

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LUCCAS MAGALHÃES PEIXOTO**

**ABORDAGEM DE VISÃO COMPUTACIONAL APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE  
MICROPLÁSTICOS EM AMOSTRAS DE ÁGUA**

**PONTA GROSSA  
2025**

**LUCCAS MAGALHÃES PEIXOTO**

**ABORDAGEM DE VISÃO COMPUTACIONAL APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE  
MICROPLÁSTICOS EM AMOSTRAS DE ÁGUA**

**Computer vision approach applied to the identification of microplastics in  
water samples**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento de Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Cristhiane Gonçalves.

**PONTA GROSSA**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LUCCAS MAGALHÃES PEIXOTO**

**ABORDAGEM DE VISÃO COMPUTACIONAL APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE  
MICROPLÁSTICOS EM AMOSTRAS DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento de Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Cristhiane Gonçalves.

Data de aprovação: 12/junho/2025

---

Cristhiane Gonçalves  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Marcella Scoczynski Ribeiro Martins  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Edison Luiz Salgado Silva  
Mestrado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA  
2025**

Em memória amorosa de Paula Tarcitano, a razão  
pela qual não desisti até hoje (1993-2023).

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente estes poucos e breves parágrafos não serão capazes de expressar meus sentimentos a todas as pessoas importantes que já passaram pela minha vida. Apesar disso, sinto-me na obrigação de citar algumas delas. Mesmo que algumas não façam mais parte da minha vida cotidiana, tiveram importância crucial para que eu não desistisse da jornada difícil que culminou neste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Jussara e Adalberto, por me darem condições de concluir um curso superior.

Agradeço à minha orientadora Profa. Dra. Cristhiane Gonçalves, pela sabedoria, paciência e gentileza que me guiaram durante a execução desse trabalho.

Aos meus amigos de curso, em especial Lucas Cominesi, Regis Land, Wadson Mota, Mattheus Tobias, Matheus Gomes, Murilo Henrique, Jackson Valle, Marcelo Ricardo, Kaiky Aleixo e Samuel Schwiderke.

Agradeço especialmente os colegas de Engenharia de Bioprocessos Rafael Lacoski, Victória Santana e Giovanna Pavlak, por prestarem auxílio fundamental à pesquisa.

Aos amigos Juliana Fadel, Mariana Mulinari, Verônica Silva, Gabriela Montemor, Rafael Arnoso, Paula Tarcitano, Lucas de Castro, Lara Dutra, Lucas Bunn, Ana Branco, Matheus Trombetti, Willian Neves, Augusto César Barreiro, Cristine Giugni, Davi Bogdanovicz e Dominique Moraes, que compartilharam bons e maus momentos comigo durante essa jornada.

Aos meus supervisores de estágio, Isaías Vandoski e Mozart Carlos Pinto, pela oportunidade de trabalho e pelo conhecimento passado durante sua realização.

Aos professores Fluvio Alves, João Guilherme Zelcovit, Ana Paula Barros, Sani da Silva, Ednei Felix Reis, Marcos César Vergés, Virginia Helena Varotto, Eloi Agostini, Hugo Siqueira, Marcella Scoczynski, Pércio Karam, Edison Salgado e Márcia Lopes, que me marcaram com suas metodologias e me fizeram crescer como estudante e como pessoa.

A todos os funcionários dos setores administrativos da UTFPR-PG, em especial os senhores Felipe Mezzadri e Marcio Pontes, por terem prestado tanta ajuda em tempos de dificuldade.

Enfim, a todos os que me foram queridos e me acompanharam durante todos esses anos.

*“Meditamos no fogo sagrado, Agni,  
o guardião dos rituais e da transformação,  
que queima a ignorância e ilumina o caminho do  
conhecimento.”*

— Agni Mantra, Rig Veda (X.1.1)

(Tradução adaptada)

## RESUMO

O curso de graduação em Engenharia Elétrica é agraciado com seu grande potencial de versatilidade para aplicações, que vão desde sistemas macros de distribuição de energia até microssistemas de processamentos de sinais. O uso de instrumentação eletrônica é imprescindível às técnicas de aferição e medição em áreas como a Engenharia Biomédica, por exemplo. Em conjunto com outras áreas de conhecimento, este trabalho terá como objetivo principal a utilização de microscopia eletrônica e processamento de imagens através da ferramenta MATLAB para a identificação da presença de microplásticos em amostras de água, colocando em evidência o crescente problema relacionado à contaminação alimentícia percebido e comentado nos últimos anos.

Palavras-chave: Microscopia; Instrumentação; MATLAB; Microplásticos; Biomédica; Saúde; Visão Computacional.

## **ABSTRACT**

The undergraduate course in Electrical Engineering is distinguished by its great potential for versatility in applications, ranging from macro systems for power distribution to microsystems for signal processing. The use of electronic instrumentation is essential for calibration and measurement techniques in fields such as Biomedical Engineering, for example. In conjunction with other areas of knowledge, this work will have as its main objective the use of electron microscopy and image processing through the MATLAB tool to identify the presence of microplastics in water samples, highlighting the growing issue of food contamination that has been increasingly observed and discussed in recent years.

Keywords: Microscopy; Instrumentation; MATLAB; Microplastics; Biomedical; Health; Computational Vision.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 - Resíduos plásticos às margens do reservatório Guarapiranga, São Paulo, Brasil.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2 - Porcentagem da quantidade total de plásticos produzidos durante o ano de 2015.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 3 - Ilustração do caminho para a bioacumulação dos microplásticos nas teias alimentares dos mamíferos aquáticos .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4 - Desenho esquemático mostrando como as redes de plâncton são utilizadas para coleta de microplásticos presentes em águas superficiais.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 5 - Esquemática do método de coleta por coluna de água com uso de rede de plâncton para análise de contaminação por microplásticos .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 6 - Esquemática do método de coleta para amostras de solo e sedimento profundos em sistemas aquáticos para análise de contaminação por microplástico com o auxílio de pegadores de fundo e garrafas amostradoras.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 7 – Processo de produção de uma imagem digital .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 8 – Imagem contínua projetada e resultado de sua amostragem e quantização.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 9 - Ilustração dos tipos de vizinhança entre pixels .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 10 - Convolução entre máscara e imagem sintética.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 11 - Antes e depois da aplicação do filtro Gaussiano em imagem ruidosa em tons de cinza .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 12 - Antes e depois da aplicação do filtro Gaussiano em imagem ruidosa colorida .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 13 - Diferença entre técnicas de limiarização com diferentes limiares .</b>	<b>35</b>
<b>Figura 14 - Segmentação por método de Otsu .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 15 - Exemplo de detecção de bordas pelo método de Canny .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 16 - Antes e depois da segmentação por watershed .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 17 - Plástico moído em malha 35 .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 18 – Plástico moído em malha 32.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 19 – Plástico moído “RESTO” .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 20 - Microplásticos de ~425 µm diluídos em água destilada. Resolução: 640x480, 96 dpi .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 21 - Microplásticos de ~450 µm diluídos em água destilada. Resolução: 640x480, 96 dpi .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 22 - Microplásticos sem tamanho definido diluídos em água destilada. Resolução: 640x480, 96 dpi.....</b>	<b>51</b>

<b>Figura 23 - Fluxograma para códigos de detecção de microplásticos.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 24 – Malha 32 pós-processamento em binarização adaptativa .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 25 - Malha 32 segmentada em binarização adaptativa.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 26 - Histograma da Malha 32 pós-processamento em binarização adaptativa.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 27 - Malha 35 pós-processamento em binarização adaptativa.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 28 - Malha 35 segmentada em binarização adaptativa.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 29 - Histograma da Malha 35 pós-processamento em binarização adaptativa.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 30 - Resto pós-processamento em binarização adaptativa.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 31 - Resto segmentada em binarização adaptativa .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 32 - Histograma da Resto pós-processamento em binarização adaptativa.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 33 – Malha 32 pós-processamento em Otsu .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 34 – Malha 32 segmentada em Otsu .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 35 – Histograma da Malha 32 pós-processamento em Otsu .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 36 – Malha 35 pós-processamento em Otsu .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 37 – Malha 35 segmentada em Otsu .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 38 – Histograma da Malha 35 pós-processamento.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 39 – Resto pós-processamento em Otsu .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 40 – Resto segmentada em Otsu .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 41 – Histograma da Resto pós-processamento em Otsu .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 42 – Malha 32 pós-processamento em Canny .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 43 – Malha 32 segmentada em Canny .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 44 – Histograma da Malha 32 pós-processamento.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 45 – Malha 35 pós-processamento em Canny .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 46 – Malha 35 segmentada em Canny .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 47 – Histograma da Malha 32 pós-processamento em Canny.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 48 – Resto pós-processamento em Canny .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 49 – Resto segmentada em Canny.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 50 – Histograma da Resto pós-processamento em Canny.....</b>	<b>71</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Comparativo entre técnicas de detecção.....</b>	<b>72</b>
---	-----------

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 - Avaliação qualitativa de exatidão e precisão das técnicas de detecção.....</b>	<b>73</b>
--	-----------

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Problema .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução aos microplásticos.....</b>	<b>16</b>
<b>4.2</b>	<b>Protocolos para caracterização de microplásticos na natureza .....</b>	<b>19</b>
4.2.1	Amostras de águas superficiais.....	20
4.2.2	Amostra de colunas de água .....	21
4.2.3	Solo e sedimento .....	22
<b>4.3</b>	<b>Processamento das amostras.....</b>	<b>23</b>
4.3.1	Análises físicas.....	24
<b>4.4</b>	<b>Imagens digitais .....</b>	<b>25</b>
4.4.1	Amostragem e quantização.....	26
4.4.2	Representação do pixel em valores de intensidade .....	27
4.4.3	Noções básicas de relacionamentos entre <i>pixels</i> .....	28
4.4.4	Histogramas .....	29
<b>4.5</b>	<b>Processamento de imagens .....</b>	<b>29</b>
<b>4.6</b>	<b>Filtragem espacial .....</b>	<b>31</b>
4.6.1	Filtro Gaussiano .....	31
<b>4.7</b>	<b>Segmentação por limiarização .....</b>	<b>33</b>
4.7.1	Limiar global .....	34
4.7.2	Limiarização adaptativa.....	34
4.7.3	Técnica de Otsu .....	35
<b>4.8</b>	<b>Detecção de bordas .....</b>	<b>37</b>
4.8.1	Método de Canny .....	38
<b>4.9</b>	<b>Segmentação morfológica por bacias hidrográficas .....</b>	<b>41</b>
4.9.1	Fundamentos matemáticos da técnica de bacias hidrográficas .....	41
<b>4.10</b>	<b>Processamento computacional com MATLAB .....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>45</b>

<b>5.1</b>	<b>Revisão de literatura:</b> .....	<b>45</b>
<b>5.2</b>	<b>Preparação dos equipamentos:</b> .....	<b>45</b>
<b>5.3</b>	<b>Preparação das amostras:</b> .....	<b>45</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise e comparação:</b> .....	<b>45</b>
<b>5.5</b>	<b>Elaboração do relatório:</b> .....	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS ESPERADOS</b> .....	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>ANÁLISES LABORATORIAIS</b> .....	<b>47</b>
<b>7.1</b>	<b>Resultados preliminares</b> .....	<b>51</b>
7.1.1	Estrutura e lógica dos scripts de detecção .....	52
7.1.2.	Binarização adaptativa .....	54
7.1.3	Técnica de Otsu .....	60
7.1.4.	Técnica de Canny.....	66
<b>7.2</b>	<b>Resultados e discussões</b> .....	<b>72</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE A - CÓDIGO DE DETECÇÃO DE MICROPLÁSTICOS: LIMARIZAÇÃO ADAPTATIVA</b> .....	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE B - CÓDIGO DE DETECÇÃO DE MICROPLÁSTICOS: OTSU</b> .....	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE C - CÓDIGO DE DETECÇÃO DE MICROPLÁSTICOS: CANNY</b> .....	<b>88</b>
	<b>ANEXO A – LEI N. 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998</b> .....	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A história do plástico tem início em 1862 com o químico Alexander Parkes, que apresentou em uma exposição em Londres a sua parkesiana, um material orgânico derivado da celulose com características de flexibilidade e impermeabilidade para competir com a borracha. Apesar de seu marketing ter falhado, seu pontapé inicial abriu as portas para a reinvenção e aprimoramento do material, até que, no início do século XX, o primeiro plástico totalmente sintético e capaz de ser produzido em larga escala surgiu com o também químico Leo Hendrik Baekeland, chamado de “o pai da indústria do plástico” (ANDRADY; NEAL, 2009). Sua criação se chamava baquelite; em outras palavras, a primeira resina sintética a partir de uma combinação de fenol e formaldeído.

A invenção da resina sintética teve impactos avassaladores durante todo o resto do século XX devido sua grande versatilidade e preço competitivo, vindo a substituir a largos passos outros materiais como vidro, madeira e papel em várias aplicações (HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009). Após a criação e aperfeiçoamento da técnica de polimerização, o plástico passou por mais um salto, dando origem a novos materiais como PVC, PP, PE etc.

Os microplásticos, por sua vez, são detritos plásticos minúsculos vindos da fragmentação de materiais plásticos maiores. São encontrados, na maioria dos casos, em forma de partículas, fibras ou grânulos de tamanho menor ou igual a 5mm (GESAMP, 2015). Foram detectados no meio-ambiente pela primeira vez em 1970 e rapidamente passaram a ser tornar um fator de preocupação para os ecossistemas marinhos, sobretudo. O impacto mais comum está relacionado à ingestão do material por vida marinha, o que pode causar uma gama de problemas que vão desde a lesão de órgãos até mesmo à intoxicação dos animais, visto que esses materiais possuem uma grande capacidade de absorção de compostos tóxicos, como mercúrio e cádmio (ROCHMAN et al., 2013).

O Brasil é o quarto maior produtor de plásticos no mundo, com cerca de 12 milhões de toneladas por ano, e uma taxa de reciclagem de apenas 1,3% contra a média mundial, também baixa, de 9% (WWF, 2019). Boa parte do descarte de plástico vai parar nas costas do país, com análises preliminares sugerindo que São Paulo, Paraná, Sergipe e Bahia estão entre os estados mais poluídos por este agente (ABRELPE, 2022).

## 1.1 Contextualização

Nos seres humanos, os efeitos da ingestão de microplásticos também são preocupantes. Já é comprovado, por exemplo, que a acumulação de microplásticos no organismo pode ser responsável por um risco até 4 vezes maior de infarto em pessoas contaminadas pelas partículas, assim como também podem gerar distúrbios endócrinos e queda de fertilidade. Um outro estudo, ainda em fase de testes em camundongos, sugere que os microplásticos podem ser neurotóxicos. Ou seja, podem ter impacto negativo na saúde mental e neurológica em pessoas afetadas (CNN BRASIL, 2024; THE CONVERSATION, 2024).

Os microplásticos chegam aos seres humanos de diversas formas diferentes, seja através da bioacumulação pelo consumo de animais marinhos que já carregam o material em seus organismos, pela via olfativa por meio de ar poluído e até mesmo pelo uso de produtos de beleza e estética, que contém microplásticos em suas composições. Também existe a ingestão indireta por conta das embalagens plásticas, geralmente as feitas de material PET ou PP, materiais com maior tendência a liberar microplásticos ao permanecer em contato com os produtos alimentícios.

## 1.2 Problema

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, analisaremos com um microscópio simples e de baixo custo diferentes amostras de água destilada com microplásticos moídos, e será quantificado o número de partículas presentes e observáveis através de um algoritmo, enquanto se lida com as limitações técnicas tanto do microscópio quanto das amostras, para assim determinarmos qual o método de processamento de imagens mais apropriado para detectar esse tipo de partícula.

## **2 JUSTIFICATIVA**

A crescente presença de microplásticos no meio-ambiente tem se tornado uma preocupação de nível global, devido seus impactos negativos na saúde humana e nos ecossistemas aquáticos. Como estas partículas são majoritariamente invisíveis a olho nu, é interessante desenvolver métodos eficazes para detectá-las e quantificá-las. Este trabalho busca contribuir para o aumento de conscientização sobre os riscos associados a este material, além de explorar a aplicação de dispositivos acessíveis como o MATLAB para otimizar a análise dessas partículas.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo geral**

Analisar amostras de água potável com um microscópio para estimar a quantidade de microplásticos presentes.

### **3.2 Objetivos específicos**

Explicar, por meio de revisões bibliográficas, os perigos dos microplásticos à saúde humana e marinha, analisar amostras de água através de um microscópio eletrônico, processar as imagens através do MATLAB para melhor identificação dos materiais e, por fim, a identificação do método de processamento de imagens mais apropriado para detectar partículas microscópicas em um sistema viável e barato.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 Introdução aos microplásticos

De acordo com estudos nos últimos anos, mais de 320 milhões de toneladas de plástico são produzidas por ano em todo o mundo (WRIGHT; KELLY, 2017), e taxa de produção mundial de plásticos é maior que a maioria dos outros materiais sintéticos produzidos pela indústria no geral (XIA et al., 2020). Esse grande volume de produção de plástico se deve às suas vantagens em relação à durabilidade, custo-benefício, praticidade e resistência, sendo usados na indústria, na agricultura, na medicina e em produtos de uso diário. Logicamente, podemos então deduzir que, devido à imensa produção desse material, também teríamos um descarte em grande quantidade do mesmo, sobretudo em locais inadequados.

**Figura 1 - Resíduos plásticos às margens do reservatório Guarapiranga, São Paulo, Brasil**

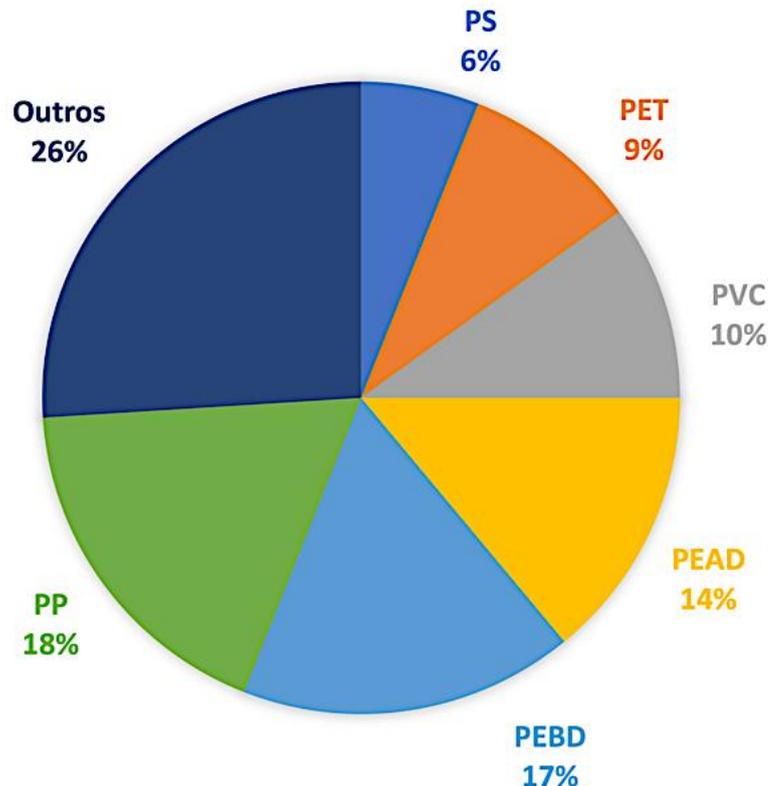


**Fonte: Acervo do Laboratório de Limnologia, IB, USP.**

Os plásticos constituem um grupo heterogêneo formado por diversos polímeros sintéticos, cuja estrutura é baseada na repetição de monômeros. Esta diversidade de polímeros foi crescendo à medida em que diferentes aplicabilidades foram

necessárias em seus processos industriais. Entre os polímeros produzidos, podemos destacar o polipropileno (PP), o polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), policloreto de vinila (PVC), tereftalato de polietileno (PET) e o poliestireno (PS) (Fig 2).

**Figura 2 - Porcentagem da quantidade total de plásticos produzidos durante o ano de 2015**



Fonte: Atlas do Plástico (2020)

Os microplásticos, segundo Massos e Turner (2017), podem ainda ser classificados de acordo com sua origem, sendo divididos entre as formas primária e secundária:

Primária: representa partículas menores ou iguais a 5 mm produzidas intencionalmente para determinadas aplicações, isto é, sem alterações. Podemos citar como exemplo as pastas de dente, sabões, cremes esfoliantes e géis de banho como produtos de higiene pessoal que podem conter microplásticos em suas composições. A principal via de contaminação de rios e outros corpos hídricos por microplásticos de forma primária é a partir de efluentes domésticos e industriais.

Secundária: representa fragmentos formados através de ação da natureza. Quando materiais plásticos são lançados e mantidos em locais inapropriados para

descarte, eles ficam sujeitos à ação de diversos fatores ambientais, como intemperismo, radiação UV e ações mecânicas como o vento, ação das ondas e atrito, que podem promover a fragmentação desses materiais em partículas cada vez menores, até atingirem o tamanho mínimo para serem consideradas microplásticos (XU et al., 2020a).

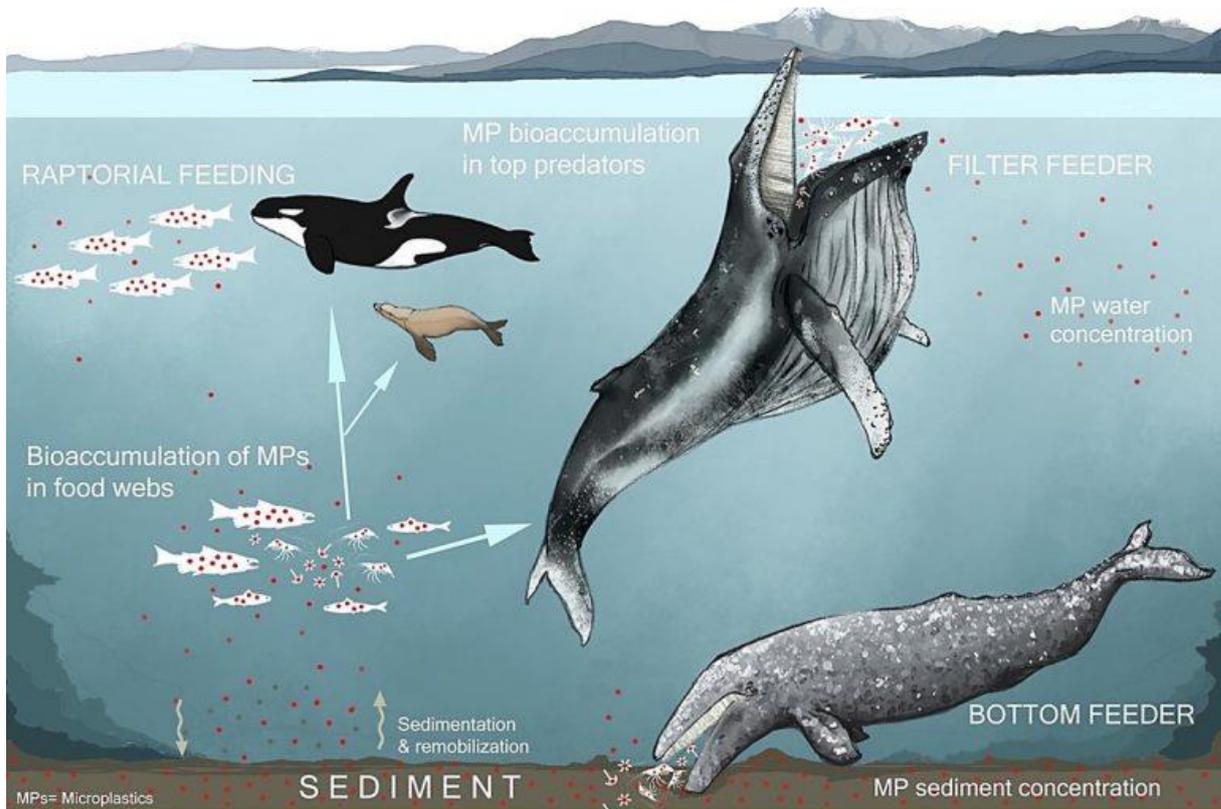
Devido à grande heterogeneidade no que diz respeito à sua forma, os microplásticos podem ser classificados também pelo seu componente morfológico (ROSAL, 2021). Sendo assim, suas principais categorias possíveis de classificação de formato são: pellets, fragmentos, filmes, linhas e espumas. Estas categorias estão associadas à origem das partículas plásticas. Os pellets, particularmente, estão mais relacionados às fontes primárias supracitadas. Por outro lado, os fragmentos, filmes, espumas e linhas são, majoritariamente, provenientes de fontes secundárias.

