

EXTRAÇÃO DE OURO A PARTIR DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS DE DRONES AGRÍCOLAS: USO DA TIOURÉIA COMO ALTERNATIVA AO CIANETO

Stéfany Vier Steffen – stefanyvier@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Materiais.

Rua Padre Nóbrega, 200, AP 21, Vila Nova

93525-290 – Novo Hamburgo – RS

Hugo Marcelo Veit – hugo.veit@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Materiais.

Fernanda Machado – machado.fe2020@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Ambiental

Resumo: O rápido avanço tecnológico no setor agrícola tem impulsionado a utilização de drones de pulverização e quando a vida útil destes chega ao fim eles podem ser considerados um tipo de resíduo eletroeletrônico. Isso pode levar a um acúmulo de resíduos contendo metais preciosos, como o ouro. Este estudo investiga, inicialmente através da caracterização de materiais a presença ou não de metais de interesse, e na sequência a recuperação de ouro a partir de pinos de conexão de drones agrícolas por meio da lixiviação com tiouréia, uma alternativa menos tóxica ao cianeto. A caracterização das amostras por fluorescência de raios-X revelou a presença de ouro (2,17%), cobre (75,65%) e níquel (21,38%) em pinos de conexão. Experimentos de lixiviação foram realizados, inicialmente com cianeto como referência, e após com tiouréia variando a temperatura (25°C, 30°C e 35°C), a razão sólido-líquido (10g/L e 40g/L) e o método de agitação (magnética e ultrassônica). O aumento da temperatura resultou em uma diminuição significativa no rendimento da lixiviação com tiouréia, enquanto a agitação ultrassônica proporcionou os melhores resultados, atingindo 37,02% de extração de ouro. No entanto, o desempenho da tiouréia foi inferior ao cianeto. Os resultados indicam que a lixiviação com tiouréia assistida por ultrassom é uma estratégia promissora para a recuperação sustentável de ouro de resíduos eletrônicos, mas requer otimização das condições operacionais e avaliação da viabilidade técnica e econômica em comparação com o processo convencional à base de cianeto.



Palavras-chave: Drones agrícolas; Resíduos eletrônicos; Recuperação de ouro; Lixiviação com tiouréia; Sustentabilidade.

EXTRACTION OF GOLD FROM ELECTRONIC WASTE FROM AGRICULTURAL DRONES: USE OF THIOUREA AS AN ALTERNATIVE TO CYANIDE

Abstract: Rapid technological advances in the agricultural sector have boosted the use of spraying drones and when their useful life comes to an end they can be considered a type of electronic waste. This can lead to an accumulation of waste containing precious metals such as gold. This study investigates, initially through the characterization of materials, the presence or absence of metals of interest, and then the recovery of gold from the connecting pins of agricultural drones through leaching with thiourea, a less toxic alternative to cyanide. Characterization of the samples by X-ray fluorescence revealed the presence of gold (2.17%), copper (75.65%) and nickel (21.38%) in the connecting pins. Leaching experiments were carried out, initially with cyanide as a reference, and then with thiourea, varying the temperature (25°C, 30°C and 35°C), pulp density (10g/L and 40g/L) and the stirring method (magnetic and ultrasonic). Increasing the temperature resulted in a significant decrease in the thiourea leaching yield, while ultrasonic agitation provided the best results, achieving 37.02% gold extraction. However, the performance of thiourea was inferior to that of cyanide. The results indicate that ultrasound-assisted thiourea leaching is a promising strategy for the sustainable recovery of gold from electronic waste, but it requires optimization of the operating conditions and evaluation of the technical and economic viability in comparison with the conventional cyanide-based process.

Keywords: Agricultural drones; Electronic waste; Gold recovery; Thiourea leaching; Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das atividades humanas que mais transforma o meio ambiente. Em vista disso, a tecnologia da agricultura de precisão consiste em aumentar a produção com maior eficiência e sustentabilidade dos recursos econômicos e ambientais. A coleta de dados de áreas georreferenciadas, se torna possível a utilização da automação agrícola (JULIANA MARTINS MEDINA, [s.d.]). Como isso, a utilização de drone para a agricultura de precisão é uma realidade que já está promovendo a transformação tecnológica no campo. Em movimento constante, o mercado de drones movimenta cerca de R\$300 milhões ao ano, sendo grande parte desse capital proveniente do agronegócio (RENATO BORGES, [s.d.]).



