

Aperfeiçoamento dos modelos ambientais componentes do Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa (SIMPPOD)

Edital:	Edital PiiC 2021/2022
Grande Área do Conhecimento (CNPq):	Ciências Exatas e da Terra
Área do Conhecimento (CNPq):	Ciência da Computação
Título do Projeto:	Planejamento integrado de controle e redução de cargas pontuais e difusas de poluição em bacias hidrográficas
Título do Subprojeto:	Aperfeiçoamento dos modelos ambientais componentes do Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa (SIMPPOD)
Professor(a) Orientador(a):	Lucia Catabriga
Estudante:	Juliane Azeredo Ferreira

Resumo

A presente proposta objetivou aprimorar o Sistema de Suporte a Decisão desenvolvido no Projeto PIBIC EDITAL 2021/2022, intitulado "Aperfeiçoamento dos modelos ambientais componentes do Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa (SIMPPOD)". Tal sistema permite ao usuário estimar a produção de cargas difusas, simular perfil de qualidade de água em rios a partir da entrada de fontes pontuais e difusas, além de identificar os percentuais de remoção/redução necessários a serem aplicados a estas cargas de modo a garantir a classe de qualidade de água fixada pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama). Dentre os aperfeiçoamentos e complementações possíveis, este projeto se propôs a criar um modelo pontual mais robusto e completo por meio da implementação da simulação e otimização das captações de água. Portanto, o sistema é capaz de simular e otimizar todo um sistema hídrico, composto pelo rio principal e seus afluentes. Ademais, este projeto se propôs a aprimorar a interface, a reformular os arquivos de entrada a serem fornecidos pelo usuário, e a reorganizar os arquivos de saída gerados pelo programa, a fim de uma melhor experiência do usuário.

Palavras-chave: Sistema de Suporte a Decisão. Python. Simulação. Otimização. Afluentes. Poluição Pontual.

1 Introdução

Os padrões brasileiros de qualidade de água foram fixados pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) nº 357 de 2005, a qual foi posteriormente complementada pela resolução Conama nº 430 de 2011, estabelecendo limites de concentração para vários parâmetros de qualidade de água.

Todavia, a qualidade de água nos rios brasileiros frequentemente está em desacordo com a legislação vigente, violando o referido padrão de qualidade, e essa violação ocorre principalmente devido à aportes de cargas poluentes aos cursos d'água. Tanto os processos naturais como atividades humanas influenciam na qualidade de água de corpos d'água. Entretanto, a intensificação destas atividades sobre a bacia hidrográfica geralmente resulta na

deterioração da qualidade da água dos seus recursos hídricos. Estas atividades intervêm com o equilíbrio do ecossistema resultando, por vezes, em perda de biodiversidade e alterações nos constituintes químicos e parâmetros físicos dos cursos d'água presentes na bacia.

A poluição hídrica pode ser classificada como pontual quando o lançamento de carga poluente ocorre de modo concentrado e numa localidade específica, como por exemplo, o esgoto de uma cidade. Por outro lado, a poluição hídrica pode ser classificada como difusa quando essa carga poluente não possui uma fonte ou localidade específica, como os poluentes que se encontram presentes nas enxurradas (Novotny (2003)).

Comumente são empregados métodos de busca, como algoritmos genéticos, para identificar valores mínimos de eficiências de remoção de cargas de poluição, de modo que os cursos d'água se mantenham de acordo com a legislação ambiental. Dada a complexidade presente em sistemas hídricos, principalmente pelas múltiplas variáveis e processos envolvidos a serem representados, o uso de meta-heurísticas como alternativa de otimização para estes sistemas vêm crescendo nos últimos anos (Maringanti (2011)).

Este assunto foi o tema principal da pesquisa de tese de doutorado de Selena Lopes Carvalho, defendida em dezembro de 2019 no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFES (Carvalho (2019)). Assim sendo, no edital PIBIC 2017/2018 foi apresentada proposta de projeto de pesquisa de implementação de modelo de qualidade de água para simular os efeitos e comportamentos destas cargas de poluição em cursos d'água, implementação de modelo de estimativa de produção de cargas difusas, além de algoritmo genético para otimizar a redução de cargas de origem pontual (Ribeiro (2018), Novotny (2000), Gonçalves & Resende (2011), Von Sperling (2014)). No ano seguinte, edital PIBIC 2018/2019, o projeto teve continuidade, sendo desenvolvido algoritmo de otimização para poluição difusa e uma primeira versão de interface, constituindo então um sistema de suporte a decisão denominado "Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa" ou simplesmente "SIMPPOD" (Ribeiro (2019)). Dando continuidade a pesquisa, no edital PIBIC 2019/2020 foi então apresentada a proposta direcionada ao aperfeiçoamento da interface, dos modelos presentes no SIMPPOD e a inclusão de outras metaheurísticas, o qual foi intitulado "Desenvolvimento de melhorias no Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa (SIMPPOD)" (Ferreira (2020)). Esses resultados obtidos também foram publicados no Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC) (Ferreira et al., 2021). Por fim, no edital PIBIC 2020/2021 foram implementados e testados a otimização de outros parâmetros de qualidade de água e um critério de parada, bem como houve a introdução do fator de segurança do Oxigênio Dissolvido na modelagem. Tal projeto foi intitulado "Aperfeiçoamento e desenvolvimento de melhorias no Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa (SIMPPOD)" (Ferreira (2021b)), tomando como apoio Cordeiro (2021).

