

## **Implementação de rotinas de Otimização de Ferramentas de Controle e Redução de Poluição para Rios e Córregos.- Aperfeiçoamento e Complementação do SSD**

### **Identificação:**

Grande área do CNPq: Ciências Exatas e da Terra

Área do CNPq: Ciência da Computação

Título do Projeto: Planejamento integrado de controle e redução de cargas pontuais e difusas de poluição em bacias hidrográficas

Professor Orientador: Lucia Catabriga

Estudante PIBIC/PIVIC: Luiz Felipe Oliveira Ribeiro

**Resumo:** *No Brasil a legislação vigente categoriza os rios em classes de 1 a 4, de acordo com o uso desejado pela população para estes valiosos recursos, sendo que estas classes representam diferentes faixas dos parâmetros de qualidade de água. Neste projeto buscamos identificar os menores valores de remoção de poluentes vindos de fontes pontuais e difusas de poluição, com o objetivo de enquadrar os rios na classe desejada. Abordamos este problema como um problema de otimização, considerando o Algoritmo genético de chaves aleatórias viciadas (BRKGA) para sua resolução. Como parte do sistema desenvolvido, temos o modelo de qualidade de água de rios (QUAL-UFMG), responsável por descrever o comportamento dos poluentes no curso d'água e um modelo de quantificação de poluição difusa baseado no método Concentração Média de Evento (CME), representando a poluição que chega ao rio por fontes difusas. Com o objetivo de facilitar o uso do código pela sociedade civil, implementando um GUI (Gráfica User Interface), caracterizando o chamado Sistema de Suporte a Decisão (SSD). Os resultados mostram que por vezes, otimizar apenas a redução da poluição pontual não é suficiente para garantir a classe de qualidade de água e que muitas vezes a necessidade de remoções de poluição difusas podem ser altas.*

**Palavras chaves:** Otimização, Algoritmo Genético, BRKGA, Recursos Hídricos, Qualidade de Água, Poluição Difusa.

## 1 Introdução

As águas fluviais são um recurso essencial para a sobrevivência e o desenvolvimento do homem. Segundo a ANEEL, 83,2% da energia produzida no Brasil vem dos rios através das hidrelétricas. O Plano Nacional de Recursos Hídricos, Lei n. 9433/97<sup>1</sup>, é a legislação que visa tratar dos recursos hídricos brasileiros. Essa lei cria o Enquadramento de Cursos D'água, instrumento de gestão e planejamento no qual os rios são categorizados em classes de acordo com o seu uso. Essas classes apresentam valores de parâmetros de qualidade de água admissíveis para o uso no qual os rios são destinados. Os menores índices de poluentes devem ser encontrados nos rios de Classe 1 – rios que serão usados para abastecimento público, por exemplo. Já os rios Classe 4 são aqueles em que os índices admissíveis de poluentes são os maiores e as Classes 2 e 3 são intermediárias. A maioria dos rios Brasileiros encontra-se em uma classe abaixo da que deveria estar, ou seja, encontram-se inadequados para os usos que são destinados.

Neste projeto, consideramos o problema de encontrar o percentual mínimo de remoção de poluentes para que os rios se enquadrem na classe adequada para seu uso de acordo com a legislação. Modelamos esse problema como um problema de otimização combinatória, utilizando para a sua resolução, um algoritmo genético (Holland, 1975), mais especificamente o BRKGA (Biased random-key genetic algorithm) ou Algoritmo Genético de Chaves Aleatórias Viciadas. Inspirado na evolução das espécies, esse algoritmo considera uma população de indivíduos que evolui através de iterações (aqui também chamadas gerações), até que um critério de parada pré estabelecido seja satisfeito. Essa evolução ocorre através de três operações: o cruzamento, que consiste em gerar um novo indivíduo com partes de dois indivíduos pais; o elitismo, que consiste em preservar os melhores indivíduos através das gerações; e a mutação, que consiste em inserir novos indivíduos durante o processo.

