

Utilização de IA em Sensoriamento Remoto, com Aerolevantamentos Realizados por Drone, para Identificar Tubulações de Drenagem em Reservatório de Rejeito

Emanuel Joaquim Daniel Júnior

Engenheiro Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Tamandaré, Brasil, emanuel.daniel12@gmail.com

Karla Leite Teixeira

Engenheira Civil, TPF Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, karla.leite@tpfe.com.br

Sanderllan Costa

Engenheiro Cartógrafo e Agrimensor, TPF Engenharia, Recife, Brasil, sanderllan.costa@tpfe.com.br

Luiza Cardoso Cavalcanti

Engenheira Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Belo Horizonte, Brasil, luizac.cavalcanti@gmail.com

Sophia Braga Carvalho

Engenheira Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Juiz de Fora, Brasil, sophia.carvalho@tpfe.com.br

RESUMO: A área minerada do platô Sacará possui reservatório para depósito de rejeito oriundo do processo de beneficiamento da bauxita. Devido sua extensa área, os dispositivos de drenagem alocados nas últimas décadas foram concebidos para atendimento da dinâmica operacional. Conseqüentemente, novas ferramentas, como drones, podem ser empregadas para facilitar o monitoramento das mudanças de localização. Paralelamente, a inteligência artificial também se destaca, sendo capaz de interpretar dados externos, aprender e utilizá-los para realizar tarefas. Assim, o objetivo deste estudo é utilizar IA, a partir de aerolevantamentos realizados por drone, para acompanhamento do dinamismo na localização das tubulações de drenagem superficial ao longo dos paredes do reservatório TP-02. O drone utilizado foi DJI Air 2S. Quanto à IA, utilizou-se o YOLOv8. Posteriormente, conduziu-se a análise visual da ortofoto e uma visita de campo para validação. Os resultados apontaram uma taxa de assertividade de 85% para o parede leste e 87% para o talude oeste, obtendo-se uma média geral de 86%. Assim, observa-se que o uso da metodologia proposta pode ser efetivo para executar um levantamento cadastral preliminar de forma prática, célere e de baixo custo. Salienta-se que a IA continua em treinamento, tendo capacidade de realizar um levantamento cadastral ainda mais resolutivo.

PALAVRAS-CHAVE: Inteligência Artificial, Drenagem Superficial, Mineração, VANTs.

ABSTRACT: The mining area of the Sacará plateau has a reservoir for depositing waste from the bauxite processing. Due to their extensive area, replacement devices allocated in recent decades were designed to meet operational dynamics. Consequently, new tools, such as drones, can be used to facilitate monitoring the location changes. At the same time, artificial intelligence also stands out as being capable of interpreting external data, learning, and using it to perform tasks. Therefore, the objective of this study is to use AI, based on aerial surveys carried out by drone, to monitor the dynamism in the location of surface drainage pipes along the walls of the TP-02 reservoir. The equipment used was the DJI Air 2S. As for AI, YOLOv8 was used. Subsequently, was made a visual analysis of the orthophoto and a field visit. The results present an assertiveness rate of 85% for the east wall and 87% for the west slope, obtaining an overall average of 86%. Therefore, note that the use of the proposed methodology can be effective in carrying out a preliminary cadastral survey in a practical, quick, and low-cost manner. It should be noted that the AI has been training, increasing its capacity to carry out more decisive cadastral surveys.

KEYWORDS: Artificial Intelligence, Surface Drainage, Mining, UAVs.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os tipos de mineradores existentes no território brasileiro, há aquelas que atuam na exploração de bauxita para produção de alumínio. Dentre essas minhas, destaca-se o platô existente no complexo do Porto Trombetas, localizado na região oeste do estado do Pará, Brasil, conforme ilustrado na Figura 1.