O presente projeto Ferreira (2021a) teve por meta desenvolver melhorias no SIMPPOD, aperfeiçoando os resultados obtidos nos projetos de Iniciação Científica anteriores. O projeto previu o ajuste do balanço da vazão com a inclusão de captação de água, bem como a simulação e otimização de tributários a fim de se comparar os resultados obtidos da otimização de um curso d'água principal com e sem a otimização prévia de seus afluentes. Além disso, continuou-se refinando a interface para uma melhor experiência, com criação de novos botões, saídas gráficas e um novo padrão de arquivo a ser fornecido de entrada ao programa. Todo o material referente ao programa foi disponibilizado na plataforma GitHub com acesso livre.

2 Objetivos

O presente projeto teve por objetivo incorporar novas funcionalidades e aperfeiçoar a relação do usuário com o SIMPPOD.

Inicialmente, uma das funcionalidades que este projeto se propôs a implementar foi o método HRU (Unidades de Resposta Hidrológica) para a poluição difusa. Contudo, no primeiros meses do projeto, após estudos feitos sobre o assunto, identificou-se que, diante das possíveis mudanças ocasionadas pela implementação deste método, seria necessário primeiramente modificar a estrutura de representação física do modelo de simulação de qualidade pontual para simular múltiplos cursos d'água ao mesmo tempo. Após discussões, foi então decidido retroceder no cronograma no que tange a implementação deste método, que foi removido deste projeto, e concluído que a prioridade é criar um modelo pontual mais robusto e completo antes de prosseguir para o desenvolvimento de um novo modelo de poluição difusa.

Com isso, destacam-se os seguintes objetivos específicos alcançados: (i) ajuste do balanço de vazão, com a inclusão de captação de água; (ii) implementar a simulação e otimização de um tributário ou conjunto de tributários; (iii) implementar a otimização do curso d'água principal a partir de seus tributários otimizados; (iv) avaliar e comparar os resultados obtidos da otimização do rio principal com e sem a otimização prévia de suas captações de água; (v) criar um arquivo de entrada padrão no formato de uma planilha do Excel contendo subplanilhas - as chamadas abas - referentes a cada arquivo de entrada anteriormente utilizado; (vi) organizar os arquivos de saída gerados em subpastas nomeadas de acordo com cada entrada fornecida, separando as saídas do rio principal das saídas dos tributários; (vii) modificar e otimizar o código atual para suprir as novas funcionalidades; (viii) geração do gráfico da vazão do curso d'água em análise, e acréscimo de estatísticas básicas - a saber: mínimo, máximo e média - em cada saída gráfica gerada pelo programa; (ix) aperfeiçoar a atual interface para torná-la mais funcional e amigável, principalmente para a comunidade leiga; (x) criar uma conta na plataforma *GitHub* para a disponibilização do código-fonte e da nova planilha de entrada - uma em branco e uma preenchida com valores fictícios para exemplificação.

3 Embasamento Teórico

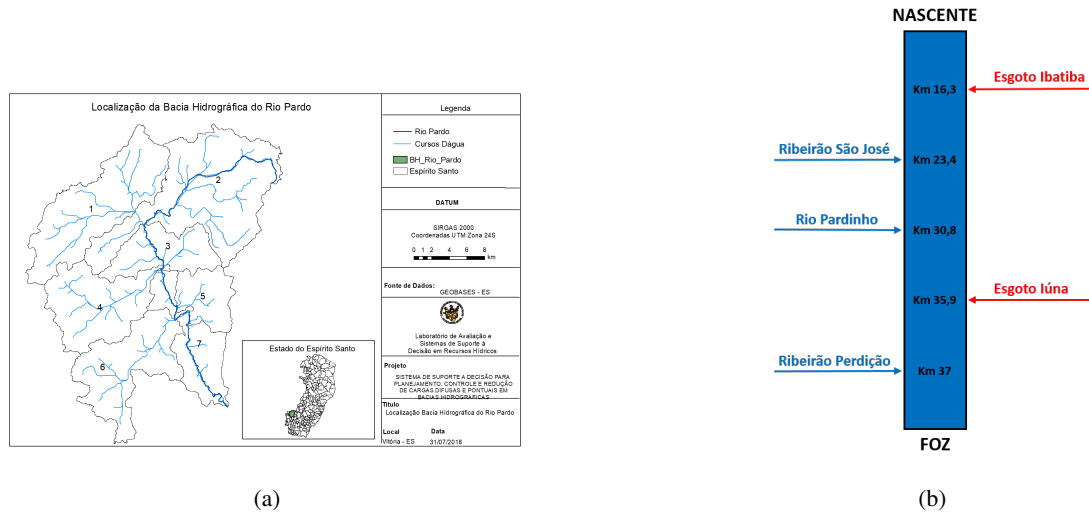
3.1 Características da bacia estudada

A bacia hidrográfica do Rio Pardo, afluente do Rio Itapemirim, está localizada quase totalmente no estado do Espírito Santo (Ferreira, 2021b). Uma sucinta caracterização da bacia pode ser vista na Figura 1. Os esgotos domésticos dos núcleos urbanos dos municípios de Ibatiba e Iúna são caracterizadas como fontes pontuais. Para a caracterização de fontes difusas - as entradas de lançamento de esgoto - a bacia hidrográfica é subdividida em sete unidades, denominadas de sub-bacias e identificadas pelos algarismos de 1 a 7 na Figura 1a.

Podem ser identificados na Figura 1b três tributários que deságuam no curso principal da bacia: o Ribeirão São José; o Rio Pardinho, que recebe o esgoto produzido pelo núcleo urbano de Irupi; e o Ribeirão da Perdição, que recebe o esgoto produzido nas localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças.

