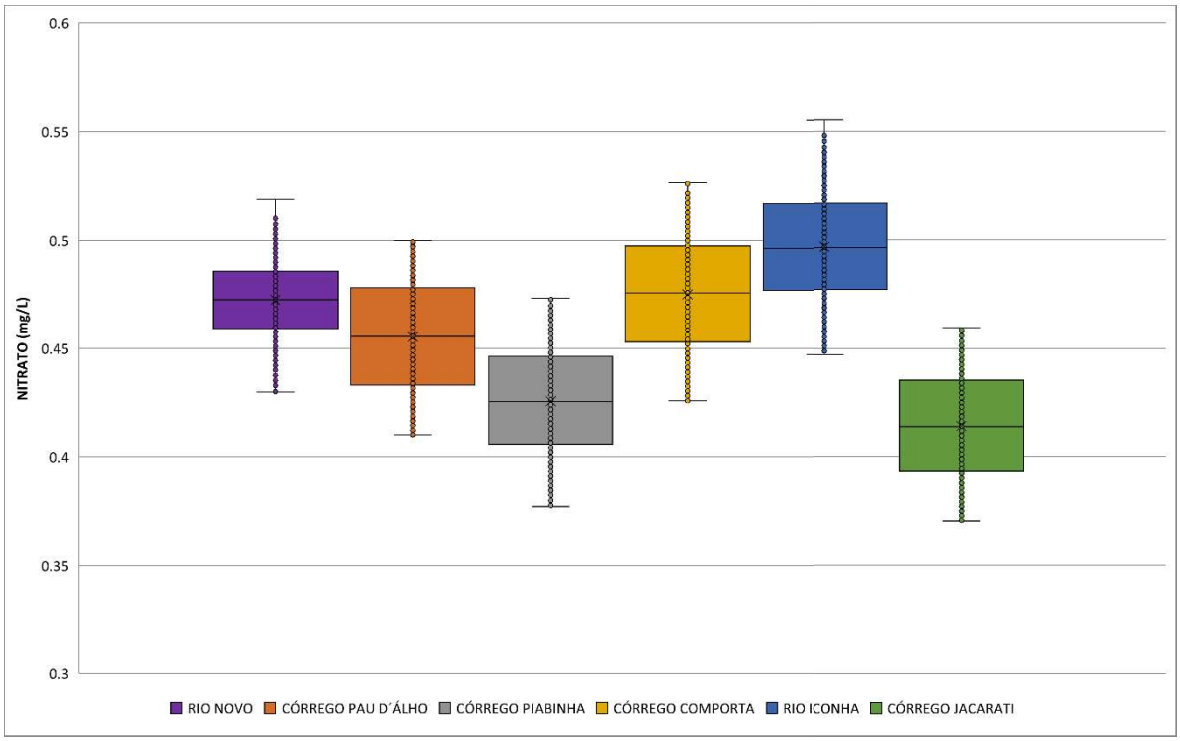

Figura 92: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

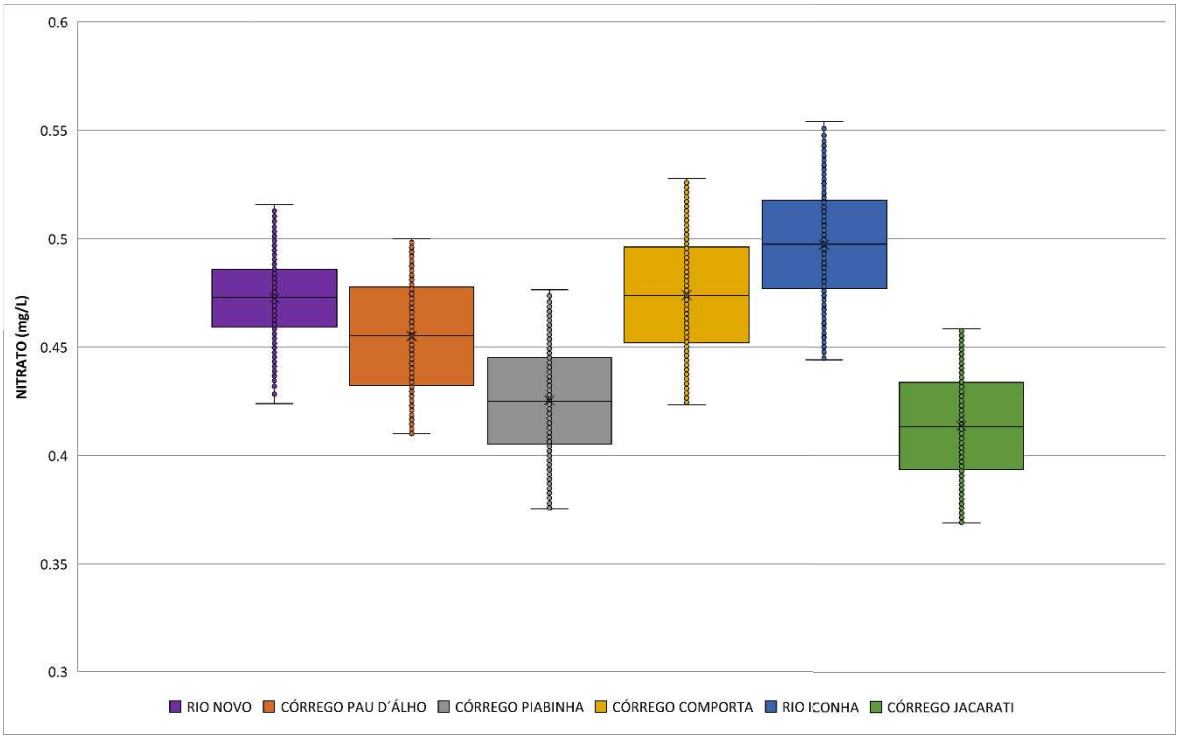

Figura 93: Diagramas tipo Box-plot para nitrato nos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria