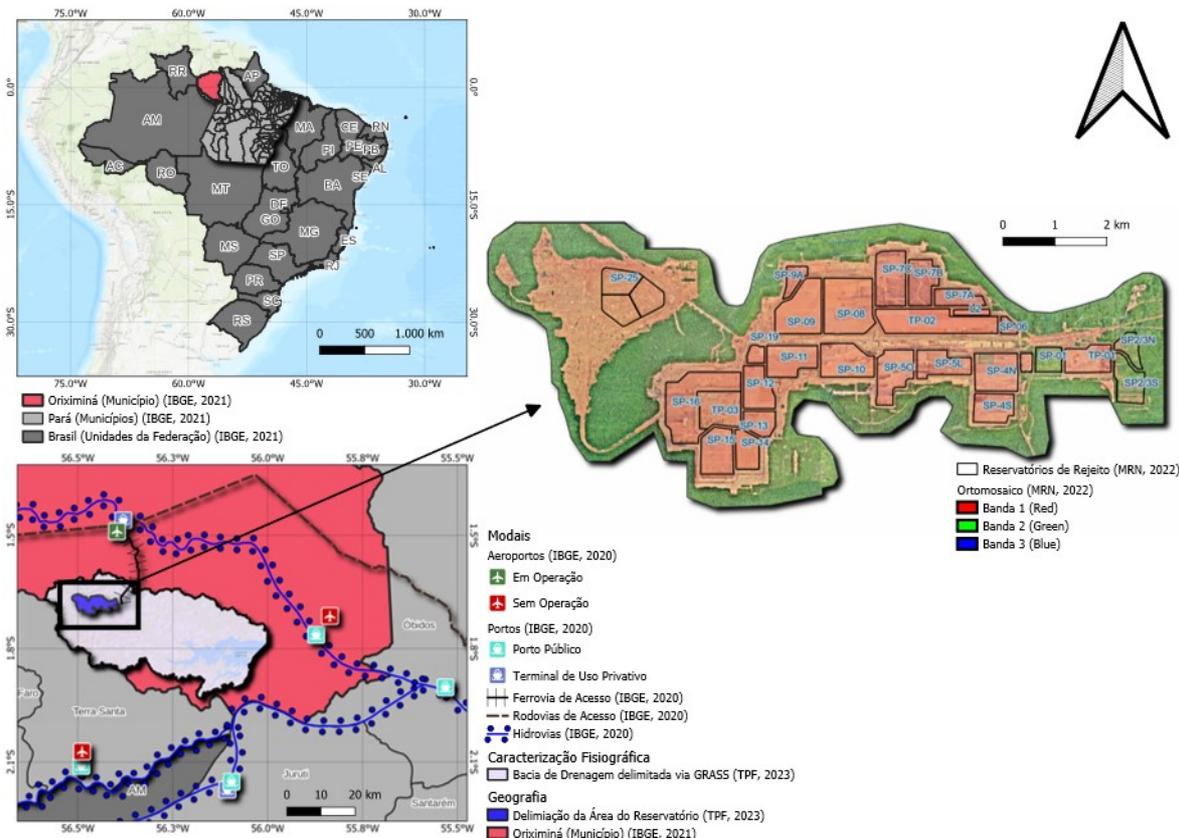


Figura 1. Localização da Mina Platô Saracá Leste e Oeste.

Os rejeitos gerados no processo de beneficiamento da bauxita são armazenados em reservatórios construídos na área previamente explorada do platô Sacará Leste e Oeste, formando um Sistema de Disposição de Rejeitos. Dada a vasta extensão de aproximadamente 2.244 hectares de Sacará Leste, infere-se que o monitoramento das mudanças no sistema de drenagem superficial é um desafio. Dessa forma, entende-se que novas ferramentas podem ser empregadas para facilitar o monitoramento de tais modificações.

Dentre essas ferramentas, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), comumente chamados de drones, são uma excelente solução para o sensoriamento remoto na região. A utilização de drones para inspeções de barragens não apenas supera as limitações das inspeções visuais, mas também permite uma gestão mais fácil da conservação e monitoramento de ativos para os seus respectivos gestores. Ao comparar os dados das inspeções periódicas, o estado e a progressão de potenciais anomalias podem ser avaliados e monitorados.

