

RECYROB

Classificação Hiperespectral de Plásticos ao Nível do Objeto

Uma cadeia completa de supervisão fraca para classificar objetos de resíduos plásticos em imagens hiperespectrais de tapete transportador



Ricardo Silva Peres · Leandro Filipe · Alexandre Costa
UNINOVA – Centre of Technology and Systems



Mensagem executiva



A viabilidade está demonstrada; a próxima fase deve focar-se na robustez, validação e implementação.

16

imagens HSI
rotuladas

1,267

espectros de objeto
limpos

0.968

melhor macro-F1 em
validação holdout

5

classes de
plástico

Mensagem principal

A cadeia de processamento é funcional e inspecionável: ingere pastas ENVI em bruto, calibra a refletância, segmenta objetos, limpa rótulos fracos, treina classificadores espectrais e executa inferência através de uma interface local em Gradio.

Pronta para validação alargada — ainda não é um módulo certificado de separação em tempo real.

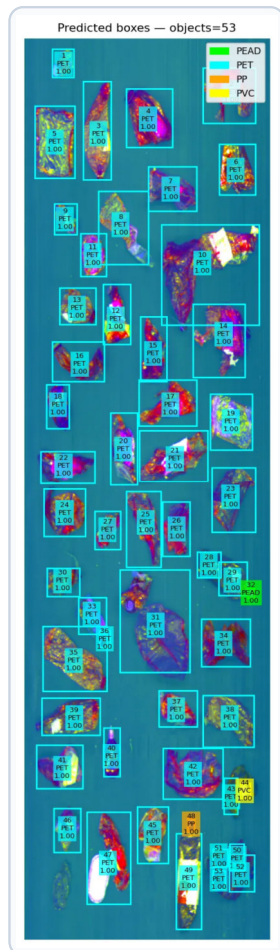
Próximas ações críticas

- PET e PVC precisam de mais imagens independentes.
- Ainda falta verdade-terreno para plásticos mistos.
- Os limiares de confiança/rejeição exigem calibração.
- A segmentação em tempo real deve tornar-se determinística.

PRÓXIMA DECISÃO: VALIDAÇÃO ALARGADA

Cenário operacional

Cada objeto no tapete deve receber uma decisão independente sobre o material.



Dados de desenvolvimento

- Imagens HSI maioritariamente de classe única.
- O nome da pasta fornece o rótulo do polímero maioritário.
- Objetos minoritários podem ser contaminantes ou colocações incorretas.

Objetivo de implementação

- Fluxos de plásticos mistos num tapete transportador.
- Uma previsão e confiança por objeto.
- Objetos desconhecidos ou de baixa confiança devem ser rejeitados ou reciclados.

Rótulos fracos maioritários → rótulos fiáveis ao nível do objeto



Escolha central de conceção: classificar o material a partir dos espectros hiperspectrais dos objetos, não da aparência visual.