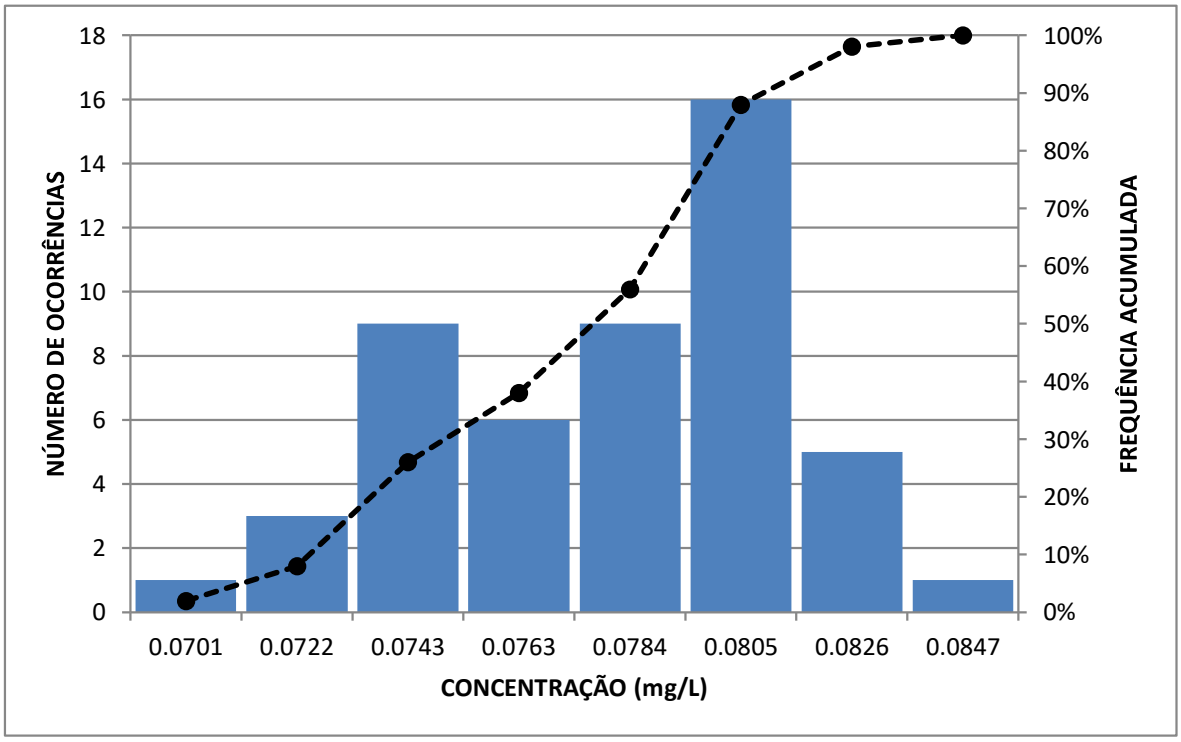

Figura 94: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

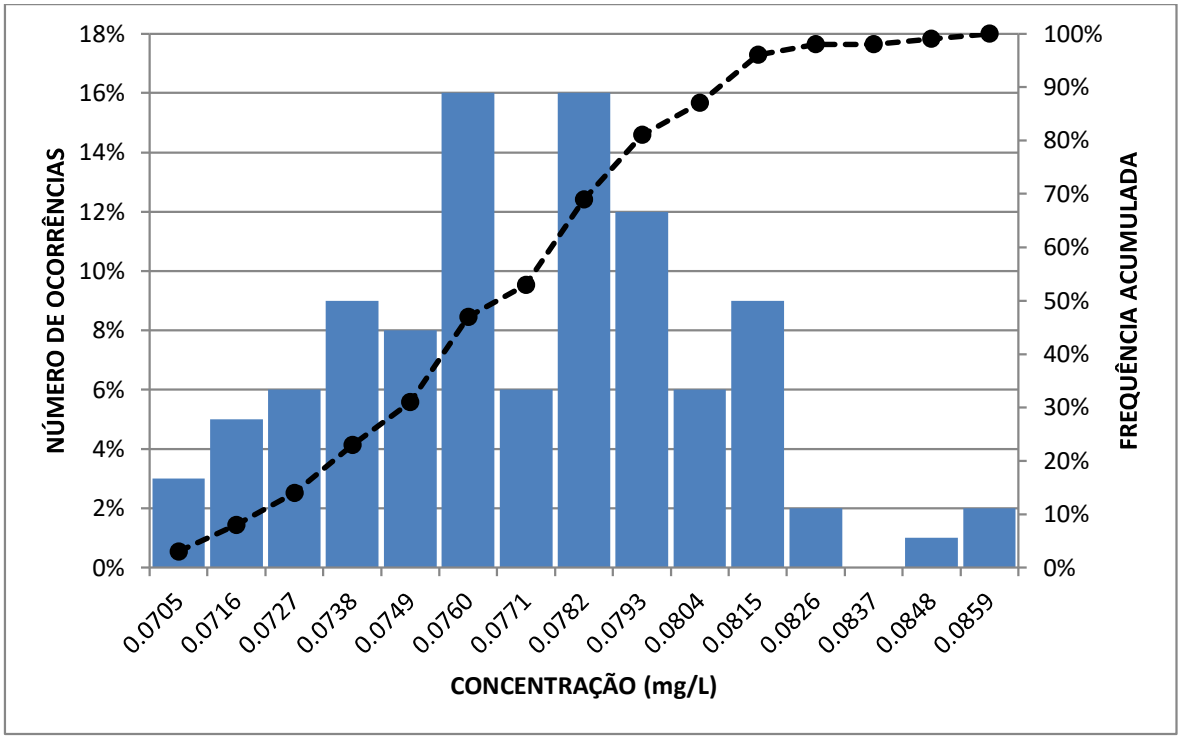

Figura 95: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

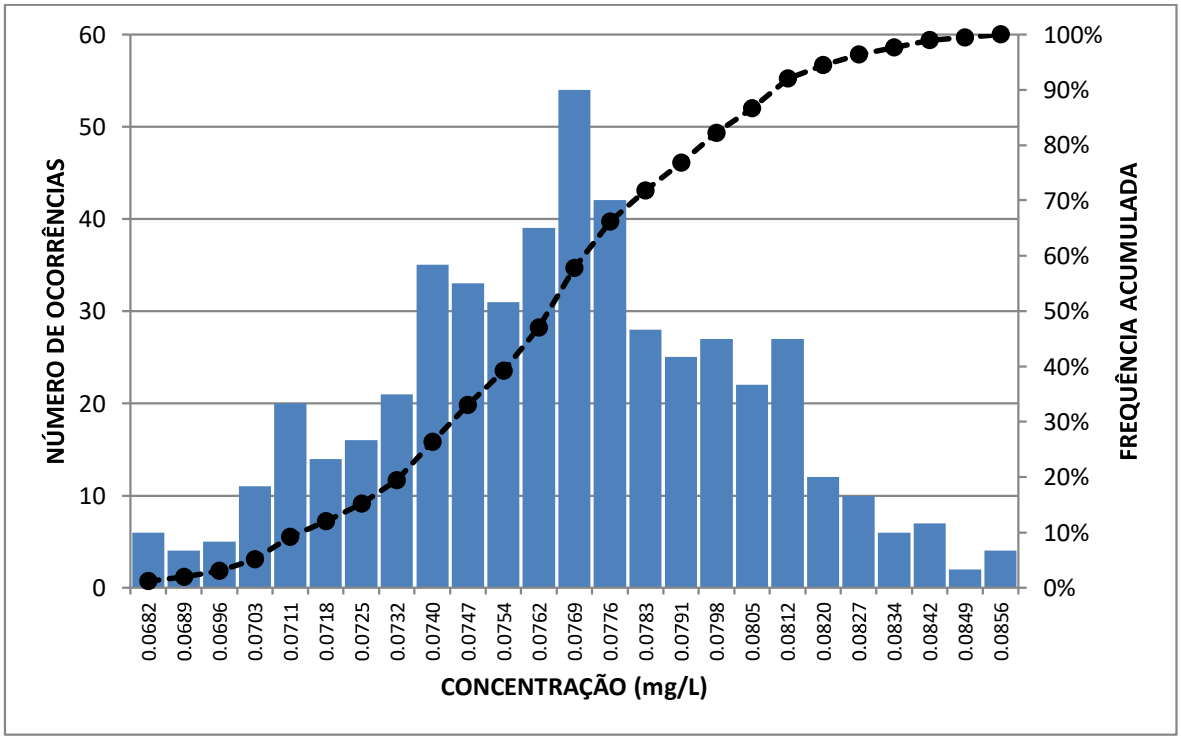

Figura 96: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

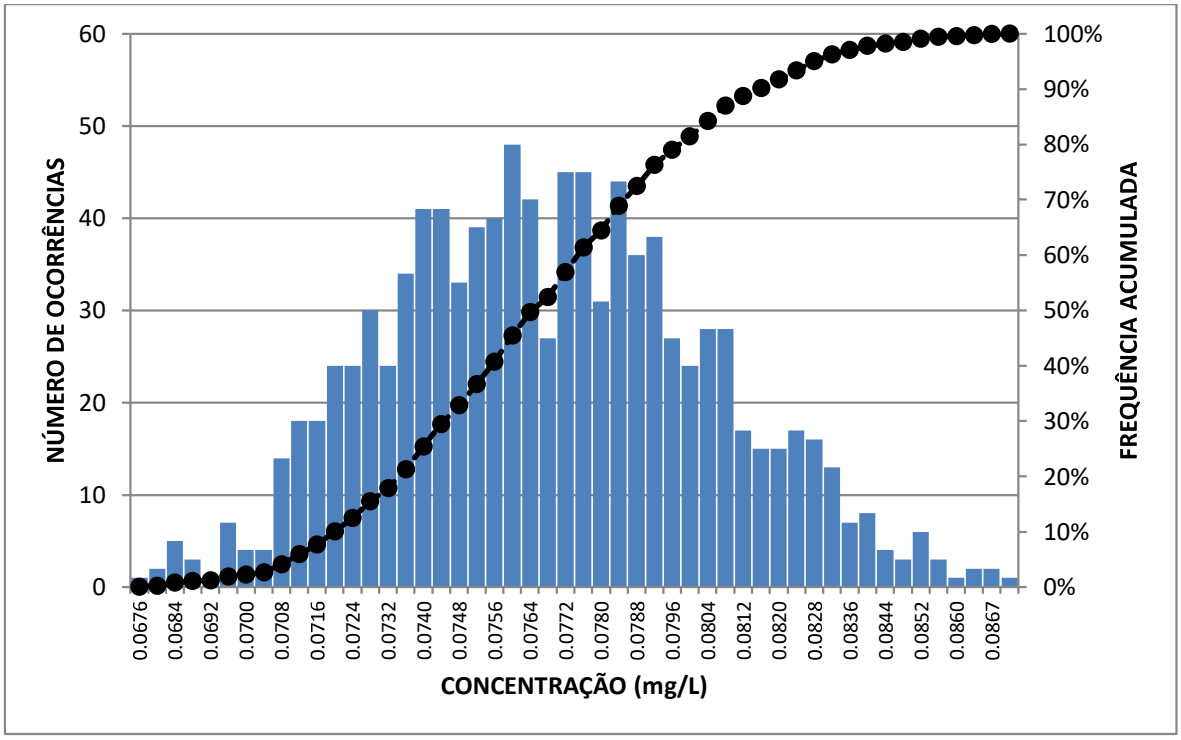

Figura 97: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

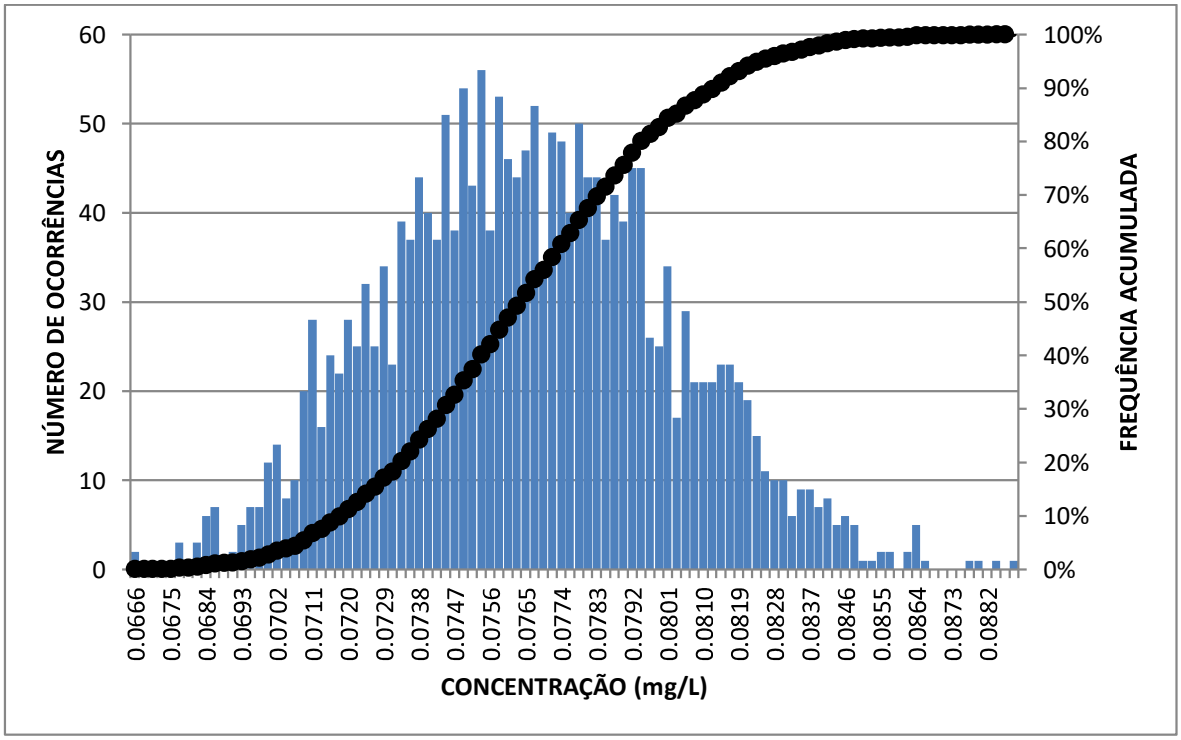

Figura 98: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

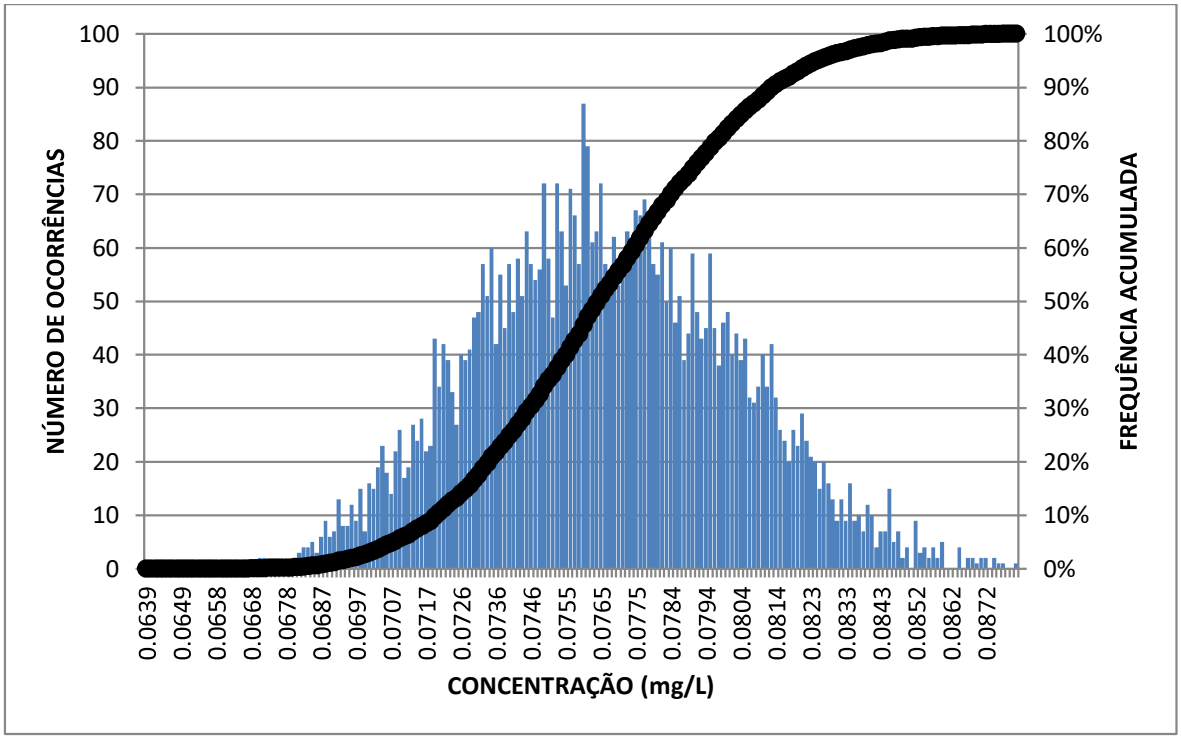

Figura 99: Histograma de frequência para fósforo orgânico no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