Os microplásticos estão amplamente distribuídos em oceanos, rios, lagos, reservatórios, estuários, regiões polares, estações de tratamento de esgoto e água potável (KASAVAN et al., 2021; WANG et al., 2022), sendo que a distribuição e o nível de contaminação nas regiões de água doce são altamente afetados pela própria ação humana. A proximidade do corpo hídrico com um centro urbano e o tamanho da população presente influencia diretamente no nível de contaminação deste corpo por microplásticos de forma diretamente proporcional (SILVA-CAVALCANTI et al., 2017; XU et al., 2020b). Fenômenos naturais como chuvas e correntes de ar também influenciam na propagação da contaminação dos corpos hídricos (KYE et al., 2023), tornando a contaminação por microplásticos em corpos hídricos muito complexa de ser mensurada de forma eficaz.

Dentre as maiores fontes de poluição por microplásticos, podemos considerar os rios como as principais, visto que são estes que transportam uma grande parcela dos materiais plásticos vindas do ambiente terrestre e os leva até os maiores ambientes marinhos. Porém, deve ser considerado que parte destes materiais acabam adentrando nas cadeias tróficas locais ou formar sedimentos nestes ambientes, especialmente em pontos com menor turbulência das águas, como os reservatórios. Dessa forma, os ecossistemas de água doce possuem uma importância particular na compreensão deste tipo de poluição (WINTON et al., 2020). Uma vez presentes nos ecossistemas aquáticos, o material acaba contaminando a vida marinha, o que inevitavelmente resulta em efeitos tóxicos em cadeia para todos os seres vivos presentes, em especial os peixes, que são muitas vezes consumidos por

seres humanos ou outros animais terrestres (M. L. Khan et al, 2024). Já é sabido que os microplásticos podem entrar na cadeia alimentar através dos níveis mais básicos, como o zooplâncton, e atinge níveis tróficos mais elevados através da bioacumulação (ZHANG et al., 2006) (Fig 3).

**Figura 3 - Ilustração do caminho para a bioacumulação dos microplásticos nas teias alimentares dos mamíferos aquáticos**



Fonte: ALAVA CALLE, Nastenka apud UBC Institute for the Oceans and Fisheries (2021).

#### 4.2 Protocolos para caracterização de microplásticos na natureza

Para avaliarmos os impactos causados pela contaminação crescente de microplásticos, deve-se, antes de tudo, garantir as formas mais apropriadas e seguras para coleta, processamento e análise. Atualmente, apesar da crescente conscientização e divulgação dos níveis de contaminação do meio-ambiente por partículas de plástico, ainda carecemos de normas que deveriam delimitar os procedimentos e métodos a serem seguidos. Mesmo assim, ainda possuímos tecnologias e métodos já empregados para a caracterização física e química das partículas, além da detecção de outros contaminantes em sua superfície. Dentre essas tecnologias, as mais usadas até o momento são: infravermelho por

transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia Raman, pirólise acoplada à cromatografia gasosa e à espectrometria de massas (py-GCMS), ionização e dessorção a laser assistida por matriz (MALDITOF) e espectroscopia no infravermelho próximo associada a imagens hiperespectrais (HSI-NIR), além de diversas técnicas de microscopia.

A falta de padronização, tanto em relação à terminologia quanto em relação à metodologia de pesquisa e classificação, pode oferecer graves prejuízos para o estudo desse material poluente, já que todos os elementos envolvidos podem ser determinantes para a compreensão da reação ambiental e biológica. Além disso, a falta de padronização pode causar a incomunicabilidade entre diferentes estudos (LI et al., 2018).

Por definição, os microplásticos são partículas de até 5 mm de diâmetro (COURTNEY; BAKER; BAMFORD, 2009), podendo ainda ser subdivididos em microplásticos pequenos (< 1 mm) e grandes (1 a 5 mm) (ERIKSEN et al., 2014, HANVEY et al., 2017). Com o avanço e difusão de pesquisas que comprovam que já existe a presença dos nanoplásticos ( $\leq 0,1 \mu\text{m}$ ) no ambiente e a necessidade de diferenciar os níveis de toxicidade entre as diferentes partículas, passou-se a considerar o tamanho mínimo para a classificação de microplásticos, sendo este na faixa de  $0,1 \mu\text{m}$  a 5 mm.

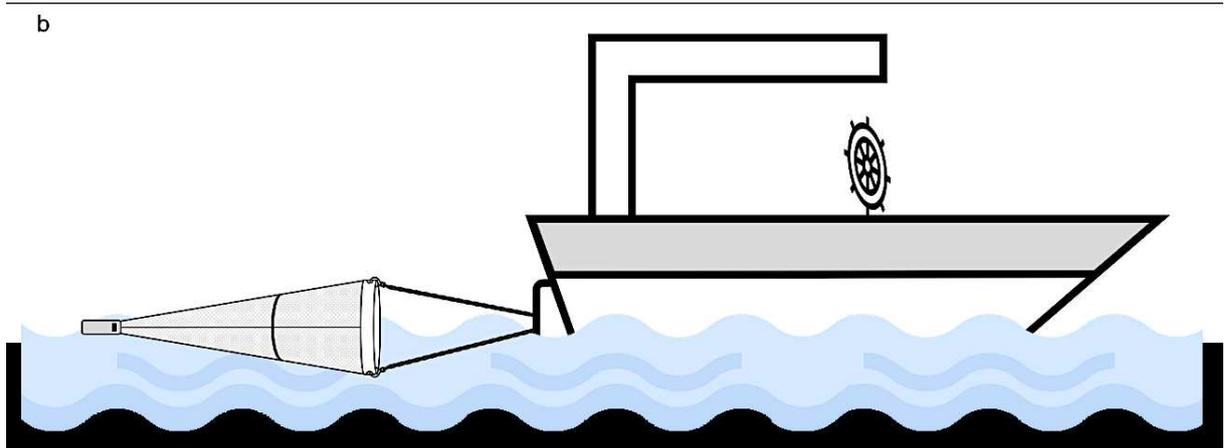
A seguir, serão apresentados os procedimentos para coleta, processamentos das amostras e análises mais comumente empregadas para o estudo de microplásticos presentes em diferentes circunstâncias. Pelo escopo desse trabalho, os procedimentos serão focados em corpos hídricos, porém já existem possibilidades para coleta em outros tipos de matrizes.

#### 4.2.1 Amostras de águas superficiais

Os procedimentos para coleta de amostras de água são diferentes em função da profundidade desejada. Geralmente, a coleta de amostras de águas superficiais pode ser feita de duas maneiras: com ou sem redução de volume *in situ* (HIDALGO-RUZ et al., 2012). O método sem redução refere-se à coleta e armazenamento de amostras em recipientes variados, como frascos de vidro ou garrafas de Van Dorn para posterior processamento em laboratório. Já o método com redução, pode ser realizado de forma manual, através do uso de uma peneira ou rede de mão (LI et al., 2018), ou através do uso de redes de plâncton ou redes de arrasto, de preferência

com o uso de um medidor de vazão de água e acoplada a veículos motorizados (Fig 4). Este último é o método mais empregado até hoje, dada sua praticidade e o volume de amostra possível de ser coletado de uma só vez (FREE et al., 2014, LI et al., 2018).

**Figura 4 - Desenho esquemático mostrando como as redes de plâncton são utilizadas para coleta de microplásticos presentes em águas superficiais**

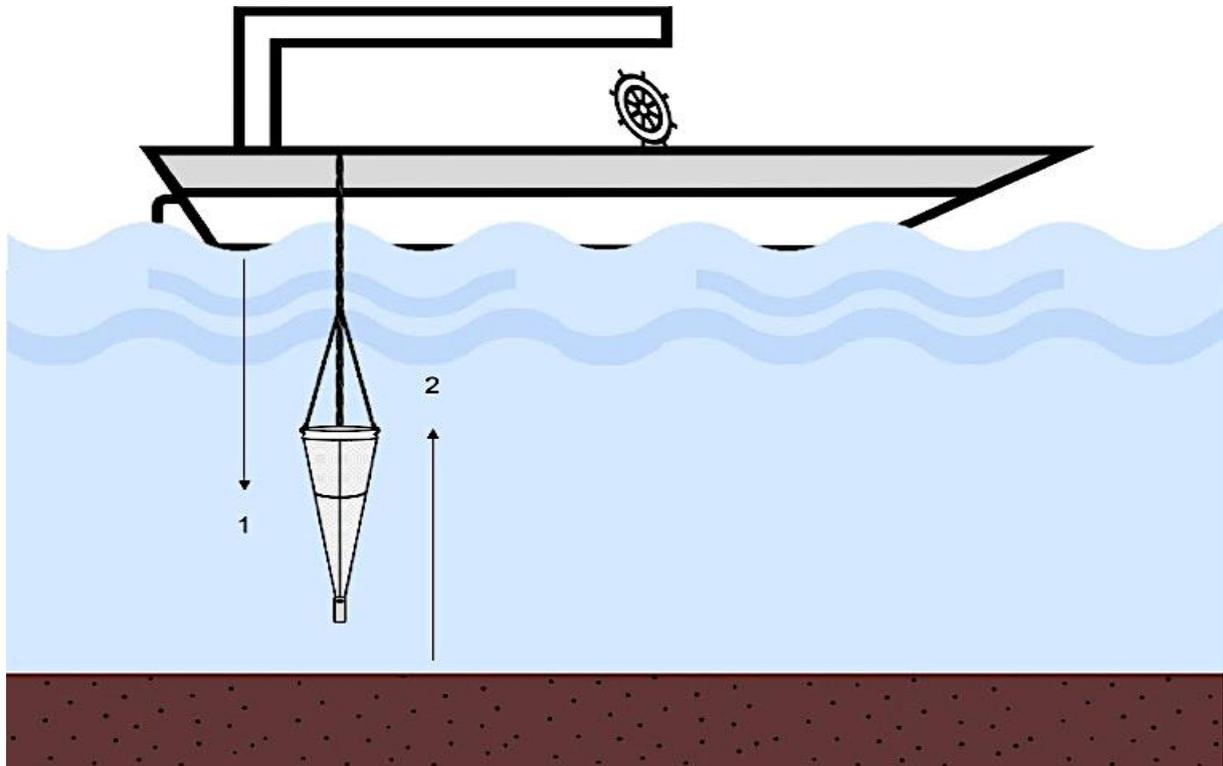


Fonte: POMPÊO et al., 2022, p. 11

#### 4.2.2 Amostra de colunas de água

Já foram realizados, em adição, alguns estudos com coletas em perfil de coluna de água, também realizados com o auxílio das redes de plâncton (GÜVEN et al., 2017, BAINI et al., 2018). Neste caso, no ponto onde a coleta é realizada, faz-se o lançamento desta rede, permitindo que a mesma afunde até a profundidade desejada, e a rede é então arrastada à superfície (Fig 5). O volume do cilindro representado pela área da boca da rede e a altura da coluna de água que a rede foi arrastada permitem calcular o volume de água que foi filtrado na coleta.

**Figura 5 - Esquemática do método de coleta por coluna de água com uso de rede de plâncton para análise de contaminação por microplásticos**



Fonte: POMPÊO et al., 2022, p. 12

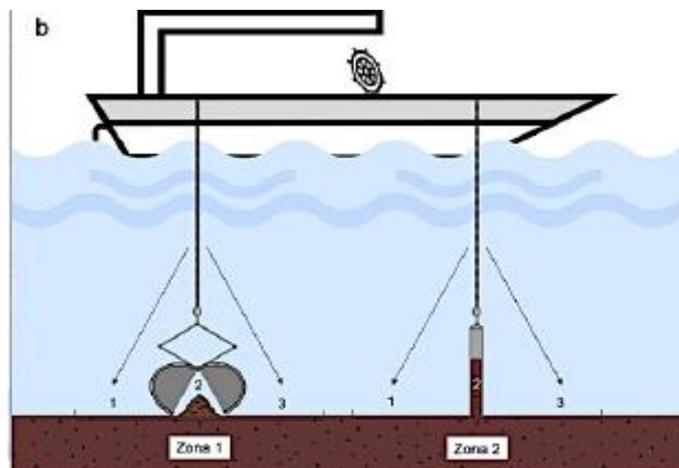
#### 4.2.3 Solo e sedimento

No geral, as coletas de amostras de materiais sólidos como areia, solo e sedimento de áreas úmidas apresentam muita semelhança. Porém, as características físicas e químicas dos diferentes tipos de solos e sedimentos, como a composição mineral, carga orgânica e frações granulométricas, são fatores importantes a serem considerados antes de se definir os métodos de coleta e de processamento dessas amostras.

Amostras de solos e sedimentos de superfície, inclusive a areia, são obtidas através da coleta direta, com o auxílio de ferramentas como pás metálicas e cilindros de solo. Após a coleta, as amostras são passadas por peneiras granulométricas específicas, cujos procedimentos de processamento podem ser tanto feitos no próprio local quanto em laboratório. Para o transporte, as amostras são acomodadas de forma que fiquem preservadas e protegidas de fontes de contaminação até que as análises sejam feitas.

A coleta de sedimentos profundos, porém, necessita de um procedimento diferente para garantir acesso às amostras. Nesses casos, a coleta deve ser feita a partir de plataformas fixas ou com veículos motorizados e com o auxílio de amostradores de fundo. Os amostradores, como pegadores Van Veen ou Ekman-Birge, ou ainda garrafas amostradoras (Fig 6), são jogados ao ponto de coleta escolhido e as amostras são, então, armazenadas para análise. (HURLEY; WOODWARD; ROTHWELL, 2018, LORENTZ et al., 2019, MANI et al., 2019b). Da mesma forma que a coleta de sedimentos de superfície, aconselha-se que as amostras de um mesmo ambiente sejam coletadas sempre com a mesma profundidade, para que os resultados sejam comparáveis entre si. Cada unidade de amostra deve ser composta por 400 g de sedimento, e este deve ser seco e pesado para o ajuste dos resultados (MASURA et al., 2015), pois o uso de amostras úmidas tem altas chances de resultar em variações e diminuir a reprodutibilidade do experimento.

**Figura 6 - Esquemática do método de coleta para amostras de solo e sedimento profundos em sistemas aquáticos para análise de contaminação por microplástico com o auxílio de pegadores de fundo e garrafas amostradoras**



Fonte: POMPÊO et al., 2022, p. 13

### 4.3 Processamento das amostras

Após a coleta, as amostras de água, solo, sedimento ou de organismos devem ser submetidas a duas etapas, sendo a primeira a de processamento ou extração e purificação, e outra de análises químicas e físicas do material e, quando necessário,

análises biológicas para determinar a presença e interação da superfície polimérica com microrganismos (LI et al., 2018). Para garantir que os resultados da próxima etapa não sejam comprometidos, é imprescindível que o processamento seja feito de forma adequada. Essas análises podem ser químicas, físicas ou biológicas, sendo escolhidas a depender exclusivamente da origem da amostra em questão. Cada método conta com um número e complexidade de etapas diferente. Pelo escopo deste TCC, focaremos somente na análise física das amostras de água.

#### 4.3.1 Análises físicas

Fazem parte das análises físicas a quantificação, a classificação por cor, o formato e o tamanho dos microplásticos. Cada uma dessas classificações possui um papel importante para o entendimento da presença nas amostras e como o material chegou até o ambiente onde a amostra foi coletada. A morfologia dos microplásticos, por exemplo, é uma propriedade importante para a compreensão dos fenômenos de transporte dessas partículas no ambiente (RUBIN; KUMAR; ZUCKER, 2021). A cor é um possível indicativo da origem do material e o tamanho e formato da partícula são fatores diferenciais para o estabelecimento dos níveis de toxicidade para a biota.

As ferramentas a serem empregadas para as análises físicas dos microplásticos sempre variam com o processamento das amostras, pois alguns processos são irreversíveis. Por exemplo, uma vez que amostras de água são filtradas em filtros de fibra de vidro para reter os microplásticos com tamanho menor que 1  $\mu\text{m}$ , essas partículas só poderão ser analisadas sobre seus respectivos filtros, não sendo mais possível aplicar um outro método de processamento. Assim, o conjunto deve ser escolhido de acordo com o objetivo do estudo.

Após o processamento das amostras e separação dos poluentes, pode-se dar início à caracterização por tamanho, que pode ser realizada diretamente nos filtros de fibra de vidro ou com o uso de peneiras granulométricas no caso de areia, solo e sedimentos secos. O tamanho, a cor e o formato dos microplásticos podem ser observados com a ajuda de uma lupa manual ou por equipamentos mais avançados, como um microscópio óptico, estereomicroscópio, microscopia eletrônica de varredura, microscópio de fluorescência, microscópio de Raman/FTIR e ionização e dessorção a laser assistida por matriz (MALDI-TOF) (SONG et al., 2015, HUPPERTSBERG; KNEPPER, 2018, MUKOTAKA; KATAOKA; NIHEI, 2021, SIEGEL et al., 2021). Amostras ricas em microplásticos grandes, de tamanho maior que 1 mm,

podem ser passados por peneiras granulométricas fixadas em tamizadora ou não, até que os fragmentos estejam separados de acordo com a abertura das malhas escolhidas (GODOY et al., 2019, STOCK et al., 2019).

O uso de corantes fluorescentes tem sido cada vez mais empregado para as análises visuais, já que é um método relativamente simples, barato e eficiente para diferenciar as partículas de outros detritos não plásticos. Microplásticos primários podem ser adquiridos comercialmente já com uma pintura fluorescente ou este processo pode ser feito em laboratório, tanto em microplásticos primários e secundários. O corante mais utilizado atualmente é o Vermelho do Nilo, e para visualização microscópica e identificação das partículas coradas, deve-se utilizar a luz azul em 470 nm e um filtro laranja (PRATA et al., 2020). A classificação e quantificação por cor também devem ser realizadas manualmente com o auxílio de lupa ou diferentes técnicas de microscopia, ou até mesmo através de contadores automáticos (ENFRIN et al., 2021).

#### 4.4 Imagens digitais

Uma imagem pode ser uma função bidimensional  $f(x, y)$ , na qual cada ponto define o nível de cinza. Nas situações em que essa função possui valores discretos e finitos, temos uma imagem digital, composta por *pixels*, que constituem o menor elemento da imagem. O processamento digital de imagens, dessa forma, envolve o uso de softwares específicos para manipular esses dados (GONZALEZ; WOODS, 2010).

A função  $f(x, y)$  pode ser caracterizada pelos seguintes componentes:

Iluminação: representada por  $i(x, y)$ , que indica a quantidade de iluminação da fonte que incide na cena sendo vista;

Refletância  $r(x, y)$ , que indica a quantidade de iluminação refletida pelos objetos na cena. Combinando as duas funções, teremos:

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y)$$

Onde:

$$0 < i(x, y) < \infty$$

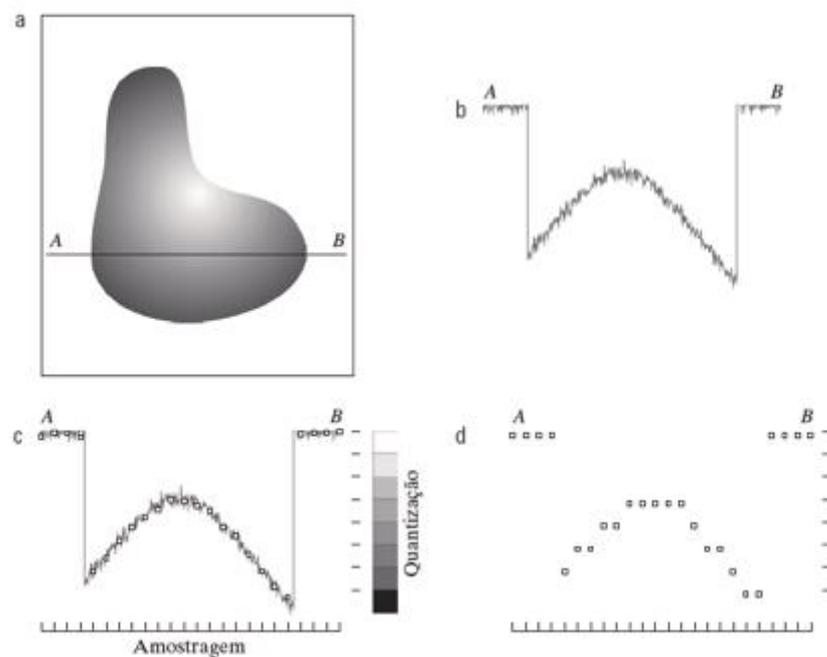
$$0 < r(x, y) < 1$$

Dessa forma, os limites da refletância são chamados de “absorção total” (quando  $r = 0$ ) e “refletância total” (quando  $r = 1$ ) (GONZALEZ; WOODS, 2010).

#### 4.4.1 Amostragem e quantização

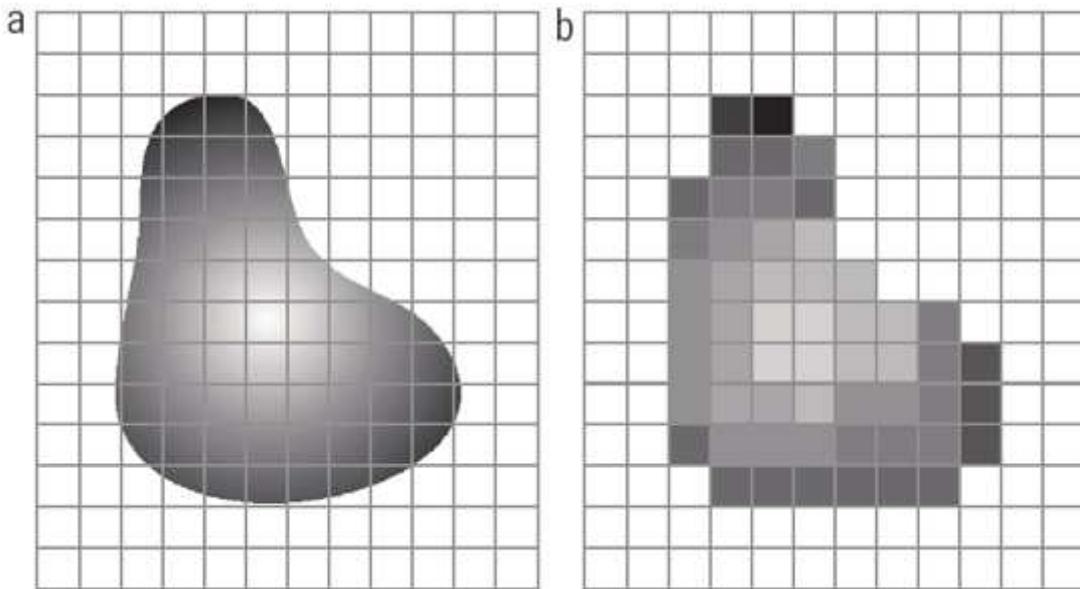
Para uma imagem ser convertida ao formato digital, ela passa por um processo de amostragem de sua função em ambas as suas coordenadas e na sua amplitude. A digitalização desses valores é chamada de amostragem, enquanto a digitalização dos valores de amplitude é chamada de quantização (Fig 7) (Fig 8).