No subprojeto de IC intitulado "Implementação de rotinas de Otimização de Ferramentas de Controle e Redução de Poluição para Rios e Córregos" (Ribeiro, 2018) de edital PIIC 2017/2018, desenvolvemos um BRKGA aplicado ao problema da remoção de poluição pontual, que é aquela advinda de fontes conhecidas, como efluentes domésticos e industriais. O subprojeto atual visa dar continuidade ao estudo do tema, acoplando ao modelo a chamada poluição difusa que é introduzida nos rios através da chuva. Durante eventos de precipitação parte da água da chuva não consegue penetrar no solo e escoar sob a superfície da bacia hidrográfica, atingindo o curso d'água e aumentando seu volume, este fenômeno é chamado de escoamento superficial (von Sperling, 2014). Durante o escoamento superficial ocorre uma lavagem da superfície da bacia hidrográfica e consequentemente o carregamento de vários poluentes que são encaminhados para os cursos d'água, denominada poluição difusa (Prodanoff, 2005). Esse tipo de poluição é mais complicada de se quantificar devido a natureza estocástica da chuva, ao fato de não existir um ponto de origem exata, e a dependência direta de características do solo (Prodanoff, 2005). Para tratar a poluição difusa consideramos o modelo hidrológico do *Soil Conservation Service*

---

<sup>1</sup> <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=370>

(SCS) (Santos, 2010) e o modelo de Concentração Média de Evento (CME) para a quantificação da poluição difusa presente em rios e córregos.

Três tipos de poluentes são investigados: a Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio e suas frações, Fósforo e suas frações. Essas substâncias estão presentes na poluição pontual e difusa. Quando estas substâncias são encontradas dentro dos cursos d'água são poluentes que podem ocasionar a morte de peixes e outros organismos. Outro parâmetro de interesse é o Oxigênio Dissolvido (OD), no qual desejamos maximizá-lo, uma vez que quanto menos oxigênio dissolvido estiver no curso d'água, menor é a existência de qualquer forma de vida no rio. Para calcular os valores de entrada de poluentes vindos de poluição difusa consideramos uma bacia hidrográfica, a dividimos em sub-bacias, e para cada sub-bacia calculamos o valor de vazão gerada para uma chuva e um valor de concentração através do tipo de solo daquela sub-bacia.

Para modelar esses poluentes utilizamos o Qual-UFMG que é um modelo matemático desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, baseado no Qual2e (von Sperling, 2014). Esse modelo recebe como parâmetros de entrada, a localização e a concentração de poluentes de todos os lançamentos no curso d'água. É composto por equações diferenciais ordinárias de primeira ordem, solucionadas numericamente, neste subprojeto, pelo método de Euler (Campos, 2007). A saída do modelo são funções relacionando Concentração (mg/L) x distância (m), para cada um dos poluentes.

Neste subprojeto complementamos o estudo iniciado por (Ribeiro, 2018), acoplando um modelo para quantificação de poluição difusa. Foram necessárias adaptações no BRKGA já desenvolvido para otimização da poluição pontual, além da integração entre os dois algoritmos de otimização, ou seja, minimizando os dois tipos de poluição "simultaneamente". Para facilitar a utilização do código desenvolvido, implementamos uma interface gráfica (GUI), transformando o programa em um chamado SSD-Sistema de Suporte a Decisão, permitindo que o sistema desenvolvido possa ser usado por usuários da sociedade civil.

## 2 Objetivos

Os principais objetivos desse subprojeto de iniciação científica são:

- Estudo e implementação dos modelos: Modelo hidrológico do *Soil Conservation Service* (SCS) (Santos, 2010) e de Concentração Média de Evento (CME) para a quantificação da poluição difusa e sua integração ao modelo de qualidade de água QUAL-UFMG (von Sperling, 2014) desenvolvido em (Ribeiro, 2018).
- Estudo e implementação do Algoritmo genético de Chaves Aleatórias Viciadas (BRKGA) aplicado ao problema de redução de poluição difusa em bacias hidrográficas e sua integração a otimização de poluição pontual já implementada em (Ribeiro, 2018).
- Implementação de estratégias para resolução do problema, tendo sempre em vista os

padrões legais de qualidade de água.

- Produção e uso de software livre utilizando a linguagem Python (Lutz & Ascher, 2007) em todas as implementações.
- Desenvolvimento de uma interface gráfica para o sistema, facilitando o uso e permitindo o seu uso pela sociedade civil.

### 3 Metodologia

Para abordarmos o problema de otimização de poluição difusa, implementamos um algoritmo para quantificação desses tipos de poluentes composto pelo modelo do *Soil Conservation Service* (SCS) e pelo Método da CME ponderada. Foram feitas adaptações ao BRKGA implementado anteriormente, para alocar a otimização de cargas difusas. Também foi desenvolvida uma GUI (Graphical User Interface), completando o Sistema de Suporte a Decisão (SSD). As seções a seguir discutem essas etapas.