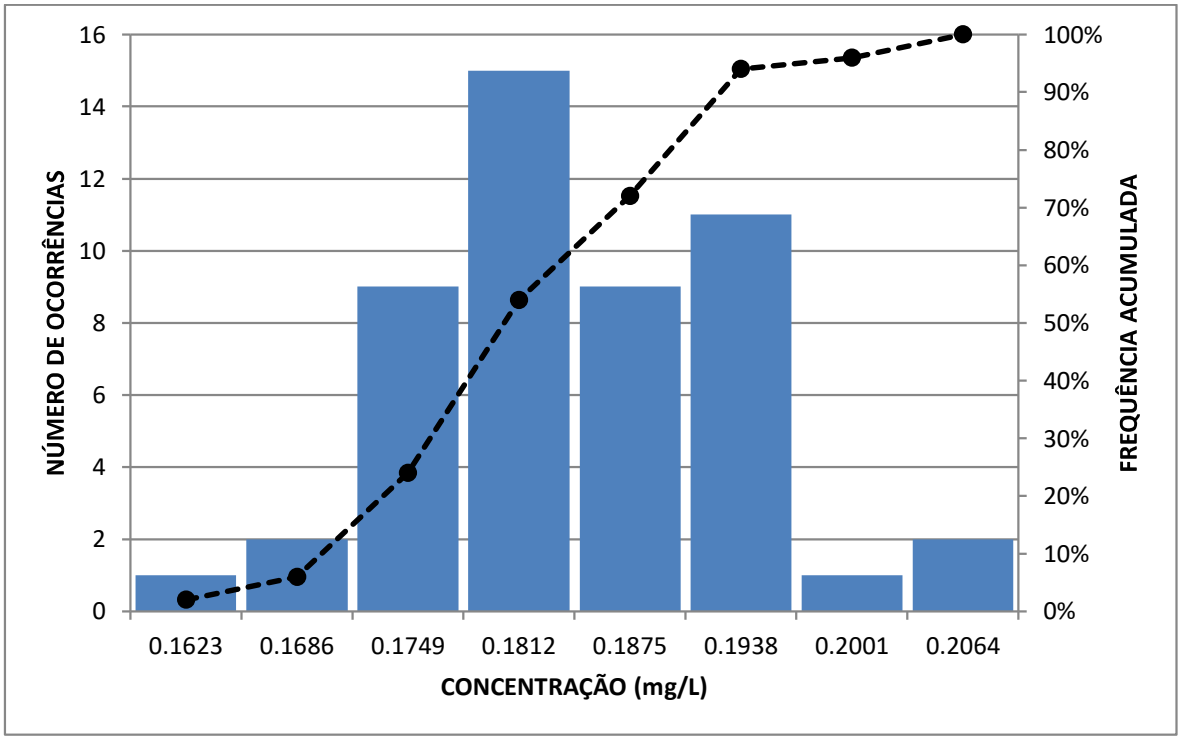

Figura 100: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

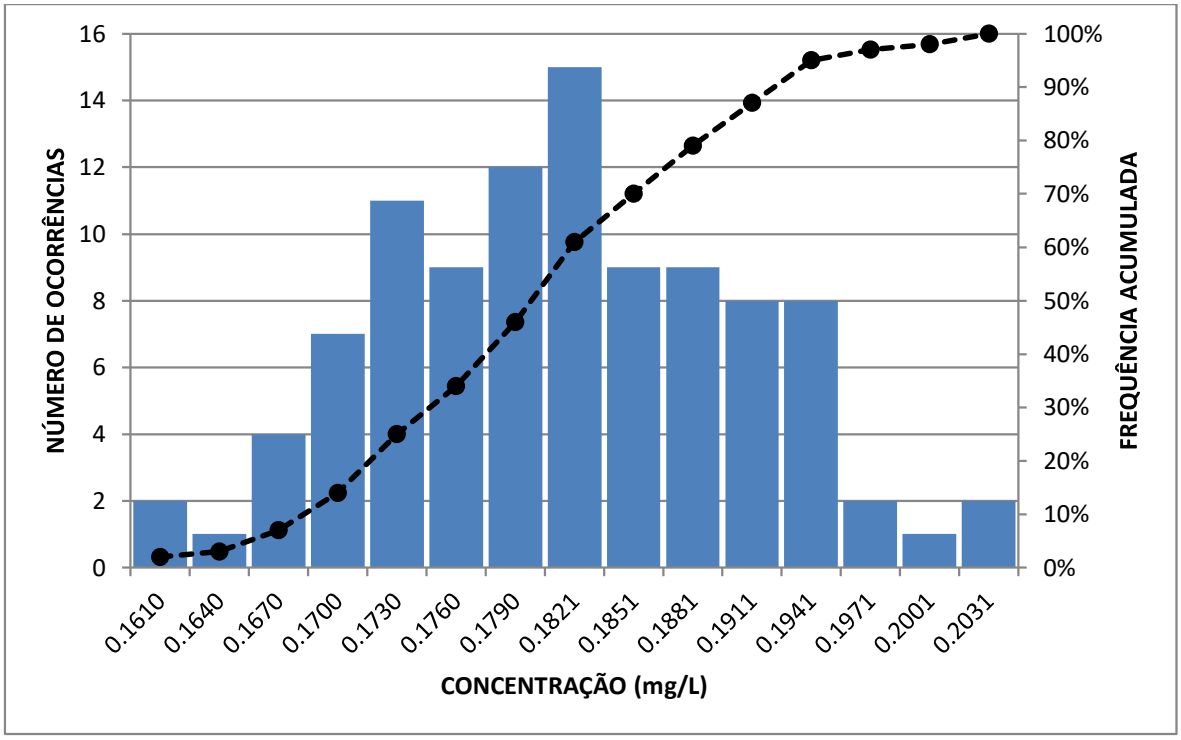

Figura 101: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

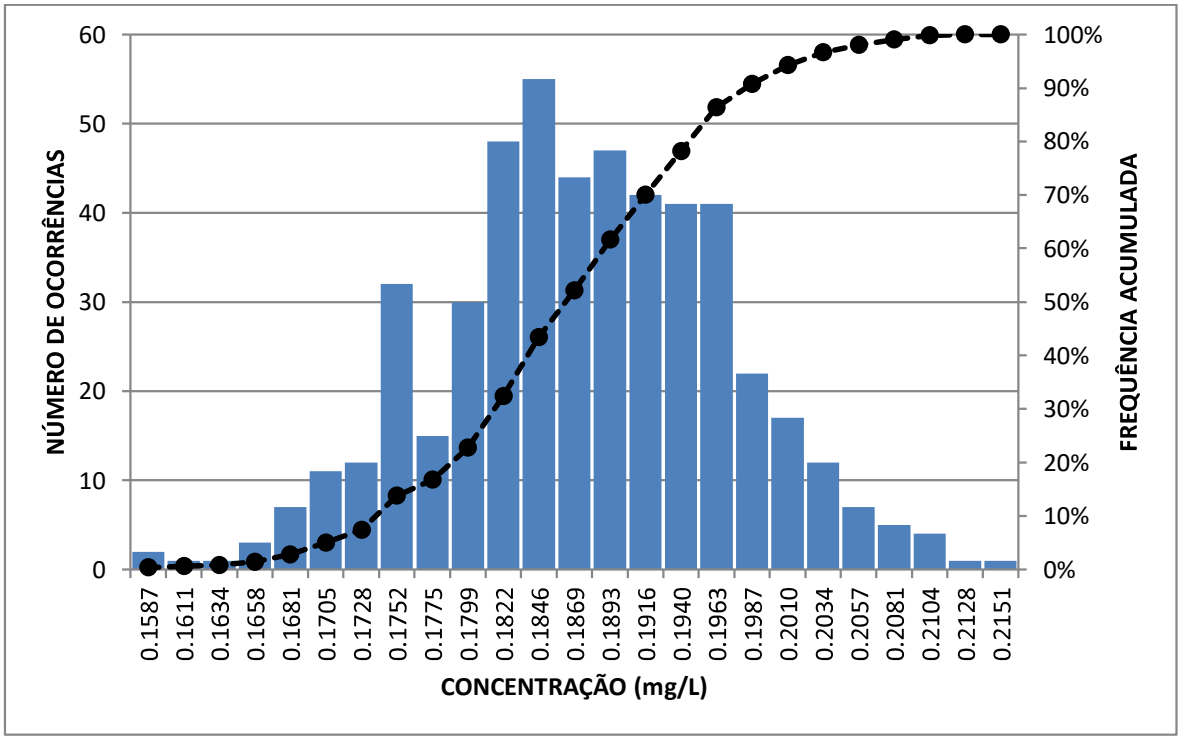

Figura 102: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

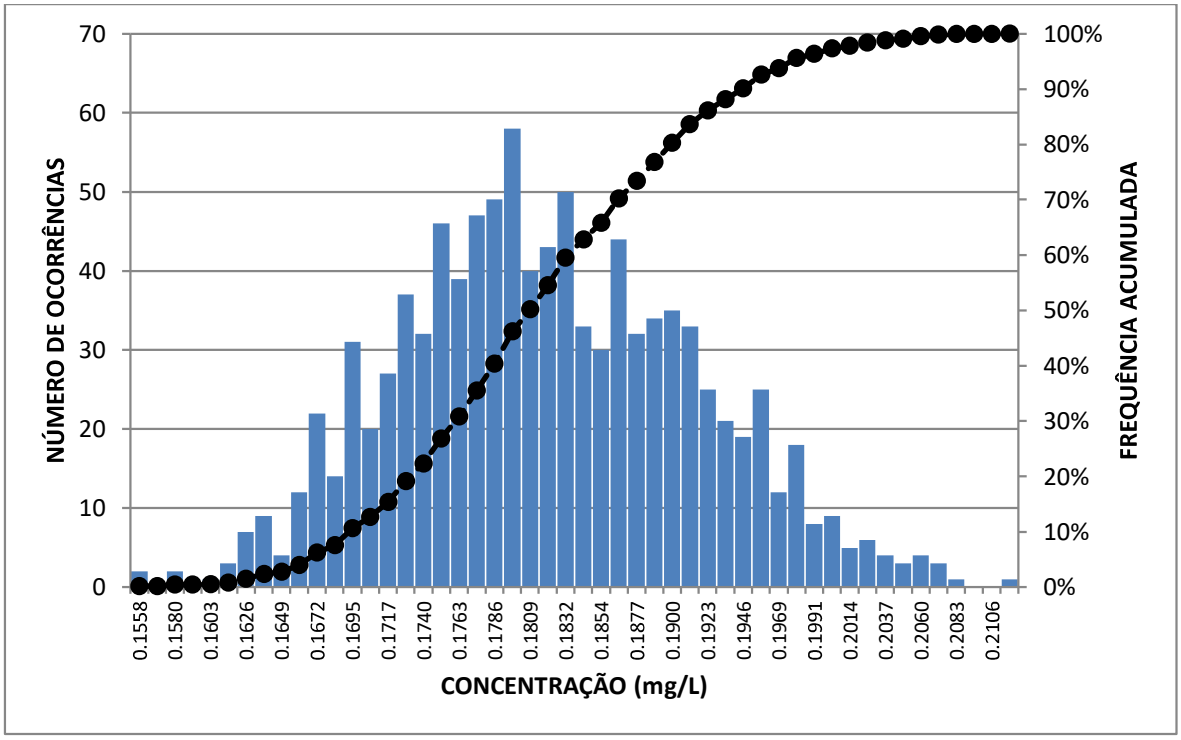

Figura 103: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

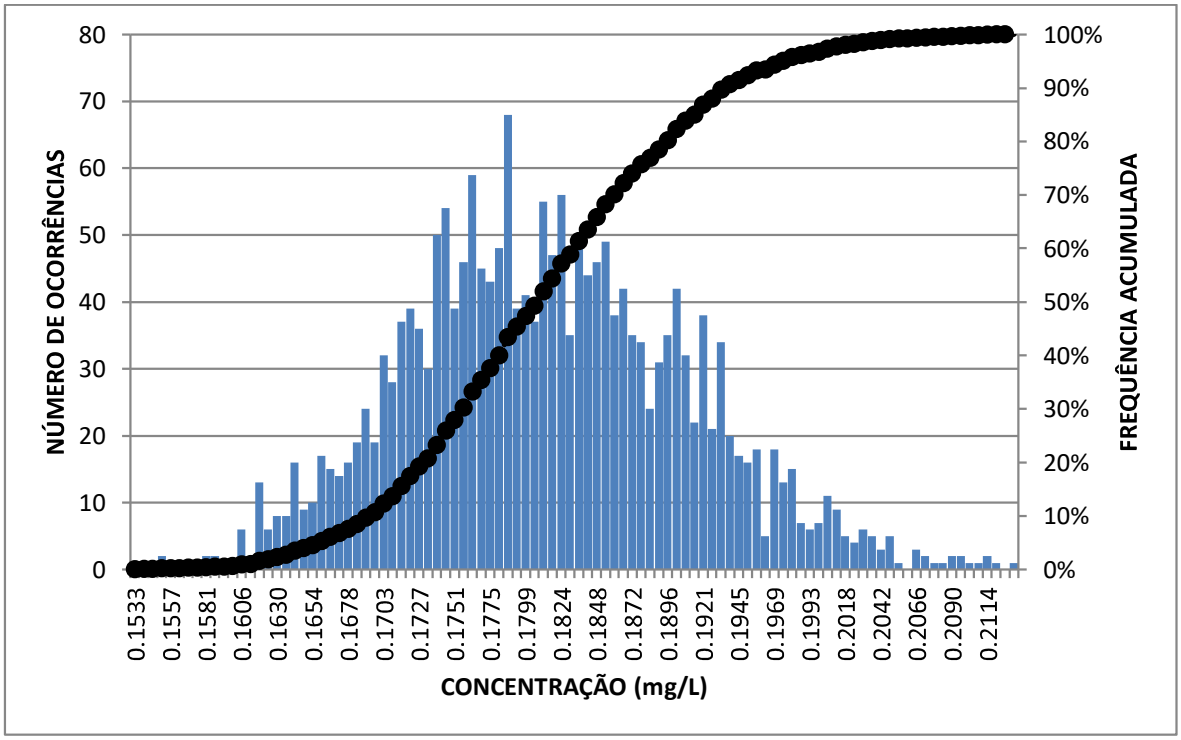

Figura 104: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

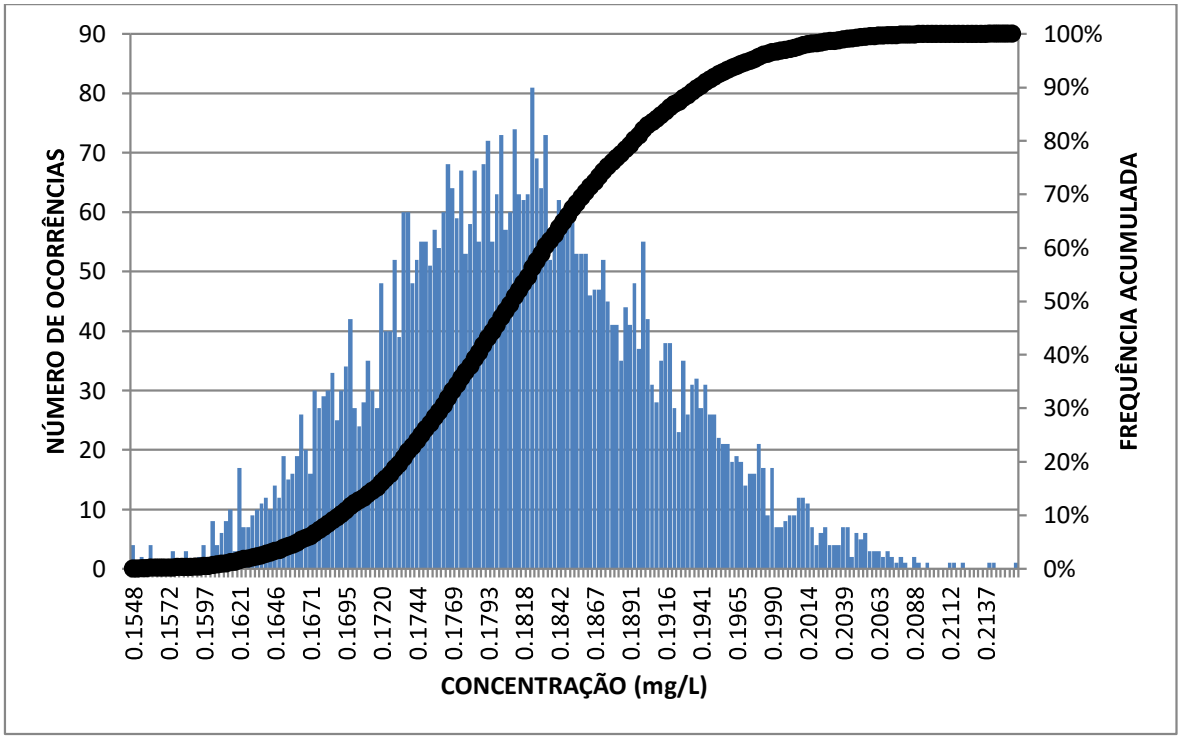

Figura 105: Histograma de frequência para fósforo inorgânico no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