Uma descrição mais completa das características da bacia do Rio Pardo pode ser analisada em Carvalho (2019).

Figura 1: (a) Localização da bacia do rio Pardo e (b) Diagrama unifilar do rio Pardo



Fonte: Carvalho (2019) e produção do próprio autor, respectivamente.

3.2 Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa

O SIMPPOD é um sistema de suporte a decisão que permite ao usuário estimar a produção de cargas difusas e simular o perfil de qualidade de água em rios a partir de entrada de fontes pontuais e difusas. Ademais, permite identificar os percentuais de remoção/redução necessários a serem aplicados a estas cargas de modo a garantir a classe de qualidade de água desejada pelos usuários.

Portanto, o SIMPPOD é um sistema de suporte ao enquadramento e ao planejamento e gestão de recursos hídricos. Ele é composto por dois algoritmos de otimização: o Algoritmo Genético de Otimização de Fontes Pontuais (AGOPF) e o Algoritmo Genético de Otimização de Fontes Difusas (AGOFD), um modelo de qualidade de água denominado Qual-UFMG, um modelo hidrológico e também um modelo de estimativa de cargas difusas (Carvalho (2019), Ferreira (2020), Ferreira (2021b), Von Sperling (2014), Novotny (2003)).

Um Algoritmo Genético é composto por uma população de *cromossomos* (*soluções*), os quais são submetidos a uma função de avaliação, *função objetivo* (FO), considerando um conjunto de restrições a serem atendidas (Linden (2003)). No SIMPPOD foram considerados três algoritmos genéticos distintos: algoritmo genético com mutação, denominado de AG1, algoritmo genético com mutação e elitismo, denominado AG2, e algoritmo genético das chaves aleatórias viciadas ou *Biased Random-Key Genetic Algorithm* (BRKGA) (Ferreira (2020), Ferreira (2021b), Gonçalves & Resende (2011)). Entretanto esse projeto tratou apenas do BRKGA, já que o foco é apresentar um estudo sobre as diferenças na otimização de um rio com e sem a otimização prévia de seus afluentes.

O AGOPF busca identificar a eficiência mínima de remoção que uma determinada Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) deve ter para não violar os limites de concentração de classe no curso d'água que recebe o efluente tratado. A melhor solução é aquela que apresenta a menor eficiência de remoção atendendo aos padrões de classe de qualidade de água. Portanto, na versão da poluição pontual, o *cromossomo* é representado por um vetor composto por n_p

números randômicos gerados no intervalo $[E_m; 0,9]$, sendo E_m a eficiência mínima¹ e n_p o número de lançamentos de esgoto na bacia hidrográfica.

Por sua vez, o AGOFD identifica o percentual mínimo a ser removido nos parâmetros DBO5, NH3, NO e P, considerando como restrição os mesmos limites de classe. Consequentemente, o cromossomo é definido como uma matriz $n_d \times 4$ de valores randômicos no intervalo $[0; 0,9]$, onde n_d representa o número de entradas de fonte difusas de poluição. Para o rio em estudo, n_d representa o número de sub-bacias, conforme Figura 1a.

Nas duas versões do algoritmo - AGOFP e AGOFD - a população inicial é formada a partir da geração aleatória de soluções até que n_{sol} soluções válidas sejam geradas. A partir da população inicial, as novas populações são geradas por meio de operadores genéticos. O cruzamento é a geração de um novo indivíduo (filho) que carrega material genético de outros dois (os pais). A mutação é caracterizada pela substituição de indivíduos de baixa qualidade por indivíduos gerados randomicamente.

4 Metodologia

A seguir são discriminadas as metodologias utilizadas para a realização de cada componente e etapa deste projeto de iniciação científica.

4.1 Modificações no programa SIMPPOD

Foram implementadas as funcionalidades de simulação e otimização de tributários, bem como um modelo de otimização do rio principal a partir do tratamento de seus afluentes. Assim o usuário consegue aplicar o programa a não apenas um corpo d'água, mas a todo um conjunto hídrico interligado, tornando o SIMPPOD mais robusto e completo. Além disso, houve a criação da saída gráfica do perfil de vazão, bem como o acréscimo de estatísticas básicas de mínimo, máximo e média em todas as saídas gráficas relacionadas aos perfis de concentração. Ademais, ocorreu a inclusão de novas variáveis, como a captação de água, a demanda de oxigênio dos sedimentos, a carga linear distribuída ao longo do rio, a posição em que um afluente adentra em seu rio principal, e os incrementais de parâmetros bioquímicos do sistema - a saber Nitrogênio Orgânico, Nitrogênio Amoniacal, Nitrito, Nitrato, Fósforo Orgânico e Fósforo Inorgânico. Por fim, a interface foi adaptada para englobar as funcionalidades criadas.

4.2 Python

A linguagem de programação Python é uma linguagem de alto nível de multiparadigma, sendo orientada a objetos, funcional, procedural e imperativa. Possui uma codificação próxima à linguagem natural, priorizando, assim, sua legibilidade. Tratando-se de representação visual, Tkinter, uma biblioteca do Python, possibilita o desenvolvimento de interfaces gráficas. O estudo da linguagem foi norteado pelo livro Lutz & Ascher (2007).

Tal linguagem foi utilizada para a criação do programa SIMPPOD, com foco neste projeto na implementação da simulação e otimização de tributários, na leitura do novo arquivo de entrada formulado no Excel, na organização das saídas e refinamento do programa e de sua interface. Além disso, a linguagem Python foi empregada no tratamento de novos parâmetros, na geração de novas saídas gráficas e estatísticas básicas acerca destas.