#### 3.1 Modelo de Poluição Difusa

Esta seção descreve brevemente o modelo de poluição difusa, tendo como ideia principal a avaliação das contribuições difusas, ou seja, os valores de vazão e concentração de poluentes que entram no Rio nos eventos de precipitação, por meio do escoamento superficial. Esses valores servem como entrada para o modelo de qualidade de água QUAL-UFMG, para que assim possamos obter o perfil de Concentração x Distância do curso d'água.

##### 3.1.1 Modelo do SCS

O Modelo SCS é um dos métodos mais utilizados para quantificar as vazões vindas da chuva em uma bacia (Santos, 2010). Foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, sendo recomendado para bacias com áreas superiores a  $2Km^2$  e possui a vantagem de não requerer muitos dados hidrológicos.

Para realizar o cálculo da vazão total gerada (ou vazão acumulada) divide-se a bacia principal em sub-bacias, tendo cada sub-bacia um conjunto de parâmetros físicos de entrada, por exemplo, declividade e área. A partir desses dados o modelo estima o intervalo de tempo do início da chuva até o instante em que toda a sub-bacia hidrográfica contribua para o escoamento, denominado tempo de concentração ( $T_c$ ) (Santos, 2010). A metodologia implementada trabalha com a equação de mistura e consequente atualização de todos os parâmetros em cada célula (passo do método de Euler). Assim sendo, se faz necessário a distribuição da vazão gerada nas sub-bacias por toda a extensão do curso d'água. Por tal fato, a vazão gerada por cada sub bacia é dividida pelo número de células do curso d'água modelado contidas na sub-bacia em questão.

Desse modo, encontramos todos os valores de vazão nas células laterais bem como quais são as células laterais que recebem vazão difusa.

### 3.1.2 Método da CME ponderada

Para quantificação da carga de poluentes, usamos o método da Concentração Média do Evento (CME) (Prodanoff, 2005), que como o próprio nome sugere, reflete a concentração média de um poluente durante um evento de chuva para diferentes usos do solo. O cálculo da CME para um determinado poluente, em uma sub-bacia, é dado pela média ponderada entre a CME tabelada dos usos de solo presentes nessa sub-bacia e a área ocupada por esses usos do solo. Assim, temos para cada poluente e em cada sub-bacia, um valor de concentração  $C$  e um valor de vazão distribuída  $V$  (dado pelo SCS), constituindo assim, as contribuições difusas nas células do curso d'água.

### 3.1.3 BRKGA

No BRKGA (Gonçalves & Resende, 2011) considera-se uma população de indivíduos chamados *cromossomos*. Um cromossomo é a representação de uma possível solução para o problema denominada *genótipo*. Essa representação é decodificada para gerar a solução propriamente dita, chamada de *fenótipo*. A menor unidade de um cromossomo, é o *alelo* ou *chave*. O algoritmo inicializa com a criação de uma população com  $n$  cromossomos, gerados aleatoriamente. Esses cromossomos são, por definição do BKRGA, compostos por alelos reais variando entre 0 e 1. Essa população evolui iterativamente através de três processos: *elitismo*, *cruzamento* e *mutação*. A cada indivíduo é atribuído um valor chamado função de aptidão, ou a função que deseja-se minimizar. Via de regra, os indivíduos com a maior função objetivo tem maior capacidade de sobreviver através das gerações. Assim, a população na iteração  $(i + 1)$  é sempre dada pelos melhores indivíduos da iteração  $(i)$ , somada a uma quantidade de indivíduos gerada através de cruzamentos, e uma quantidade de indivíduos mutantes, que nada mais são que novos indivíduos aleatórios, inseridos de geração a geração.

As iterações também podem ser chamadas de gerações, uma vez que a cada nova iteração uma nova população baseada na população da iteração anterior é gerada. A população evolui até que um critério de parada pré-estabelecido seja atingido. Ao final do processo é retornado o cromossomo com melhor função de aptidão.

No BRKGA o tamanho  $n$  da população é fixo através das iterações e a cada iteração a população é separada em dois conjuntos: o conjunto elite, no qual estão os melhores indivíduos, e o conjunto não-elite, no qual estão os outros indivíduos. Quando acontece um cruzamento, a escolha dos pais é sempre com pelo menos um pai elite, e o indivíduo filho tem sempre mais chances de herdar alelos do pai elite – por isso o nome "Chaves aleatórias viciadas". O conjunto elite é copiado inteiramente através de gerações, o que garante que a melhor solução nunca piora através das iterações. O Algoritmo 1 ilustra um pseudo-código para o BRKGA, onde:  $P$  é

uma população aleatória;  $P_e$  é a população elite;  $P_m$  é a população mutante;  $p_a$  é a probabilidade do pai  $a$ .