Arquitetura do sistema



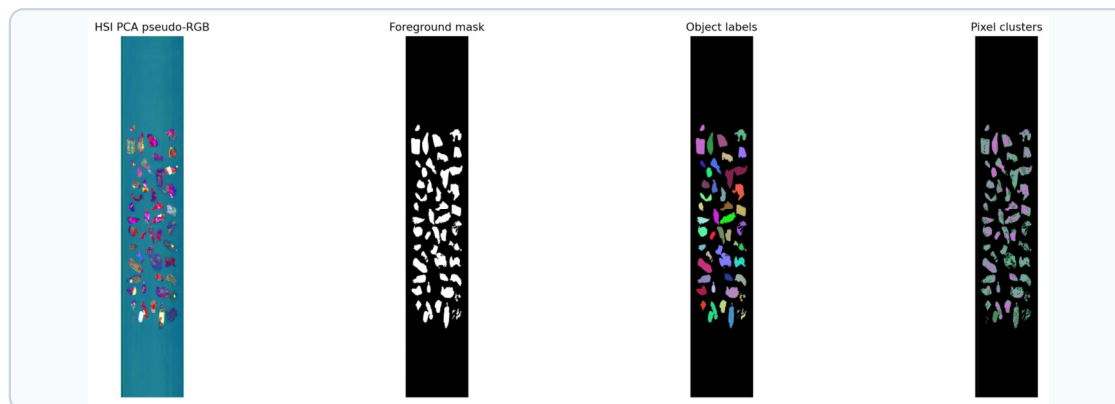
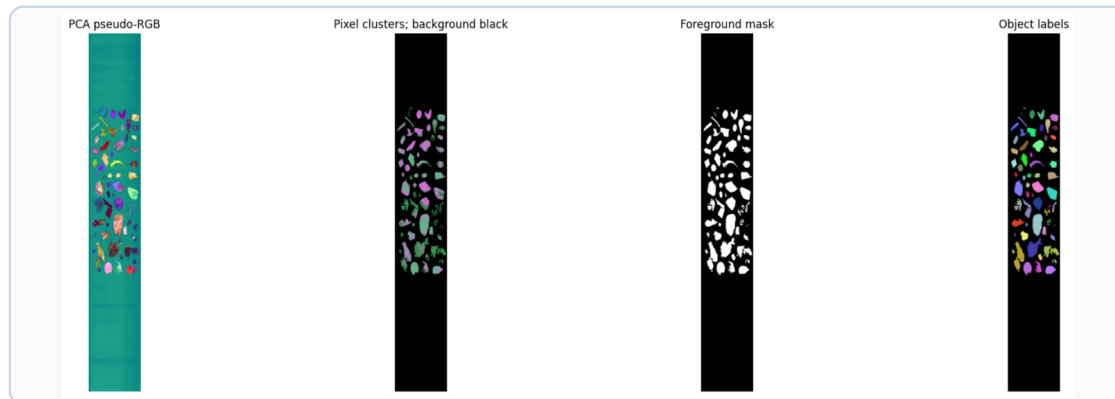
Cofinanciado pela
União Europeia

Uma cadeia de processamento reutilizável, das pastas de aquisição em bruto às previsões inspecionáveis.



Segmentação + controlo de qualidade

As máscaras dos objetos definem que píxeis se tornam evidência material.



Vistas de depuração verificam

- O pseudo-RGB por PCA confirma objetos visíveis e tapete.
- Os clusters de píxeis revelam a separação fundo/objeto.
- Máscaras de primeiro plano e componentes ligados definem instâncias de objeto.
- Controlos de qualidade rejeitam capturas incompletas ou inválidas antes da inferência.

53

objetos extraídos na amostra PET

Máscaras

píxeis usados para espectros

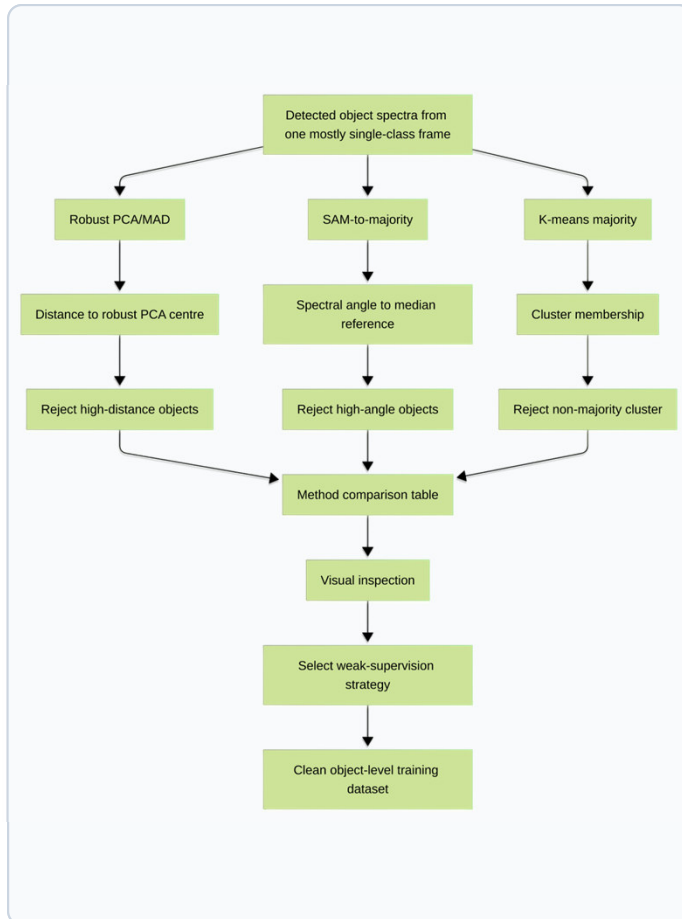
CSV

saídas rastreáveis

Uma previsão de material com elevada confiança só é significativa se a máscara do objeto for válida.