¹Referente aos limites mínimos de eficiência que as ETEs devem possuir, os quais foram fixados pela CONAMA 430/2011.

4.3 GitHub

GitHub é um serviço de hospedagem na Internet para desenvolvimento de software e controle de versão. É comumente usado para hospedar projetos de desenvolvimento de software de código aberto. Projetos no GitHub podem ser acessados e gerenciados, permitindo que os usuários organizem e, se desejado, disponibilizem seus repositórios.

Com este intuito, o sistema até então desenvolvido foi disponibilizado na página do SIMPPOD², com seus códigos fonte e a planilha padrão para ser fornecida como arquivo de entrada (uma versão em branco e uma versão preenchida com valores fictícios para exemplificação).

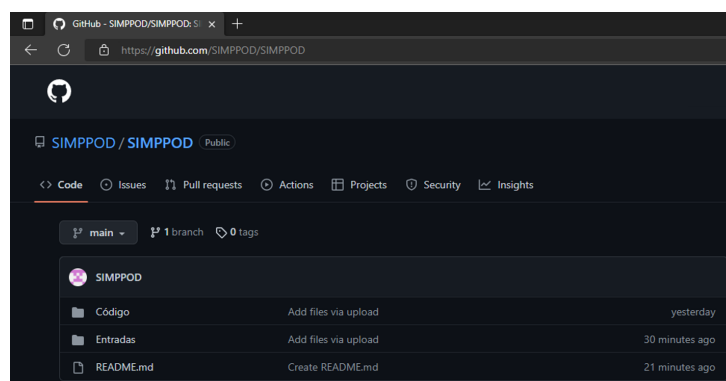
5 Resultados e Discussão

Nas seções subsequentes são percorridos os principais resultados obtidos.

5.1 Plataforma GitHub

O sistema até então desenvolvido foi disponibilizado na página do SIMPPOD, com seus códigos fonte e a planilha padrão para ser fornecida como arquivo de entrada (uma versão em branco e uma versão preenchida com valores fictícios para exemplificação). A Fig. 2 mostra a página do SIMPPOD criada no GitHub com os conteúdos de código e arquivos de entrada.

Figura 2: Página do SIMPPOD no GitHub.



Fonte: Produção do próprio autor.

Além disso, links do canal do *Youtube* e do perfil do *Instagram* também podem ser encontrados no GitHub.

5.2 Mudanças no SIMPPOD

5.2.1 Reorganização dos arquivos de entrada e de saída

Com a nova funcionalidade de simular um conjunto de tributários simultaneamente, tornou-se necessário melhorar a organização dos dados de entrada. Para isso, um novo modelo de arquivo passou a ser considerado: uma planilha

²A página do SIMPPOD na plataforma do *GitHub* pode ser acessada em <https://github.com/SIMPPOD/SIMPPOD>

em Excel dividida em abas correspondentes aos até então arquivos de entrada, agrupando todos os dados de um curso em estudo em um único arquivo. Isso facilita o processo de seleção dos arquivos de entrada, principalmente quando se deseja simular uma vasta quantidade de corpos d'água. Esse arquivo pode ser visto na Fig. 3.

Figura 3: Novo arquivo de entrada, com cada aba correspondendo aos arquivos de entrada usados anteriormente.



Fonte: Produção do próprio autor.

Foram incluídas captações no balanço hídrico - logo o arquivo de Entrada Pontual conta com um novo parâmetro denominado *tipo da entrada* onde o usuário informa se a entrada considerada provém de esgoto, um tributário ou uma captação, identificados por *E*, *T* e *C*, respectivamente. Tal modificação pode ser visualizada na Fig. 4. Além disso, foram adicionados novos parâmetros no arquivo de constantes relacionados aos incrementais do Nitrogênio orgânico, Nitrogênio Amoniacal, Nitrito, Nitrato, Fósforo Orgânico e Fósforo Inorgânico, bem como os relacionados a demanda de oxigênio dos sedimentos (*Sd*), a carga linear distribuída ao longo do rio (*Lrd*) e a célula onde tal curso d'água adentra o corpo principal (*NT*). Tais modificações podem ser visualizadas na Fig. 5.

Figura 4: Novo parâmetro no arquivo de Entrada Pontual referente ao tipo da entrada.

Rio Principal - Excel															
Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Ajuda															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	DBO	OD	NORG	NAMON	NNITRI	NNITRA	PORG	PINORG	Q	N	ExR	R	K1	T	Tipo da entrada
2	520,5045	0	30	50	0	0	2	5	0,038222	163	1	0	0,4	20	E
3	426,1926	0	30	50	0	0	2	5	0,046205	359	1	0	0,4	20	E
4															
5															
6															

Fonte: Produção do próprio autor.

Arquivos são gerados separadamente para cada afluente, otimizando um sistema hídrico e não só um rio por vez.

Figura 5: Novos parâmetros no arquivo de Entrada Constantes: os incrementais de parâmetros bioquímicos do sistema (Nitrogênio Orgânico, Nitrogênio Amoniacal, Nitrito, Nitrato, Fósforo Orgânico e Fósforo Inorgânico), demanda de oxigênio dos sedimentos (Sd), a carga linear distribuída ao longo do rio (Lrd) e a posição em que um afluente adentra em seu rio principal (NT).