---

**Algorithm 1** BRKGA: Dados  $P, P_e, P_m, n, p_a$ 

---

```
1: Gere uma população com  $P$  cromossomos aleatórios
2: enquanto Critério de parada não for satisfeito faça
3:   Avalie a Função Objetivo de cada solução na população
4:   Particione a população nos conjuntos Elite e não-Elite
5:   Inicialize a população da próxima geração
6:   Gere um conjunto com  $P_m$  mutantes aleatórios
7:   Adicione o conjunto de mutantes a população da nova geração
8:   Copie o conjunto Elite para a próxima geração
9:   para  $i \leftarrow 1$  até  $(P - P_m - P_e)$  faça
10:     Escolhe o pai  $a$  dentro do conjunto elite
11:     Escolhe o pai  $b$  dentro do conjunto não elite
12:     para  $j \leftarrow 1$  até  $n$  faça
13:       Escolhe o alelo do filho, com probabilidade  $p_a > 0.5$  de ser o do pai Elite
14:     fim para
15:     Adicione o filho a população da nova geração
16:   fim para
17: fim enquanto
18: devolve Melhor solução encontrada
```

---

### 3.1.4 Especificidades da Poluição Difusa:

A seguir são discutidas as especificidades para aplicar o BRKGA a otimização de poluição difusa.

### 3.1.5 Restrições

As restrições são características específicas do problema que restringem o domínio de busca do algoritmo. Utilizamos nesse trabalho rios enquadrados na Classe 2. Nesta classe as seguintes restrições devem ser consideradas:

- a concentração de DBO no rio não pode ultrapassar  $5mg/L$  em nenhum ponto;
- a concentração de OD não pode ser inferior a  $5mg/L$  em nenhum ponto;
- a concentração de Amônia total não ultrapassar  $3,7mg/L$  em nenhum ponto (para rios com  $PH \leq 7,5$ );
- a concentração de Nitrito não pode ultrapassar  $1mg/L$  em nenhum ponto;
- a concentração de Fósforo inorgânico não pode ultrapassar  $0,05mg/L$  em nenhum ponto;

- a concentração de Nitrato não pode ultrapassar  $1\text{mg/L}$  em nenhum ponto;

Soluções que não atendem as restrições, denominadas inválidas, não são inseridas na população, não importando o momento em que são geradas. Assim, toda vez que uma nova solução é gerada, seja por cruzamento ou por mutação, são verificadas as restrições. A verificação é realizada através de uma chamada ao modelo de qualidade de água QUAL-UFMG, que por sua vez, trata as contribuições difusas laterais. Para que um rio seja enquadrado corretamente, deve ser verificado a concentração dos poluentes em todo o sua extensão. Toda vez que uma solução inválida é gerada, ela é descartada e uma nova solução é gerada, esse processo ocorre até uma quantidade de vezes pré definida, se nenhuma solução válida for encontrada, o método que gerou esse resultado inválido é reexecutado.

### 3.1.6 Representação

Como descrito anteriormente um cromossomo é uma representação de uma possível solução para o problema a ser decodificada para gerar a solução real. As chaves do BRKGA são números reais de 0 a 1. Desse modo, na representação utilizada para poluição pontual, cada chave do cromossomo representa uma eficiência de remoção para um lançamento específico. Na poluição difusa as chaves também representam eficiências de remoção, porém são relacionadas a diferentes poluentes e diferentes sub-bacias. O cromossomo difuso é uma matriz, onde nas linhas temos as remoções por sub-bacia e nas colunas temos as remoções por poluente. Para decodificar essa solução, é necessário fazer uma chamada ao QUAL-UFMG, uma vez que a saída do BRKGA deve indicar que as restrições de concentração foram atendidas.

### 3.1.7 Função objetivo

No BRKGA aplicado a poluição pontual a função objetivo, apresentada por Reis & Mendonca (2015), obteve os melhores resultados (Ribeiro, 2018). Esta função tem por objetivo minimizar o conjunto de  $n$  eficiências:

$$\min |F(x)| = \sum_{i=1}^n E(i) \quad (1)$$

sendo  $E(i)$  a eficiência do  $i$ -ésimo tratamento de efluente.