**Figura 7 – Processo de produção de uma imagem digital**



Fonte: GONZALEZ et al., 2010, p. 34

**Figura 8 – Imagem contínua projetada e resultado de sua amostragem e quantização**



Fonte: GONZALEZ et al., 2010, p. 35

#### 4.4.2 Representação do pixel em valores de intensidade

A forma mais usual de representar  $f(x, y)$  é na forma matricial  $M \times N$ , onde cada elemento  $a_{i,j}$  está associado a um pixel em sua respectiva coordenada  $(x, y)$ . Dessa forma, podemos concluir que  $x = 0, 1, 2, \dots, M - 1$  e  $y = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ .

A imagem digital é composta por *pixels*, seus menores elementos, cada qual armazenando um valor de intensidade. Esse valor é representado dentro do intervalo:

$$[0, 2^b - 1]$$

Onde  $b$  representa a quantidade ou profundidade de bits da imagem. Na maioria dos casos, esse valor se limita a 8 bits por banda do espectro de cor. No caso de imagens de apenas uma cor, haverá apenas uma banda, sendo imagens geralmente chamadas de “imagens em tons de cinza”, enquanto as coloridas podem ter mais de duas bandas. O sistema RGB, por exemplo, representa as bandas baseadas nas cores primárias do espectro de visão humano: vermelho, verde e azul (GONZALEZ; WOODS, 2010).

#### 4.4.3 Noções básicas de relacionamentos entre *pixels*

Um píxel  $p$  na coordenada  $(x, y)$  terá quatro vizinhos horizontais e verticais, cujas coordenadas matemáticas são:

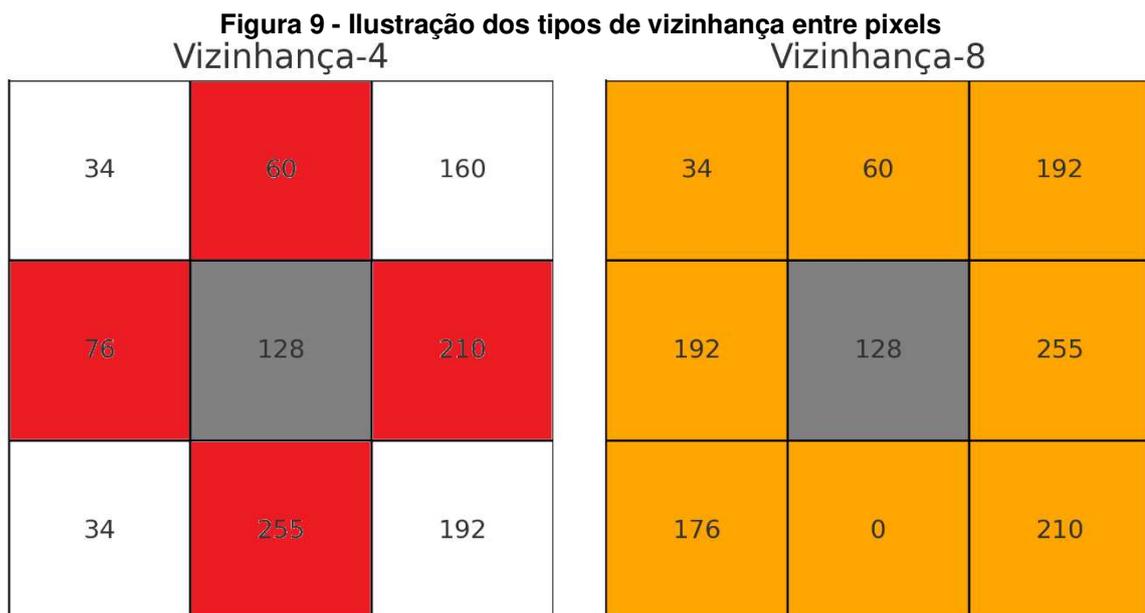
$$(x + 1, y), (x - 1, y), (x + 1, y), (x - 1, y)$$

Este conjunto de *pixels*, chamado de “vizinhança-4 de  $p$ ”, é expresso por  $N_4(p)$ . Cada pixel é uma unidade de distância de  $(x, y)$ , e alguns vizinhos ficarão para fora da imagem se  $(x, y)$  estiver em sua borda.

Já os quatro vizinhos diagonais de  $p$  são:

$$(x + 1, y + 1), (x + 1, y - 1), (x - 1, y + 1), (x - 1, y - 1)$$

Que serão expressas como  $N_D(p)$ . Estes pontos, com adição da vizinhança-4, serão chamados de “vizinhança-8 de  $p$ ”, também expressos como  $N_8(p)$ . Da mesma forma, alguns vizinhos ficarão de fora da imagem caso se localizem na borda (GONZALEZ; WOODS, 2010).



Fonte: autoria própria (2025)

Compreender os tipos de vizinhança é essencial para o entendimento de filtros espaciais, pois eles operam justamente com base nas intensidades dos *pixels* vizinhos ao pixel central.

#### 4.4.4 Histogramas

O histograma de uma imagem digital com níveis de intensidade no intervalo  $[0, L - 1]$  é uma função discreta  $h(r_k) = n_k$ , onde  $r_k$  é o  $k$ -ésimo valor de intensidade e  $n_k$  é o número de *pixels* de uma imagem com intensidade  $r_k$  (GONZALEZ; WOODS, 2010).

Os histogramas de imagens digitais representam a distribuição de intensidades de pixel em uma imagem e são usados durante a análise e processamento de imagens. Um histograma é construído a partir da contagem de quantos *pixels* possuem cada valor de intensidade dentro da faixa supracitada. Essa representação permite identificar características importantes da imagem, como seu brilho, contraste, balanço de cor em imagens RGB e uma possível presença de ruídos. Histogramas também são usados como base para várias técnicas de pré-processamento e segmentação, como a equalização de contraste e a limiarização. A análise do histograma pode indicar, por exemplo, se uma imagem está subexposta, superexposta ou bem distribuída em termos de tonalidades (GONZALEZ; WOODS, 2010).

### 4.5 Processamento de imagens

No geral, existem três níveis de processamento de imagens, divididos entre os processamentos de nível baixo, médio e alto. O processo de nível baixo consiste em operações mais básicas, como o pré-processamento para reduzir o nível de ruído da imagem, o equilíbrio de contraste e o aguçamento em geral. Entre elas, podemos citar o filtro Gaussiano para redução de ruído, o algoritmo de bacias hidrográficas e as técnicas de binarização. O processamento de nível médio já envolve técnicas como a segmentação de imagens, descrição dos objetos e redução dos mesmos a uma forma adequada ao processamento computacional e o reconhecimento destes. De forma geral, o processamento de nível médio é caracterizado pelas suas entradas, geralmente, serem imagens, mas as saídas são dados extraídos delas, como bordas,

contornos e identidades. Por fim, o processamento de nível alto ressignifica um conjunto de objetos já identificados e, de forma mais sofisticada, realiza funções cognitivas mais complexas, associadas à visão humana (GONZALEZ; WOODS, 2010).

O processamento de imagens é uma tecnologia amplamente utilizada em diversas áreas do conhecimento, devido à sua capacidade de extrair informações visuais relevantes de dados digitais. Na medicina, é empregado em exames como tomografias e ressonâncias magnéticas para auxiliar no diagnóstico de doenças. Na indústria, é utilizado no controle de qualidade automatizado por meio da inspeção visual de produtos. Em aplicações agrícolas, permite o monitoramento de plantações e a detecção de pragas por meio de imagens de satélite ou drones. Também é amplamente aplicado na segurança, com reconhecimento facial e leitura automática de placas veiculares, no mapeamento de áreas e na pesquisa científica, como ferramenta para análise de materiais, organismos e partículas em escalas microscópicas. Essa versatilidade torna o processamento de imagens uma ferramenta indispensável para estudos interdisciplinares, como na identificação e quantificação de microplásticos em amostras ambientais.

## 4.6 Filtragem espacial

A filtragem espacial é uma técnica fundamental que atua diretamente sobre os *pixels* da imagem digital, ou seja, em seu domínio espacial. O seu funcionamento se baseia, majoritariamente, na aplicação de uma máscara sobre uma área de *pixels* adjacentes entre si, realizando operações que permitem realçar, suavizar ou realçar padrões locais. Estes filtros podem ser divididos entre duas categorias: filtros de suavização, que visam reduzir ruídos e variações abruptas de intensidade; e filtros de realce, que servem para destacar bordas, contornos ou detalhes específicos de uma imagem.

Diferentes tipos de filtros são utilizados dependendo do objetivo da operação. Por exemplo, o filtro da média ou o filtro Gaussiano são mais aplicados para a suavização e redução do ruído, enquanto o filtro de mediana é mais apropriado para eliminar ruídos enquanto preserva bordas. Já os filtros como Sobel e Laplaciano servem para realces de bordas e transições mais bruscas de intensidade ou contraste (CASTELO BRANCO, 2011).

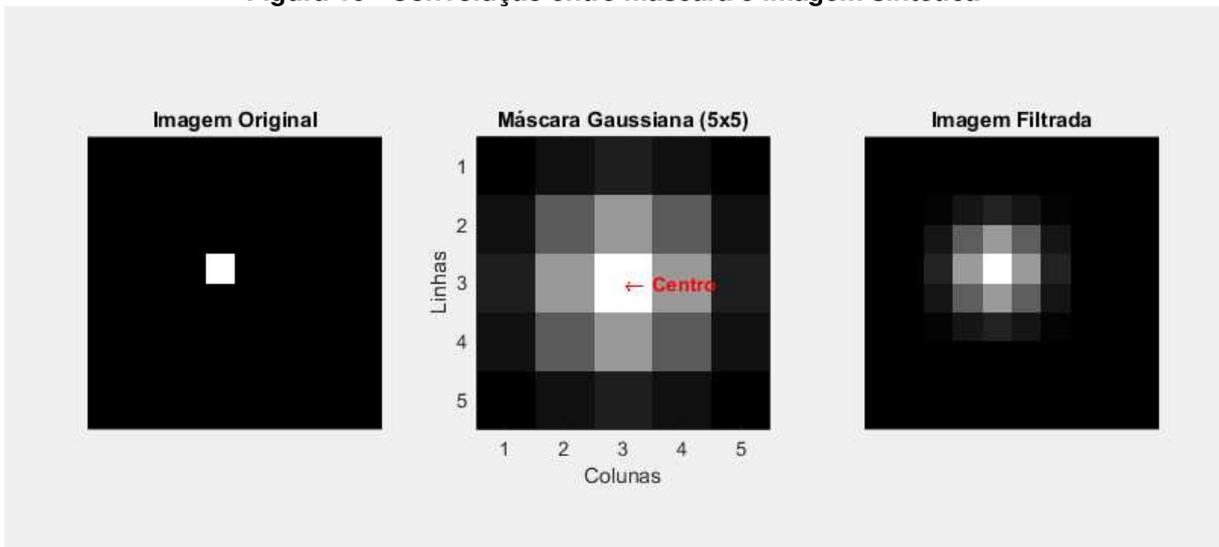
### 4.6.1 Filtro Gaussiano

O filtro Gaussiano é muito utilizado para suavização de imagens e redução de ruído no geral. Seu funcionamento se baseia na convolução da imagem com uma função Gaussiana (Fig 10), caracterizada por uma distribuição normal em duas dimensões,  $x$  e  $y$ . Essa técnica permite suavizar mudanças bruscas de intensidade, reduzindo o ruído sem comprometer as estruturas principais de uma imagem (GONZALEZ; WOODS, 2009). A máscara Gaussiana é descrita pela seguinte equação:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

Onde  $\sigma$  simboliza o desvio padrão da distribuição, controlando o grau de suavização. Valores maiores de desvio padrão geram, conseqüentemente, um desfoque mais acentuado.

Figura 10 - Convolução entre máscara e imagem sintética



Fonte: autoria própria (2025)

Figura 11 - Antes e depois da aplicação do filtro Gaussiano em imagem ruidosa em tons de cinza



Fonte: Adaptado de ROCHA, Evandro. *Ruído ou grãos: como diferencial artístico*. Epics, 2023.

Disponível em: <https://www.epics.com.br/blog/ruído-ou-grãos-como-diferencial-artístico>.

Acesso em: 26 maio 2025.

**Figura 12 - Antes e depois da aplicação do filtro Gaussiano em imagem ruidosa colorida**



**Fonte: Adaptado de BORIS FX. *BCC RGB Pixel Noise*. Disponível em: <https://borisfx.com/documentation/continuum/bcc-rgb-pixel-noise/>. Acesso em: 26 maio 2025.**

Neste trabalho de conclusão de curso, o filtro Gaussiano foi utilizado como etapa de pré-processamento antes de todas as técnicas de binarização e segmentação, com a finalidade de reduzir qualquer possível ruído presente nas capturas de imagem pelo microscópio e facilitar a segmentação posterior.

#### **4.7 Segmentação por limiarização**

A segmentação de imagens foi uma etapa fundamental no processo desta pesquisa, e tem como finalidade particionar uma imagem em regiões que possuem características semelhantes entre si, facilitando a identificação dos objetos de interesse. Em outras palavras, esse processo tem como objetivo realizar a separação das estruturas importantes da imagem, como as partículas de microplásticos, de seu fundo, sendo fundamentais ao reconhecimento de padrões, análise morfológica e contagem de objetos.

Segundo Gonzalez e Woods (2010), segmentar uma imagem significa dividi-la em partes ou objetos que sejam homogêneos de acordo com um critério determinado pelo usuário, como variações de intensidade, cor, textura ou bordas. A eficácia dessa segmentação depende muito da natureza da imagem analisada e das condições nas quais foi aplicada. Por exemplo, em imagens microscópicas com variações de

iluminação, métodos que consideram apenas um limiar fixo podem acabar resultando em falha, sendo necessárias técnicas um pouco mais elaboradas.

As abordagens para a segmentação podem ser separadas em três categorias principais: baseadas em limiarização, em detecção de bordas e baseada em crescimento ou divisão de regiões. Nessa pesquisa, diferentes métodos serão explorados e aplicados ao problema da contagem de microplásticos em condições sub-ótimas, com o objetivo de isolar as partículas para análise quantitativa e estatística.

#### 4.7.1 Limiar global

A limiarização com limiar global é uma técnica conceitualmente simples, na qual uma imagem em tons de cinza é transformada em uma imagem binária (preta e branca) através da definição de um limiar. Esse limiar é único para toda a imagem, e os *pixels* com intensidade inferior a ele se tornam pretos, enquanto os *pixels* com intensidade superior ao limiar se tornam brancos. Essa técnica é útil em aplicações onde o contraste entre o objeto de interesse e o fundo da imagem permanece uniforme, como em detecção de formas, reconhecimento de padrões e segmentação de estruturas com bordas bem definidas. Porém, sua eficiência é altamente reduzida quando usada em imagens com iluminação desigual, com presença de sombras e quando há variações locais de contraste. Nesses casos, a limiarização adaptativa será mais útil e eficaz na segmentação correta (GONZALEZ; WOODS, 2010).

#### 4.7.2 Limiarização adaptativa

Como mencionado na seção anterior, fatores como ruído e iluminação têm um papel determinante na eficácia da técnica de limiarização com um único limiar. Porém, em vários casos reais, como o desta pesquisa, não há um ambiente totalmente controlado e condições que garantam uma captura adequada às condições necessárias para uma boa segmentação por limiarização global. Nesses casos, podemos utilizar uma técnica um pouco mais avançada, cujo conceito envolve aplicar um limiar adaptado às diferenças de iluminação, sombras e ruído dentro da imagem.

O método de limiarização adaptativa calcula um limiar para cada ponto  $(x, y)$  da imagem, com base em uma ou mais propriedades especificadas dentro de sua vizinhança de *pixels*. Por mais que isso pareça um processo complexo e moroso, os

softwares e hardwares atuais são totalmente capazes de fazer um processamento rápido da vizinhança, principalmente para as funções mais simples, como operações lógicas e aritméticas. Dessa forma, por mais que uma imagem tenha interferências não-planejadas como ruído, iluminação deficiente e sombras durante a captura, essa técnica pode garantir um bom resultado ao trabalhar com uma técnica mais minuciosa de segmentação feita em pontos, sem que o resto da imagem seja afetado.

Por outro lado, dada a complexidade da técnica ser um pouco mais elevada, geralmente faz-se necessário que o usuário faça ajustes finos nas propriedades do algoritmo, como a sensibilidade, para que o resultado seja otimizado à necessidade.

**Figura 13 - Diferença entre técnicas de limiarização com diferentes limiares**



Fonte: Adaptado de OPENCV. Disponível em:

[https://docs.opencv.org/3.4/d7/d4d/tutorial\\_py\\_thresholding.html](https://docs.opencv.org/3.4/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html). Acesso em: 24 maio 2025.

#### 4.7.3 Técnica de Otsu

A técnica de Otsu é um método automático para segmentação de imagens em tons de cinza. Seu funcionamento consiste em separar os *pixels* da imagem em duas categorias, sendo essas fundo ( $C_0$ ) e objeto ( $C_1$ ), de forma que a separação entre elas seja a melhor possível. Para fazer essa separação, o algoritmo busca automaticamente um limiar de intensidade  $t$  que maximize a distinção entre essas duas regiões específicas, de modo que os *pixels* com intensidade inferior a  $t$  façam parte de  $C_0$  e os *pixels* com intensidade superior a  $t$  façam parte de  $C_1$  (GONZALEZ; WOODS, 2010).

A métrica principal usada para encontrar o limiar ideal é a variância entre as classes, que é dada pela fórmula:

$$\sigma_B^2(t) = \omega_0(t)\omega_1(t)(\mu_0(t) - \mu_1(t))^2$$

Onde:

$\omega_0(t)$  e  $\omega_1(t)$  são as probabilidades de ocorrência dos *pixels* estarem em cada classe  $C_0$  e  $C_1$ , respectivamente. Elas são calculadas como as somas das probabilidades de intensidade de *pixels* nas duas classes:

$$\omega_0(t) = \sum_{i=0}^t p(i)$$

$$\omega_1(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} p(i)$$

Sendo  $p(i)$  a probabilidade de intensidade  $i$ , e  $L$  o número total de níveis de cinza;

$\mu_0(t)$  e  $\mu_1(t)$  são as médias das intensidades das classes  $C_0$  e  $C_1$ , calculadas por:

$$\mu_0(t) = \frac{\sum_{i=0}^t ip(i)}{\omega_0(t)}$$

$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} ip(i)}{\omega_1(t)}$$

A segmentação ocorrerá no limiar  $t$  que maximiza a função  $\sigma_B^2(t)$ , sendo:

$$t^* = \arg \max_t \sigma_B^2(t)$$

Onde o valor de  $t^*$  é o limiar de intensidade que resulta na melhor separação entre objeto de interesse e fundo, gerando a segmentação ótima.

O método de Otsu é eficaz em imagens onde há uma distribuição bimodal de intensidades, onde há uma clara distinção entre fundo e objeto. Porém, como veremos a seguir, o método de Otsu não se mostra eficaz quando temos uma imagem com iluminação desigual, ruído alto, várias classes de objetos ou quando o objeto e o fundo possuem intensidades muito próximas (por exemplo, microplásticos transparentes em água cristalina) (GONZALEZ; WOODS, 2010).



Fonte: Adaptado de Medium. Disponível em: <https://medium.com/data-hackers/segmenta%C3%A7%C3%A3o-de-imagens-utilizando-t%C3%A9cnicas-dethresholding-1ee031562c63>. Acesso em: 25 maio 2025.

#### 4.8 Detecção de bordas

A detecção de bordas, assim como a limiarização, é uma das abordagens clássicas para a segmentação de imagens, dessa vez operando em função das bordas dos objetos de interesse. Essas bordas trazem transições abruptas de intensidade, e representam informações estruturais importantes para reconhecimento de padrões e interpretação de imagens digitais (GONZALEZ; WOODS, 2010).

Algumas técnicas como os filtros de Sobel e Prewitt são utilizadas para detectar e interpretar essas variações de intensidade, baseando-se em operadores de diferença ou gradiente. Apesar dessas técnicas serem efetivas em muitos casos, elas

também se mostram sensíveis a ruídos e apresentam baixa eficácia na detecção de bordas mal definidas ou suaves demais.

Para superar essa limitação, foi escolhido o método de Canny, que se diferencia por critérios de otimalidade com boa detecção, precisão e baixa resposta a ruídos. Essa técnica aplica uma abordagem mais complexa que as anteriores, pois envolve uma suavização da imagem a priori, cálculo preciso do gradiente, a supressão de não-máximos e aplicação da histerese para rastrear corretamente as bordas em situações reais, resultando em uma detecção mais robusta em casos onde haverá ruído, iluminação deficiente e objetos com bordas mal definidas como os microplásticos (GONZALEZ; WOODS, 2010).

#### 4.8.1 Método de Canny

O método de Canny foi a melhor técnica utilizada nesta pesquisa. Criada em 1986 por John F. Canny, ela tem como objetivo detectar bordas otimizando três critérios: boa detecção, boa localização e resposta mínima (uma borda detectada apenas uma vez). Para isso, o algoritmo segue cinco etapas principais:

##### 1 Redução de ruído

A imagem é suavizada com um filtro Gaussiano para reduzir o ruído de alta frequência que pode gerar falsas detecções de bordas. A convolução é feita pelo método que já foi descrito anteriormente, enquanto a imagem suavizada é obtida por:

$$I_s(x, y) = I(x, y) * G(x, y)$$

Onde:

$I_s(x, y)$  é a imagem suavizada;

$I(x, y)$  é a imagem original;

$G(x, y)$  é o filtro gaussiano;

\* é o operador de convolução.