Supervisão fraca

A rejeição de outliers converte imagens maioritariamente de classe única em amostras de treino limpas ao nível do objeto.



PCA/MAD robusto

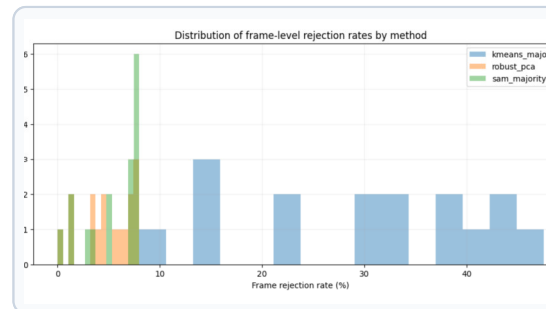
Linha de base por defeito. Espectros normalizados por SNV projetados no espaço PCA; objetos distantes do centro robusto são rejeitados por limiar MAD.

SAM-para-Maioria

Alternativa forte. Rejeita objetos com elevado desvio de ângulo espectral face à referência maioritária da imagem. Macro-F1 em holdout ligeiramente superior.

Maioria k-means

Linha de base de diagnóstico. Rejeita objetos de clusters minoritários. Mais agressivo do que os outros. Pode rejeitar em excesso a variabilidade natural intra-classe.



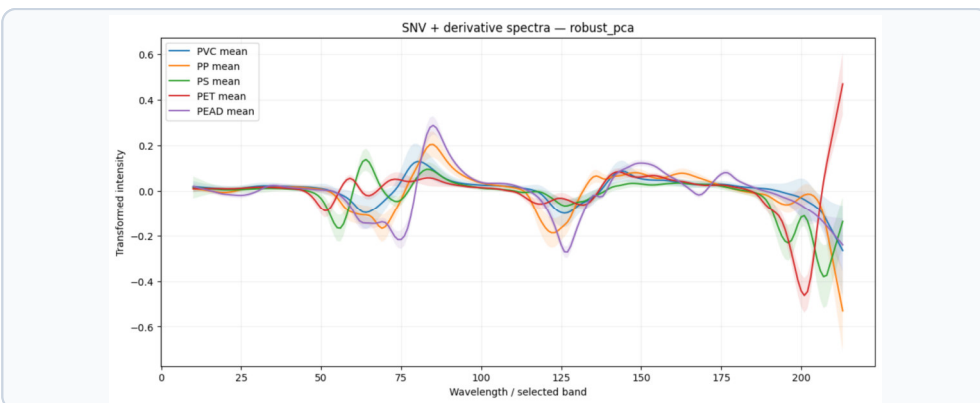
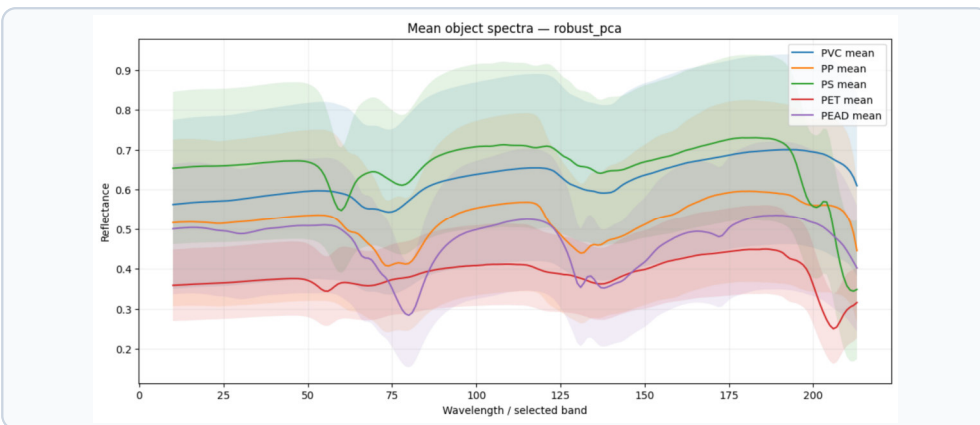
Objetos retidos

PCA/MAD	<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #00b0f0;"></div>	1267
SAM	<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #00b050;"></div>	1257
k-means	<div style="width: 100%; height: 10px; background-color: #e67e22;"></div>	948

A seleção do método deve ser revista depois de aumentar as aquisições PET/PVC e de imagens mistas.