A função objetivo usada para a poluição difusa é similar a Eq.(1) acrescentando apenas pesos para os diferentes poluentes:

$$\min |F(x)| = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E[i][j] * P[j] \quad (2)$$

onde  $E[i][j]$  equivale a eficiência de remoção do  $j$ -ésimo poluente (DBO, Amônia, Nitrito e Fósforo inorgânico) na  $i$ -ésima sub-bacia e  $P[j]$  equivale ao peso atribuído ao  $j$ -ésimo poluente. Em todas as simulações desse trabalho foi adotado  $P[j] = 0,25$  para todo poluente.

As simulações são realizadas em passos sequenciais de tempo, sendo primeiramente identificadas as eficiências mínimas necessárias para o enquadramento das fontes pontuais, e uma

vez fixada estas, procede-se a otimização da identificação das reduções de cargas difusas para que em ambos períodos (seco e chuvoso) o curso d'água modelado possa estar de acordo com os usos desejados e consequentemente com a legislação vigente. Assim como em (Ribeiro, 2018) foi realizado um estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Pardo. Esse rio nasce em Ibatiba-ES e é um importante tributário do rio Itapemirim, localizado no sul do estado do Espírito Santo (Bringer, 2017). Esta bacia foi escolhida em virtude dos trabalhos já realizados por outros trabalhos desenvolvidos no contexto do PPGEA/UFES, tais como (Bringer, 2017) e (Reis & Mendonça, 2015) que acabaram por levantar informações necessárias as simulações modeladas.

### **3.2 Desenvolvimento da GUI e Sistema de Suporte a Decisão - SIMPPOD**

A GUI (*Graphical User Interface*) como o próprio nome já diz é a interface no qual o usuário vai interagir com o código implementado. Seu objetivo é tornar a execução do código mais simples e intuitiva, em comparação com a linha de comando padrão do Python, fazendo com que a ferramenta seja mais acessível, principalmente para usuários da sociedade civil que não estão habituados a programação. Utilizamos para programação da GUI a biblioteca Tkinter (Lutz & Ascher, 2007) que é uma biblioteca nativa do Python específica para o desenvolvimento de interfaces gráficas.

Nas Figs. 1, 2 e 3 apresentamos as três principais telas da GUI proposta. A Fig. 1 mostra a tela de apresentação do Sistema de Modelagem de Poluição Pontual e Difusa (SIMPPOD), contendo dois botões: um *Sobre o SIMPPOD* que abre uma janela auxiliar contendo uma breve descrição da ferramenta, e outro *Simulações* que dispara as escolhas para a simulação.





Figura 1: Tela de Apresentação do SIMPPOD

A segunda tela organiza toda a entrada de dados da simulação. Nela é possível escolher a simulação da poluição difusa, pontual e de ambas através dos *checkboxes* que permitem ao usuário ativar/desativar qualquer um dos módulos. Também é possível abrir os arquivos de entrada para os módulos *Poluição Difusa*, *QUAL-UFMG* e *BRKGA*. No canto inferior direito dessa tela temos o botão *Executar*, que inicializa a simulação e dispara a tela seguinte.

**Seleção os Arquivos de Entrada:**

**Poluição Difusa:**  
☐ Executar Poluição Difusa  
Selecione a Entrada\_hidro.csv...   
Selecione a Entrada\_cme.csv...   
Selecione a Entrada\_cn.csv...   
Selecione a Entrada\_usos.csv...

**QUAL-UFMG:**  
☐ Executar QUAL-UFMG  
Selecione a Entrada\_Pontual.txt...   
Selecione a Entrada\_Constantes.txt...   
Qual a classe do Rio?  
☒ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4

**BRKGA:**  
☐ Executar BRKGA  
Selecione a Entrada\_BRKGA.txt...   
Modo de execução do BRKGA:  
☒ Pontual ☐ Difuso ☐ Pontual + Difuso  
Selecione o caminho para as Saidas...

Figura 2: Tela da Simulação: tela em que os arquivos de entrada são lidos, são setados quais módulos serão executados e a simulação é iniciada.

A terceira tela mostra as interações de saída. Nela observamos uma caixa de texto que exhibe diversas mensagens sobre a simulação em execução e vários botões que exibem gráficos de todos os poluentes nos cenários: Cenário Base Pontual, Cenário Otimizado Pontual, Cenário Base Difuso e Cenário Otimizado Pontual.



Figura 3: Tela dos Resultados: informações sobre as saídas são exibidas na caixa de texto e gráficos podem ser acessados através dos botões.