##### 2 Cálculo do gradiente

Então, o gradiente da imagem é calculado usando operadores de derivada nos eixos x e y, representados por:

$$G(x, y) = \frac{\partial I_s}{\partial x}, G_y = \frac{\partial I_s}{\partial y}$$

A magnitude do gradiente é dada por:

$$M(x, y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

E a direção do gradiente em radianos é dada por:

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x}$$

### 3 Supressão de não-máximos

Esta etapa serve para afinar as bordas dos objetos. Nela, cada pixel será comparado com sua vizinhança ao longo da direção do gradiente. Se o valor do gradiente não corresponder ao máximo local, ele será suprimido de forma que:

$$M'(x, y) = M(x, y), \text{ se for máximo local ao longo de } \theta(x, y),$$

$$M'(x, y) = 0, \text{ em caso contrário}$$

### 4 Limiarização com histerese

Duas faixas de limiares são aplicadas: um limiar alto  $T_H$  e um limiar baixo  $T_L$ , sendo  $T_L \leq T_H$ . A partir dessas relações:

Se  $M'(x, y) \geq T_H$ : o pixel é considerado como borda forte;

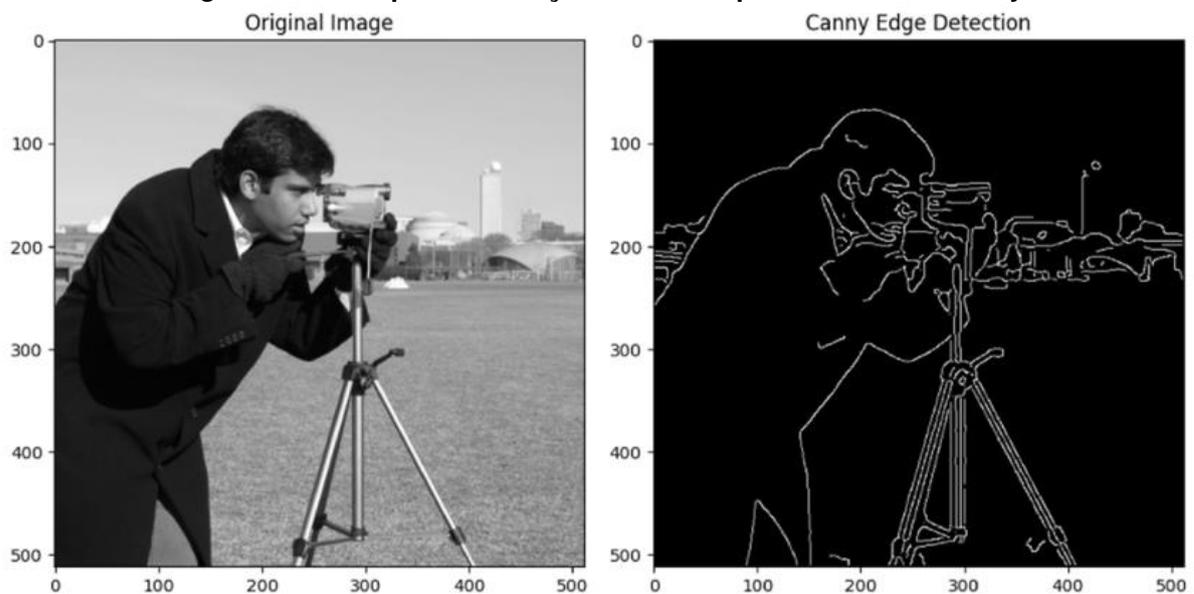
Se  $T_L \leq M'(x, y) < T_H$ : o pixel é considerado como uma borda fraca, e incluído somente se conectado a uma borda forte;

Se  $M'(x, y) < T_L$ : o pixel será descartado.

Essa tática evita a detecção de bordas acidentais por ruído (GONZALEZ; WOODS, 2010).

Dessa forma, o método de Canny se mostra uma opção efetiva dentro do escopo da pesquisa, inclusive em casos onde haverá fatores inesperados e impossíveis de controlar completamente, como a iluminação deficiente e baixa resolução do microscópio utilizado.

**Figura 15 - Exemplo de detecção de bordas pelo método de Canny**



**CANNY edge detection applied to a sample image. In: *Performance evaluation of edge detection techniques for image segmentation*. ResearchGate, 2023. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Canny-edge-detection-applied-to-a-sample-image-a-Original-image-b-Detected-edges\\_fig3\\_384056389](https://www.researchgate.net/figure/Canny-edge-detection-applied-to-a-sample-image-a-Original-image-b-Detected-edges_fig3_384056389). Acesso em: 25 maio 2025.**

## 4.9 Segmentação morfológica por bacias hidrográficas

A segmentação por bacias hidrográficas morfológicas é diferente de todas as outras apresentadas, mesmo que incorpore conceitos em comum. Como tal, ela pode ser combinada com técnicas de limiarização e segmentação, gerando assim um resultado ainda mais confiável (GONZALEZ; WOODS, 2010).

Nesta técnica, a imagem em tons de cinza é interpretada como uma superfície tridimensional, sendo duas coordenadas espaciais e uma coordenada de intensidade, onde a intensidade de cada pixel representa sua altitude morfológica. Então, o algoritmo simula o alagamento dessa superfície: regiões com intensidades mínimas se tornam bacias ou vales, e à medida que a intensidade aumenta, são formadas linhas divisórias (bacias hidrográficas) que delimitam objetos distintos na imagem (GONZALEZ; WOODS, 2010).

### 4.9.1 Fundamentos matemáticos da técnica de bacias hidrográficas

Seja  $f(x, y)$  uma função de intensidade no domínio  $D \subset \mathbb{R}^2$ . A bacia hidrográfica tenta identificar as linhas de crista que separam os mínimos locais da função, formando as regiões  $R_i$  associadas a cada mínimo. Então, a transformada de distância é descrita por:

$$D(x, y) = \min_{(x', y') \in \partial\Omega} \|(x, y) - (x' - y')\|$$

Onde  $\partial\Omega$  representa a borda do objeto e  $\| \cdot \|$  representa a norma euclidiana. A inversão dessa transformada é representada por:

$$I(x, y) = D(x, y)$$

E gera uma imagem na qual os centros dos objetos têm os menores valores, se tornando ideal para aplicação da A bacia hidrográfica. O algoritmo atua sobre os mínimos dessa imagem invertida, os tratando como marcadores iniciais (GONZALEZ; WOODS, 2010).

**Figura 16 - Antes e depois da segmentação por watershed**



Fonte: ROSEBROCK, Adrian. *Watershed and image segmentation with Python and OpenCV*. PyImageSearch, 2015. Disponível em: <https://pyimagesearch.com/2015/11/02/watershed-opencv/>. Acesso em: 26 maio 2025.

#### 4.10 Processamento computacional com MATLAB

O MATLAB foi utilizado como a ferramenta principal para a execução dos testes nessa pesquisa, dada sua biblioteca versátil de funções e facilidade de uso. Todas as técnicas previamente explicadas são aplicáveis via MATLAB e têm seus comandos análogos, junto com algumas funções nativas que ilustram melhor as imagens resultantes para uma comparação posterior. A seguir, se destacam os principais comandos e suas finalidades:

##### 1 Pré-processamento de imagem:

Imread: leitura das imagens em diferentes formatos;

- Rgb2gray: conversão para a escala de cinza;

Imadjust: ajuste de contraste para o melhor destaque de bordas;

Imgaussfilt: aplicação de filtro gaussiano para suavização da imagem.

## 2 Segmentação:

Limiarização adaptativa: `imbinarize(I, 'adaptive', 'Sensitivity', s)`;

Otsu: `level = graythresh(I)` e `imbinarize(I, level)`;

Canny: `edge(I, 'Canny')` para detecção de bordas.

## 3 Pós-processamento:

`~BW`: inversão da imagem binária;

`bwareaopen`: remoção de pequenos objetos/ruídos;

`imclose`: fechamento morfológico para unir regiões;

`imfill`: preenchimento de buracos internos (após Canny).

## 4 Separação de objetos com bacia hidrográfica:

`bwdist`: distância até o fundo (background);

`imextendedmin`: criação de marcas mínimas;

`imimposemin`: imposição de mínimos para guiar a bacia hidrográfica;

bacia hidrográfica: ajuda a separar as partículas grudadas.

## 5 Rotulagem e medição:

`bwlabel`: faz a rotulagem de regiões conectadas;

`regionprops`: calcula a área e posição (centroide) dos fragmentos;

`sum(areas)`: área total ocupada pelos microplásticos.

`numel(I)`: área total da imagem.

## 6 Visualização:

`imshow, subplot`: exibe as imagens e resultados;

`label2rgb`: visualização colorida dos rótulos;

`plot(..., 'r+')`: marcação dos centróides das partículas;

`histogram`: distribuição das áreas dos fragmentos.

(MATHWORKS, [s.d.])

Os códigos completos estarão presentes no apêndice dessa pesquisa, bem como o fluxograma de seu funcionamento será melhor apresentado na seção 7.1.1.

## **5 METODOLOGIA**

A metodologia deste trabalho busca fornecer uma estrutura geral dos passos a serem seguidos durante a condução da criação de uma interface óptica para a detecção de microplásticos em amostras aquosas. Os procedimentos a seguir visam atingir os objetivos traçados e validar o sistema como uma ferramenta eficaz para enxergar as maiores partículas de microplásticos presentes nas amostras.

### **Passo-a-passo metodológico:**

#### **5.1 Revisão de literatura:**

- Realizar uma revisão de literaturas e artigos relacionados às propriedades gerais dos microplásticos, seus métodos de dispersão e o panorama atual de sua presença na natureza;
- Explicar os métodos de coleta e processamento de amostras de água que servirão de inspiração para a realização da pesquisa, apesar da mudança de escala;
- Explicar os fundamentos de processamento de imagens digitais que serão aplicados ao tratamento posterior das amostras;
- Apresentar a sintaxe e o fluxograma do algoritmo criado para a pesquisa.

#### **5.2 Preparação dos equipamentos:**

- Preparar o microscópio para obtenção de imagens das amostras.

#### **5.3 Preparação das amostras:**

- Preparar diferentes amostras aquosas com microplásticos triturados e peneirados em malha 32, malha 35 e uma malha heterogênea sem tamanho definido, chamada de “Resto”.

#### **5.4 Análise e comparação:**

- Detectar as partículas de microplásticos presentes nessas amostras usando diferentes técnicas de processamento através do MATLAB e comparar a exatidão e precisão obtidas em cada uma delas.

### **5.5 Elaboração do relatório:**

- Elaborar um relatório geral do experimento, incluindo as etapas, os resultados obtidos, as discussões e conclusões.

## **6 RESULTADOS ESPERADOS**

A hipótese dessa pesquisa inclui a validação da integração entre um microscópio barato e um tratamento de imagens digitais como uma interface visual para a detecção de microplásticos de, pelo menos, 5mm em amostras de água. Além disso, espera-se que a pesquisa incorpore know-how aos grupos de pesquisa universitários da UTFPR, contribuindo assim com a integração entre cursos como Engenharia Elétrica e Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, assim como pesquisas futuras no campo.

## 7 ANÁLISES LABORATORIAIS

Primeiro, foram coletadas garrafas PET e moídas usando malhas diferentes para a obtenção de diferentes tamanhos de grânulos. Para os primeiros testes e calibração dos equipamentos, foi utilizada água destilada e os plásticos moídos em malha 32 ( $\sim 500 \mu\text{m}$ ), malha 35 ( $\sim 425 \mu\text{m}$ ) e uma amostra de sobras denominada “RESTO”, sem tamanho uniforme e definido. Cada amostra foi diluída em 100ml de água destilada, despejada em uma cápsula de vidro individual e analisada com um microscópio genérico sem marca USB-C ligado a um notebook tendo o aplicativo padrão de câmera do Windows como reprodutor das imagens.

**Figura 17 - Plástico moído em malha 35**



**Fonte: autoria própria (2025)**

**Figura 18 – Plástico moído em malha 32**



**Fonte: autoria própria (2025)**

**Figura 19 – Plástico moído “RESTO”**



**Fonte: autoria própria (2025)**

O microscópio não possui foco automático e teve de ser ajustado manualmente através de um pequeno regulador em sua estrutura. Dada a natureza dos microplásticos, a iluminação foi incidente, através de pequenos LEDs do próprio microscópio. As seguintes imagens foram obtidas (Fig 20) (Fig 21) (Fig 22):

**Malha 35:**

**Figura 20 - Microplásticos de ~425 µm diluídos em água destilada. Resolução: 640x480, 96 dpi**



**Fonte: autoria própria (2025)**

**Malha 32:**

**Figura 21 - Microplásticos de ~450  $\mu\text{m}$  diluídos em água destilada. Resolução: 640x480, 96 dpi**



**Fonte: autoria própria (2025)**

**RESTO:**

**Figura 22 - Microplásticos sem tamanho definido diluídos em água destilada. Resolução: 640x480, 96 dpi**



**Fonte: autoria própria (2025)**

Mesmo a olho nu foi possível observar que, em um meio neutro como a água destilada, os microplásticos apresentam tendência à aglomeração, em razão de suas características físico-químicas.

### **7.1 Resultados preliminares**

Após separação e organização das capturas, foi montado um script no MATLAB voltado à visão computacional para a tentativa de contabilização dos microplásticos presentes em cada imagem. As tentativas foram feitas usando, respectivamente, o método de limiarização adaptativa, Otsu e Canny. Para cada método utilizado, foram criadas uma imagem com as segmentações sinalizadas, os microplásticos detectados com uma cruz e, ao final, um histograma de distribuição das áreas das partículas e o quanto da imagem está ocupada por partículas consideradas microplásticos pelo

script. Após isso, calculamos a exatidão do script a partir da comparação com uma contagem manual das partículas em cada imagem, utilizando a seguinte fórmula:

$$Exatidão = \left(1 - \frac{|valor\ real - valor\ de\ referência|}{valor\ real}\right) \times 100\%$$

Onde os valores de referência para as partículas de cada malha são:

Malha 32: 92 partículas;

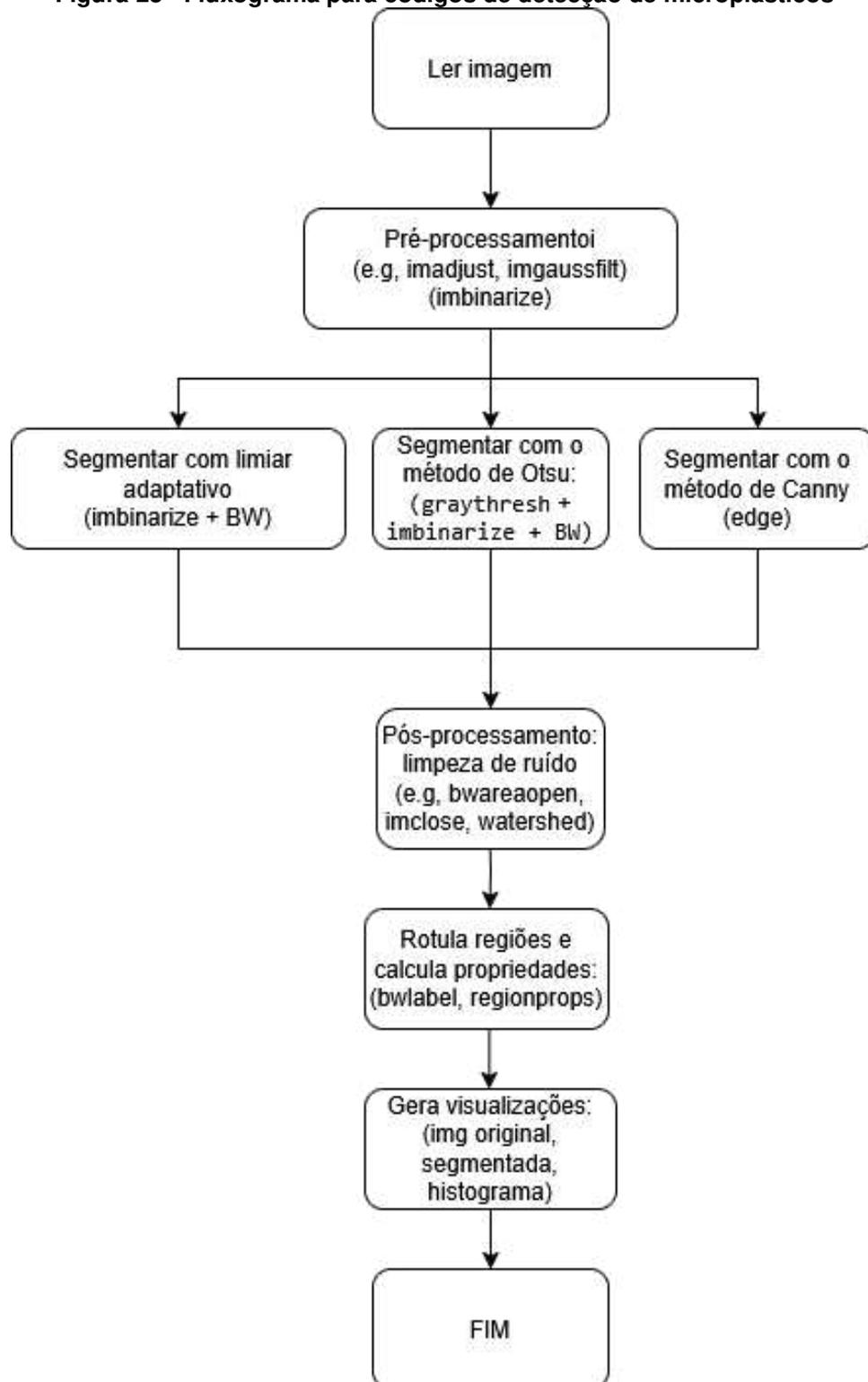
Malha 35: 132 partículas;

Resto: 87 partículas.

#### 7.1.1 Estrutura e lógica dos scripts de detecção

Três scripts diferentes foram usados, sendo eles com a técnica de limiarização adaptativa, Otsu e Canny, respectivamente. Os três códigos usam os comandos previamente descritos e possuem vários elementos em comum. A lógica e sequência podem ser explicadas via o seguinte fluxograma e estarão integralmente disponíveis nos apêndices A, B e C.

Figura 23 - Fluxograma para códigos de detecção de microplásticos

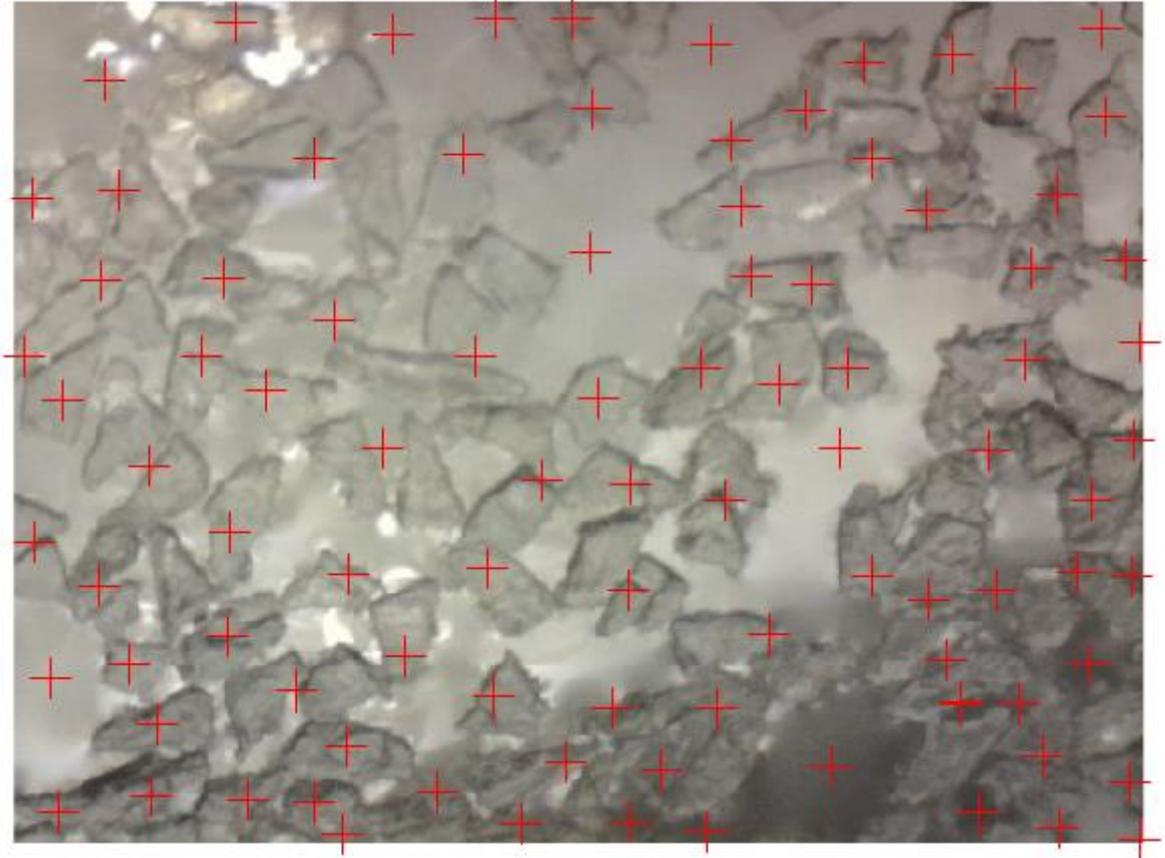


Fonte: autoria própria (2025)

### 7.1.2. Binarização adaptativa

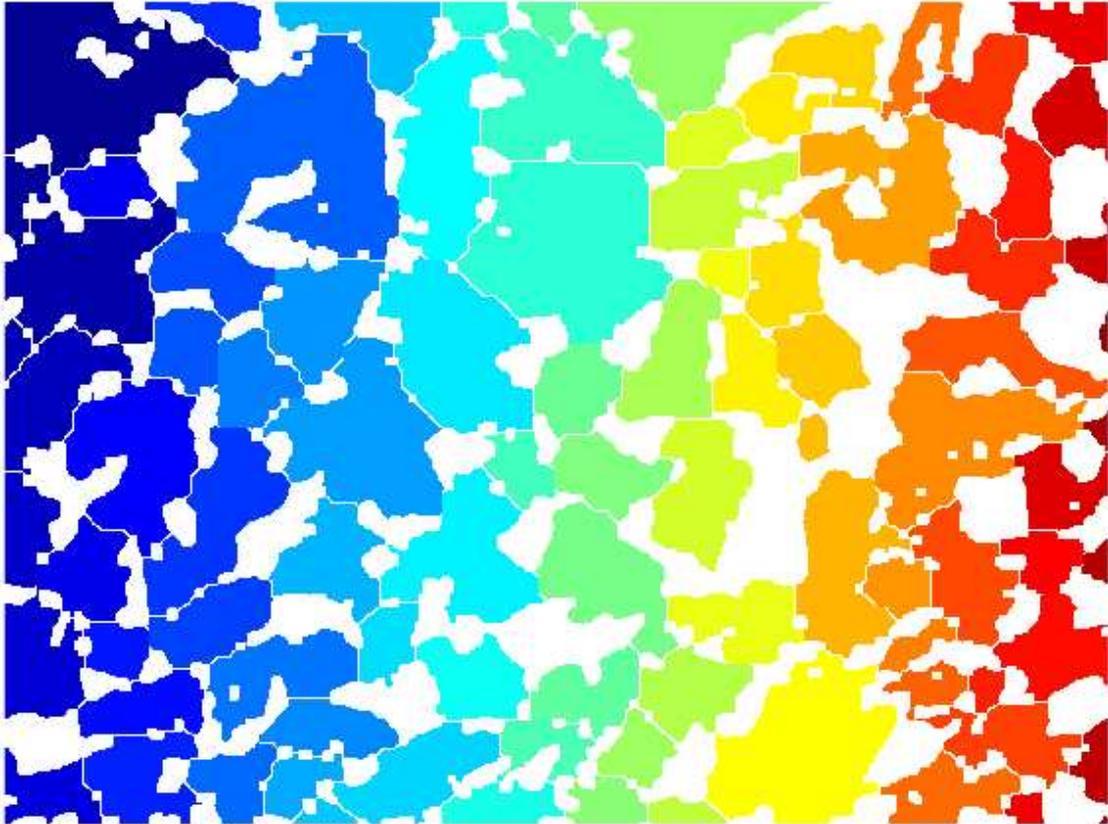
Para a técnica de binarização adaptativa, os seguintes resultados foram alcançados com a malha 32 (Fig 24) (Fig 25) (Fig 26):