Conjunto de dados ao nível do objeto

O classificador aprende a partir de espectros medianos dos objetos, não de imagens completas.



Conjunto de dados atual

1,267

objetos limpos com rótulos fracos

204

bandas espectrais retidas

5

classes

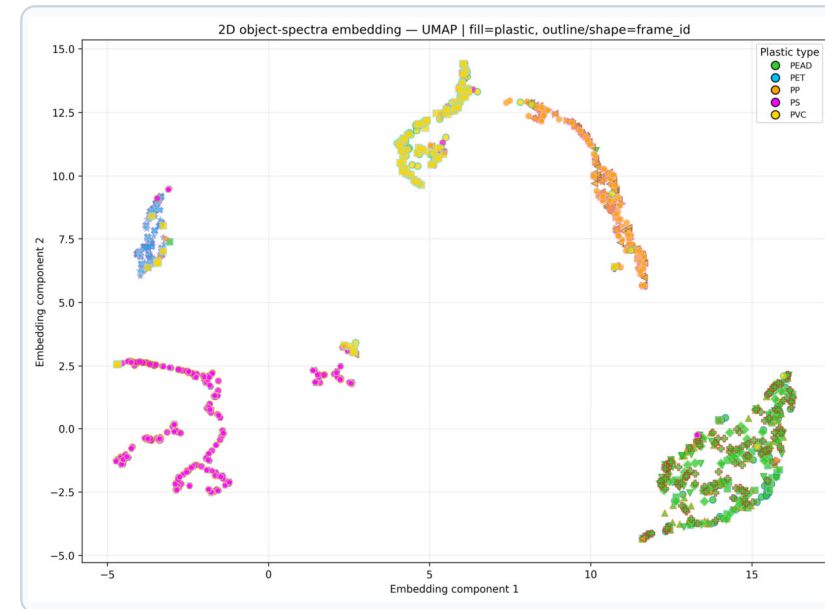
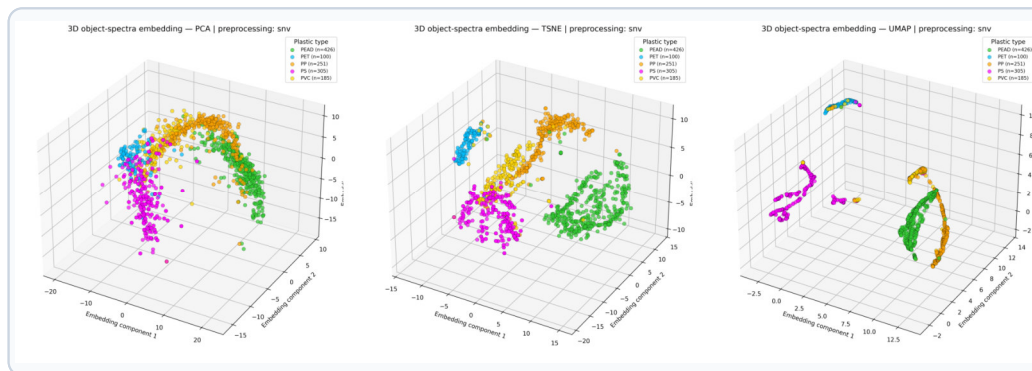
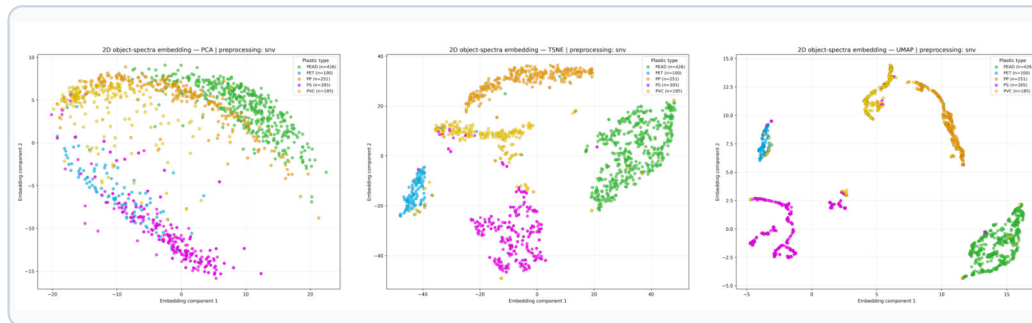
Objetos limpos por classe

PEAD		426
PS		305
PP		251
PVC		185
PET		100

A robustez da validação é limitada pelas imagens independentes: PET e PVC têm atualmente apenas duas imagens cada.