## 4 Resultados e Discussão

Nas simulações realizadas o modelo de poluição difusa calcula concentrações médias para 4 poluentes, a DBO - demanda bioquímica de oxigênio, o chamado Nitrogênio Kjeldahl (NTK) que consiste na soma entre o Nitrogênio Orgânico e o Nitrogênio Amoniacal, o Nitrato (NOX) e o Fosforo Inorgânico (PINORG) Dividimos a bacia principal em 7 sub-bacias, as CME's ( $mg/L$ ) e vazões distribuídas encontradas ( $m^3/s$ ), utilizando uma chuva de 40 mm estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de saída do Modelo de Poluição Difusa para o cenário base. As concentrações são dadas em  $(mg/L)$ , e a vazão em  $(m^3/s)$

Nome	DBO	NTK	NOX	PINORG	Vazão Distr.
sub-bacia 1	7,3739	1,0248	0,9348	0,0574	0,00865
sub-bacia 2	6,8681	1,0627	0,9752	0,0482	20,470
sub-bacia 3	7,7255	0,9525	0,8774	0,0578	0,0
sub-bacia 4	7,4466	1,1033	1,0244	0,0502	0,8291
sub-bacia 5	8,2877	0,8132	0,6848	0,0797	0,0122
sub-bacia 6	8,4827	0,9347	0,9134	0,0570	14,873
sub-bacia 7	7,7786	0,8333	0,7547	0,0641	66,849

Esta caracterização física é adotada para todos os testes realizados. Quanto a vazão, a sub-bacia 2 não deságua diretamente no rio e sim em outra sub-bacia, transferindo toda sua vazão para esta, já as subs 6 e 7 são sub-bacias que desaguam diretamente no rio porém o fazem de modo concentrado, afluindo numa única célula lateral.

## 4.1 Testes Realizados

Realizamos testes em três cenários básicos: o primeiro cenário é o base mostrado na seção anterior, considerando uma chuva de 40  $mm$ , chamado de Cenário 1, um segundo cenário em que aumentamos a chuva para 100  $mm$  chamado Cenário 2, e um terceiro cenário onde estimou-se um aumento de 20% na taxa de urbanização da bacia, o Cenário 3. Os seguintes parâmetros foram fixados nos testes realizados:

- O critério de parada usado foi o de número máximo de iterações = 100
- O parâmetro  $P_a$  do BRKGA = 0,7
- Os pesos para os poluentes na F.O. são  $P[j] = 0,25$  ou seja, todos os poluentes tem mesmo peso
- Os parâmetros  $P_e, P_m$  do BRKGA são respectivamente 0,3 e 0,1

## 4.2 Resultados obtidos

### 4.2.1 Cenário 1

Exibimos na Fig. 4 o resultado para o poluente DBO em três casos, em azul o caso em que aplicamos apenas as reduções pontuais identificadas previamente pelo algoritmo de otimização, em amarelo temos a poluição pontual reduzida e a entrada da poluição difusa não otimizada e

por fim, em vermelho o cenário otimizado para ambas cargas. Observamos nesta figura que para o Rio Pardo apenas a otimização de fontes pontuais não é satisfatória.

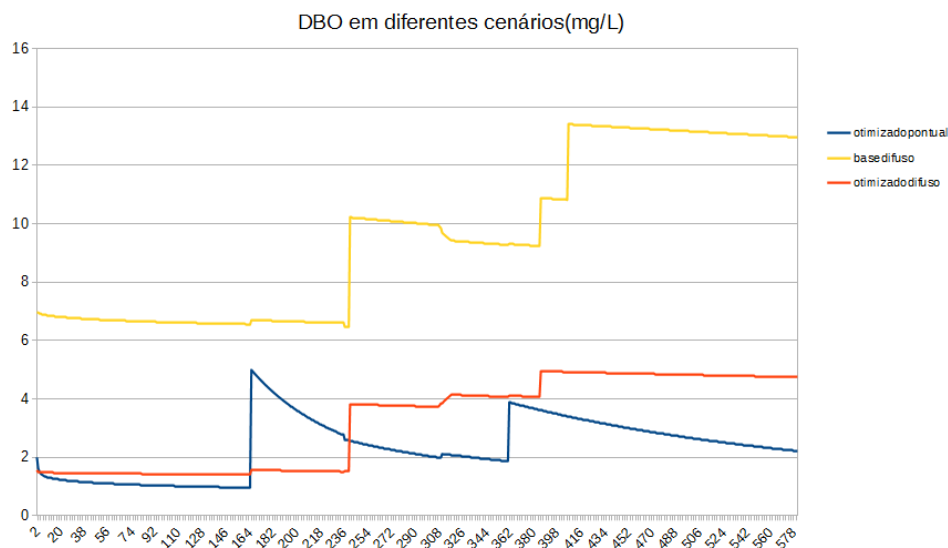


Figura 4: Gráfico que mostra a DBO nos casos otimizado pontual, base difuso e otimizado difuso para o Cenário 1