Drones de asas rotativas, como o utilizado neste estudo, foram reconhecidos por Pinto *et al.* (2020) como mais adequado para fiscalizações de estruturas e obras de infraestrutura. Sua capacidade de voo vertical permite operar em espaços mais apertados, realizar voos estáticos e planar no ar.

Segundo Gorkos (2022), a utilização de VANTs para inspeções de barragens facilita a gestão de ativos e melhora o registro de dados, os quais podem ser analisados por uma equipe multidisciplinar de especialistas. A comparação dos dados das inspeções periódicas permite avaliar o estado e a progressão de potenciais anomalias. Além disso, os VANTs permitem a análise da segurança de barragens sob diferentes condições climáticas, incluindo períodos de inundação ou seca.

Pinto *et al.* (2020) consideram os drones como uma inovação disruptiva com potencial para transformar as metodologias tradicionais de inspeção de barragens e expandir as capacidades de imagem tridimensional.

Além disso, Buffi *et al.* (2017) destacam que esta técnica fornece dados de alta precisão adequados para avaliações detalhadas de conservação de materiais e reconstrução métrica de estruturas de barragens e terrenos adjacentes.

Paralelamente, destaca-se o conceito de inteligência artificial (IA). A IA é um sistema capaz de interpretar dados externos, aprender com eles e usar esse conhecimento para realizar tarefas. Quando combinada com dados obtidos de drones, a IA torna-se uma ferramenta poderosa para análise de dados.

Com base neste conceito, Feng *et al.* (2020) desenvolveram uma máquina de aprendizagem profunda usando métodos de redes neurais convolucionais, um tipo de algoritmo de IA treinado para identificar padrões. Em seu trabalho, eles demonstraram a capacidade de extrair aberturas e comprimentos de fissuras por meio da análise de pixels. O conjunto de dados foi dividido em conjuntos de treinamento e validação, com o método atingindo 80,45% de precisão na detecção de trincas.

Dentre as ferramentas de aprendizagem profunda, o YOLOv8 é a versão mais recente do YOLO da Ultralytics, um renomado modelo de detecção de objetos e segmentação de imagens em tempo real. O YOLOv8 representa um transformador multimodal de última geração (SOTA), incorporando novas melhorias e recursos para melhor desempenho, eficiência e flexibilidade. Ele suporta várias tarefas de IA de visualização, incluindo detecção, segmentação, estimativa de pose, rastreamento e classificação, tornando-o versátil para diversas aplicações e domínios (Ultralytics, 2023).

Assim, o objetivo deste estudo é utilizar a inteligência artificial em sensoriamento remoto, especificamente por meio de levantamentos aéreos realizados por drone, para monitorar mudanças na posição das tubulações de drenagem superficial ao longo das cristas dos reservatórios de rejeitos, com foco em um reservatório de rejeitos diluídos.

2 METODOLOGIA

A partir do levantamento aéreo é possível obter as ortofotos, fotografias que mostram imagens de objetos em suas verdadeiras posições ortográficas. Essas ortofotos são processadas por meio do DroneDeploy, plataforma que gera mapas ortomosaicos e modelos 3D da área pesquisada. O modelo de drone empregado neste estudo foi o Air 2S, da DJI. A Tabela 1 fornece uma visão geral das especificações técnicas do VANT (DJI, 2024) utilizado neste trabalho, incluindo detalhes sobre a câmera utilizada para capturar as ortofotos.

Tabela 1. Especificações técnicas do DJI Air 2S.

Itens	Características
Peso de decolagem	595 g
Velocidade máx.	6 m/s
Altura máx. de serviço acima do nível do mar	5000 m
Tempo máx. de voo (sem vento)	31 minutos
Distância máx. de voo (sem vento)	18,5 km
	CMOS de 1"
Sensor da Câmera	Píxeis efetivos: 20 MP; dimensões de píxeis de 2,4 μm
	Campo de visão (FOV): 88°
Lente	Formato equivalente a 35 mm: 22 mm
	Abertura: f/2.8
	Alcance de disparo: 0,6 m a ∞
	20 MP
Tamanho da imagem	5472×3648 (3:2) 5472×3078 (16:9)

Inicialmente, criou-se um plano de voo, utilizando o DroneDeploy, para definir a área a ser percorrida durante o levantamento aéreo. Neste projeto, os seguintes parâmetros de entrada foram definidos:

- Altura (m): 120;
- Sobreposição vertical (%): 75;
- Sobreposição horizontal (%): 80.