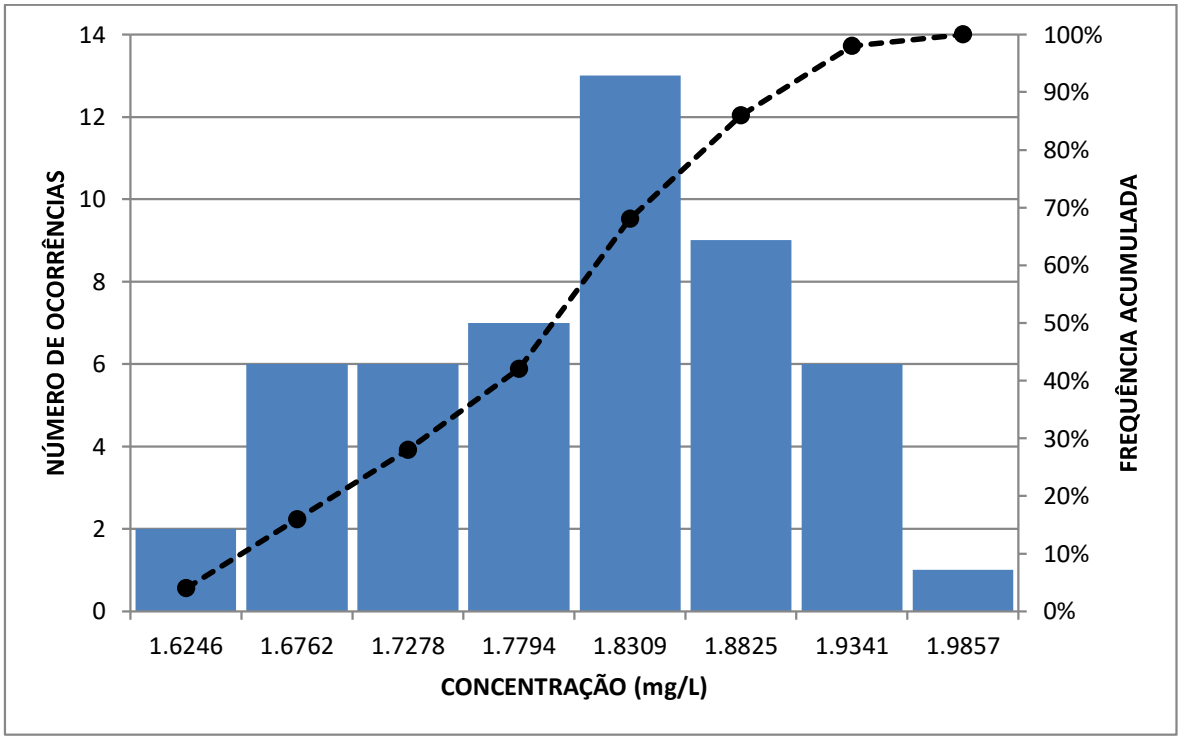

Figura 106: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

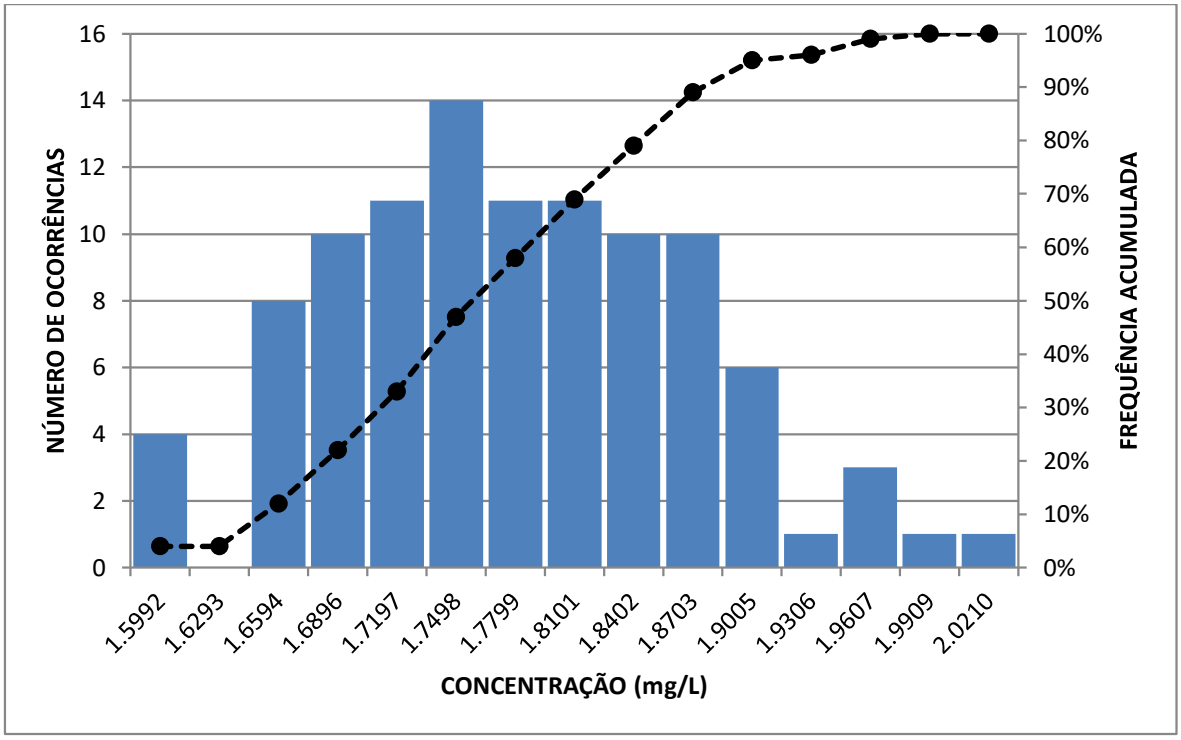

Figura 107: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

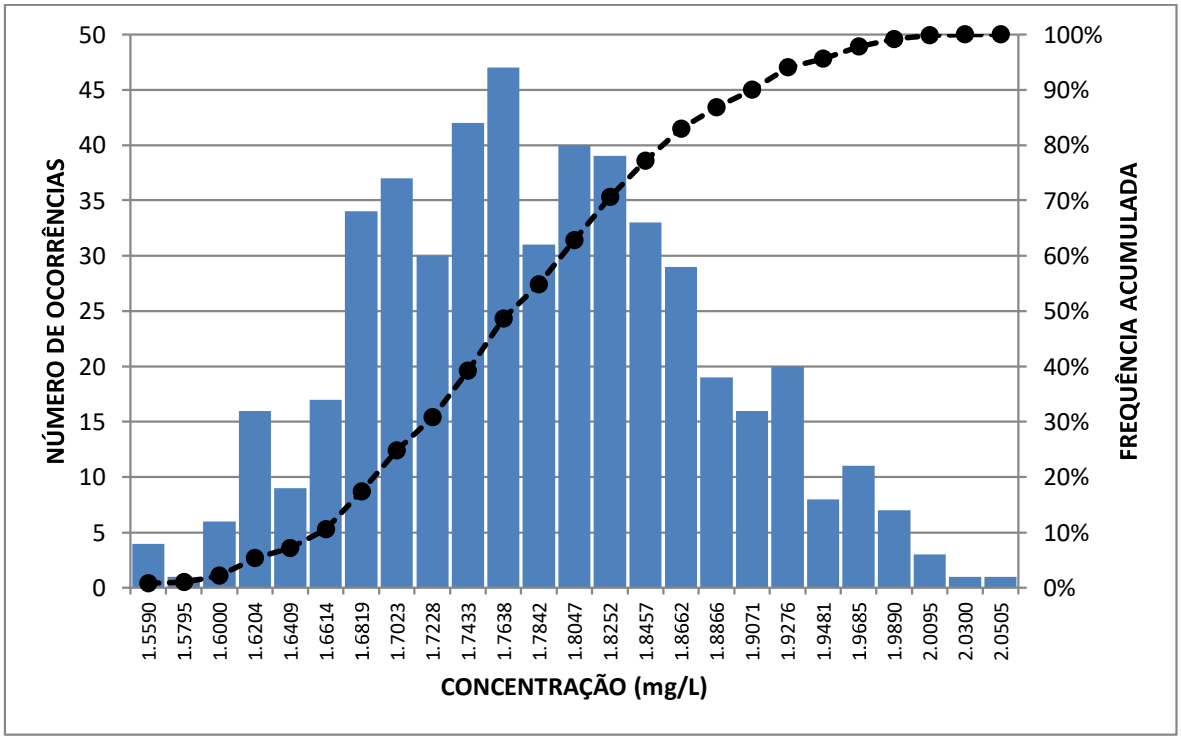

Figura 108: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

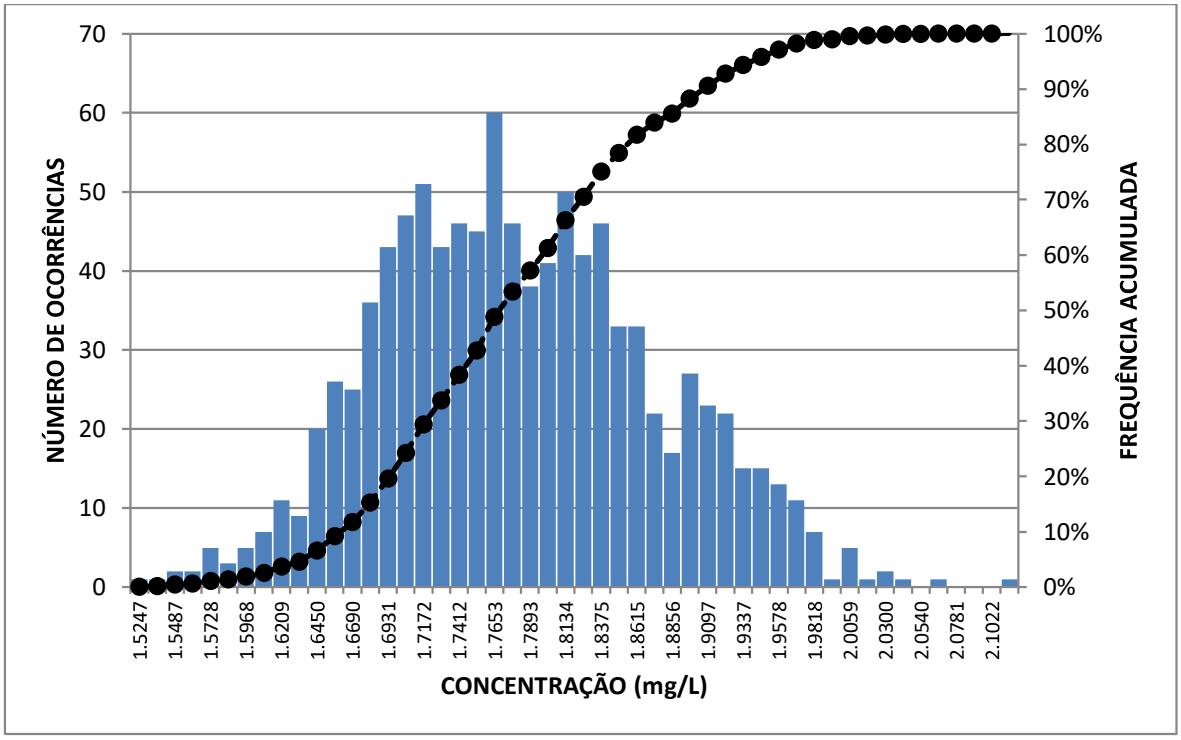

Figura 109: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

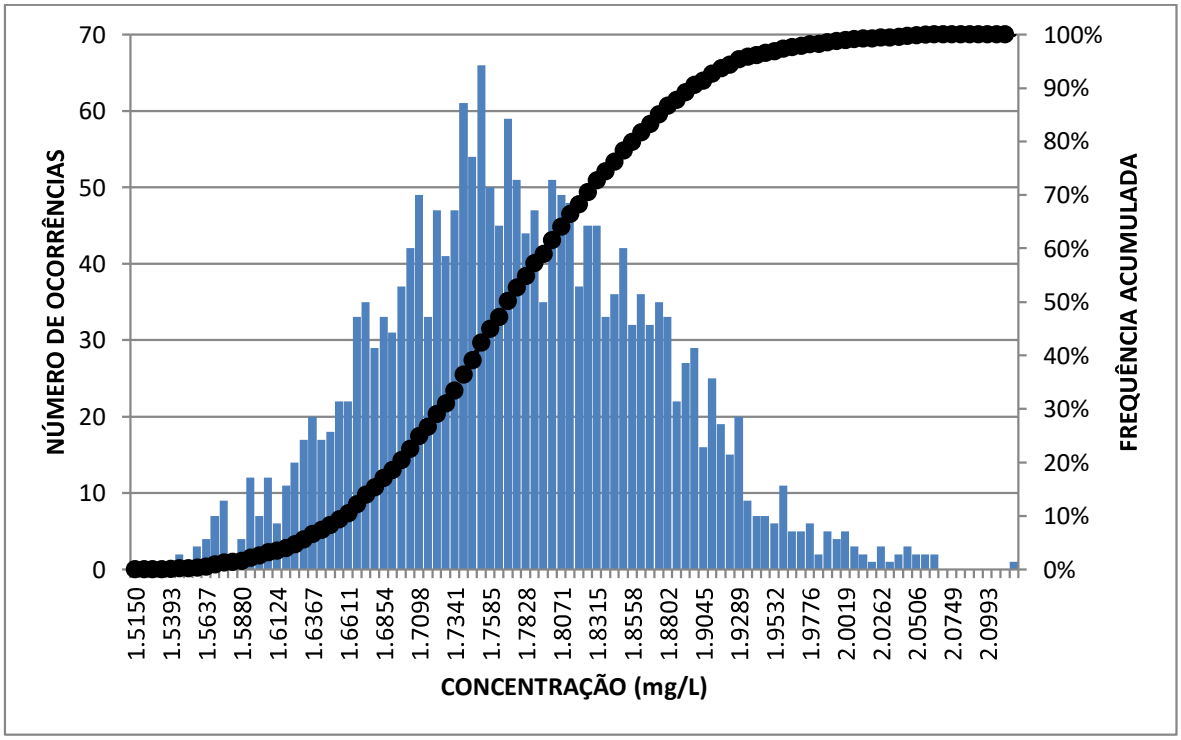

Figura 110: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

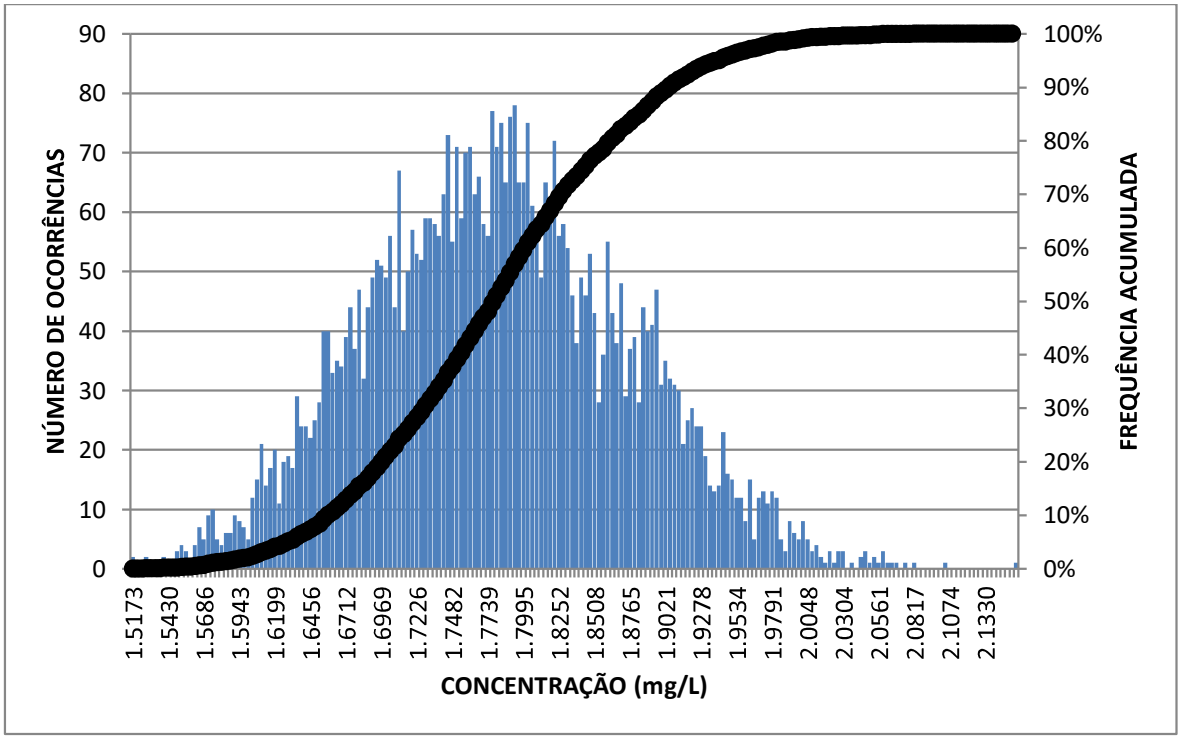

Figura 111: Histograma de frequência para nitrogênio orgânico no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