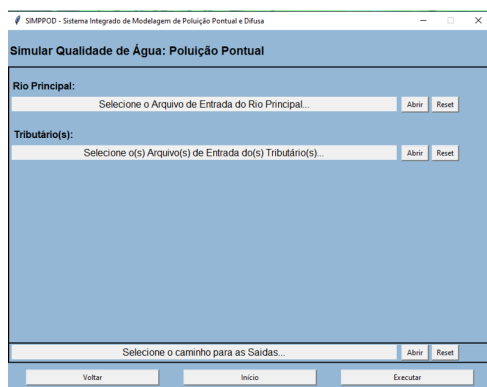


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
42	ODinc	7													
43	NORGinc	0													
44	NAMONinc	0													
45	NNITRinc	0													
46	NNITRAinc	0													
47	PORGinc	0													
48	PINORGinc	0													
49	Sd	0,5													
50	Lrd	0													
51	NT	0													

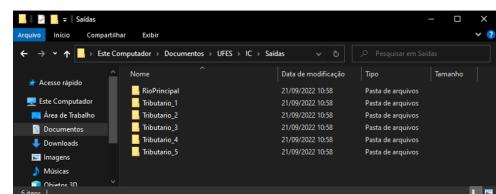
Fonte: Produção do próprio autor.

Com isso, o usuário pode selecionar os diversos arquivos de entrada referentes ao rio principal e seus afluentes, como na Fig. 6a, e o programa retornará um arquivo de saída para cada, separados em pastas para cada entrada, indicado pela Fig. 6b.

Figura 6: (a) Nova tela de seleção dos arquivos de entrada e (b) Arquivos de saída gerados separados em pastas.



(a)



(b)

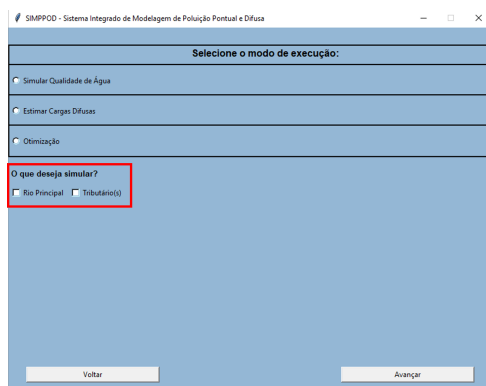
Fonte: Produção do próprio autor.

5.2.2 Melhorias na interface

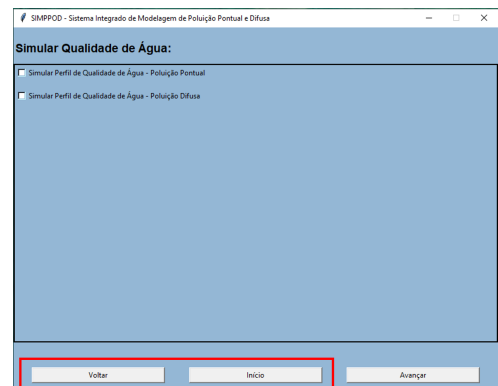
Com a funcionalidade de simular um corpo principal e/ou seus tributários simultaneamente, um novo botão foi adicionado à tela de seleção do modo de execução, como na Fig. 7a. Assim o usuário escolha o que ele deseja

simular. Botões de *Voltar* e *Início* foram acrescentados, como na Fig. 7b, a fim de que o usuário possa voltar para a etapa anterior de sua simulação ou, se preferir, retornar à tela inicial, em qualquer momento. Uma nova tela final (Fig. 7c) conta com um gráfico do comportamento da vazão, já que na análise a vazão é a primeira a ser observada e muitas das oscilações nos perfis dos parâmetros podem ser explicadas por estas variações. Estatísticas básicas como mínimo, máximo e média foram acrescentadas em todas as saídas gráficas (Fig. 7d).

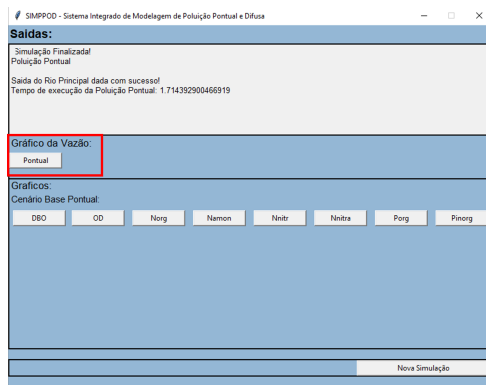
Figura 7: Novas telas do SIMPPOD



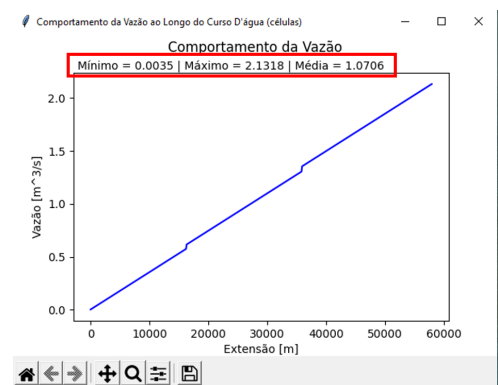
(a) Novo botão na tela de seleção do modo de execução.



(b) Acréscimo dos botões *Voltar* e *Início* para melhor experiência do usuário.



(c) Nova tela final conta com a saída gráfica do perfil da vazão.



(d) Gráfico do comportamento da vazão, com estatísticas básicas de mínimo, máximo e média.

Fonte: Produção do próprio autor.