Essas configurações determinam a altitude em que o drone voa, bem como a quantidade de sobreposição

entre imagens consecutivas, tanto vertical quanto horizontalmente. Esses parâmetros são cruciais para gerar ortomosaicos e modelos 3D precisos.

Para garantir a segurança do operador durante o levantamento aéreo, foram seguidas as seguintes normas normativas:

- Código Brasileiro de Aeronáutica (Lei nº 7.565/1986): Este código fornece um conjunto abrangente de regulamentos e procedimentos para operações de aviação no Brasil, incluindo a operação de sistemas de aeronaves não tripuladas (UAS).
- RBAC-E nº 94, da ANAC: Regulamento emitido pela ANAC (Autoridade Brasileira de Aviação Civil) especificamente para a operação de UAS no Brasil. Estabelece os requisitos e diretrizes para operações seguras de UAS.
- IS nº E94-001 - Revisão A, IS nº E94-002 - Revisão A, IS nº E94-003 - Revisão A, IS nº E94.503-001 - Revisão A: São Manuais de Instruções emitidos pela ANAC que fornecem orientações e procedimentos detalhados para operações de UAS em conformidade com o RBAC-E nº 94.
- Resolução ANAC nº 25/2008: Estabelece regulamentos gerais para operações de aeronaves civis no Brasil, que podem incluir disposições relevantes para operações de UAS.
- ICA 100-40 e ICA 100-12: São Instruções para Navegação Aérea emitidas pelo DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo). A ICA 100-40 fornece diretrizes para operações de UAS, e a ICA 100-12 cobre a operação geral de UAS no espaço aéreo brasileiro.
- ICA 100-37: Esta Instrução de Navegação Aérea do DECEA fornece diretrizes para a operação de sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS) no espaço aéreo brasileiro.
- Resolução ANATEL nº 635: Esta resolução da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) estabelece regulamentos e requisitos para o uso do espectro de radiofrequências por UAS no Brasil.

Esses regulamentos e normativas garantem que o levantamento aéreo seja conduzido em conformidade com os padrões de segurança e leis aplicáveis no Brasil. A adesão a estes regulamentos ajuda a mitigar riscos e garantir a operação segura do drone.

Com condições climáticas favoráveis, especificamente em um tempo ensolarado e sem chuva, estando em conformidade com as normas legais supramencionadas, o voo foi realizado dentro da área pré-determinada pelo DroneDeploy. As áreas sobrevoadas para este artigo foram as paredes leste e oeste do reservatório TP-02, o qual pode ser visualizado na Figura 1. A seleção desse local considerou a classificação de Dano Potencial Associado (DPA) do reservatório, conforme especificado na Resolução ANM nº 95, bem como a disposição das tubulações de PEAD responsáveis pela drenagem superficial.

Assim que o voo foi concluído, as imagens capturadas foram carregadas e processadas utilizando o DroneDeploy. O processamento envolveu a geração do ortomosaico e a criação de um modelo 3D da área pesquisada. O ortomosaico resultante tinha resolução de pixels de 2,6 cm, fornecendo informações visuais detalhadas.

Em relação à implementação da inteligência artificial, o modelo YOLOv8 foi utilizado como *framework* de aprendizagem profunda. Isso envolveu a construção de um conjunto de dados com a identificação de tubos PEAD, seguido de treinamento e validação do modelo de IA. O plugin QGIS, *Deepness*, foi empregado para carregar e integrar o modelo de IA no fluxo de trabalho.