**Figura 24 – Malha 32 pós-processamento em binarização adaptativa**  
**Imagem Original**



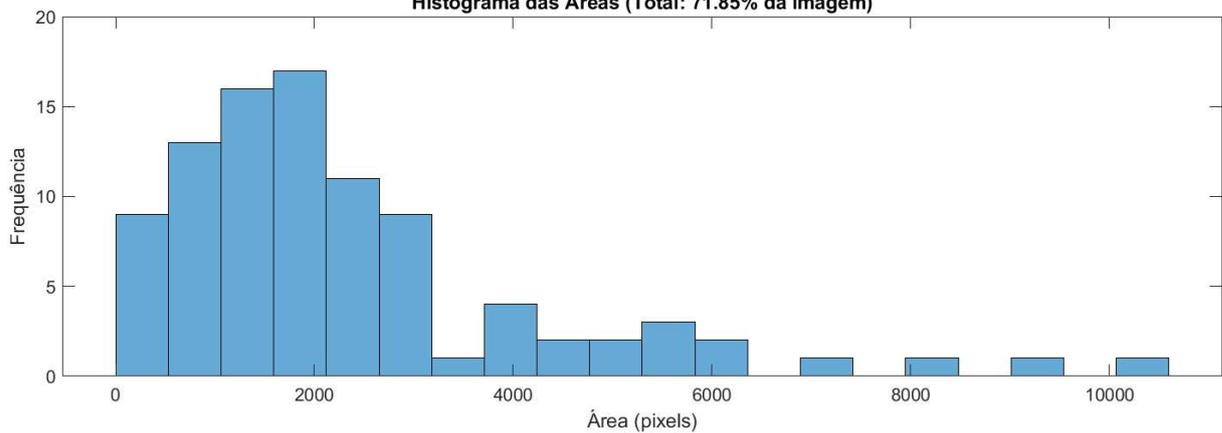
Fonte: autoria própria (2025)

Figura 25 - Malha 32 segmentada em binarização adaptativa  
**Segmentação: 93 fragmentos**



Fonte: autoria própria (2025)

Figura 26 - Histograma da Malha 32 pós-processamento em binarização adaptativa  
 Histograma das Áreas (Total: 71.85% da imagem)



Fonte: autoria própria (2025)

O nível de exatidão para esta malha foi de 98,91% após os seguintes ajustes finos no script:

Filtro Gaussiano: 1;

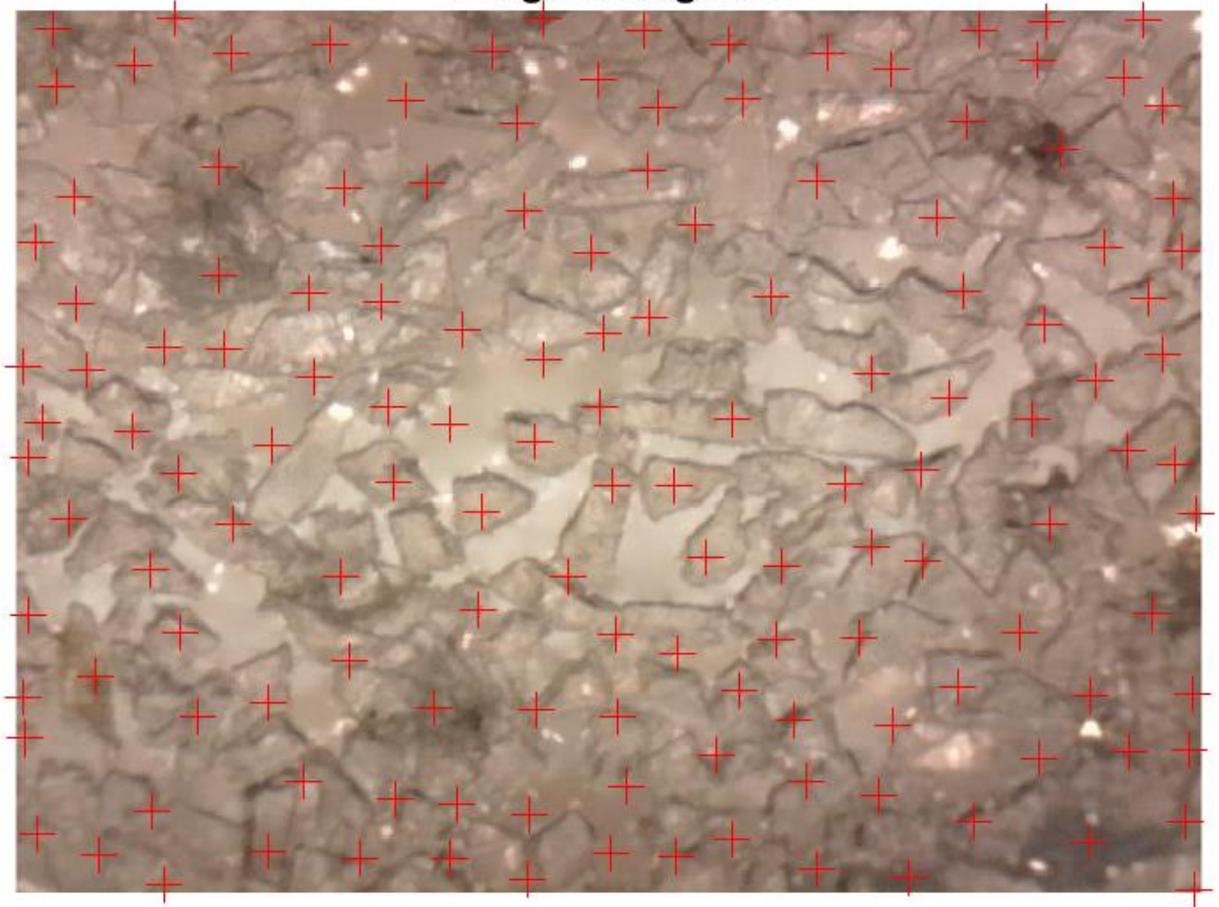
Disk: 3;

Sensibilidade da binarização: 0.5;

Profundidade de Bacia hidrográfica: 3.

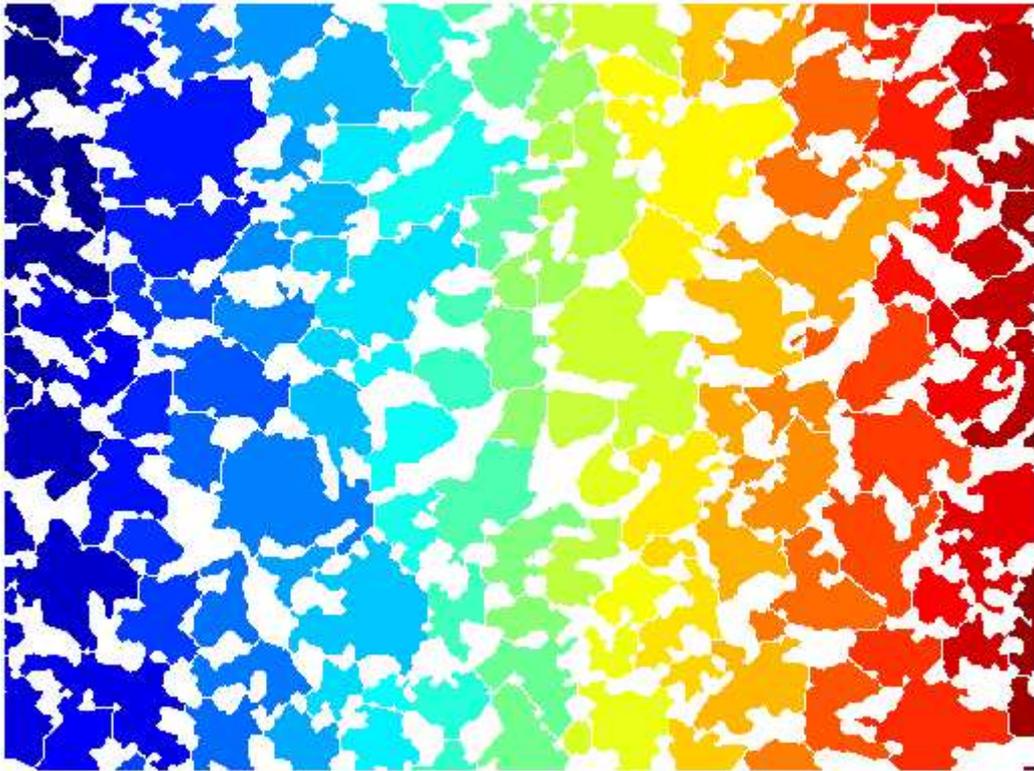
Para a malha 35, os seguintes resultados foram obtidos (Fig 27) (Fig 28) (Fig 29):

**Figura 27 - Malha 35 pós-processamento em binarização adaptativa**  
**Imagem Original**



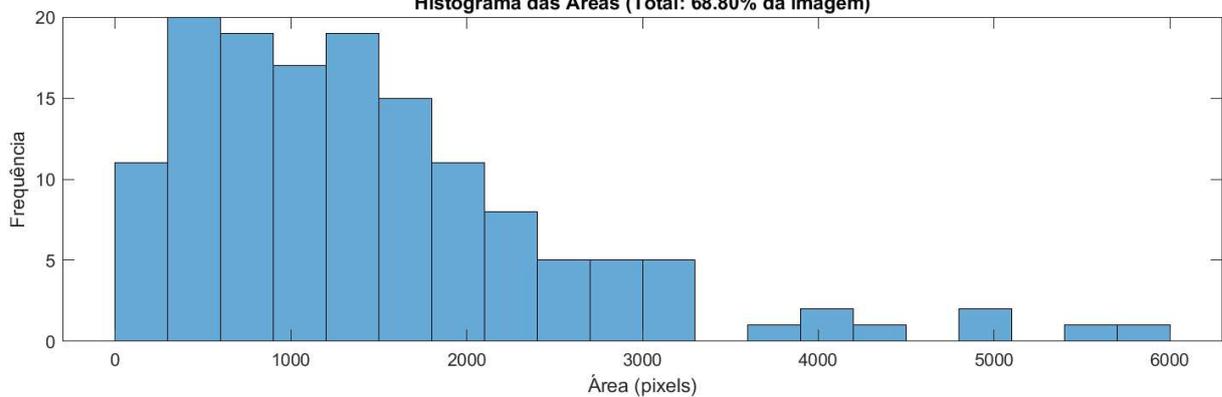
Fonte: autoria própria (2025)

Figura 28 - Malha 35 segmentada em binarização adaptativa  
**Segmentação: 143 fragmentos**



Fonte: autoria própria (2025)

Figura 29 - Histograma da Malha 35 pós-processamento em binarização adaptativa  
 Histograma das Áreas (Total: 68.80% da imagem)



Fonte: autoria própria (2025)

O nível de exatidão para esta malha foi de 92,30% após os seguintes ajustes finos no script:

Filtro Gaussiano: 1;

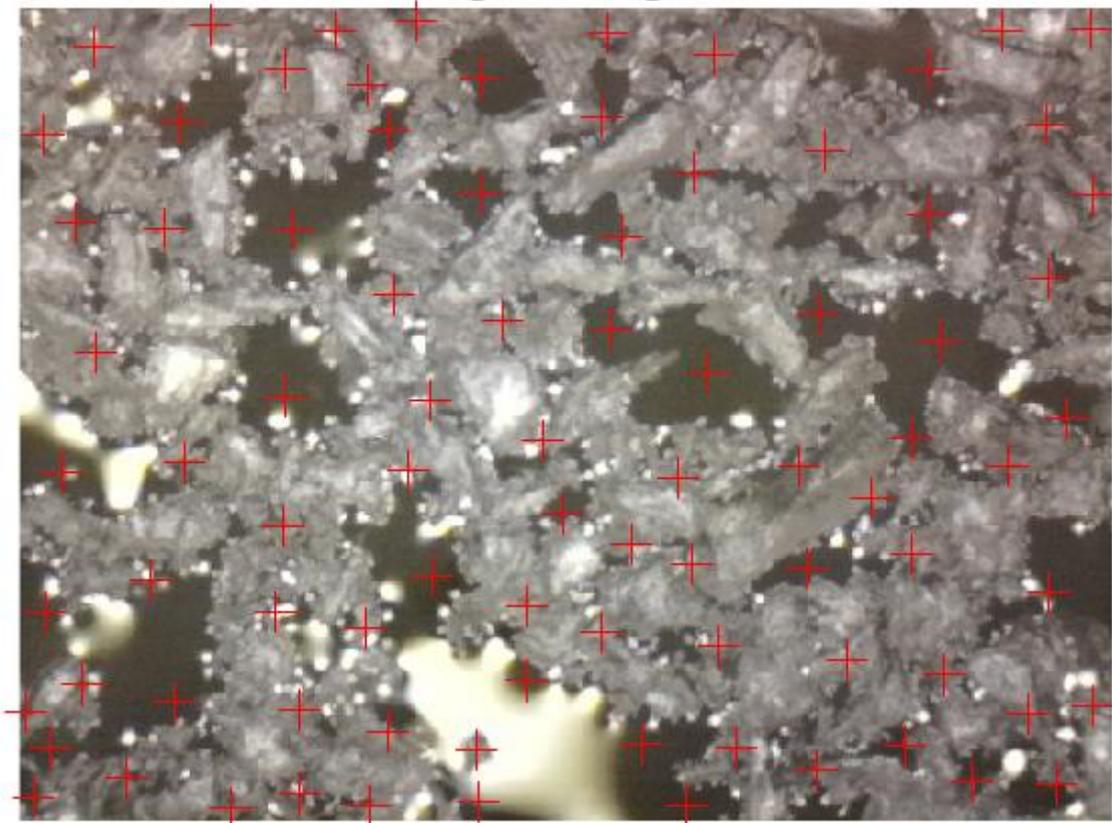
Disk: 2;

Sensibilidade da binarização: 0.5;

Profundidade de Bacia hidrográfica: 3.

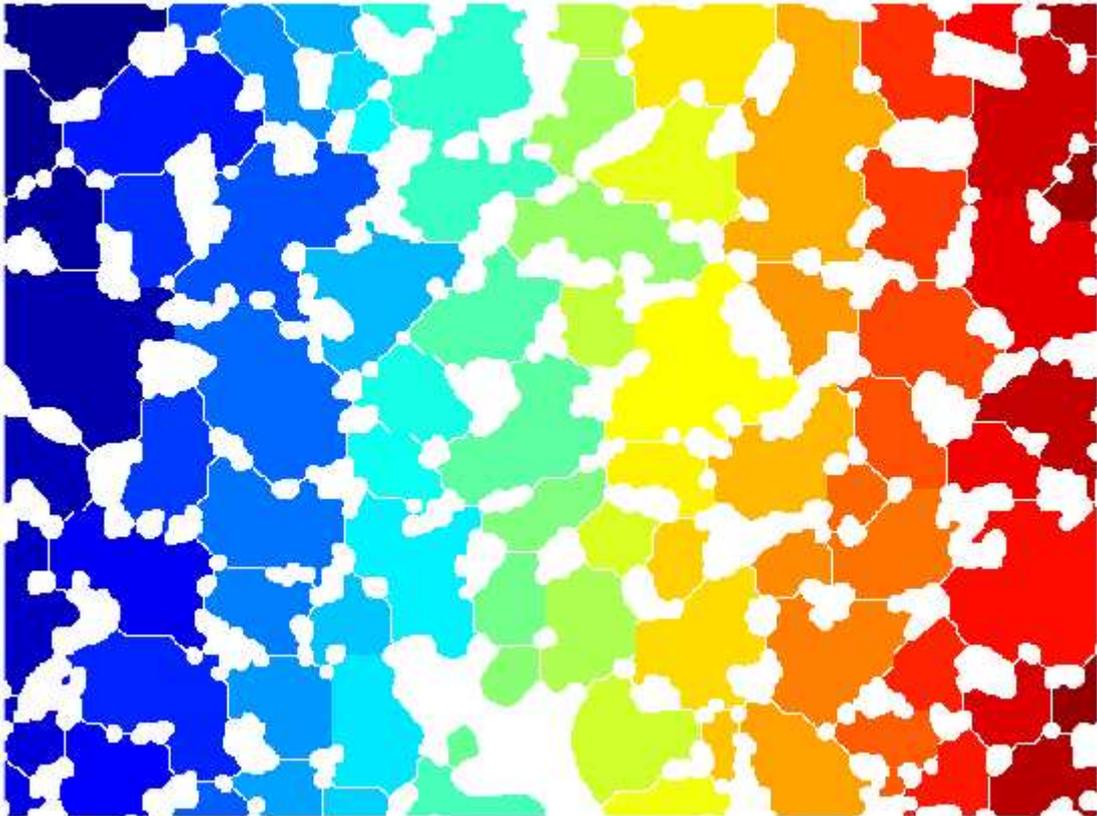
Já para a malha resto, os seguintes resultados foram obtidos (Fig 30) (Fig 31) (Fig 32):

**Figura 30 - Resto pós-processamento em binarização adaptativa**  
**Imagem Original**



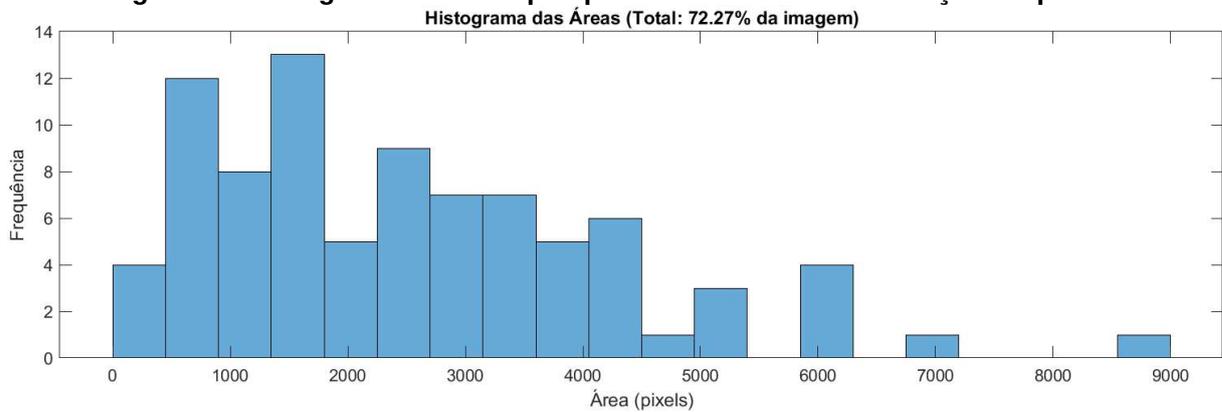
**Fonte: autoria própria (2025)**

Figura 31 - Resto segmentada em binarização adaptativa  
**Segmentação: 86 fragmentos**



Fonte: autoria própria (2025)

Figura 32 - Histograma da Resto pós-processamento em binarização adaptativa



Fonte: autoria própria (2025)

O nível de exatidão para esta malha foi de 98,85% após os seguintes ajustes finos no script:

Filtro Gaussiano: 1;

Disk: 5;

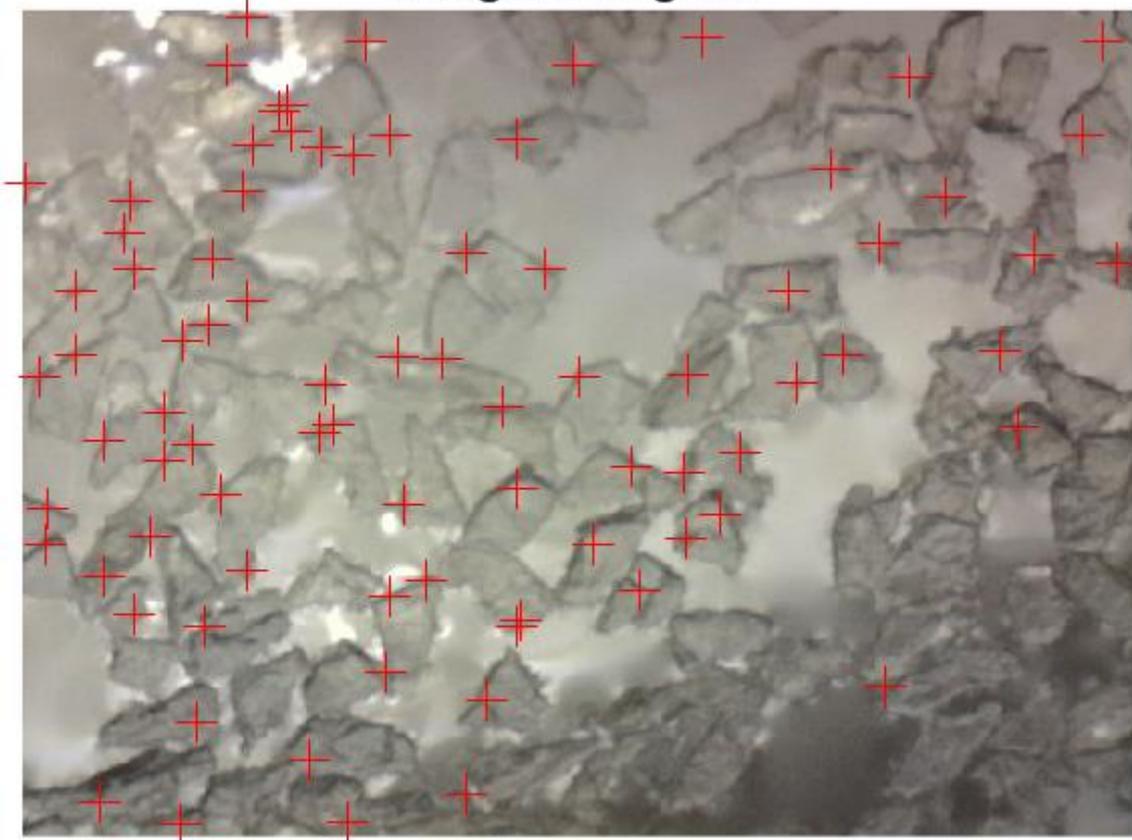
Sensibilidade da binarização: 0.5;

Profundidade de Bacia hidrográfica: 3.