No entanto, a rápida obsolescência dessas máquinas levanta questões importantes sobre o descarte responsável e sustentável dos componentes eletrônicos. Surge disso um desafio premente relacionado ao manejo responsável de seus resíduos, em especial dos resíduos eletrônicos como placas de circuito impresso (PCI), baterias, telas, pinos e conexões que podem apresentar quantidades substâncias de metais de interesse, entre eles os metais preciosos como ouro (Au). A reciclagem de drones de pulverização agrícola para obtenção de metais a partir de seus componentes eletrônicos representam uma abordagem inovadora e ambientalmente responsável para lidar com essa crescente fonte de resíduos, contribuindo para a conservação de recursos naturais e a redução do impacto ambiental (IAN TISEO, 2013).

Este estudo tem como objetivo principal investigar a presença e a viabilidade da recuperação de ouro a partir de drones de pulverização agrícola por meio de uma rota hidrometalúrgica alternativa e menos poluente, utilizando tiouréia (TU) como agente lixiviante. Tradicionalmente, a obtenção do ouro é realizada por meio de lixiviação com cianeto, um processo amplamente utilizado na indústria de mineração. No entanto, a lixiviação com cianeto é associada a sérios riscos ambientais, incluindo a contaminação de águas subterrâneas e o envenenamento da vida aquática, além de implicações à saúde humana (KAMGA et al., 2018). Nesse contexto, a presente pesquisa propõe uma análise comparativa entre a rota convencional com cianeto e a rota alternativa com tiouréia, avaliando não apenas a eficiência da recuperação do ouro, mas também os parâmetros para aumento ou diminuição da eficiência da extração.

Ao explorar essa temática, esse trabalho busca contribuir para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos eletrônicos provenientes da indústria agrícola, promovendo a transição para soluções menos prejudiciais ao meio ambiente. Além disso, a pesquisa também visa fornecer insights valiosos para a indústria de reciclagem de eletrônicos, abrindo portas para a recuperação de recursos valiosos de forma mais responsável, alinhada com os princípios da economia circular e da sustentabilidade ambiental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O que são drones

Drone é todo veículo aéreo que não utiliza de piloto para ser guiado, podendo ser controlado a distância via rádio, satélite, infravermelho ou até mesmo com rota definida previamente coordenadas via satélite (GNSS – Global Navigation Satellite System). Desta forma, todo drone é um veículo aéreo não tripulado (VANT), no entanto a nomenclatura VANT já é obsoleta e para adequação ao padrão mundial para esses equipamentos atualmente são chamados de RPA (Remote Piloted Aircraft System)



ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) (HAMILTON PIRES DE AZEVEDO; JOSÉ WILLIAM GOMES DA SILVA, 2019).

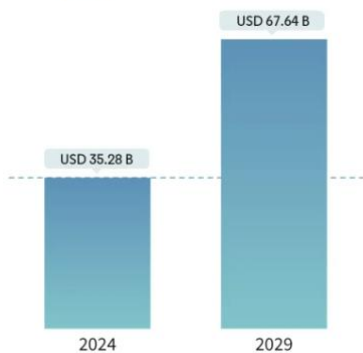
Drones, podem ser divididos em duas categorias, asa fixa e multirrotores. Os drones asa fixa são mais empregados em operações de grandes altitudes e velocidades, tem como característica grande autonomia. Já os drones multirrotores além de possuírem menos autonomia, podem ser divididos em três subcategorias de acordo com a quantidade de hélices: quadricópteros, hexacópteros e octacópteros. Quanto mais hélices, maior a capacidade de carga.

2.2. Mercado de drones

Drones vem sendo adotados em várias aplicações, desde fotografia e filmagem aérea a vigilância, agricultura, mapeamento e entregas. Espera-se que os avanços da tecnologia embarcada nestes equipamentos, tanto em termos de carga como em eletrônica, fomentem ainda mais o crescimento desse mercado incrementando e consolidando investimentos no setor a longo prazo. No entanto, esse mercado ainda está nos estágios iniciais em algumas economias em desenvolvimento, em grande parte devido a restrições tecnológicas e regulamentações específicas em cada país.

Para o ano de 2024, estima-se que o mercado mundial de drones chegue a US\$35.28 bilhões e alcance a marca de US\$67.64 bilhões até 2029, conforme Figura 1. Apesar do crescimento no setor de drones ser a nível mundial, algumas regiões do globo têm se mostrado mais promissoras para o negócio. Os mercados europeu e asiático lideram o ranking quando se fala em previsão de crescimento, seguidos pelo mercado norte americano. Em menores proporções o mercado latino (américa central e américa do sul), africano e Groelândia representam o último terço do cenário mundial do mercado de drones, conforme Figura 2.