Separabilidade espectral

Os embeddings mostram uma estrutura forte por polímero e expõem a difícil fronteira PP-PVC.

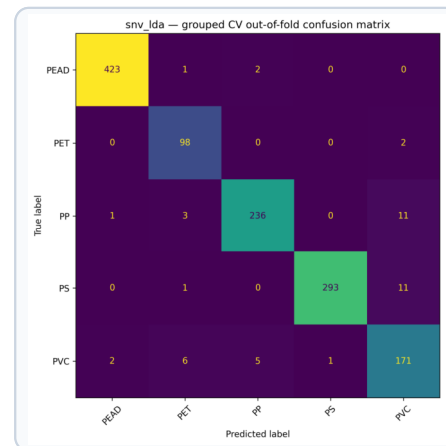
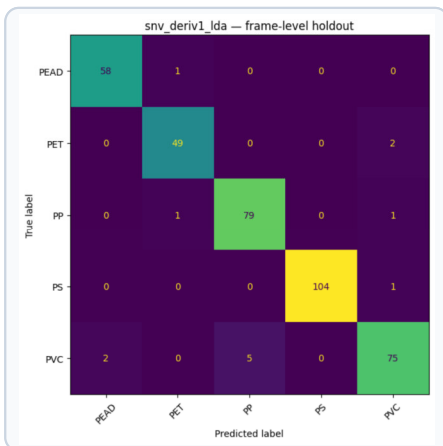


Interpretação

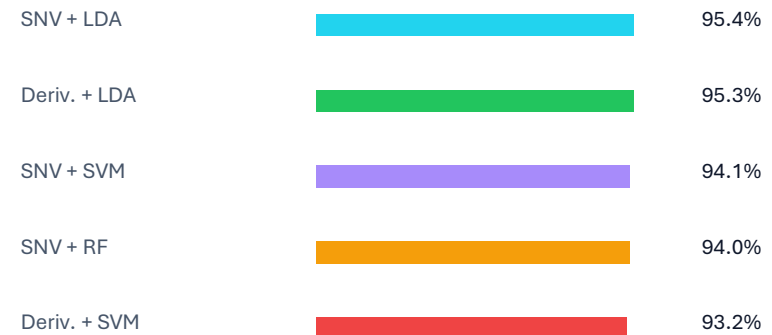
- PEAD e PS formam regiões de classe estáveis.
- PET é compacto, mas sub-representado.
- PP e PVC são o par de classes mais próximo.
- O UMAP consciente da imagem não mostra agrupamento dominante por imagem.

Avaliação do modelo

A validação consciente da imagem evita fuga otimista entre objetos da mesma aquisição.



Comparação de modelos em validação cruzada agrupada



Melhor validação holdout

- SNV + LDA com primeira derivada
- Exatidão 96.56%
- Exatidão balanceada 96.49%
- Macro-F1 96.40%