### 7.1.3 Técnica de Otsu

Para a técnica de Otsu, os seguintes resultados foram alcançados com a malha 32 (Fig 33) (Fig 34) (Fig 35):

**Figura 33 – Malha 32 pós-processamento em Otsu**  
**Imagem Original**



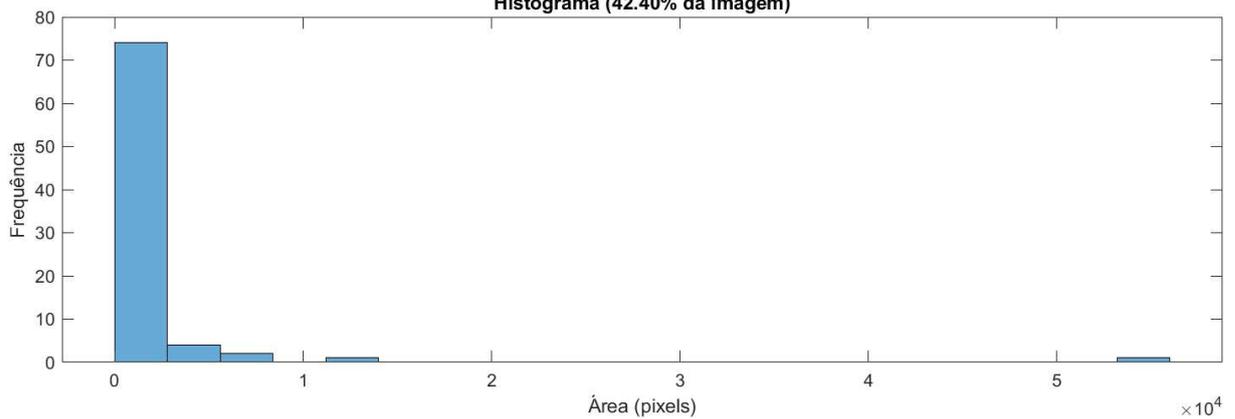
Fonte: autoria própria (2025)

Figura 34 – Malha 32 segmentada em Otsu  
**Segmentação (Otsu): 82 fragmentos**



Fonte: autoria própria (2025)

Figura 35 – Histograma da Malha 32 pós-processamento em Otsu  
 Histograma (42.40% da imagem)



Fonte: autoria própria (2025)

O nível de exatidão para esta malha foi de 89,13% após os seguintes ajustes finos no script:

Filtro Gaussiano: 1;

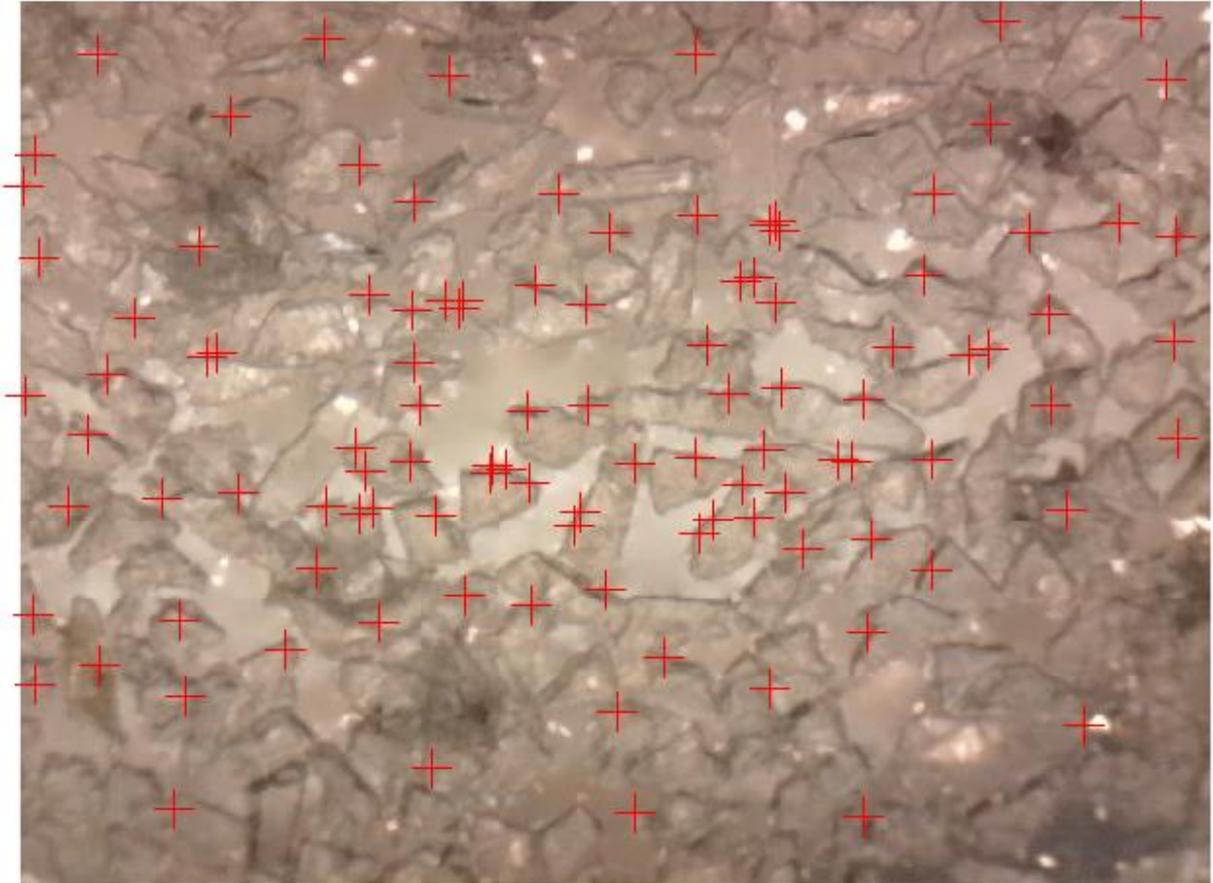
Disk: 5;

Profundidade de Bacia hidrográfica: 3.

Para a malha 35, os seguintes resultados foram obtidos (Fig 36) (Fig 37) (Fig 38):

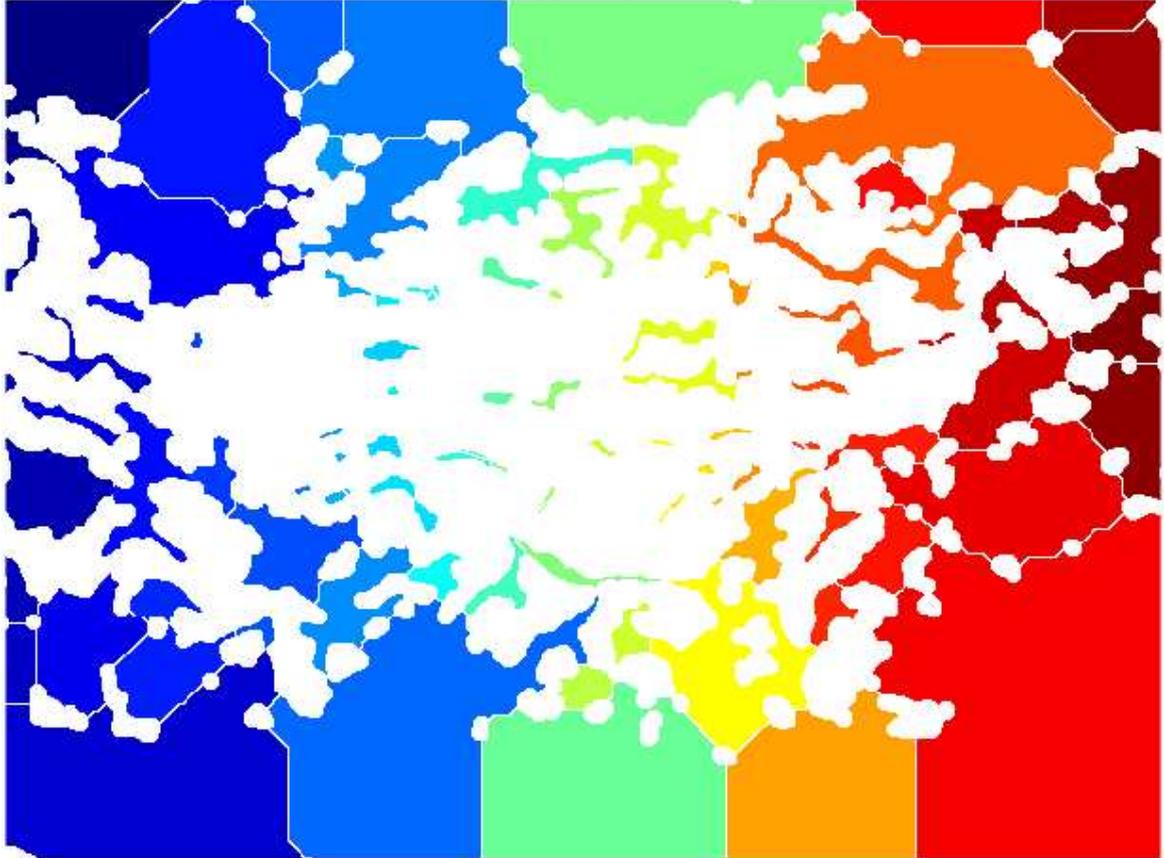
**Figura 36 – Malha 35 pós-processamento em Otsu**

### **Imagem Original**



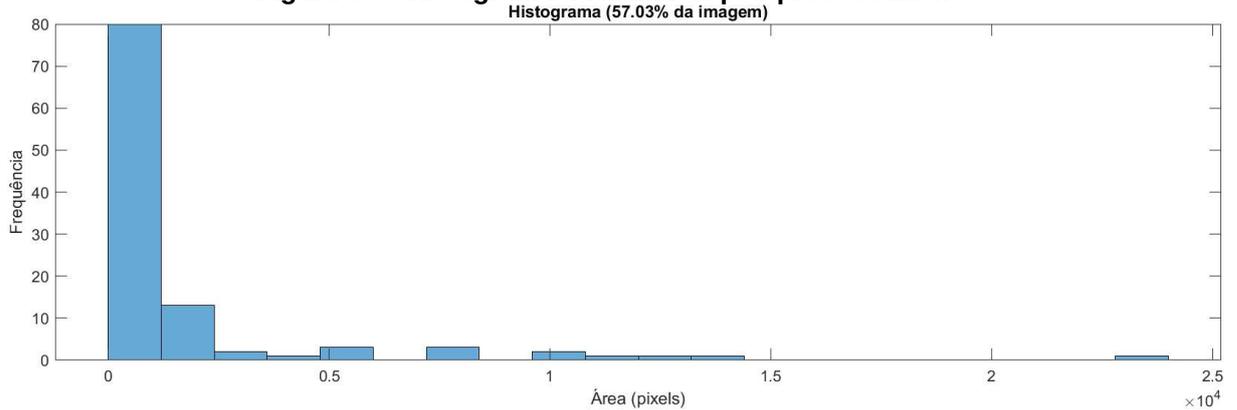
**Fonte: autoria própria (2025)**

**Figura 37 – Malha 35 segmentada em Otsu**  
**Segmentação (Otsu): 108 fragmentos**



Fonte: autoria própria (2025)

**Figura 38 – Histograma da Malha 35 pós-processamento**



Fonte: autoria própria (2025)

O nível de exatidão para esta malha foi de 81,82% após os seguintes ajustes finos no script:

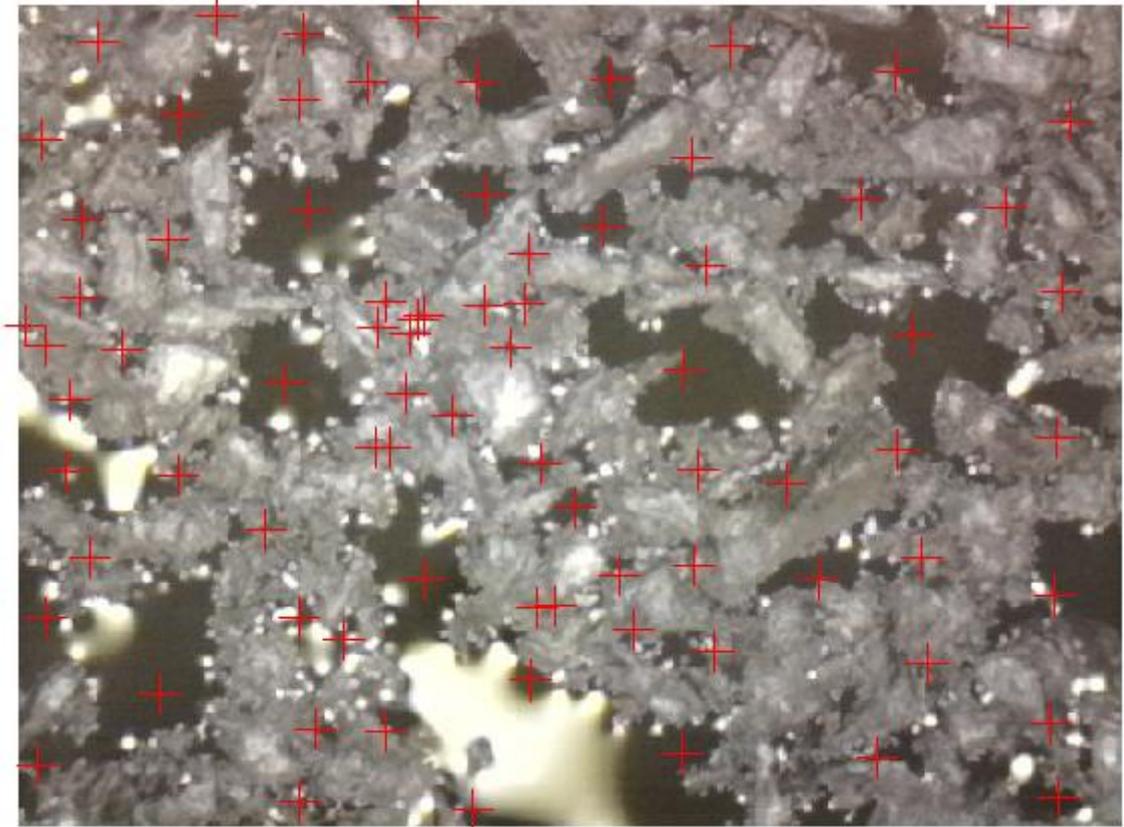
Filtro Gaussiano: 1;

Disk: 5;

Profundidade de Bacia hidrográfica: 3.

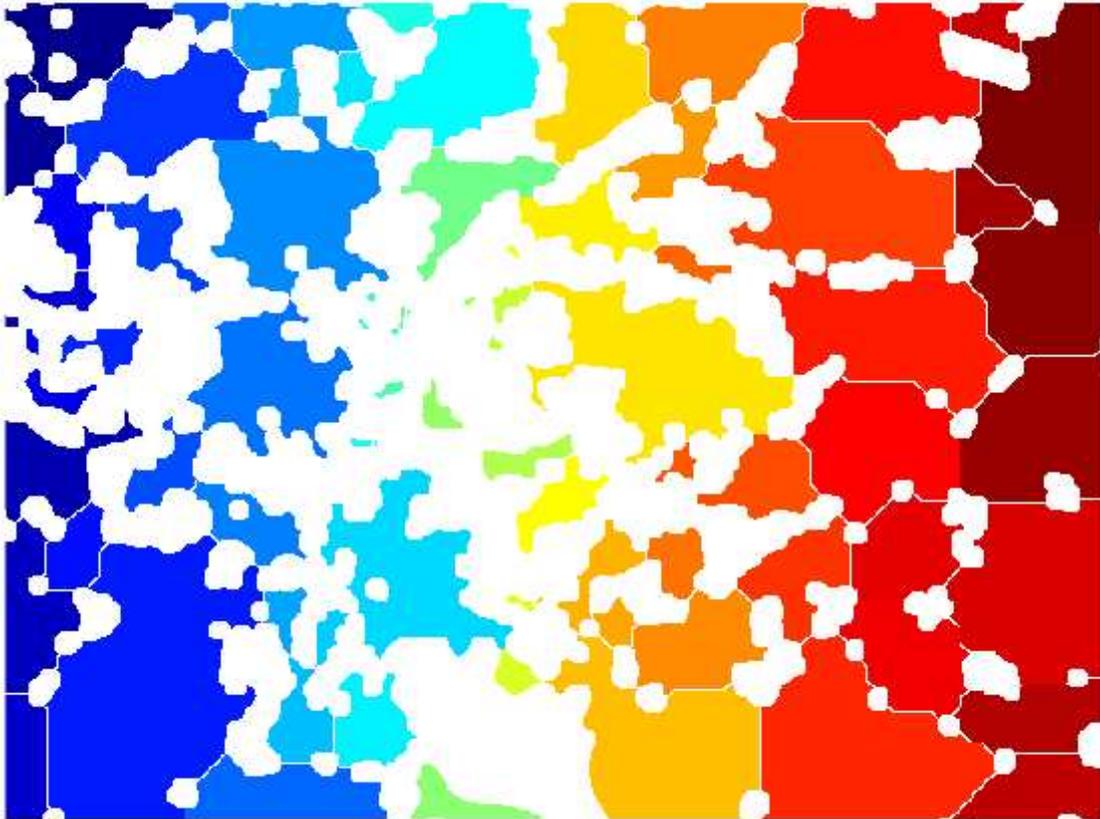
Já para a malha resto, os seguintes resultados foram obtidos (Fig 39) (Fig 40) (Fig 41):

**Figura 39 – Resto pós-processamento em Otsu**  
**Imagem Original**



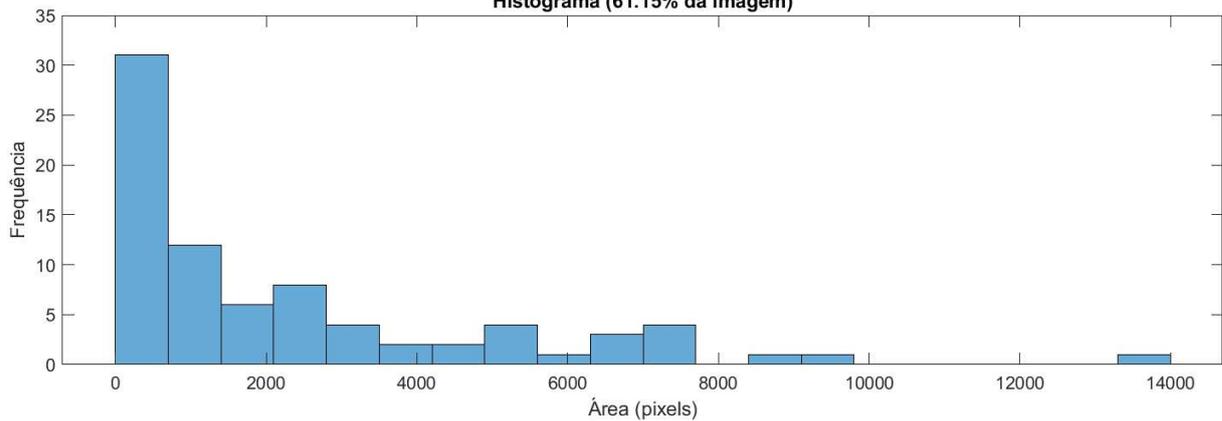
Fonte: autoria própria (2025)

Figura 40 – Resto segmentada em Otsu  
**Segmentação (Otsu): 80 fragmentos**



Fonte: autoria própria (2025)

Figura 41 – Histograma da Resto pós-processamento em Otsu  
 Histograma (61.15% da imagem)



Fonte: autoria própria (2025)

O nível de exatidão para esta malha foi de 91,95% após os seguintes ajustes finos no script:

Filtro Gaussiano: 1;

Disk: 6;

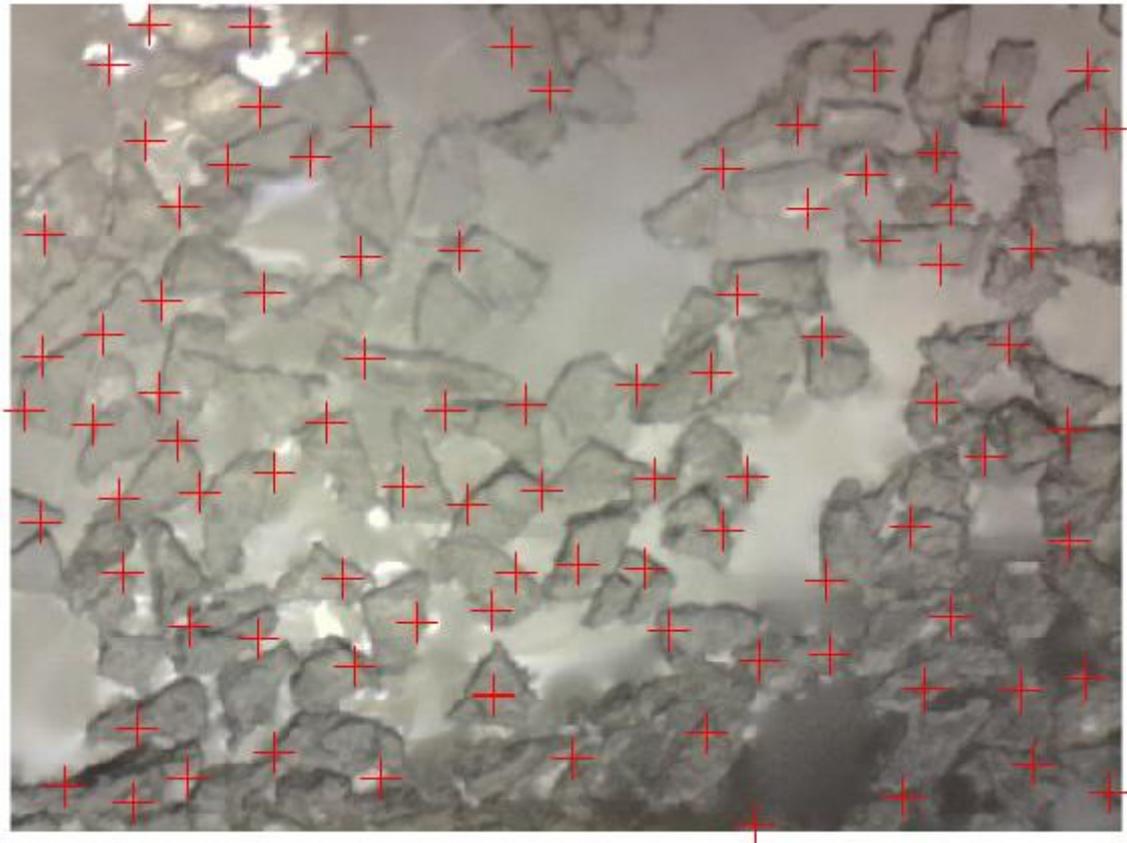
Profundidade de Bacia hidrográfica: 3.

Após as análises da técnica de Otsu, podemos perceber que, apesar da exatidão ser aceitável, a precisão é menor que a obtida nos resultados usando binarização adaptativa.