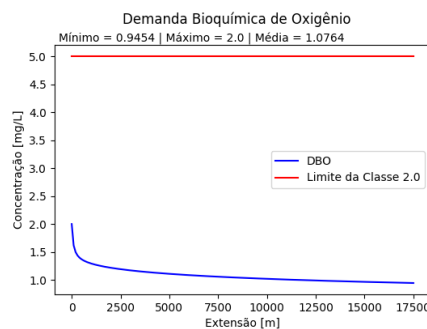
5.3 Comparativo da otimização

Neste projeto foram implementadas a simulação e a otimização de um tributário ou conjunto de tributários. O usuário pode então aplicar o programa em múltiplos corpos d'água simultaneamente e avaliar em uma só execução a qualidade da água dos afluentes de um rio através da leitura dos arquivos de saída gerados para cada um. Entretanto, por limitações na interface, para se gerar as saídas gráficas desses arquivos automaticamente dentro do programa, é necessário fornecer uma entrada por vez.

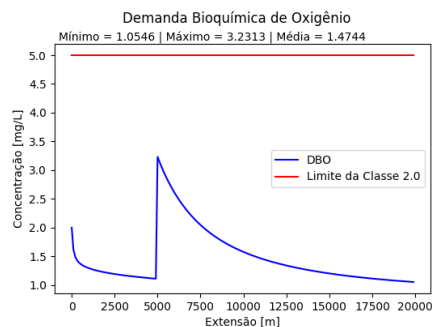
5.3.1 Rio Pardo e tributários reais

O Rio Pardo conta com três tributários, como mostra a Fig. 1b. Foram coletados os dados físicos e bioquímicos necessários para simular a qualidade do Ribeirão São José, do Rio Pardinho e do Ribeirão Perdição. Pôde-se então simular os parâmetros bioquímicos a fim de verificar possíveis violações no padrão de qualidade. Em ambos Rio Pardinho e Ribeirão Perdição há a entrada de esgotos das comunidades próximas, o que indica uma possível instalação de uma ETE para otimização dos parâmetros. Já no Ribeirão São José, como não ocorre poluição pontual, não se faz necessária essa instalação, e a otimização dos parâmetros não precisa ser executada. A Fig. 8 mostra o perfil da Demanda Bioquímica de Oxigênio desses tributários, e sua otimização quando executada.

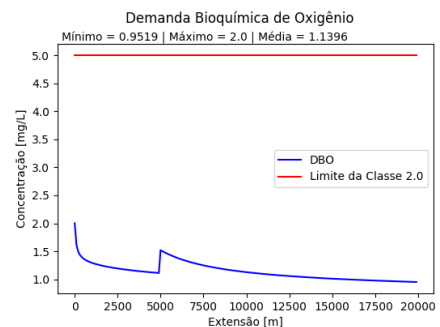
Figura 8: Perfis da Demanda Bioquímica de Oxigênio dos tributários do Rio Pardo.



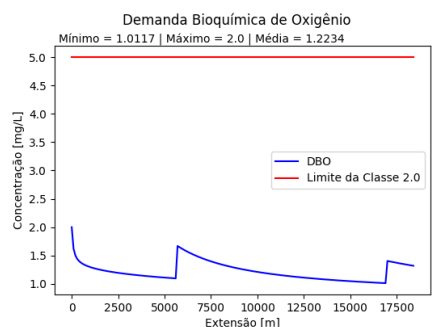
(a) Perfil da DBO no Ribeirão São José.



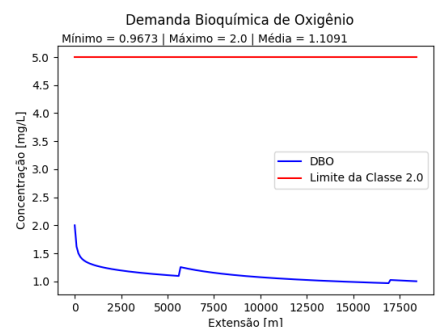
(b) Perfil da DBO no Rio Pardinho.



(c) Perfil otimizado da DBO no Rio Pardinho.



(d) Perfil da DBO no Ribeirão Perdição.

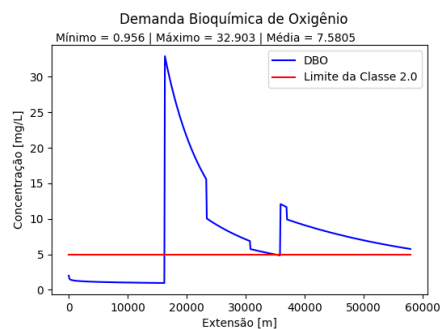


(e) Perfil otimizado da DBO no Ribeirão Perdição.

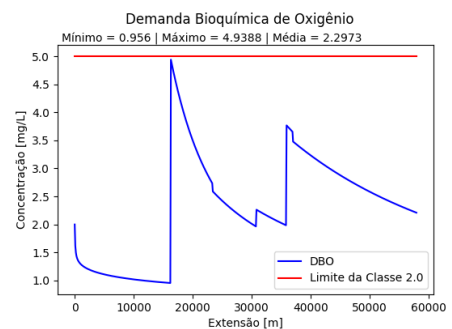
Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se perceber pelas Figs.8a, 8b e 8d que não houve violação dos padrões de qualidade determinados, não sendo de extrema importância a instalação de ETEs para controle nesses tributários. Mas ainda vale comparar os resultados obtidos da otimização do Rio Pardo com e sem essa otimização. A Fig.9 mostra o perfil da Demanda Bioquímica de Oxigênio do Rio Pardo, ora considerando a simulação dos tributários ora não.