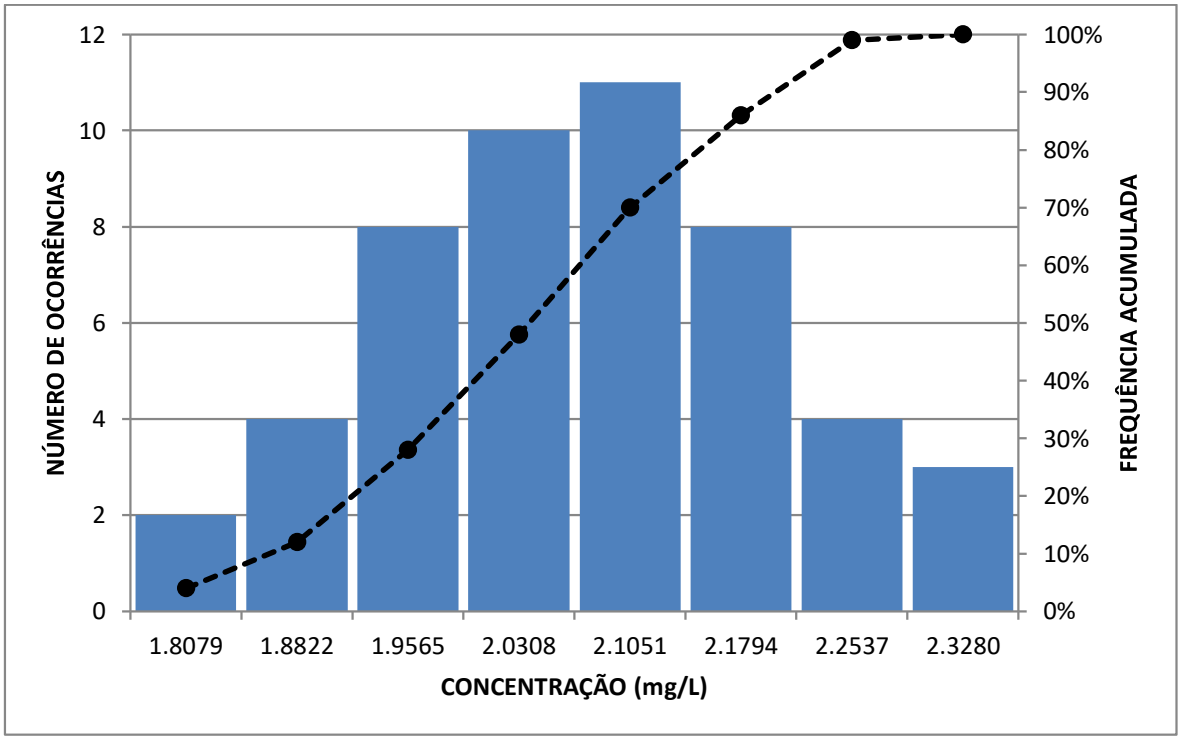

Figura 112: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

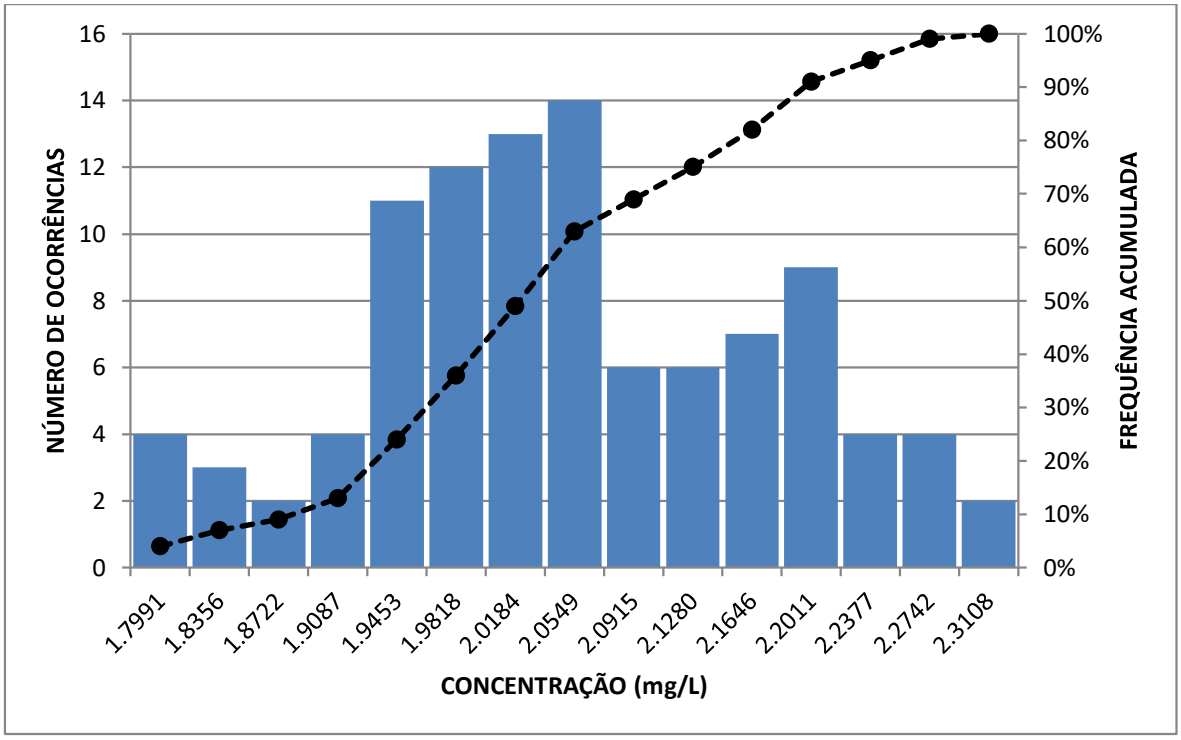

Figura 113: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

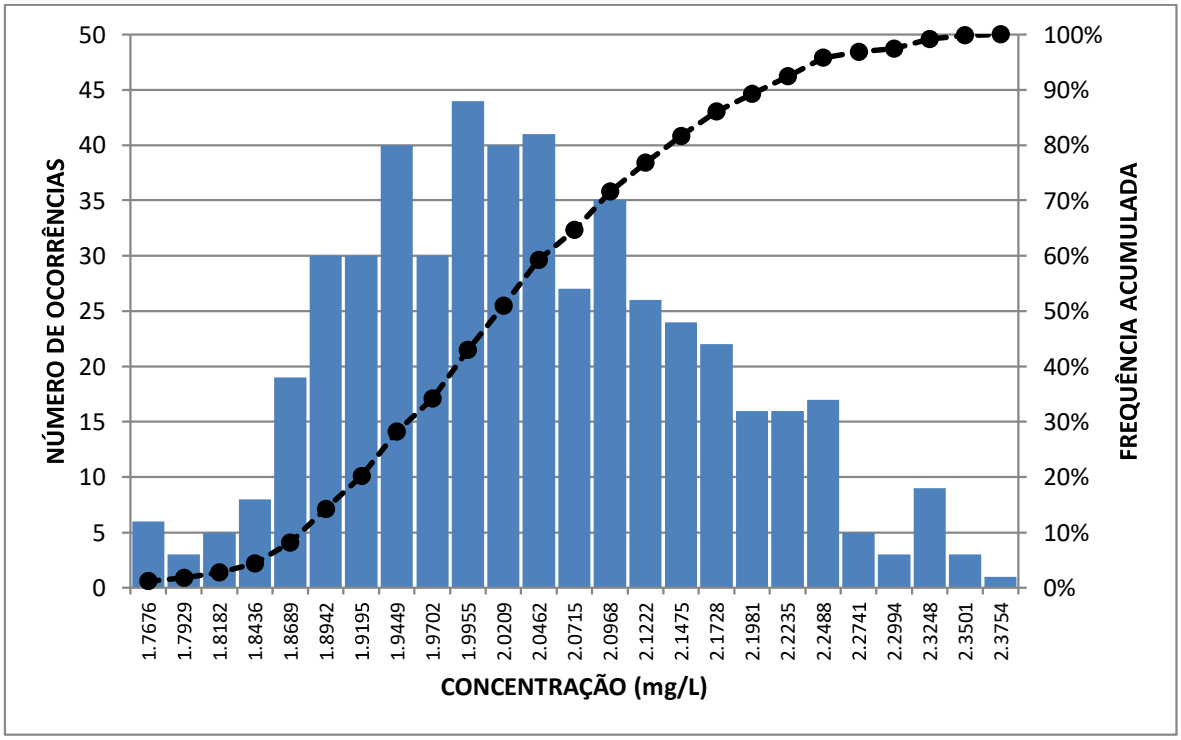

Figura 114: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

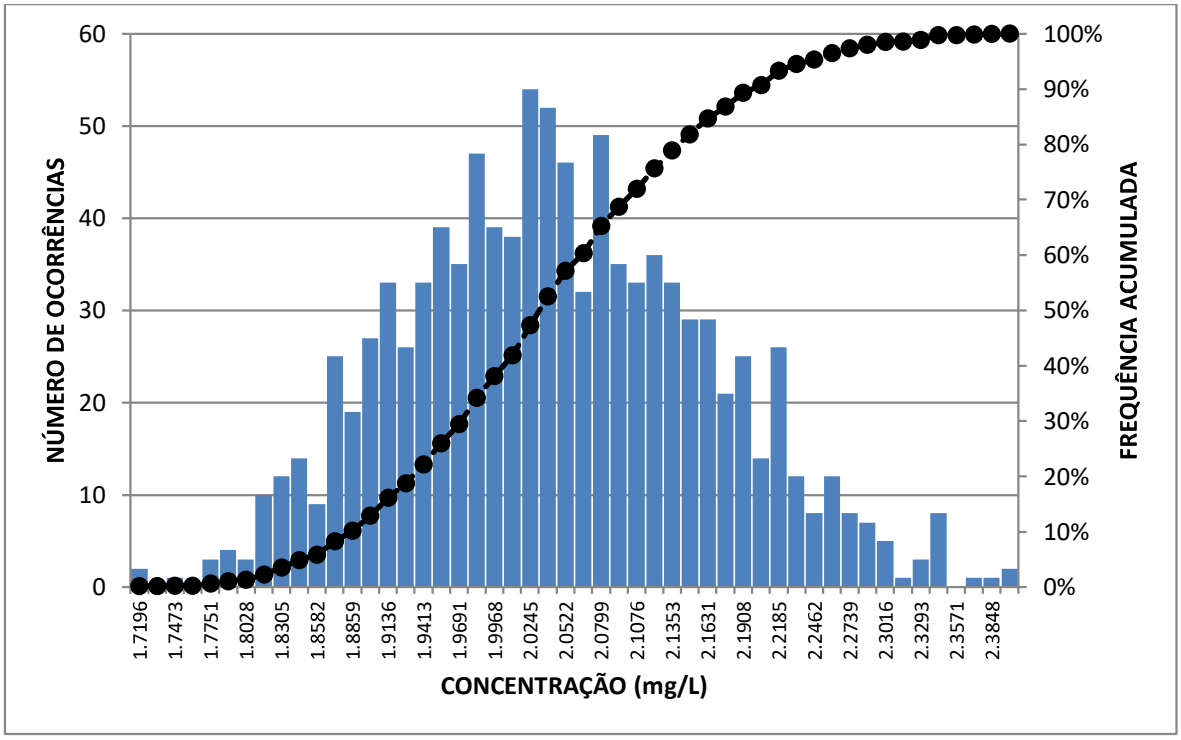

Figura 115: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

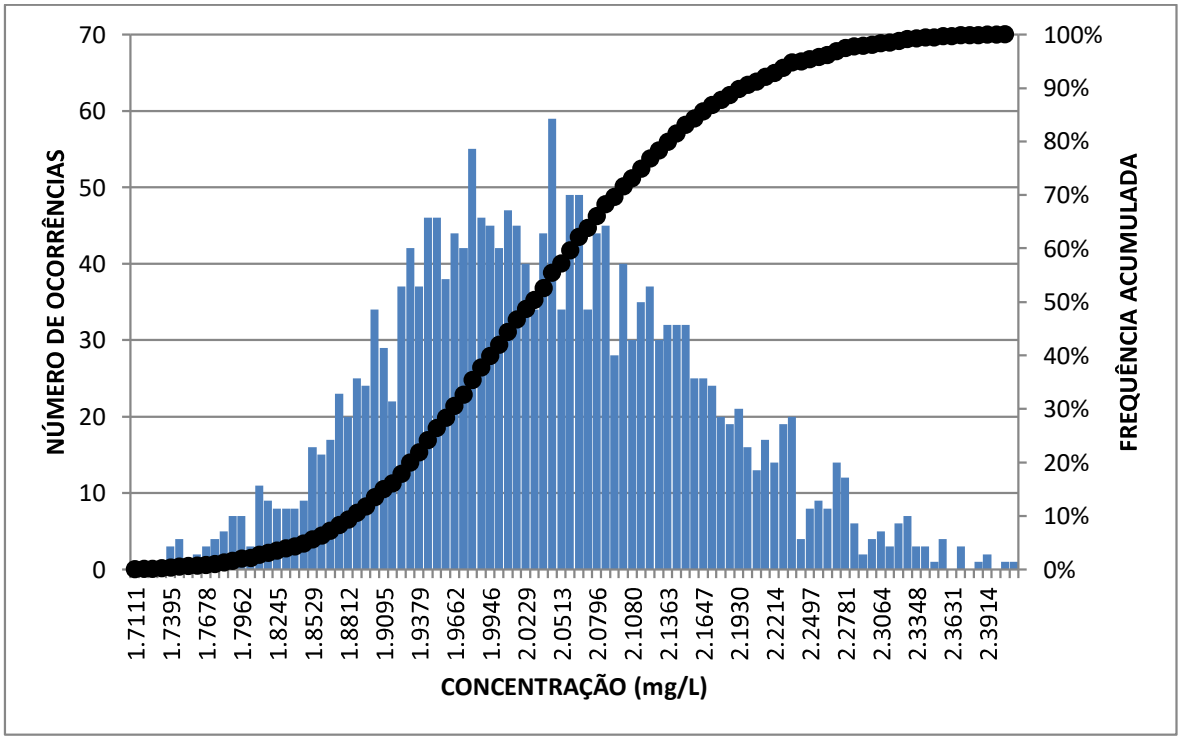

Figura 116: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

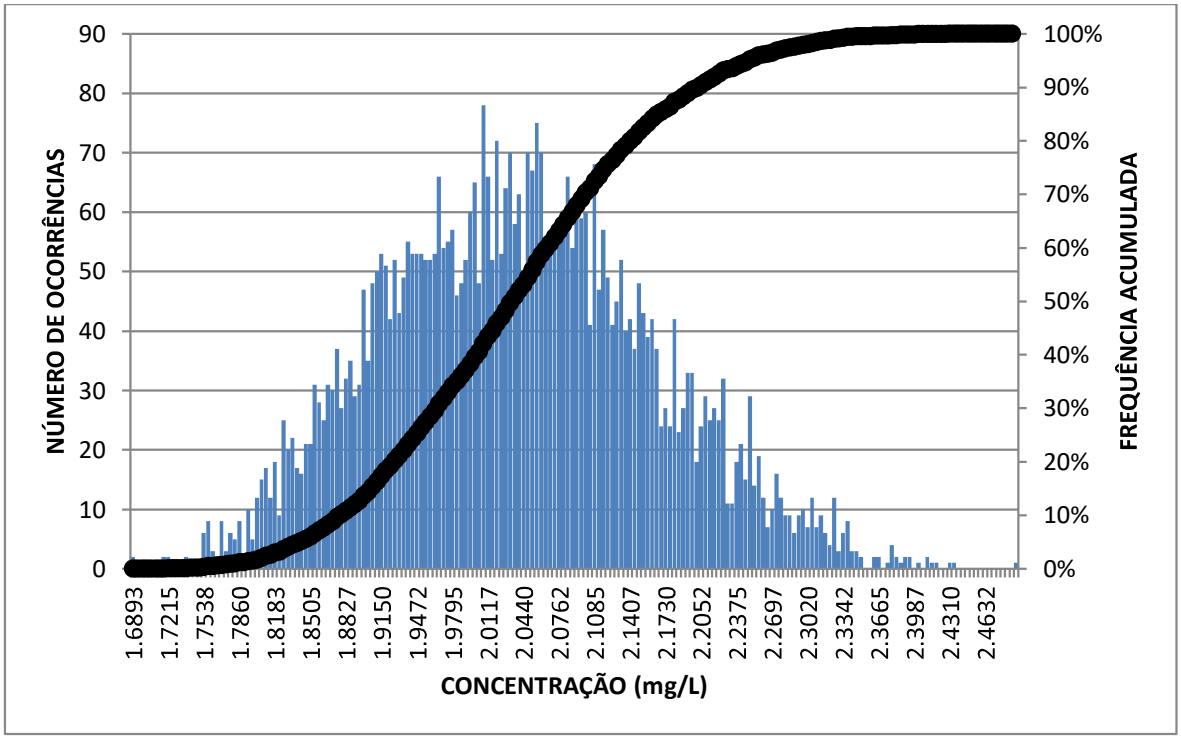

Figura 117: Histograma de frequência para nitrogênio amoniacal no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações.