#### 7.1.4. Técnica de Canny

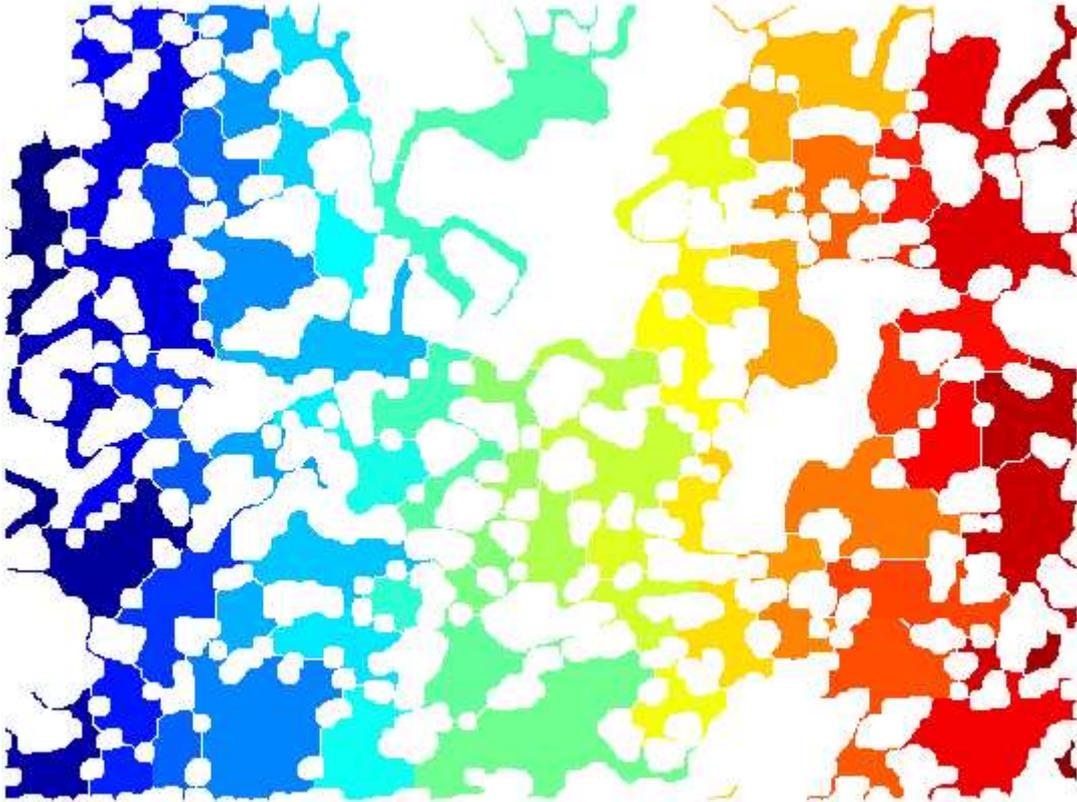
Para a técnica de Canny, os seguintes resultados foram alcançados com a malha 32 (Fig 42) (Fig 43) (Fig 44):

**Figura 42 – Malha 32 pós-processamento em Canny**  
**Imagem Original**



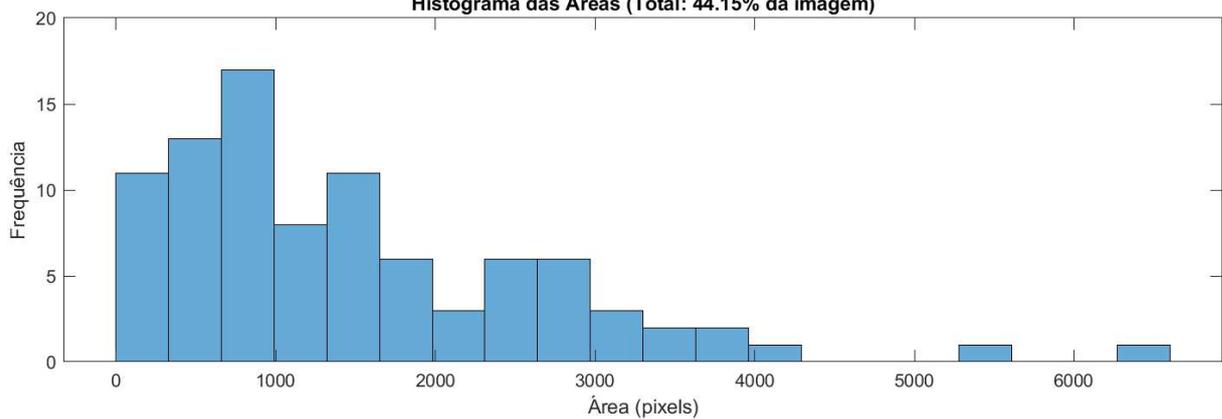
**Fonte: autoria própria (2025)**

Figura 43 – Malha 32 segmentada em Canny  
**Segmentação (Canny): 91 fragmentos**



Fonte: autoria própria (2025)

Figura 44 – Histograma da Malha 32 pós-processamento  
 Histograma das Áreas (Total: 44.15% da imagem)



Fonte: autoria própria (2025)

O nível de exatidão para esta malha foi de 98,91% após os seguintes ajustes finos no script:

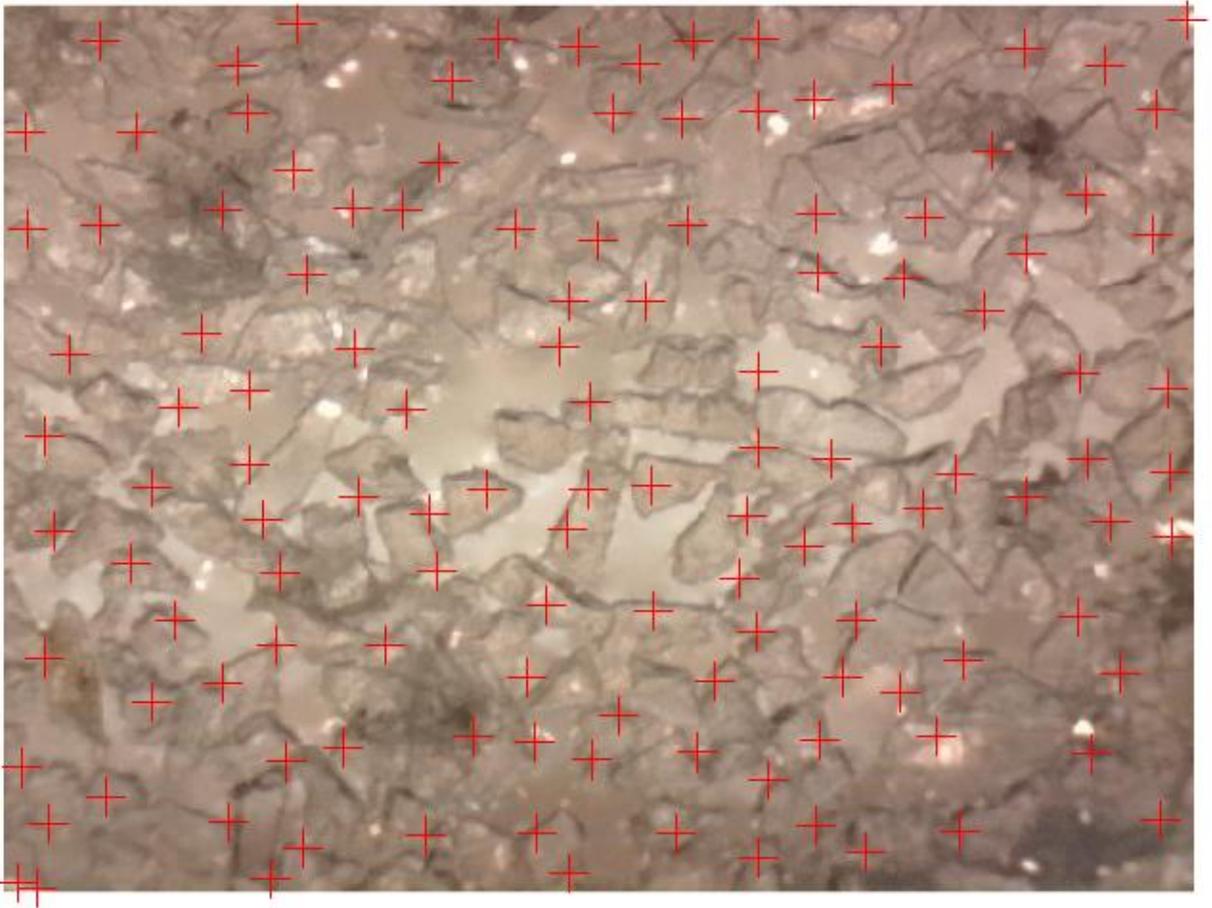
Filtro Gaussiano: 1;

Disk: 6;

Profundidade de Bacia hidrográfica: 3.

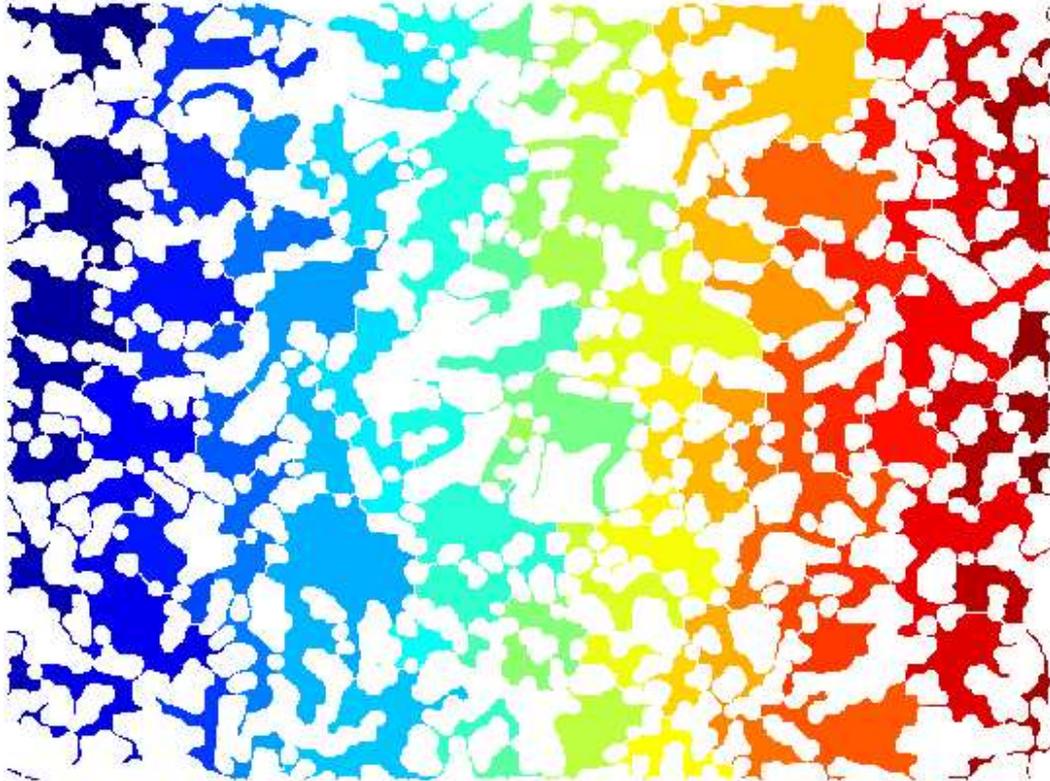
Para a malha 35, os seguintes resultados foram obtidos (Fig 45) (Fig 46) (Fig 47):

**Figura 45 – Malha 35 pós-processamento em Canny**  
**Imagem Original**



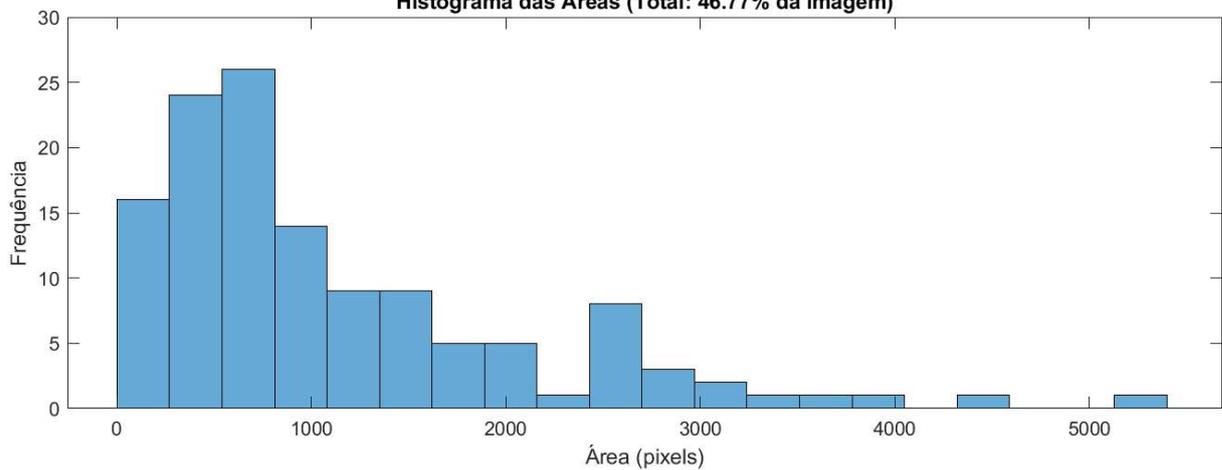
**Fonte: autoria própria (2025)**

Figura 46 – Malha 35 segmentada em Canny  
**Segmentação (Canny): 127 fragmentos**



Fonte: autoria própria (2025)

Figura 47 – Histograma da Malha 32 pós-processamento em Canny  
 Histograma das Áreas (Total: 46.77% da imagem)



Fonte: autoria própria (2025)

O nível de exatidão para esta malha foi de 96,21% após os seguintes ajustes finos no script:

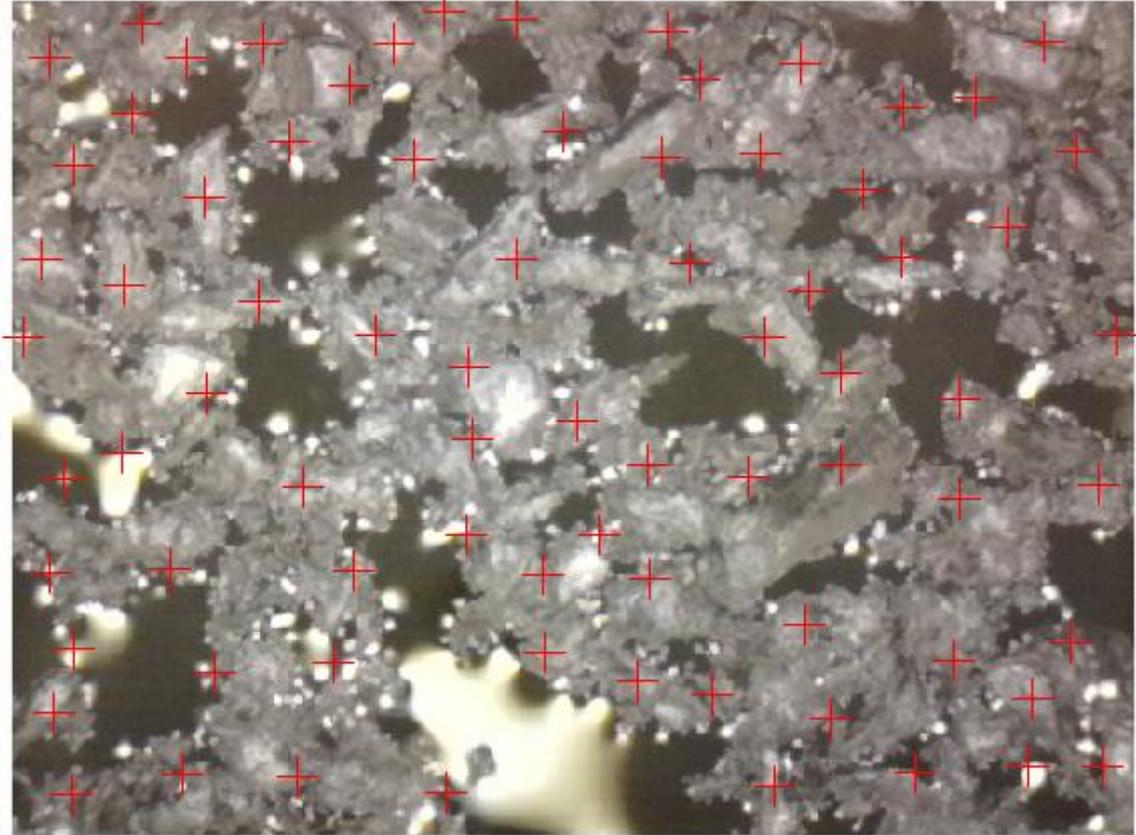
Filtro Gaussiano: 1;

Disk: 5;

Profundidade de Bacia hidrográfica: 3.

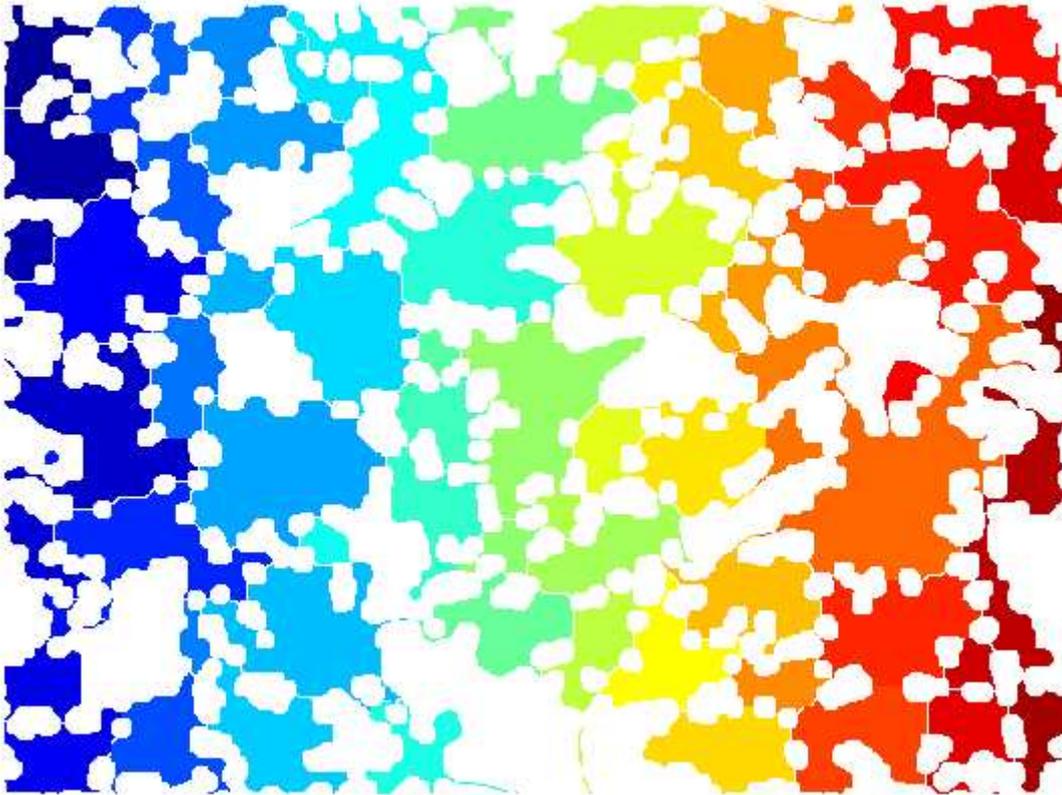
Já para a malha resto, os seguintes resultados foram obtidos (Fig 48) (Fig 49) (Fig 50):

**Figura 48 – Resto pós-processamento em Canny**  
**Imagem Original**



**Fonte: autoria própria (2025)**

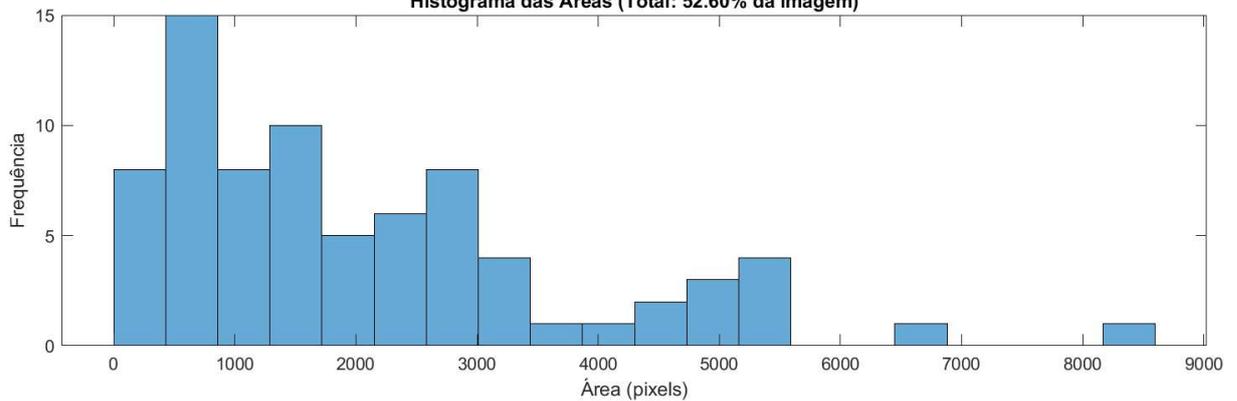
Figura 49 – Resto segmentada em Canny  
**Segmentação (Canny): 77 fragmentos**



Fonte: autoria própria (2025)

Figura 50 – Histograma da Resto pós-processamento em Canny

Histograma das Áreas (Total: 52.60% da imagem)



Fonte: autoria própria (2025)

O nível de exatidão para esta malha foi de 88,50% após os seguintes ajustes finos no script:

Filtro Gaussiano: 1;

Disk: 6;

Profundidade de Bacia hidrográfica: 4.

## 7.2 Resultados e discussões

Após a obtenção de todos os resultados analíticos, montamos a seguinte tabela em nível da exatidão dos resultados:

**Tabela 1 – Comparativo entre técnicas de detecção**

<b>Malha</b>	<b>E% – Binarização adaptativa</b>	<b>E% – Otsu</b>	<b>E% - Canny</b>
32	98,85	89,13	98,91
35	92,30	81,82	96,21
Resto	97,75	91,95	88,50

**Fonte: autoria própria (2025)**

Após análise dos resultados e, principalmente, dos histogramas e das imagens segmentadas, chegamos a conclusões interessantes sobre as técnicas usadas para detecção nas capturas:

A detecção por meio da binarização adaptativa possui uma boa taxa de exatidão nos resultados pois ajusta o limiar localmente, levando em conta as variações de iluminação e contraste em pequenas áreas. Apesar disso, pode acabar detectando áreas de reflexo de iluminação ou sombras como partículas, diminuindo um pouco a precisão final. Mesmo assim, ainda segmenta bem o local indicado.

A detecção por meio da técnica de Otsu teve os piores resultados em níveis de exatidão, ainda que em números aceitáveis. Porém, nesta pesquisa em específico, que lida com imagens microscópicas, a técnica de Otsu calcula um limiar global. Dessa forma, pequenas variações nas imagens acabam por superestimar as regiões claras ou escuras, resultando em muitos falsos positivos, resultando em precisão baixa.

Por fim, a detecção por meio de Canny possui uma boa taxa de exatidão na contagem, porém sofreu um pouco na contagem da malha Resto graças aos contornos mal definidos inerentes à heterogeneidade da malha composta por vários tamanhos diferentes de partículas e que, sobretudo, tendem a se agrupar. Porém, nas outras malhas, teve o melhor resultado em nível de precisão, sendo excelente para encontrar as bordas e segmentar a imagem de forma precisa, separando partículas de plástico da água.

Graças às condições de captura, como microscópio simples, baixa resolução de captura, condições de iluminação subótimas e as próprias características particulares dos microplásticos, todas as detecções tiveram erros de captura, como falsos positivos e duplicação nas marcações de uma mesma partícula, por exemplo. Porém, todas essas limitações foram previstas e fazem parte da proposta da pesquisa de criar um sistema minimamente eficaz para detecção de microplásticos usando equipamentos simples.

Dessa forma, podemos resumir os métodos testados nos parâmetros de exatidão e precisão da seguinte maneira:

**Quadro 1 - Avaliação qualitativa de exatidão e precisão das técnicas de detecção**

Técnica	Exatidão geral	Precisão geral	Observações
Binarização Adaptativa	Boa	Média	Detecta bem as partículas, mas é sensível a reflexos e sombras
Otsu	Média	Ruim	Limiar global gera falsos positivos em imagens microscópicas
Canny	Boa	Boa	Excelente separação de bordas, mas sofre com partículas agrupadas e contornos mal definidos

Fonte: autoria própria (2025)

Embora métricas matemáticas pudessem ser aplicadas para o cálculo de precisão, optou-se por não utilizá-las devido à dificuldade de validação objetiva das detecções duplicadas ou equivocadas. Como alternativa, a avaliação foi feita de forma visual e comparativa, a partir das imagens segmentadas geradas pelo script, que permitem uma análise qualitativa da eficácia da detecção. Após todas as observações,

podemos concluir que as melhores técnicas para as detecções nessas condições foram a binarização adaptativa e especialmente Canny, se mostrando a mais precisa de todas, enquanto Otsu se mostrou ineficaz graças às condições de iluminação deficiente levando a falsos positivos. Uma possível alternativa seria a adição manual de pigmentos, como azul de metileno, ou a mudança do ângulo de iluminação para testes posteriores com condições melhores para a detecção e processamento.