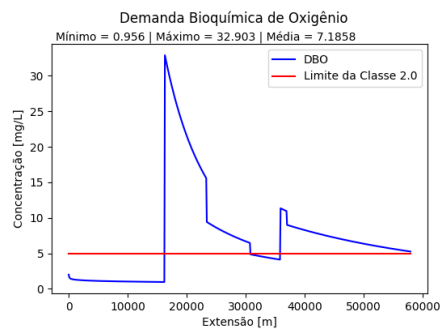
Figura 9: Perfis da Demanda Bioquímica de Oxigênio do Rio Pardo.



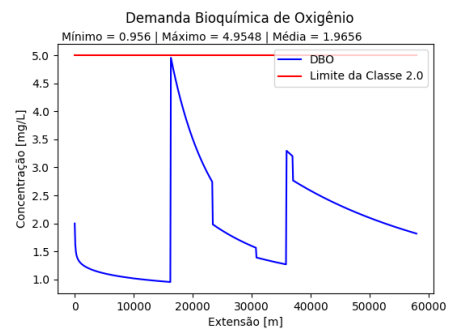
(a) Perfil da DBO no Rio Pardo sem a simulação prévia dos tributários.



(b) Perfil otimizado da DBO no Rio Pardo sem a otimização prévia dos tributários.



(c) Perfil da DBO no Rio Pardo com a simulação prévia dos tributários.



(d) Perfil otimizado da DBO no Rio Pardo com a otimização prévia dos tributários.

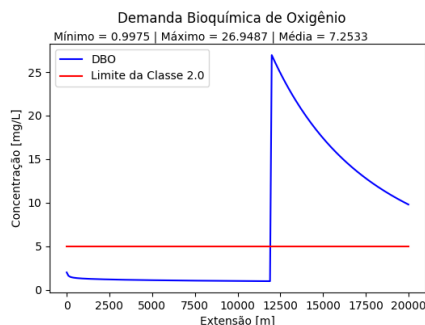
Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se notar das Figs. 9a e 9c uma pequena divergência entre os quilômetros 31 e 35 aproximadamente. Isso ocorre visto que, quando se simula a qualidade de um tributário antes de adentrar o rio principal, o método de Euler – que aproxima o sistema de equações diferenciais ordinárias – é aplicado nesse afluente calculando a concentração dos parâmetros e o fluxo de vazão por aproximações; é natural portanto que essas medidas sejam um pouco diferentes dos dados coletados reais. Já pelas Figs. 9b e 9d, é possível perceber valores de concentração menores quando se otimiza os tributários previamente, em todo o percurso do rio após a entrada do Ribeirão São José no quilômetro 23 aproximadamente. Isso comprova que ao se otimizar os afluentes de um rio principal, as concentrações dos parâmetros bioquímicos estarão mais de acordo com os padrões de qualidade. Porém vale ressaltar que, para esse exemplo do Rio Pardo em específico, visto que seus tributários não violam esses padrões, não se faz necessária a instalação de ETEs e a otimização.

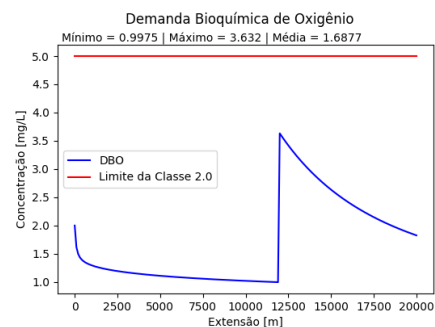
5.3.2 Rio Pardo e tributários fictícios

Para fins de análise, foi criado um exemplo fictício a fim de verificar a importância da implementação da otimização de um rio mediante à de seus tributários. Foram criados cinco tributários fictícios idênticos, com dados de concentração dos parâmetros bioquímicos e de fluxo de vazão iguais entre si, que adentram o curso d'água principal do Rio Pardo nos quilômetros 10, 23.4, 30.9, 37.1 e 48, respectivamente. A Fig. 10 mostra o perfil da Demanda Bioquímica de Oxigênio desses tributários, e sua otimização.

Figura 10: Perfis da Demanda Bioquímica de Oxigênio dos tributários - Caso fictício.



(a) Perfil da DBO nos tributários fictícios criados.



(b) Perfil otimizado da DBO nos tributários fictícios criados.

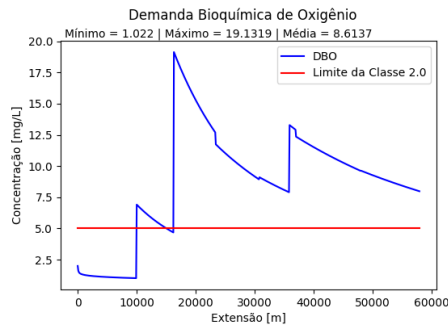
Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se perceber a partir da Fig. 10a que há uma violação dos padrões de qualidade a partir do quilômetro 12 aproximadamente, e que portanto a instalação de uma ETE se tornaria necessária, bem como a otimização desses tributários. A Fig. 11 mostra o perfil de concentração da Demanda Bioquímica de Oxigênio ora com a simulação prévia dos tributários, ora sem.

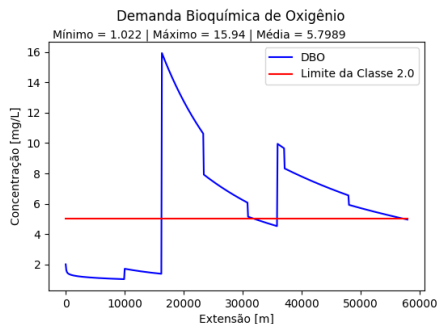
Note que não há a representação do perfil da DBO para a otimização do Rio Pardo sem a otimização prévia dos tributários. Isso ocorre visto que o modelo não foi capaz de encontrar em tempo hábil uma solução válida para o problema devido a alta carga de poluição presente nos afluentes. Esse exemplo então seria considerado muito complexo, não sendo possível encontrar e aplicar as reduções necessárias no rio principal sem que haja antes o tratamento de seus tributários. Já com a otimização prévia dos tributários, foi possível encontrar uma solução válida, mostrando a eficiência dessa ferramenta.