Drones Market
Market Size in USD Billion
CAGR 13.90%



Source : Mordor Intelligence

Study Period	2019 - 2029
Market Size (2024)	USD 35.28 Billion
Market Size (2029)	USD 67.64 Billion
CAGR (2024 - 2029)	13.90 %
Fastest Growing Market	Asia Pacific
Largest Market	North America
Major Players	    

*Disclaimer: Major Players sorted in no particular order

Realização

ABES-RS

PUCRS

UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL



abes-rs@abes-rs.org.br

(51) 999330700

www.abes-rs.org.br



Figura 1. Previsão de crescimento de 13,9% no mercado mundial de drones, entre 2024 a 2029.

Fonte: Mordor Intelligence



Figura 2. Classificação de crescimento do mercado de drones em cada continente, de 2024 a 2029.

Fonte: Mordor Intelligence

2.3. Reciclagem de resíduo eletrônico

Considera-se resíduo eletrônico todo dispositivo eletrônico que não mais é desejado, utilizado ou funcional. Sendo destinado ao descarte, esse tipo de resíduo pode incluir uma complexa mistura de materiais de variados tipos de produtos eletrônicos, componentes e equipamentos que muitas vezes podem ser perigosos. Esses materiais podem causar tanto problemas ambientais como apresentar risco a saúde humana se não descartados da forma correta. Não obstante, muitos desse eletrônicos modernos possuem em sua composição elementos raros e recursos caros, que muitas vezes podem ser reciclados e reutilizados tornando a gestão desses resíduos mais eficiente (EUROPEAN COMMISSION, 2012).

Espera-se que o mercado de descarte de materiais eletrônicos cresça, em média, em 10,3% no período de 2024-2029, sendo esse alimentado pelo crescimento na aquisição de eletrônicos e também devido a conscientização para o descarte desse material. Vários benefícios podem ser atingidos com a adoção de um descarte específico para esse tipo de material, o principal deles é manter metais tóxicos e polímeros fora do meio ambiente, ao mesmo tempo em que se pode recicla-los para a obtenção de matéria prima (INTELLIGENCE, 2024).

2.4. Extração de ouro por rota cianídrica

A obtenção de ouro utilizando cianeto com agente lixiviante é uma prática consolidada e patenteada desde 1887 por John Steward MacArthur. Esse método é amplamente utilizado até hoje devido a simplicidade operacional do processo, assim como sua reprodutividade em escala industrial e seu alto rendimento extrativo. Porém, em alguns casos não é possível a utilização desse tipo de rota devido a incompatibilidades químicas, como é o caso em minérios refratários, minérios com presença de cianídeos ou em minérios de pH baixo (abaixo de 10,5) (TRINDADE, 1994).

De acordo com as estatísticas, a quantidade de Au presente em minérios de ouro variam entre 1-10g/T, enquanto que em resíduos eletrônicos pode se encontrar Au concentrado em 250g/T (WEN XIAO; ZIYI ZHONG, 2020). Frente a isso, a utilização de equipamentos eletrônicos descartados como fonte de obtenção de ouro se torna promissora para a utilização sustentável de ouro metálico já existente (XURAN JI et al., 2024). O uso de cianeto para extração de ouro, além de ser usado em matérias primas primárias, também tem sido estudado e usado em matéria prima secundária (ATA AKCIL et al., 2015), como nos resíduos eletroeletrônicos. Essa extração ocorre através da seguinte reação:



2.5. Extração de ouro com lixivantes alternativos

A busca por soluções e minimização dos obstáculos envolvidos no processo cianídrico têm servido de motivação no estudo por novos reagentes. Na tabela 1 podemos ver os reagentes mais estudados para essa substituição, dentre os quais destacam-se o tiosulfato e a tiouréia como os mais promissores e com potencial de aplicação industrial.