Como etapa essencial na validação do modelo de aprendizagem profunda, foi realizada uma visita de campo especificamente na parede leste da TP-02. Antes da visita, realizou-se uma análise minuciosa dos mapas de localização derivados dos resultados da IA para obter consciência espacial das prováveis localizações dos tubos. Isso facilitou o desenvolvimento de uma estratégia de abordagem no local. Durante a inspeção de campo, verificou-se a parametrização de escala do ortomosaico em relação às medições do mundo real. Também foi validada a presença de tubos previamente identificados pela IA. Os resultados obtidos durante a visita de campo foram registrados em fichas de cadastro e registros fotográficos georreferenciados foram obtidos por meio do aplicativo *Timestamp*. Esses registros foram utilizados para comparação com as coordenadas previamente determinadas pelo modelo de aprendizagem profunda, aumentando ainda mais a precisão e confiabilidade dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao implementar os métodos discutidos no capítulo anterior, o sistema de inteligência artificial identificou e geolocalizou com sucesso tubos de PEAD. A avaliação do desempenho da IA foi realizada

utilizando-se de uma matriz de confusão, conforme ilustrada na Figura 2. A matriz de confusão é uma métrica comumente usada para avaliar a precisão do modelo de classificação, analisando-se como o seu comportamento para com diferentes classes. No contexto da detecção de objetos, a matriz de confusão permite determinar a capacidade do modelo de identificar corretamente objetos pertencentes a classes específicas, como tubos PEAD.

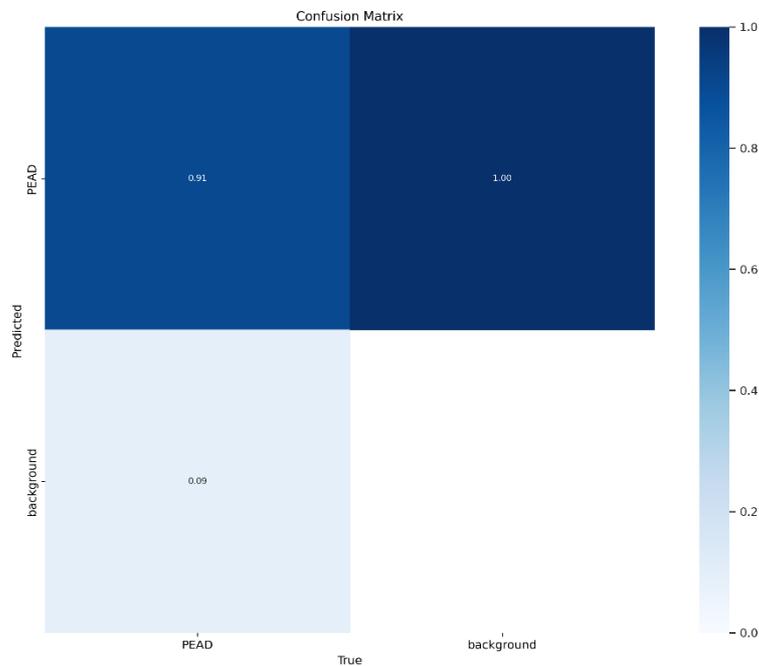


Figura 2. Matriz de Confusão.

De acordo com a matriz de confusão, o modelo IA obteve resultados satisfatórios na detecção de tubos PEAD. Identificou corretamente os tubos como PEAD (verdadeiros positivos) em 91% dos casos, mas não conseguiu detectá-los (falsos negativos) em 9% dos casos. Isto demonstra que o modelo tem um alto nível de precisão e fornece informações valiosas sobre a sua presença e localização na área pesquisada.

As informações fornecidas pela matriz de confusão são determinantes para avaliar o desempenho do modelo e compreender suas limitações. Eles ajudam a identificar áreas de melhoria e orientar os ajustes necessários para aumentar a precisão e a confiabilidade do modelo.