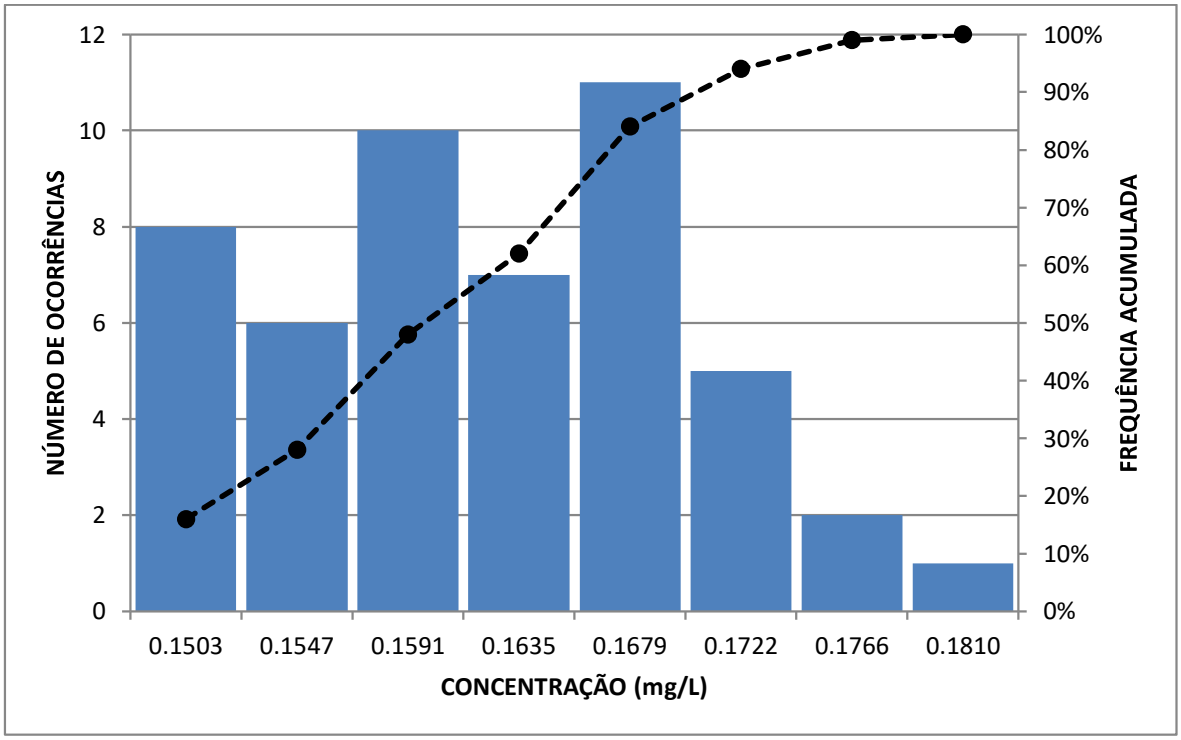

Figura 118: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

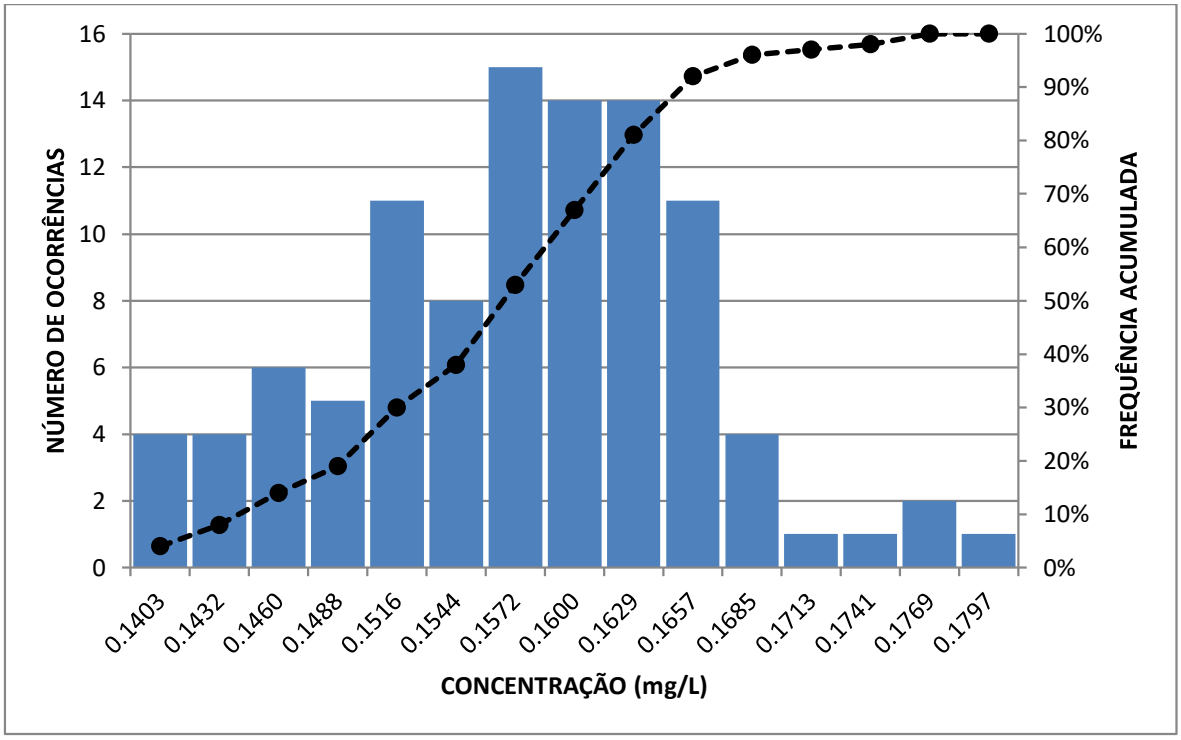

Figura 119: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

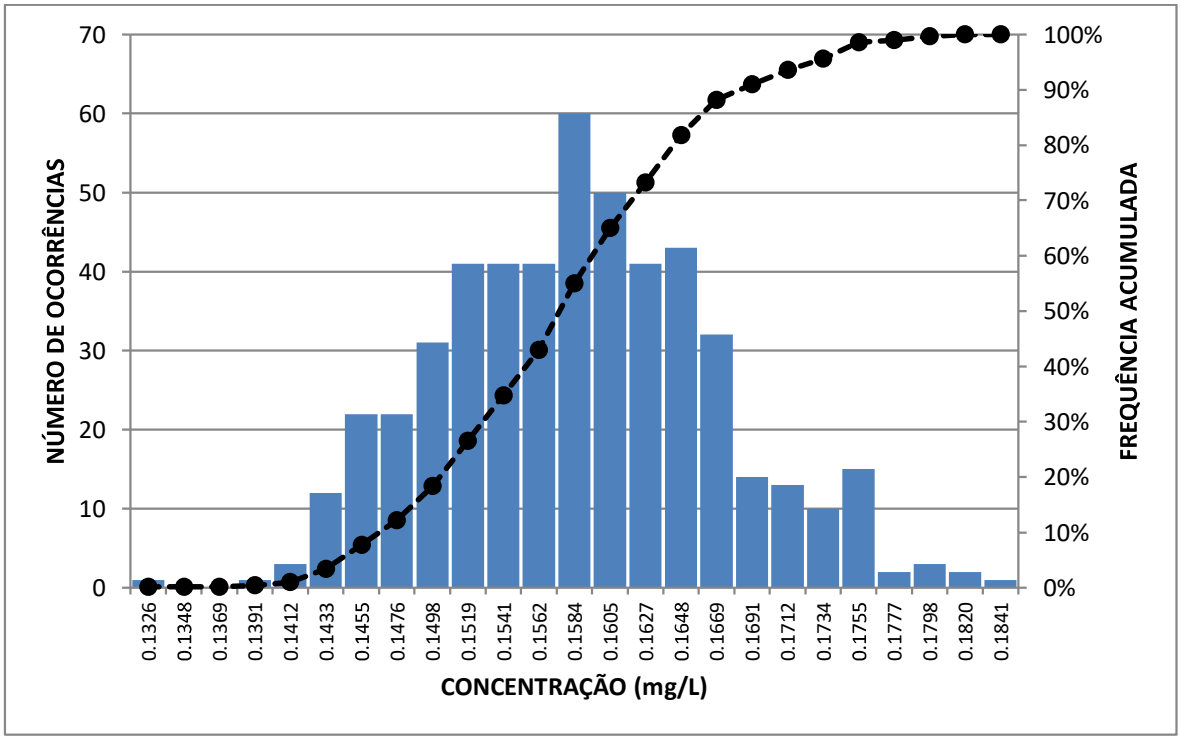

Figura 120: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

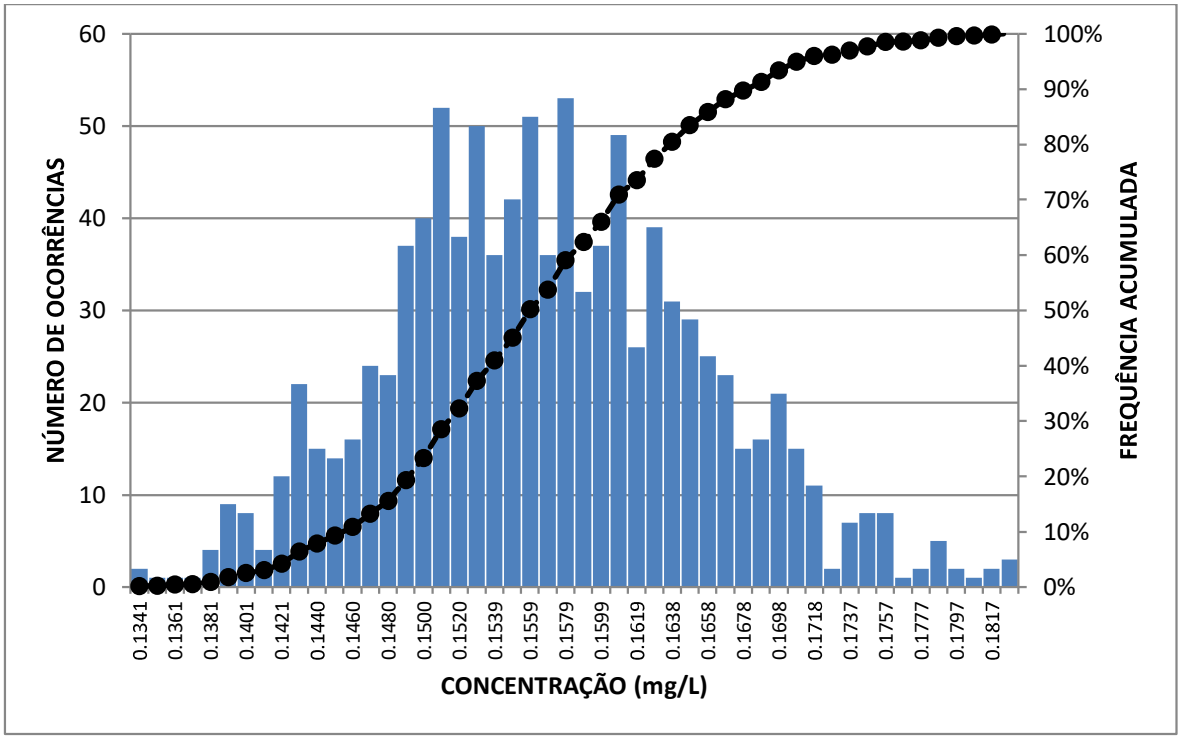

Figura 121: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