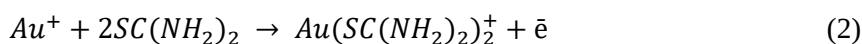
Tabela 1 – Principais reagentes alternativos ao cianeto para metalurgia extrativa de ouro

Reagente	Ligante	pH	Principal complexo de Au Formado
Tiouréia	NH ₂ CSNH ₂	1 - 4	[Au(NH ₂ CSNH ₂) ₂] ⁺
Bromo	Br ⁻	1 – 7	AuBr ₄ ⁻
Iodo	I ⁻	1 – 5	AuI ₂ ⁻
Cloro	Cl ⁻	1 – 4	AuCl ₄ ⁻
Tiocianato	SCN ⁻	1 – 3	[Au(SCN) ₄] ⁻
Tiosulfato	S ₂ O ₃ ²⁻	8 – 11	[Au(S ₂ O ₃) ₂] ³⁻



Várias pesquisas vêm sendo conduzidas na busca por solventes para recuperação de Au por rotas não cianídricas, dentro eles estão tiosulfato, tiouréia, halogênios e métodos de biolixiviação. No entanto, todos esses métodos ainda possuem uma limitação principal para a aplicação industrial, o grande consumo de reagente (GUI et al., 2023). Por isso, se faz necessário mais estudo para cada rota a fim de aprimorar esse processo.

A tiouréia ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$) é um composto orgânico que se apresenta como um cristal sólido e solúvel em água. Quando dissolvida em meio aquoso de pH ácido (menor do que 3) e na presença de oxidante, complexa o ouro metálico Au^0 para Au^+ , formando assim um complexo catiônico solúvel (TAKAMI KAI, et al., [s.d.]) (JINSHAN LI, 2004).



Segundo estudos já propostos anteriormente, o oxidante mais eficaz para esse tipo de reação é o sulfato férrico, que quando utilizado forma dissulfeto de formamida. Além disso, a utilização de Fe^{3+} como agente oxidante é de fácil manuseio e utilização in situ. Quando utilizado em subdosagem pode comprometer o rendimento da reação, enquanto que quando utilizado em excesso pode oxidar não apenas o ouro, mas também a própria tiouréia. O que pode decompor o dissulfeto de formamida, formando cianamida e enxofre elementar (S^0) que forma uma camada passivante sobre o Au (SEBASTIÁN CAMELINO et al., 2015).

Vários são os fatores que interferem no rendimento da lixiviação. Dentre eles destaca-se a razão sólido-líquido entre a solução extrativa e o componente contendo ouro; a concentração da solução de TU; a concentração de sulfato férrico; a temperatura e agitação do meio.

Como a TU é o fator limitante na reação, medidas que limitem a decomposição desse reagente se fazem necessárias para maximização da extração. O controle da temperatura do meio também se faz necessária pois seu aumento pode tanto acelerar a reação como degradar a TU, consumindo as espécies livre para complexação (LI; MILLER, 2007).

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização de componentes do drone

Inicialmente, o drone foi pesado e seus componentes classificados em polímeros, metálicos, compósitos e eletrônicos. Da fração de componentes eletrônicos, removeu-se pinos de conexão, que devido a sua aparência indicavam a presença de ouro. Cada pino foi cortado em três partes de aproximadamente 0,5g cada. Na sequência, realizou-se a análise de fluorescência de raio-x (FRX) para confirmar a presença de Au nos pinos. Para a análise de FRX utilizou-se o equipamento Thermo



Scientific Niton XL3t XRF Analyzer de 50kV, de forma que o range de detecção aplicado era para metais eletrônicos.

Para a estimativa da concentração de ouro nos pinos, optou-se por dissolver as amostras com água régia. A dissolução ocorreu durante 2h a 70°C na razão sólido-líquido de 1:25 com o auxílio de um agitador magnético sob a velocidade de 200 RPM. O equipamento utilizado para analisar a concentração foi um Espectrômetro de Emissão Ótica (ICP-OES 5110) da Agilent Technologies.

3.2. Lixiviação

Lixiviação com cianeto

De forma que se obtivesse um valor de referência para comparação do rendimento por tiouréia, realizou-se a extração de Au dos pinos através da rota convencional com cianeto (CN), na proporção de 1:25, durante 2h, a 25°C, em solução aquosa de pH 14. As alíquotas obtidas através dessa extração também foram analisadas via ICP-OES.

Lixiviação com Tiouréia

A fim compreender melhor os fatores que influenciam no rendimento da reação e também identificar a extração mais rentável, realizou-se a lixiviação com TU com duas rotas distintas nas proporções sólido-líquido, mas com parâmetros semelhantes. O fluxograma que representa essas duas rotas pode ser visto na Figura 3.