A curva da função de perda, conforme ilustrada na Figura 3, oferece uma representação visual do processo de treinamento do modelo e a sua direção de aprendizagem. As três diferentes variáveis plotadas nas Figuras 3a, b e c, demonstram a progressão da perda. Pode-se observar que à medida que período aumenta, há uma notável convergência no sentido da redução do erro. Essa rápida convergência indica que o modelo está aprendendo e melhorando de forma eficiente suas previsões.

Além disso, as Figuras 3f, g e h, ilustram a queda do erro no conjunto de teste para as mesmas variáveis mencionadas acima. Esses gráficos são valiosos para avaliar o desempenho do modelo em dados não vistos. A queda consistente de erros em todo o conjunto de teste indica que o modelo está efetivamente convergente e está adequado para realizar novas previsões precisas em demais exemplos.

No geral, esses gráficos fornecem informações valiosas sobre o treinamento e o desempenho do modelo, ajudando pesquisadores e profissionais a acompanhar o seu progresso, tomar decisões direcionadas e refinar ainda mais o modelo para obter melhores resultados.

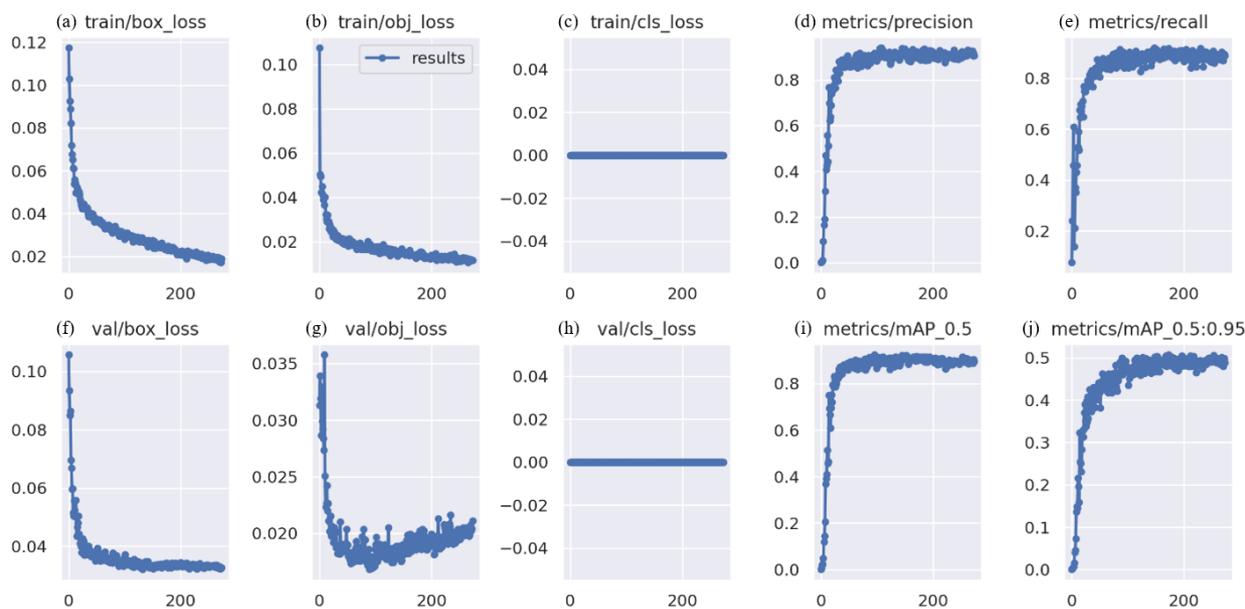


Figura 3. Métricas de Validação (abscissas apontam o número de épocas e as ordenadas apontam os resíduos de erro).

Por fim, realizou-se uma análise visual para verificar a assertividade do modelo implementado. Para este artigo são detalhadas as regiões da parede leste do reservatório TP-02. Os polígonos vermelhos numerados que identificam os tubos encontrados podem ser visualizados nas 4, 5 e 6.



Figura 4. Região Superior da Parede Leste da TP-02.