As eficiências encontradas para remoção de DBO nesse cenário nas 7 sub-bacias, respectivamente, são: 79,34%, 30,72%, 15,76%, 12,41%, 77,17%, 26,35%, 61,07%. As remoções para os outros poluentes nunca passam de 20%, logo esse é um caso simples no que tange a otimização de Nitrogênio e Fósforo.

#### 4.2.2 Cenário 2

O Cenário 2 (precipitação igual a 100mm) obteve resultados similares ao Cenário 1. Na Fig. 5 observamos que esse aumento na precipitação tem pouca influência na concentração de DBO. Em azul apresenta o caso em que aplicamos as reduções pontuais e não consideramos poluição difusa. Em laranja apresenta o caso com poluição difusa e com otimização da poluição pontual. Em amarelo apresenta o caso onde as duas poluições são otimizadas.

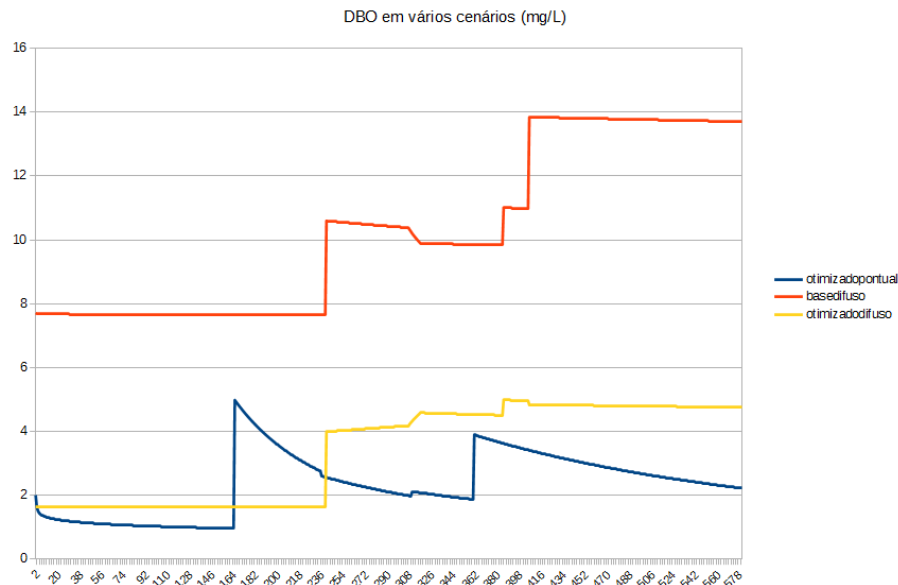


Figura 5: Gráfico que mostra a DBO nos casos otimizado pontual, base difuso e otimizado difuso

Ao contrário do que se pode imaginar inicialmente, aumentar a chuva não aumenta necessariamente a concentração de poluentes, uma vez que com o incremento de chuva, proporcionalmente aumenta-se o volume de água total do rio. Podemos perceber também que quando otimizamos a poluição difusa nesse caso, o cenário otimizado fica mais próximo do limite da Classe 2 ( $DBO < 5mg/L$ ) do que o cenário anterior. As reduções encontradas nesse caso são em média menores do que as encontradas no cenário com menos chuva, o que também explica a concentração mais próxima da Classe 2.

As Eficiências encontradas para remoção de Nitrogênio e Fósforo também não passam de 20% nesse caso. Novamente, é insuficiente otimizar apenas a poluição pontual para o enquadramento em Classe 2.

#### 4.2.3 Cenário 3

Para o Cenário 3 o algoritmo não encontrou solução que preserve o enquadramento em Classe 2, pois o fósforo na Classe 2 é um poluente muito sensível, de baixos valores admissíveis ( $P_{inorg} < 0,05mg/L$ ), e com a urbanização os valores de fósforo crescem excessivamente, inviabilizando o algoritmo de encontrar as eficiências dentro da faixa estipulada de remoção (0 a 90%). Portanto o enquadramento para este exemplo só foi possível para a Classe 3 onde ( $DBO < 10mg/L$ ). A Fig. 6 mostra o perfil de DBO para o caso em que aplicamos as reduções pontuais e consideramos poluição difusa (em azul), o caso com poluição difusa e com otimização da poluição pontual (em laranja) e o caso onde as duas poluições são otimizadas (em amarelo).