Melhor validação agrupada

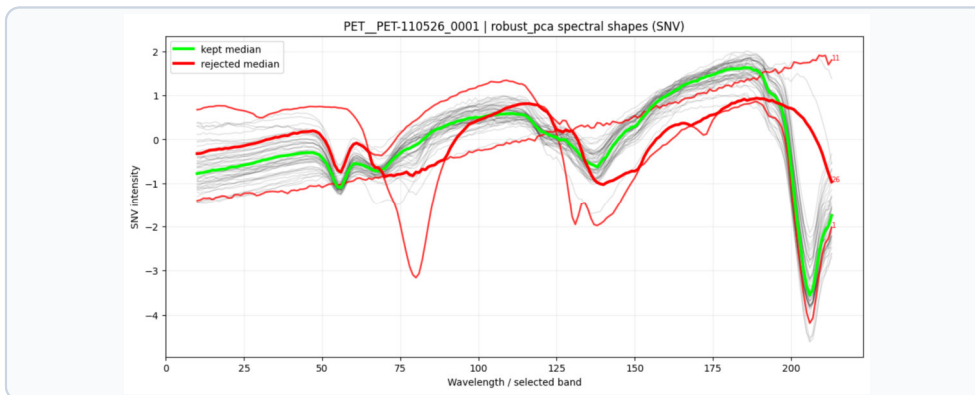
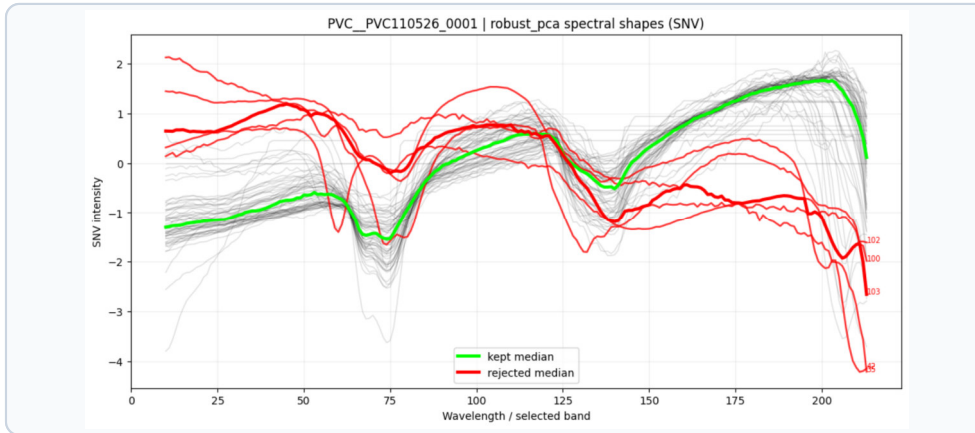
- SNV + LDA
- Exatidão 96.45%
- Exatidão balanceada 96.22%
- Macro-F1 95.38%

Linha de base recomendada: SNV + LDA pela simplicidade, estabilidade, interpretabilidade e eficiência de implementação.


Análise de erros



Todas as classes são aprendíveis; o PVC continua a ser a fragilidade diagnóstica principal.



Recall em validação agrupada

PEAD		99.3%
PET		98.0%
PS		96.8%
PP		94.6%
PVC		92.5%

Principais confusões residuais

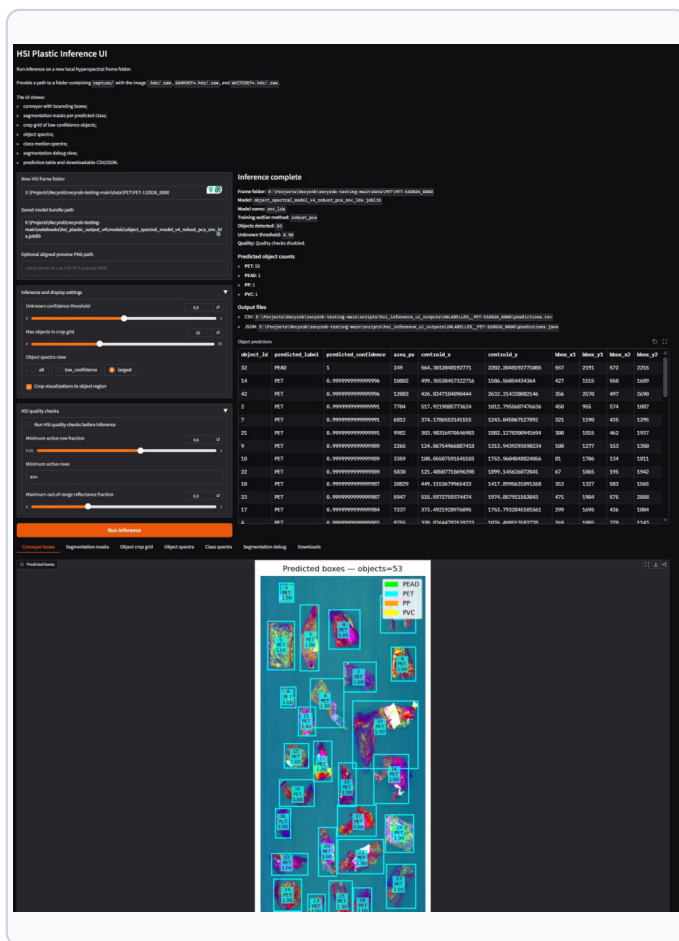
- PVC → PP
- PVC → PS
- PET / PP → PVC

Prioridade: recolher mais imagens de PVC e PET com maior variação de aquisição e de forma dos objetos.