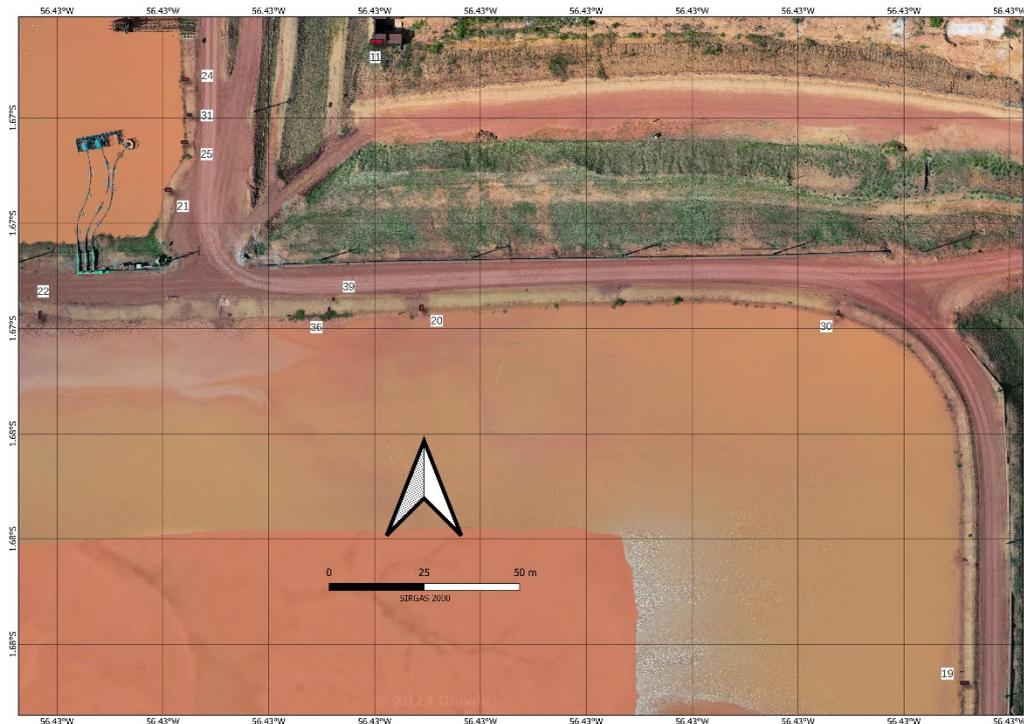


Figura 5. Região Central da Parede Leste de TP-02.

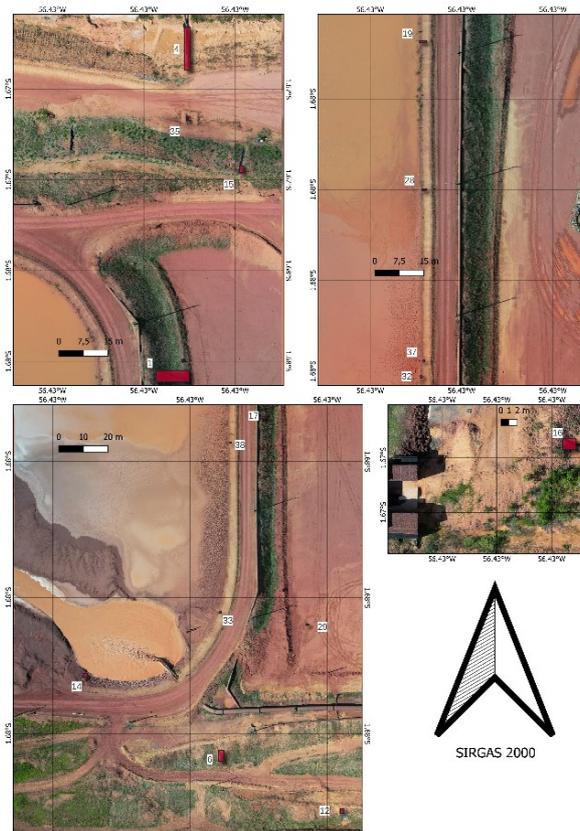


Figura 6. Outras Áreas da Parede Leste da TP-02.