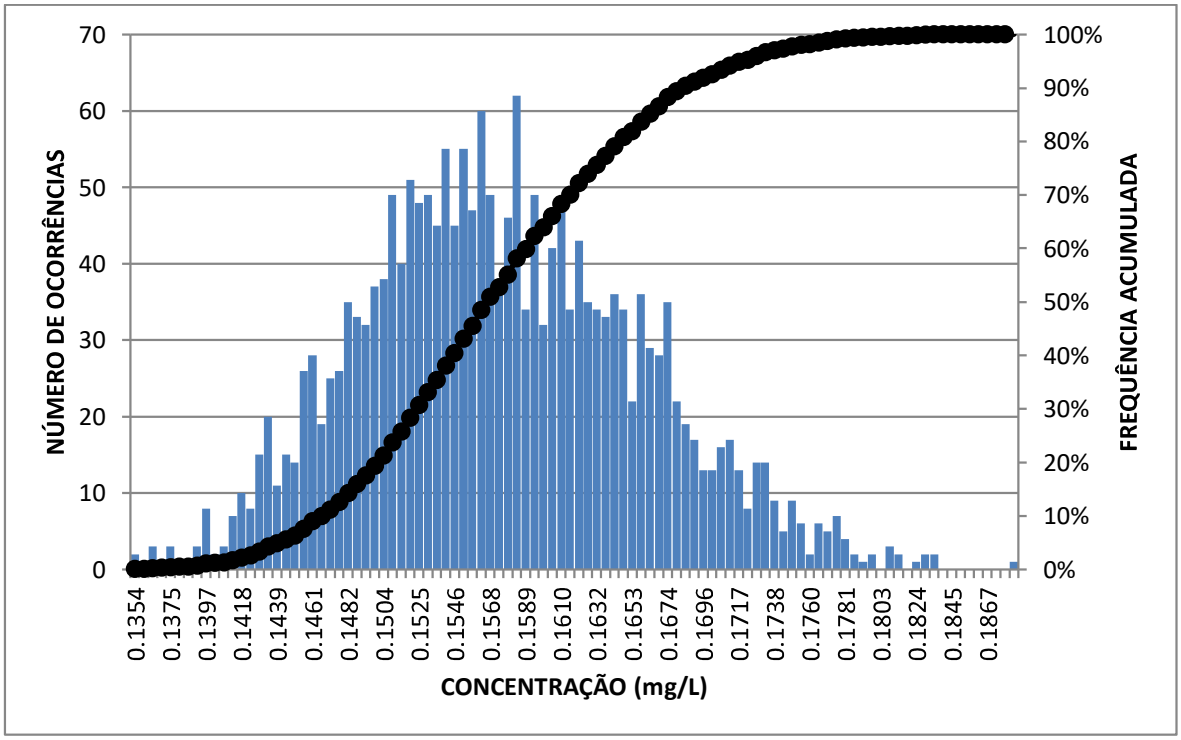

Figura 122: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

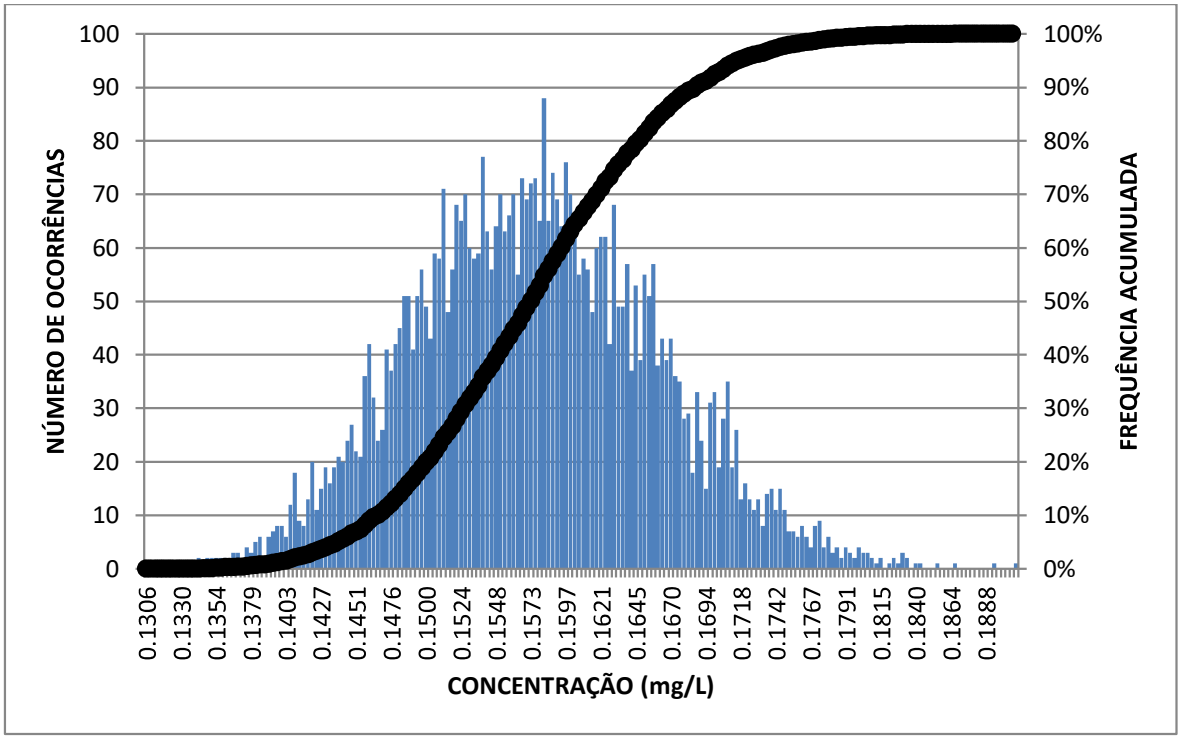

Figura 123: Histograma de frequência para nitrito no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

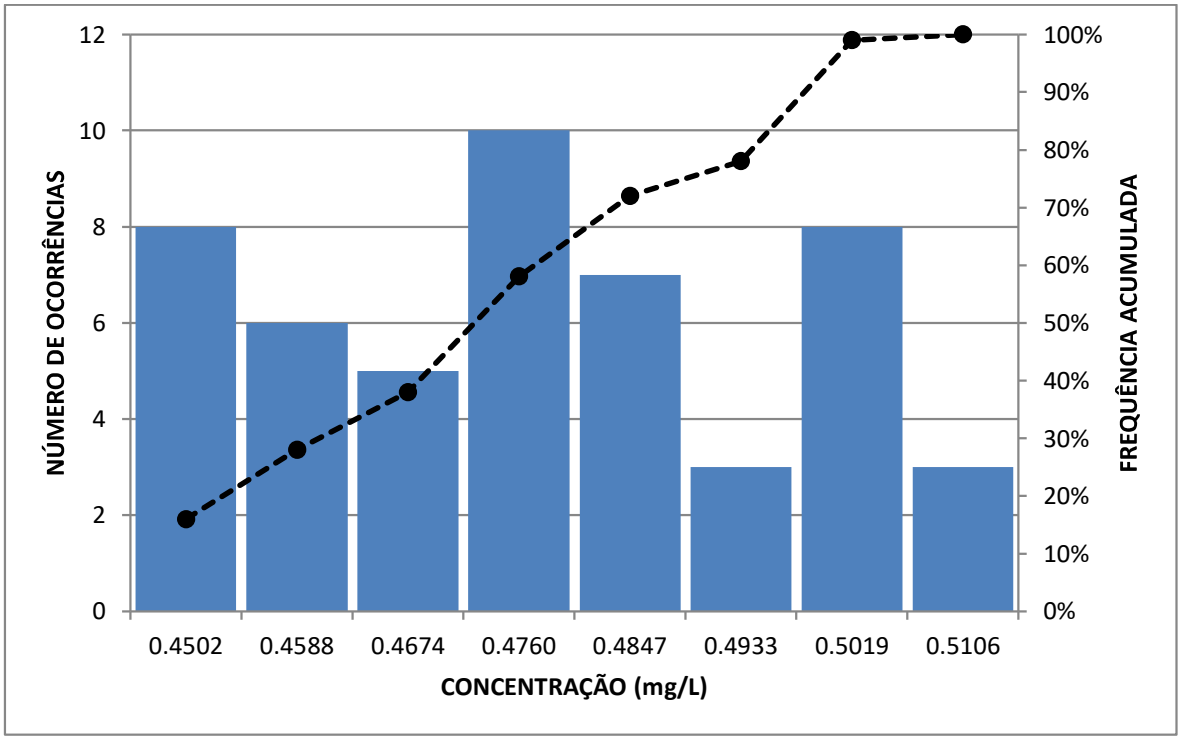

Figura 124: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 50 simulações. Fonte: Autoria própria.