Fluxo de trabalho interativo de inferência



O relatório completo inclui uma interface local funcional para validação rápida em novas aquisições.



O que a interface expõe

- Seleção da pasta da imagem e do pacote do modelo guardado.
- Limiares de controlo de qualidade para validade HSI.
- Tabela de previsões por objeto e contagens de objetos.
- Caixas delimitadoras, máscaras, espectros, grelhas de recortes e vistas de depuração.
- Saídas CSV/JSON descarregáveis para rastreabilidade.

PET-110526_0000

execução de inferência de exemplo

SNV + LDA

modelo carregado

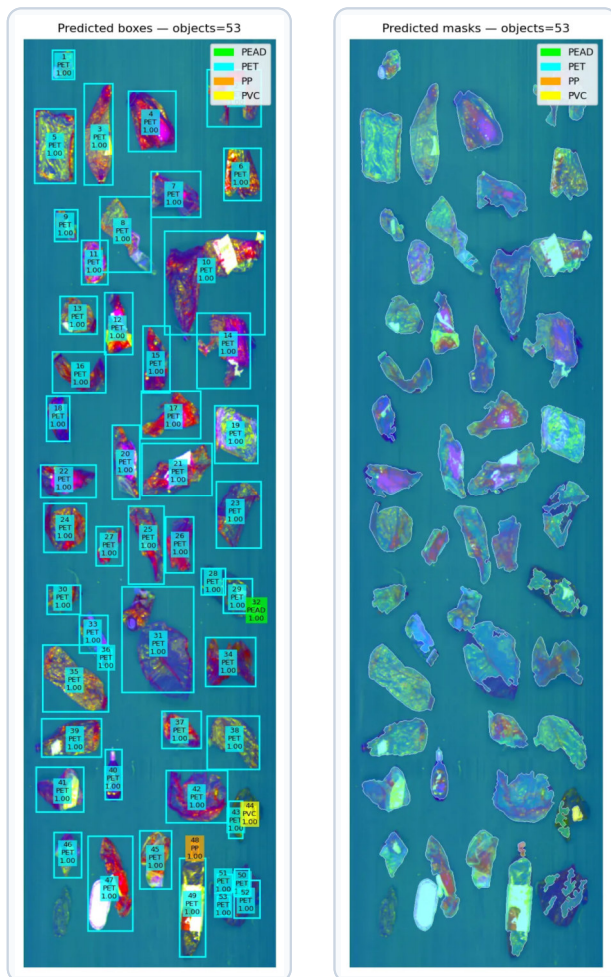
PCA/MAD

filtro de treino

Isto transforma a análise exploratória numa ferramenta de validação demonstrável para utilizadores não programadores.

Resultado na amostra PET

O modelo recuperou a maioria PET esperada, destacando previsões minoritárias para revisão.