Com base nos dados obtidos, quantificaram-se 23 tubulações na Parede Oeste da TP-02, enquanto foram identificadas 40 tubulações na Parede Leste. Através da análise visual de imagens aéreas, alcançou-se um percentual de 90% para identificação de tubos de PEAD na parede leste da TP-02, e 87% para a parede oeste, resultando em uma média de 88,5%.

Para melhorar ainda mais a precisão dos resultados, realizou-se uma visita de campo, que levou à exclusão de 2 tubos identificados incorretamente dos 36 previamente refinados para a Parede Leste. Este ajuste resultou em uma nova taxa percentual de 85% para a Parede Leste, baixando a média geral para 86%.

Esses resultados são consistentes com a Matriz de Confusão apresentada na Figura 2, indicando que o modelo de aprendizagem profunda desenvolvido teve bom desempenho e demonstrou boa precisão na detecção e identificação de tubos de PEAD nas cristas das bacias de rejeitos, atingindo um valor de 94,5% próximo ao valor esperado.

É importante notar que o refinamento dos resultados através da verificação de campo é uma etapa valiosa no processo de validação, pois ajuda a corrigir quaisquer erros de classificação feitos pelo modelo de IA e a garantir a precisão dos resultados finais.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo utilizar inteligência artificial no sensoriamento remoto, a partir de levantamentos aéreos realizados por drone, para monitorar a localização de tubulações de drenagem superficial nas paredes leste e oeste do reservatório TP-02, no Platô Saracá Leste. Assim, foi possível observar que a metodologia proposta por este trabalho foi muito eficaz em realizar um levantamento cadastral preliminar de forma prática, rápida e de baixo custo, obtendo uma assertividade média geral de 86%. Ressalta-se que a Inteligência Artificial continua em treinamento e aprendizado, podendo fornecer dados mais relevantes para um levantamento cadastral ainda mais resolutivo.

Destacam-se, também, algumas limitações do modelo implementado, uma vez que alguns tubos estão quase totalmente enterrados, aparecendo apenas como “pontos pretos” nas imagens em raster, na sua entrada e saída, o que dificulta a sua identificação como um tubo único. Além disso, é necessário um ajuste manual para aumentar a qualidade dos resultados obtidos, principalmente no que diz respeito à definição de diferentes trechos de uma mesma tubulação que, devido ao enterramento de partes intermediárias, a IA identifica como trechos diferentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar a sua sincera gratidão à TPF Engenharia, pelo seu valioso apoio e incentivo na implementação de soluções inovadoras. A colaboração e assistência prestada pela TPF Engenharia foram fundamentais para o sucesso da execução deste projeto. *Building the world, better.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Buffi, G., Manciola, P., Grassi, S., Barberini, M., Gambi, A. (2017) Survey of the Ridracoli Dam: UAV-based photogrammetry and traditional topographic techniques in the inspection of vertical structures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8 (2), p.1562-1579.
- DJI. (2024) *DJI Air 2S Especificações*. Disponível em: <<https://www.dji.com/br/air-2s/specs>>. Acesso em: 29 fev. 2024.
- Gorkos, P. (2022) *Potencial de uso de drones em inspeções de barragens: estudo de caso da Barragem dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim e Barragem Rodolfo da Costa e Silva*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul / UFRGS, 212 p.
- Pinto, L., Bianchini, F., Nova, V., Passoni, D. (2020) Low-cost UAS photogrammetry for road infrastructures' inspection. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - XXIV ISPRS, Nice. Proceedings...* ISPRS Society. p. 1145-1150.
- Ultralytics Inc. (2024) *Documentos do Ultralytics YOLOv8*. Disponível em: <<https://docs.ultralytics.com/pt>>. Acesso em: 29 fev. 2024.
- Zhang, H., Wang, H., Wang, S., Li, Y. (2020) Automatic Pixel-Level Crack Detection on Dam Surface Using Deep Convolutional Network. *Sensors*, 20 (7), p.2069.