## 8 CONCLUSÃO

A detecção de partículas de microplásticos exigiu um trabalho árduo que envolveu a acumulação de embalagens plásticas, a moagem desses resíduos e separação em diferentes malhas para a análise. Além disso, foi proposto utilizar um microscópio simples, que captura imagens em resolução baixa, possui uma iluminação deficiente e bastante ruído devido as suas limitações técnicas e construção barata. Todas essas limitações fizeram parte da proposta da pesquisa de construir uma interface visual com equipamentos de valor acessível, visando melhorar as capturas por meio do processamento de imagens digitais e então fazer uma contagem dos grânulos. A elaboração do algoritmo para captura também se mostrou um desafio diferenciado, pois para cada amostra foi necessário fazer um ajuste fino nas variáveis das técnicas, como intensidade da bacia hidrográfica, sensibilidade da binarização adaptativa e o tamanho dos “discos” para fechamento nas técnicas de Canny e Otsu.

Após as análises com as diferentes técnicas disponíveis, podemos concluir que a binarização adaptativa e, especialmente, o método de Canny, se mostraram bem-sucedidos dentro do escopo proposto, possibilitando a identificação e segmentação das partículas. A pesquisa também identificou a oportunidade de aprimoramentos para os experimentos futuros, como o uso de pigmentos que melhoram e uniformizam o contraste, um microscópio mais robusto ou um ambiente com iluminação mais controlada, a fim de minimizar sombras ou reflexos durante a captura das imagens.

Embora outros filtros de detecção também existam, como Sobel e Prewitt, eles não foram considerados como úteis nesse trabalho devido suas altas sensibilidades ao ruído, especialmente em imagens de baixa qualidade como as obtidas pelo microscópio simples. Esses operadores, baseados em gradiente, realçam qualquer variação brusca de intensidade, o que traz na geração de bordas espúrias em ambientes como os quais os testes foram realizados, com iluminação deficiente e contornos pouco definidos. Além disso, como esta pesquisa exigia regiões bem delimitadas para a medição de área e ocupação dos microplásticos na água, os métodos como Canny, Otsu e binarização adaptativa se mostraram mais eficazes, pois produzem regiões segmentadas e marcadores úteis para a posterior segmentação via bacia hidrográfica, enquanto Sobel e Prewitt demandariam um tratamento morfológico intensivo para atingir resultados comparáveis.

As próximas etapas desse estudo podem envolver uma criação de banco de imagens próprio para o grupo de pesquisa, para que próximos alunos de TCC ou de Iniciação Científica possam trabalhar a possibilidade da criação de algoritmos baseados em redes neurais para melhor identificação das partículas, incluindo amostras coletadas diretamente da natureza.

Finalmente, este trabalho proporcionou um grande aprendizado durante sua elaboração, tanto sobre o impacto ambiental dos microplásticos quanto na área de Processamento de Imagens Digitais, demonstrando como um recurso extremamente poderoso e acessível pode ser aplicado para pesquisas com relevância ecológica, trazendo também uma colaboração produtiva entre os alunos dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: Abrelpe, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br>. Acesso em: 20 maio 2025.

ANDRADY, A. L.; NEAL, M. A. Aplicações e benefícios sociais dos plásticos. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [S.l.], v. 364, n. 1526, p. 1977–1984, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>.

ANDRADY, A. L. Microplásticos no ambiente marinho. **Marine Pollution Bulletin**, [S.l.], v. 62, n. 8, p. 1596–1605, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>.

BORIS FX. **BCC RGB Pixel Noise**. Boris FX, 2023. Disponível em: <https://borisfx.com/documentation/continuum/bcc-rgb-pixel-noise/>. Acesso em: 26 maio 2025.

BUGATTI, C. et al. Microplásticos e nanoplásticos e sua relevância na saúde humana: uma revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, p. e6712139302–e6712139302, 1 jan. 2023.

CASTRO, Ítalo Ramos de; SILVA, Lilian Helena Monteiro da; PEREIRA, João da Costa (org.). **Microplásticos em ecossistemas aquáticos: impactos ambientais e humanos**. [S. l.]: [s. n.], 2022. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/363417878\\_Capitulo\\_3\\_Microplasticos\\_em\\_ecossistemas\\_costeiros\\_e\\_marinhos\\_comportamentos\\_e\\_impactos\\_a\\_biota](https://www.researchgate.net/publication/363417878_Capitulo_3_Microplasticos_em_ecossistemas_costeiros_e_marinhos_comportamentos_e_impactos_a_biota). Acesso em: 27 maio 2025.

COURTNEY, A.; BAKER, J.; BAMFORD, H. (Eds.). **Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris**. Silver Spring: NOAA, 2009. (NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R, 30).

CNN BRASIL. **Quais são os possíveis efeitos dos microplásticos no cérebro?** Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/saude/quais-sao-os-possiveis-efeitos-dos-microplasticos-no-cerebro/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

ENFRIN, M. et al. Nano/micro plastics – Challenges on quantification and remediation: a review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 42, p. 102128, 2021.

ERIKSEN, M. et al. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. **PLoS ONE**, v. 9, n. 12, p. e111913, 2014.

FREE, C. M. et al. High levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. **Marine Pollution Bulletin**, v. 85, n. 1, p. 156-163, 2014.

- GESAMP. **Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment**. London: IMO, 2015. (GESAMP Reports and Studies, n. 90). Disponível em: <https://www.gesamp.org/publications/microplastics-in-the-marine-environment>. Acesso em: 20 maio 2025.
- GODOY, V. et al. The potential of microplastics as carriers of metals. **Environmental Pollution**, v. 255, n. part. 3, p. 113363, 2019.
- GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Digital image processing**. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010.
- GÜVEN, O. et al. Microplastic litter composition of the Turkish territorial waters of the Mediterranean Sea, and its occurrence in the gastrointestinal tract of fish. **Environmental Pollution**, v. 223, p. 286-294, 2017.
- HEINRICH-BÖLL-STIFTUNG; BREAK FREE FROM PLASTIC. **Atlas do Plástico 2020: fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos**. Brasília: Fundação Heinrich Böll, 2020. Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br/2020/09/15/atlas-do-plastico-2020>. Acesso em: 27 maio 2025.
- HIDALGO-RUZ, V. et al. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 6, p. 3060-3075, 2012.
- HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. Reciclagem de plásticos: desafios e oportunidades. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [S.l.], v. 364, n. 1526, p. 2115–2126, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>.
- HURLEY, R.; WOODWARD, J.; ROTHWELL, J. J. Microplastic contamination of riverbeds significantly reduced by catchment-wide flooding. **Nature Geoscience**, v. 11, n. 4, p. 251-257, 2018.
- KASAVAN, S. et al. Plastic pollution in water ecosystems: a bibliometric analysis from 2000 to 2020. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, p. 127946, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127946>.
- KHAN, F. R. et al. 'The plastic Nile': first evidence of microplastic contamination in fish from the Nile River (Cairo, Egypt). **Toxics**, v. 8, n. 2, p. 22, 2020.
- L-KHAFAJI, A. H. Canny edge detection applied to a sample image. In: **Performance evaluation of edge detection techniques for image segmentation**. ResearchGate, 2023. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Canny-edge-detection-applied-to-a-sample-image\\_a-Original-image\\_b-Detected-edges\\_fig3\\_384056389](https://www.researchgate.net/figure/Canny-edge-detection-applied-to-a-sample-image_a-Original-image_b-Detected-edges_fig3_384056389). Acesso em: 25 maio 2025.
- LI, J.; LIU, H.; CHEN, J. P. Microplastics in freshwater systems: a review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. **Water Research**, v. 137, p. 362-374, 2018.
- MASURA, J. et al. **Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments**. Silver Spring: NOAA, 2015. (NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R, 48).

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: bwareaopen. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwareaopen.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: bwdist. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwdist.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: bwlabel. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwlabel.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: edge (Canny). [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/edge.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: graythresh (Otsu). [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/graythresh.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: histogram. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/histogram.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: imadjust. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imadjust.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: imbinarize (limiarização adaptativa/Otsu). [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imbinarize.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: imclose. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imclose.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: imfill. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imfill.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: imextendedmin. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imextendedmin.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: imimposemin. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imimposemin.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: imshow. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/imshow.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: label2rgb. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/label2rgb.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: numel. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/numel.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: regionprops. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: subplot. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/subplot.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATHWORKS. **Documentação do MATLAB**: watershed. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/watershed.html>. Acesso em: 28 maio 2025.

OPENCV. **Image Thresholding**. OpenCV Documentation, 2021. Disponível em: [https://docs.opencv.org/3.4/d7/d4d/tutorial\\_py\\_thresholding.html](https://docs.opencv.org/3.4/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html). Acesso em: 27 maio 2025.

PRATA, J. C. et al. Identifying a quick and efficient method of removing organic matter without damaging microplastic samples. **Science of the Total Environment**, v. 686, p. 131–139, 10 out. 2019.

ROCHA, Evandro. **Ruído ou grãos: como diferencial artístico**. Epics, 2023. Disponível em: <https://www.epics.com.br/blog/ruído-ou-grãos-como-diferencial-artístico>. Acesso em: 26 maio 2025.

ROCHMAN, C. M. et al. Plástico ingerido transfere produtos químicos perigosos para peixes e induz estresse hepático. **Scientific Reports**, [S.l.], v. 3, n. 3263, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep03263>.

ROSEBROCK, Adrian. **Watershed and image segmentation with Python and OpenCV**. PyImageSearch, 02 nov. 2015. Disponível em: <https://pyimagesearch.com/2015/11/02/watershed-opencv/>. Acesso em: 26 maio 2025.

RUBIN, A. E.; KUMAR, A.; ZUCKER, S. I. Questioning the suitability of available microplastics models for risk assessment: A critical review. **Science of the Total Environment**, v. 788, p. 147670, 2021.

SILVA-CAVALCANTI, J. S. et al. Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource. **Environmental Pollution**, v. 221, p. 218–226, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.068>.

SONG, Y. K. et al. A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples. **Marine Pollution Bulletin**, v. 93, p. 202-209, 2015.

THE CONVERSATION. **Microplásticos encontrados em placas nas artérias associados a maior risco de ataque cardíaco, derrame e morte**. 2024. Disponível em: <https://theconversation.com/microplásticos-encontrados-em-placas-nas-artérias-associados-a-maior-risco-de-ataque-cardíaco-derrame-e-morte-226592>. Acesso em: 28 maio 2025.

UBC INSTITUTE FOR THE OCEANS AND FISHERIES. **Modelling provides insight into the risks microplastics pose to marine life**. University of British Columbia, 01 fev. 2021. Disponível em: <https://oceans.ubc.ca/2021/02/01/modelling->

provides-insight-into-the-risks-microplastics-pose-to-marine-life/. Acesso em: 27 maio 2025.

WINTON, D. J. et al. Macroplastic pollution in freshwater environments: focusing public and policy action. **Science of the Total Environment**, v. 704, p. 135242, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135242>.

WRIGHT, S. L.; KELLY, F. J. Plastic and human health: a micro issue? **Environmental Science & Technology**, v. 51, p. 6634–6647, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>.

WWF BRASIL. **Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilidade dos produtores**. Brasília: WWF Brasil, 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br>. Acesso em: 20 maio 2025.

XIA, W. et al. Rainfall is a significant environmental factor of microplastic pollution in inland waters. **Science of the Total Environment**, v. 732, p. 139065, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139065>.

XU, S. et al. Microplastics in aquatic environments: occurrence, accumulation, and biological effects. **Science of the Total Environment**, v. 703, p. 134699, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134699>.

## **APÊNDICE A - Código de detecção de microplásticos: limiarização adaptativa**

```
% Script MATLAB para contar microplásticos na imagem - Versão Ajustada com
Histograma
```

```
% 1. Ler a imagem
```

```
I = imread('imagem_desejada.jpg'); % ajuste o nome se precisar
```

```
% 2. Converter para escala de cinza
```

```
Igray = rgb2gray(I);
```

```
% 3. Melhorar contraste para destacar as bordas
```

```
Iadj = imadjust(Igray);
```

```
% 4. Aplicar filtro Gaussiano para suavizar
```

```
Ifilt = imgaussfilt(Iadj, 1); % filtro mais leve
```

```
% 5. Binarizar (converter para preto e branco)
```

```
BW = imbinarize>Ifilt, 'adaptive', 'Sensitivity', x); % sensibilidade ajustada
```

```
% 6. Inverter a imagem se necessário
```

```
BW = ~BW; % plásticos mais claros
```

```
% 7. Remover objetos muito pequenos (ruído)
```

```
BWclean = bwareaopen(BW, 15); % tamanho mínimo ajustado
```

```
% 8. Fechar pequenos buracos
```

```
BWclean = imclose(BWclean, strel('disk', x)); % fechamento ajustado
```

```
% 9. Separar objetos grudados com watershed
```

```
D = -bwdist(~BWclean);
```

```
mask = imextendedmin(D,x); % profundidade ajustada
```

```
D2 = imimposemin(D, mask);
```

```
L = watershed(D2);
```

```
BWclean(L == 0) = 0;
```

```
% 10. Rotular regiões conectadas
```

```
BWclean = imfill(BWclean, 'holes');
```

```
[L2, num] = bwlabel(BWclean);
```

```
% 11. Mostrar os resultados comparados
```

```
figure;
```

```
subplot(2,2,1);
```

```
imshow(I);
```

```
title('Imagem Original');
```

```
hold on;
```

```
centroids = regionprops(L2, 'Centroid');
```

```
for k = 1:length(centroids)
```

```
    plot(centroids(k).Centroid(1), centroids(k).Centroid(2), 'r+', 'MarkerSize',
    10);
```

```
end
```

```
hold off;
```

```
subplot(2,2,2);
```

```
imshow(label2rgb(L2));
```

```
title(['Segmentação: ', num2str(num), ' fragmentos']);
```

```
% 12. Analisar propriedades
```

```
stats = regionprops(L2, 'Area', 'Centroid');
```

```
% 13. Analisar áreas dos fragmentos
```

```
areas = [stats.Area];
totalAreaParticles = sum(areas);
imageArea = numel(Igray); % total de pixels da imagem (linhas x colunas)
percentOccupied = 100 * totalAreaParticles / imageArea;

% 14. Exibir histograma das áreas dos fragmentos
subplot(2,2,[3,4]);
histogram(areas, 20);
title(sprintf('Histograma das Áreas (Total: %.2f%% da imagem)', percentOccupied));
xlabel('Área (pixels)');
ylabel('Frequência');
```

## **APÊNDICE B - Código de detecção de microplásticos: Otsu**

```

% Script MATLAB - Segmentação por Otsu

% 1. Ler a imagem
I = imread('imagem_desejada.jpg');

% 2. Converter para escala de cinza
Igray = rgb2gray(I);

% 3. Melhorar contraste
Iadj = imadjust(Igray);

% 4. Suavizar
Ifilt = imgaussfilt(Iadj, 1); % <<< AJUSTE: sigma

% 5. Binarização com Otsu
level = graythresh(Ifilt);
BW = imbinarize(Ifilt, level);

% 6. Inverter se necessário
BW = ~BW; % <<< AJUSTE: depende da cor do microplástico

% 7. Remover ruído
BWclean = bwareaopen(BW, 15); % <<< AJUSTE: área mínima

% 8. Fechar buracos
BWclean = imclose(BWclean, strel('disk', x)); % <<< AJUSTE: tamanho do disco

% 9. Watershed
D = -bwdist(~BWclean);
mask = imextendedmin(D, 3); % <<< AJUSTE: profundidade
D2 = imimposemin(D, mask);
L = watershed(D2);
BWclean(L == 0) = 0;

% 10. Rotular regiões
[L2, num] = bwlabel(BWclean);

% 11. Visualização
figure;
subplot(2,2,1);
imshow(I);
title('Imagem Original');
hold on;
centroids = regionprops(L2, 'Centroid');
for k = 1:length(centroids)
    plot(centroids(k).Centroid(1), centroids(k).Centroid(2), 'r+', 'MarkerSize',
    10);
end
hold off;

subplot(2,2,2);
imshow(label2rgb(L2));
title(['Segmentação (Otsu): ', num2str(num), ' fragmentos']);

% 12. Propriedades
stats = regionprops(L2, 'Area');
areas = [stats.Area];
totalAreaParticles = sum(areas);
percentOccupied = 100 * totalAreaParticles / numel(Igray);

```

```
% 13. Histograma
subplot(2,2,[3,4]);
histogram(areas, 20);
title(sprintf('Histograma (0.2f%% da imagem)', percentOccupied));
xlabel('Área (pixels)');
ylabel('Frequência');
```

## **APÊNDICE C - Código de detecção de microplásticos: Canny**

```

% Script MATLAB para contar microplásticos na imagem - Versão com Canny +
Watershed

% 1. Ler a imagem
I = imread('imagem_desejada.jpg'); % ajuste o nome se precisar

% 2. Converter para escala de cinza
Igray = rgb2gray(I);

% 3. Melhorar contraste para destacar as bordas
Iadj = imadjust(Igray);

% 4. Aplicar filtro Gaussiano para suavizar
Ifilt = imgaussfilt(Iadj, 1); % filtro mais leve

% 5. Detectar bordas usando Canny
edges = edge(Ifilt, 'Canny');

% 6. Preencher os contornos fechados
BW = imfill(edges, 'holes');

% 7. Remover objetos muito pequenos (ruído)
BWclean = bwareaopen(BW, 15); % tamanho mínimo ajustado

% 8. Fechar pequenos buracos
BWclean = imclose(BWclean, strel('disk', x)); % fechamento ajustado

% 9. Separar objetos grudados com watershed
D = -bwdist(~BWclean);
mask = imextendedmin(D, x); % profundidade ajustada
D2 = imimposemin(D, mask);
L = watershed(D2);
BWclean(L == 0) = 0;

% 10. Fechar buracos morfológicos com imclose
BWclean = imfill(BWclean, 'holes');

% 11. Rotular regiões conectadas
[L2, num] = bwlabel(BWclean);

% 12. Mostrar os resultados comparados
figure;
subplot(2,2,1);
imshow(I);
title('Imagem Original');
hold on;
centroids = regionprops(L2, 'Centroid');
for k = 1:length(centroids)
    plot(centroids(k).Centroid(1), centroids(k).Centroid(2), 'r+', 'MarkerSize',
    10);
end
hold off;

subplot(2,2,2);
imshow(label2rgb(L2));
title(['Segmentação (Canny): ', num2str(num), ' fragmentos']);

% 13. Analisar propriedades
stats = regionprops(L2, 'Area', 'Centroid');

```

```
% 14. Analisar áreas dos fragmentos
```

```
areas = [stats.Area];  
totalAreaParticles = sum(areas);  
imageArea = numel(Igray); % total de pixels da imagem  
percentOccupied = 100 * totalAreaParticles / imageArea;
```

```
% 15. Exibir histograma das áreas dos fragmentos
```

```
subplot(2,2,[3,4]);  
histogram(areas, 20);  
title(sprintf('Histograma das Áreas (Total: %.2f%% da imagem)', percentOccupied));  
xlabel('Área (pixels)');  
ylabel('Frequência');
```

**ANEXO A – LEI N. 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998**



**Presidência da República  
Casa Civil  
Subchefia para Assuntos Jurídicos**

**LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998<sup>1</sup>.**

**Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.**

**O PRESIDENTE DA REPÚBLICA** Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Título I - Disposições Preliminares

Art. 1º Esta Lei regula os direitos autorais, entendendo-se sob esta denominação os direitos de autor e os que lhes são conexos.

Art. 2º Os estrangeiros domiciliados no exterior gozarão da proteção assegurada nos acordos, convenções e tratados em vigor no Brasil.

Parágrafo único. Aplica-se o disposto nesta Lei aos nacionais ou pessoas domiciliadas em país que assegure aos brasileiros ou pessoas domiciliadas no Brasil a reciprocidade na proteção aos direitos autorais ou equivalentes.

Art. 3º Os direitos autorais reputam-se, para os efeitos legais, bens móveis.

Art. 4º Interpretam-se restritivamente os negócios jurídicos sobre os direitos autorais.

Art. 5º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - publicação - o oferecimento de obra literária, artística ou científica ao conhecimento do público, com o consentimento do autor, ou de qualquer outro titular de direito de autor, por qualquer forma ou processo;

II - transmissão ou emissão - a difusão de sons ou de sons e imagens, por meio de ondas radioelétricas; sinais de satélite; fio, cabo ou outro condutor; meios óticos ou qualquer outro processo eletromagnético;

III - retransmissão - a emissão simultânea da transmissão de uma empresa por outra;

IV - distribuição - a colocação à disposição do público do original ou cópia de obras literárias, artísticas ou científicas, interpretações ou execuções fixadas e fonogramas, mediante a venda, locação ou qualquer outra forma de transferência de propriedade ou posse;

V - comunicação ao público - ato mediante o qual a obra é colocada ao alcance do público, por qualquer meio ou procedimento e que não consista na distribuição de exemplares;

VI - reprodução - a cópia de um ou vários exemplares de uma obra literária, artística ou científica ou de um fonograma, de qualquer forma tangível, incluindo qualquer armazenamento permanente ou temporário por meios eletrônicos ou qualquer outro meio de fixação que venha a ser desenvolvido;

VII - contrafação - a reprodução não autorizada;

VIII - obra:

a) em co-autoria - quando é criada em comum, por dois ou mais autores;

b) anônima - quando não se indica o nome do autor, por sua vontade ou por ser desconhecido;

c) pseudônima - quando o autor se oculta sob nome suposto;

d) inédita - a que não haja sido objeto de publicação;

e) póstuma - a que se publique após a morte do autor;

f) originária - a criação primígena;

g) derivada - a que, constituindo criação intelectual nova, resulta da transformação de obra originária;

h) coletiva - a criada por iniciativa, organização e responsabilidade de uma pessoa física ou jurídica, que a publica sob seu nome ou marca e que é constituída pela participação de diferentes autores, cujas contribuições se fundem numa criação autônoma;

i) audiovisual - a que resulta da fixação de imagens com ou sem som, que tenha a finalidade de criar, por meio de sua reprodução, a impressão de movimento, independentemente dos processos de sua captação, do suporte usado inicial ou posteriormente para fixá-lo, bem como dos meios utilizados para sua veiculação;

IX - fonograma - toda fixação de sons de uma execução ou interpretação ou de outros sons, ou de uma representação de sons que não seja uma fixação incluída em uma obra audiovisual;

X - editor - a pessoa física ou jurídica à qual se atribui o direito exclusivo de reprodução da obra e o dever de divulgá-la, nos limites previstos no contrato de edição;

XI - produtor - a pessoa física ou jurídica que toma a iniciativa e tem a responsabilidade econômica da primeira fixação do fonograma ou da obra audiovisual, qualquer que seja a natureza do suporte utilizado;

XII - radiodifusão - a transmissão sem fio, inclusive por satélites, de sons ou imagens e sons ou das representações desses, para recepção ao público e a transmissão de sinais codificados, quando os meios de decodificação sejam oferecidos ao público pelo organismo de radiodifusão ou com seu consentimento;

XIII - artistas intérpretes ou executantes - todos os atores, cantores, músicos, bailarinos ou outras pessoas que representem um papel, cantem, recitem, declamem, interpretem ou executem em qualquer forma obras literárias ou artísticas ou expressões do folclore.

Art. 6º Não serão de domínio da União, dos Estados, do Distrito Federal ou dos Municípios as obras por eles simplesmente subvencionadas.

<sup>1</sup> Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19610.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19610.htm).