Resumo das previsões

53

instâncias de
objeto

50

previsões PET

3

previsões
minoritárias

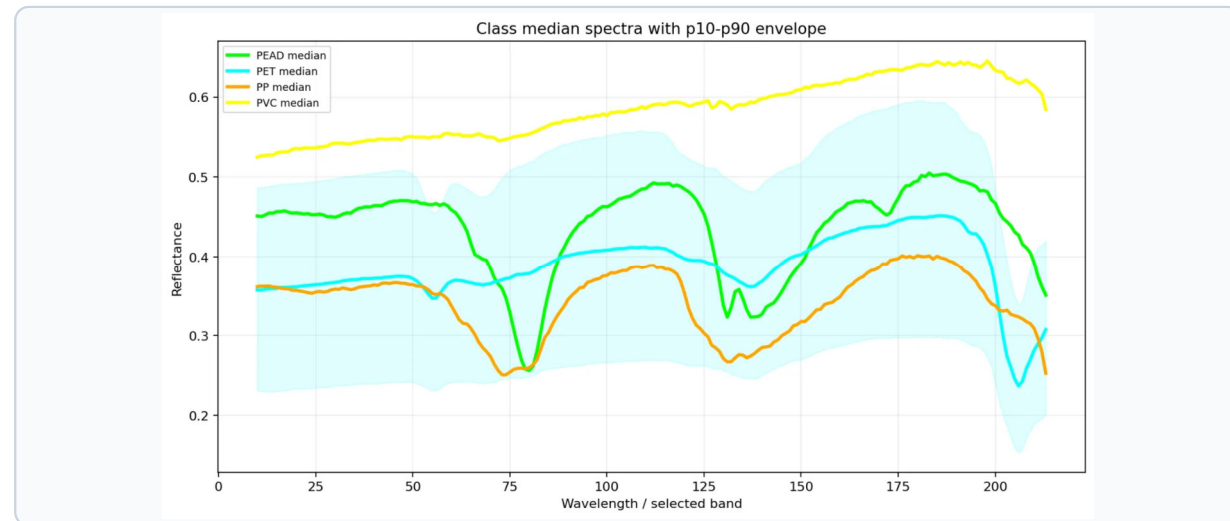
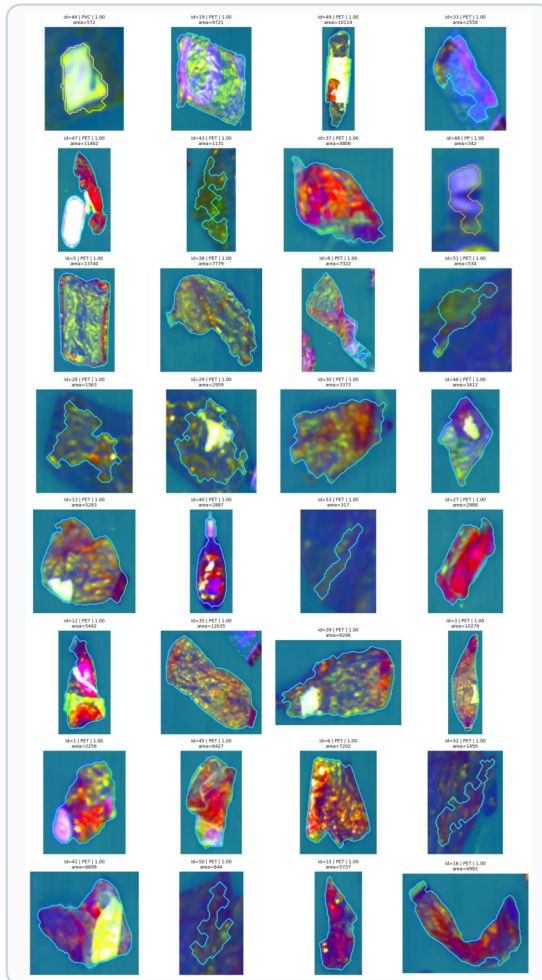
Contagens de objetos

PET		50
PEAD		1
PP		1
PVC		1

Previsões minoritárias não são automaticamente erros: são candidatas a contaminação, espectros atípicos, problemas de segmentação ou revisão manual.

Rastreabilidade + evidência espectral

As previsões são complementadas por recortes de objetos, máscaras, confiança e espectros.



Porque isto importa operacionalmente

- A grelha de recortes liga cada ID de objeto à qualidade da máscara, classe, confiança e área.
- Os espectros mostram a evidência material por detrás de cada decisão de classe.
- Objetos minoritários podem ser revistos antes de decidir se são contaminantes reais ou artefactos.

Esta camada de evidência é útil para depuração, demonstrações a partes interessadas e futura validação do tipo certificação.

Roteiro para extensão

Converter forte viabilidade em robustez de nível operacional.



A extensão justifica-se porque o sistema já está funcional; tempo adicional melhora diretamente a robustez da validação, a calibração e a capacidade de implementação.

Resultado-alvo: módulo fiável de decisão ao nível do objeto para separação de plásticos em tapete transportador.

Conclusão

O RECYROB tem agora uma cadeia HSI funcional, inspecionável e extensível para classificação de plásticos ao nível do objeto.

Entregue

Cadeia de processamento de ponta a ponta, relatório técnico e interface local de inferência.

Validado

Forte desempenho preliminar consciente da imagem em PEAD, PET, PP, PS e PVC.

Linha de base

SNV + LDA pela simplicidade, estabilidade e eficiência de implementação.

Próximo passo

Validação alargada com mais imagens, cenas mistas e calibração de confiança.

Com mais aquisições independentes e engenharia direcionada, a cadeia de processamento pode evoluir de validação de investigação para um módulo operacional de decisão para separação.