Com isso, é válido concluir que a modelagem do rio através da simulação de seus tributários é mais vantajosa, podendo tratar de bacias mais complexas que não conseguem ser otimizadas sem essa ferramenta. Esse tema será o assunto do próximo projeto de Iniciação Científica, em que será tratada a bacia do Rio Doce, um sistema hídrico mais complexo do que os utilizados até então. A partir do estudo dessa bacia será possível avaliar essa nova funcionalidade de otimização a fim de alcançar um sistema capaz de lidar com cargas de poluição mais complexas e elevadas.

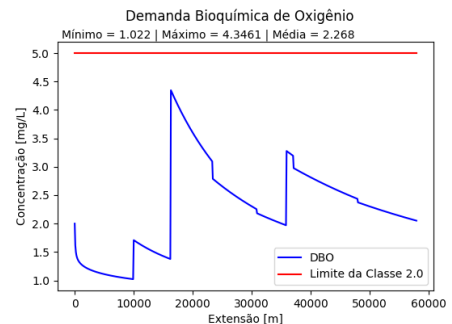
Figura 11: Perfis da Demanda Bioquímica de Oxigênio do Rio Pardo - Caso fictício.



(a) Perfil da DBO no Rio Pardo sem a simulação prévia dos tributários - Caso fictício.



(b) Perfil da DBO no Rio Pardo com a simulação prévia dos tributários - Caso fictício.



(c) Perfil otimizado da DBO no Rio Pardo com a otimização prévia dos tributários - Caso fictício.

Fonte: Produção do próprio autor.

6 Conclusões

Este trabalho apresenta uma aplicação do algoritmo genético BRKGA na Bacia do Rio Pardo, localizada no estado do Espírito Santo. Foi considerada a otimização do parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio. Para o conjunto de testes realizados, foram consideradas execuções sem e com a otimização prévia dos tributários do curso principal, a fim de avaliar o efeito dessa otimização nos valores finais. Tomando como base o exemplo do Rio Pardo com seus tributários reais, a diferença entre modos de execução não se mostrou muito expressiva, visto que é um sistema mais simples com afluentes que não violam os padrões determinados. Contudo, já no exemplo fictício criado, foi possível perceber que o modelo não foi capaz de otimizar o corpo principal sem antes ter tratado os tributários. Isso indica que tal abordagem se torna vantajosa quando se estuda um sistema hídrico complexo.

Agradecimentos

Agradecimentos à professora e doutora Lucia Catabriga e à doutora Selenia Lopes Carvalho por coordenarem esse projeto, e em especial à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo financiamento dessa pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Carvalho, S. L. (2019). *Sistema De Suporte A Decisão Para Planejamento, Controle E Redução De Cargas Difusas E Pontuais Em Bacias Hidrográficas*. PhD thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - UFES. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental.
- Cordeiro, L. E. (2021). Caracterização de Bacias Hidrográficas e Levantamento de Dados para Fins de Aplicação do Sistema de Suporte à Decisão SIMPPOD. Technical report, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).
- Ferreira, J. A., Carvalho, S. L., Rangel, M. C., & Catabriga, L. (2021). Comparação de algoritmos genéticos na solução de problemas de aporte de cargas de poluição em rios. *Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*.
- Ferreira, J. A. (2020). Desenvolvimento de melhorias no Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa (SIMPPOD). Technical report, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).
- Ferreira, J. A. (2021a). Aperfeiçoamento dos modelos ambientais componentes do Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa (SIMPPOD) - Subprojeto de pesquisa. Technical report, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).
- Ferreira, J. A. (2021b). Aperfeiçoamento e desenvolvimento de melhorias no Sistema Integrado de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa (SIMPPOD). Technical report, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).
- Gonçalves, J. F. & Resende, M. G. (2011). Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization. *Journal of Heuristics*, 17.
- Linden, R. (2003). *Algoritmos Genéticos*. Ciência Moderna, Rio de Janeiro.
- Lutz, M. & Ascher, D. (2007). *Aprendendo Python*. Bookman, Porto Alegre, 2. ed. edition.
- Maringanti, C. e. a. (2011). Application of a multi-objective optimization method to provide least cost alternatives for nps pollution control. *Environmental Management*, 48:448–461.
- Novotny, V. (2000). Integrating diffuse nonpoint pollution control and water body restoration into watershed management. *Journal Of The American Water Resources Association*, 35:717–727.
- Novotny, V. (2003). *Water quality: diffuse pollution and watershed management*. John Wiley, New Jersey.
- Ribeiro, L. F. O. (2018). Implementação de rotinas de Otimização de Ferramentas de Controle e Redução de Poluição para Rios e Córregos. Technical report, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).
- Ribeiro, L. F. O. (2019). Implementação de rotinas de Otimização de Ferramentas de Controle e Redução de Poluição para Rios e Córregos - Aperfeiçoamento e Complementação do SSD. Technical report, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).
- Von Sperling, M. (2014). *Introdução À Qualidade Das Águas E Ao Tratamento De Esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Belo Horizonte, 4. ed. edition.