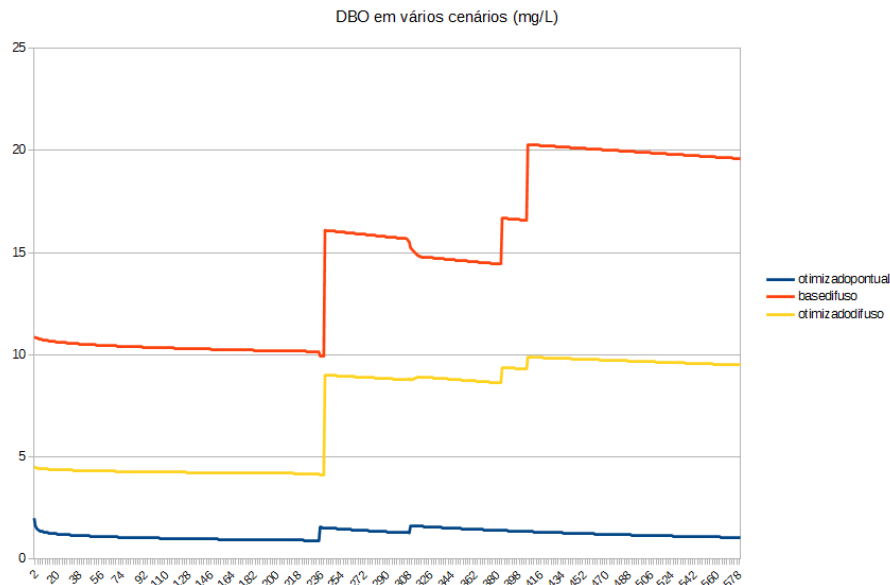


Figura 6: Gráfico que mostra a DBO nos casos otimizado pontual, base difuso e otimizado difuso

Mesmo considerando o enquadramento em Classe 3, as remoções para o Fosforo encontradas foram maiores do que nos Cenários não urbanizados, são elas: 61,51%, 30,23%, 36,42%, 11,81%, 75,22%, 10,19%, 46,49%

## 5 Conclusões

Apenas a redução de fontes pontuais não é capaz de garantir o enquadramento de um determinado curso d'água, o BRKGA obteve ótimos resultados na identificação de remoção de poluição difusa assim como para cargas pontuais. O SSD se mostrou uma excelente alternativa para que a modelagem e otimização de qualidade de água em rios alcance mais usuários.

Desse modo como metas futuras temos, estudo de novas funções objetivo e de novos critérios de parada e possivelmente, de novas meta-heurísticas para o problema. Além disso, testes com maior variação dos parâmetros e com cenários diferentes. Desejamos também aprimorar a interface para que ela fique cada vez mais funcional e intuitiva.

## Referências

- Bringer, L. M. (2017). Seleção de sistemas de tratamento de esgotos no Âmbito de bacias hidrográficas a partir do emprego de modelagem de qualidade, otimização e da análise multi-objetivo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo.
- Campos, F. F. (2007). *Algoritmos numéricos*. Rio de Janeiro: LTC.

- Gonçalves, J. F. & Resende, M. G. (2011). Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization. *Journal of Heuristics*, 17.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1st edition.
- Lutz, M. & Ascher, D. (2007). *Aprendendo Python*. Porto Alegre: Bookman.
- Prodanoff, J. H. A. (2005). *Avaliação da Poluição Difusa Gerada por Enxurradas em Meio Urbano*. PhD thesis, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ. Tese de Doutorado em Engenharia Civil.
- Reis, J. A. T. & Mendonça, A. S. F. (2015). Seleção de eficiências de tratamento de esgotos a partir da manutenção de equidade entre sistemas de tratamento - uma abordagem para o gerenciamento de bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20.
- Ribeiro, L. F. O. (2018). *Implementação de rotinas de Otimização de Ferramentas de Controle de Poluição em Rios e Córregos - Relatório final de iniciação científica*. Technical report, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES.
- Santos, L. C. C. (2010). Estimativas de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo.
- von Sperling, M. (2014). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Departamento de engenharia sanitária e ambiental.