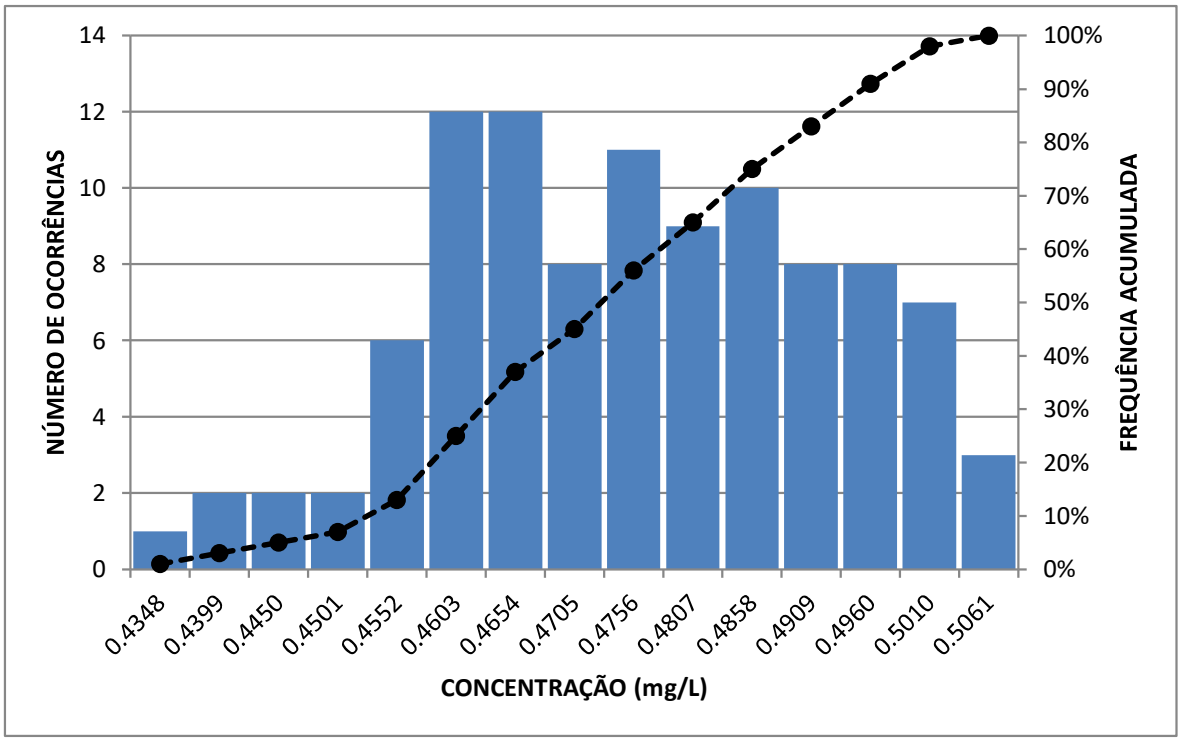

Figura 125: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 100 simulações. Fonte: Autoria própria.

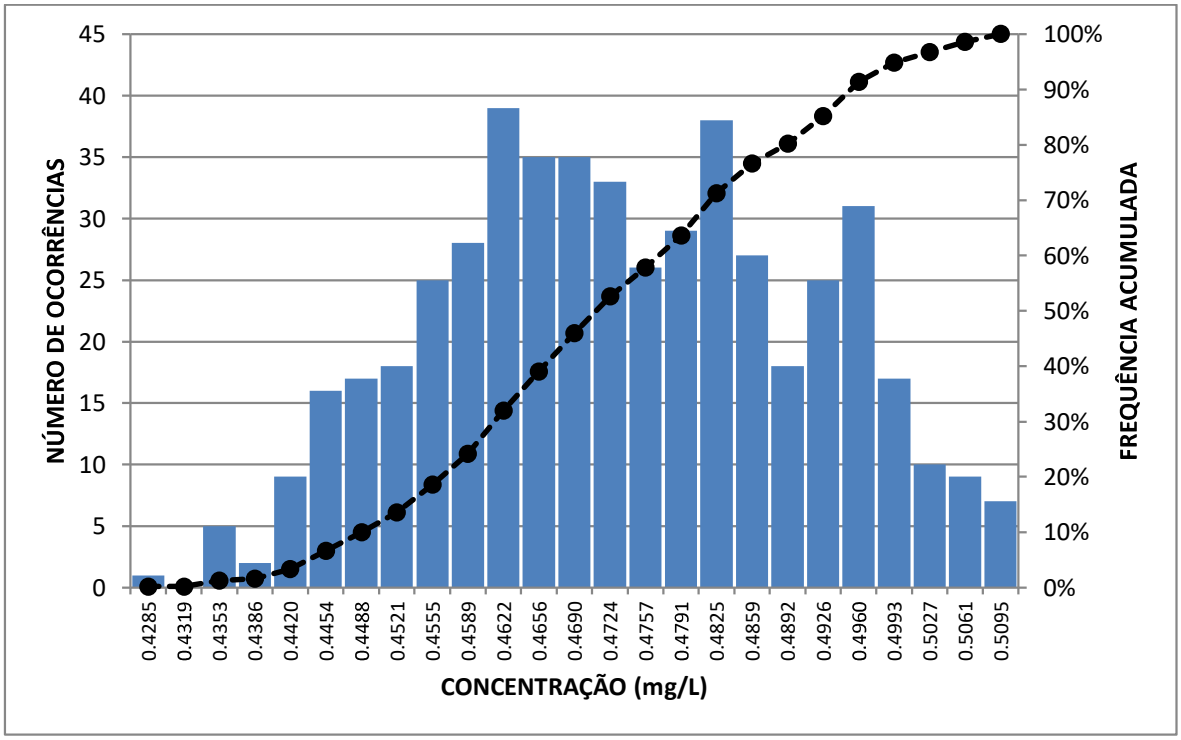

Figura 126: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 500 simulações. Fonte: Autoria própria.

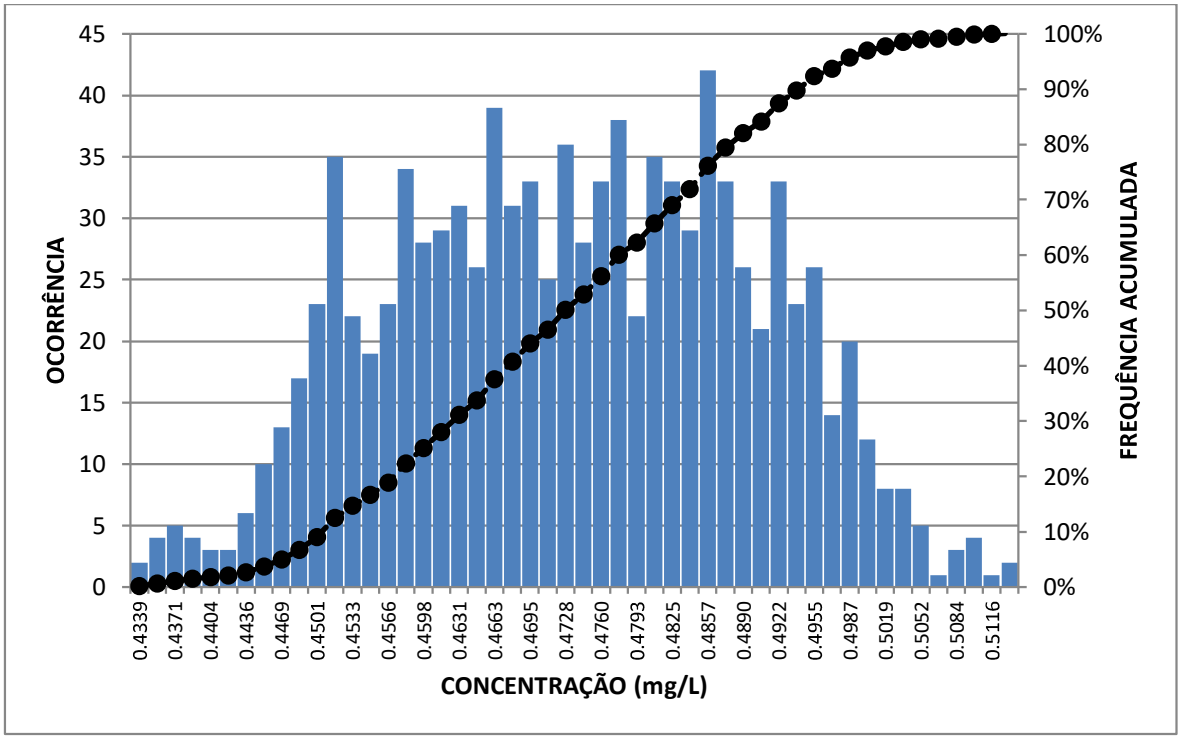

Figura 127: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 1.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

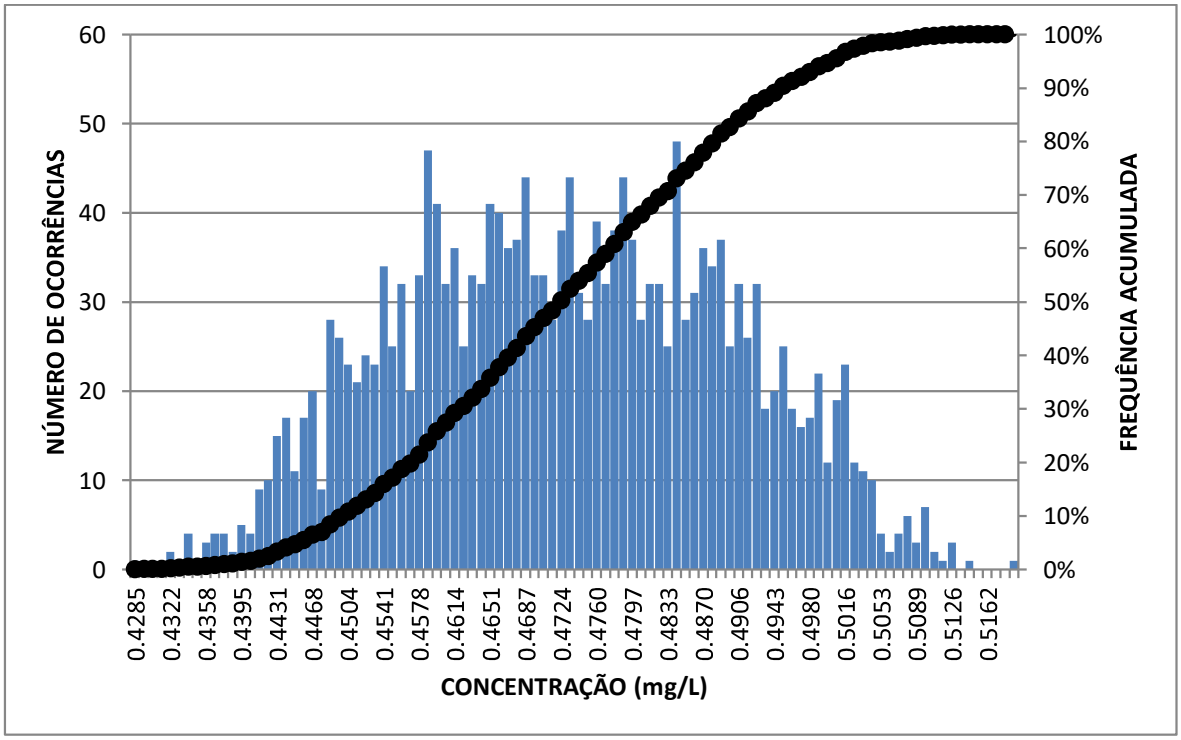

Figura 128: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 2.000 simulações. Fonte: Autoria própria.

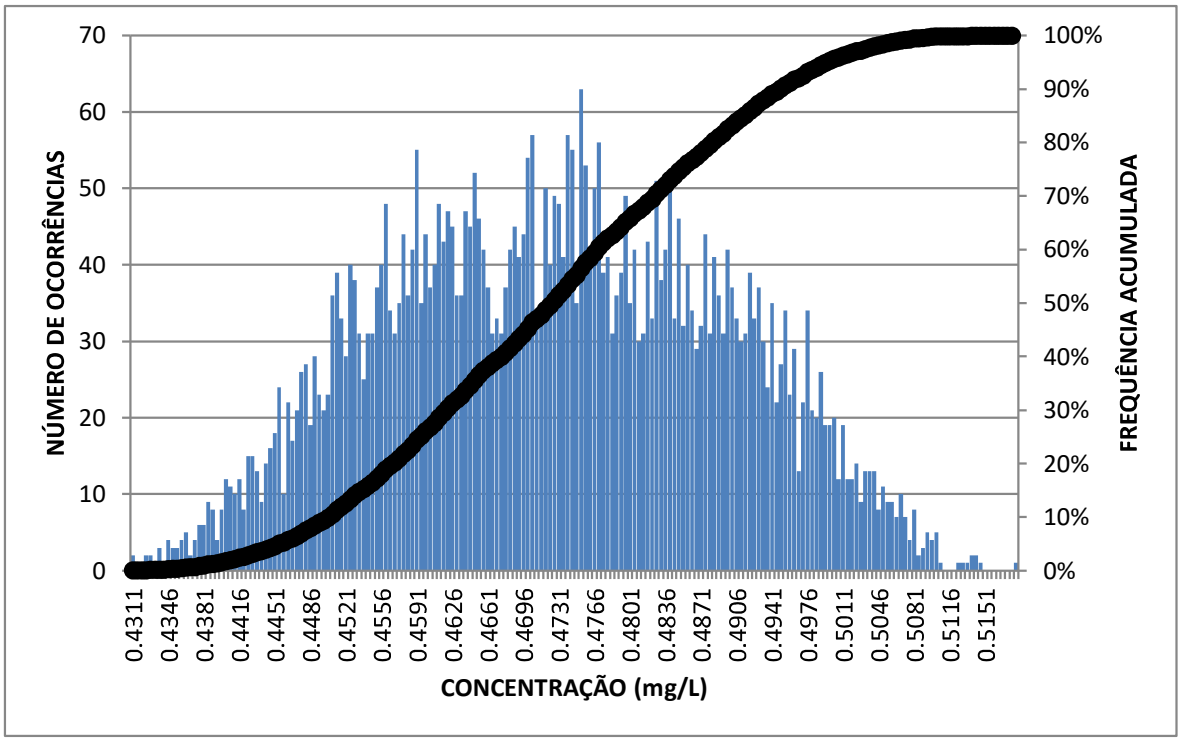

Figura 129: Histograma de frequência para nitrato no rio Novo para conjunto com 5.000 simulações. Fonte: Autoria própria.