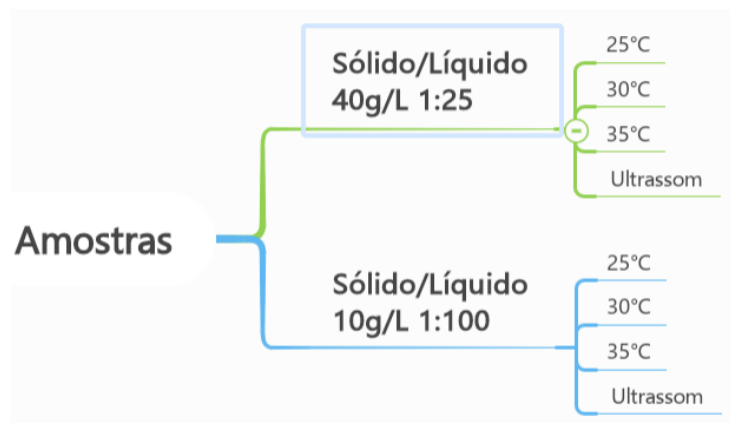


Figura 3. Fluxograma dos dois diferentes processos de lixiviação

Em ambos os casos a preparação do sistema ocorreu da seguinte forma. A amostra foi pesada e a partir desse valor, baseando-se na proporção sólido-líquido escolhida, calculou-se a quantidade de



tiouréia e sulfato férrico a ser adicionado. A incorporação de cada componente ao sistema de lixiviação ocorreu da seguinte forma:

- 1º) Adicionou-se a água deionizada ao sistema, volume de acordo com o calculado para proporção sólido-líquido adotada
- 2º) Adicionou-se a quantidade de tiouréia, conforme calculado para cada amostra
- 3º) 0,4mL de ácido sulfúrico para ajuste de pH (pH=2)
- 4º) Introdução da amostra no sistema
- 5º) Por último acrescentou-se o sulfato férrico (6g/L)

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização

A estimativa da porcentagem de cada um dos metais identificados no pino, através da análise de fluorescência de raios-x, pode ser vista na Tabela 2. Observa-se que o metal predominante na amostra é o cobre (75,65%), como esperado, uma vez que o cobre é uma opção ideal para um pino de conexão devido à sua excelente condutividade e resistência à corrosão. O níquel aparece como o segundo metal mais notório (21,38%). O níquel, quando depositado na conexão, atua como uma camada de barreira para evitar que o cobre seja difundido para o ouro, de modo que não afete sua capacidade de resistir à corrosão e também evita que a parte de cobre do pino seja fisicamente afetada. Por fim, o ouro (2,17%) está presente na menor porção, na forma de ouro puro para proteção contra corrosão em conectores.

Tabela 2. Estimativa da porcentagem de metais no pino de conexão realizada com FRX.

	Au	Ni	Cu	Outros
Pino de conexão	2,17%	21,38%	75,65%	0,8%

A dissolução das amostras com água régia foi realizada para estimar a quantidade de ouro presente nos pinos de conexão. Os resultados obtidos indicaram uma concentração média de ouro de 61,34 ppm, conforme Tabela 3. Essa técnica é amplamente utilizada para a dissolução de metais nobres, como o ouro, devido à sua capacidade oxidante e de dissolução (Mardsen, 2006; Park & Fray, 2009). No entanto, é importante ressaltar que a água régia pode apresentar interferências de outros metais presentes na amostra, como cobre e níquel, o que pode afetar a precisão da estimativa.



Tabela 3. Quantidade de ouro extraído das amostras através da digestão por água régia.

Amostra	Água Régia (ppm)
Amostra 1	69,95
Amostra 2	53,17
Amostra 3	60,9
Média	61,34

4.2 Lixiviação

Lixiviação com cianeto

Os resultados da lixiviação com cianeto foram utilizados como referência na comparação com o processo utilizando tiouréia. Na Tabela 4 podemos ver os resultados obtidos na lixiviação com cianeto que uma concentração média de ouro de 83,42 ppm, considerada como 100% de extração. Esse valor, inclusive, é superior ao obtido pela dissolução com água régia, o que pode ser explicado pela maior seletividade do cianeto em relação ao ouro, formando complexos estáveis sem a precipitação de sólidos (BIRICH; STOPIC; FRIEDRICH, 2019).

Tabela 4. Quantidade de ouro extraído das amostras através da lixiviação por cianeto.

Amostra	Cianeto (ppm)
Amostra 1	80,49
Amostra 2	92,78
Amostra 3	77,0
Média	83,42

Lixiviação com tiouréia

Os experimentos de lixiviação com tiouréia foram conduzidos variando a temperatura (25°C, 30°C e 35°C) e o método de agitação (magnética e ultrassônica). As Figuras 4, 5, 6 e 7 apresentam os resultados obtidos para as diferentes condições testadas.



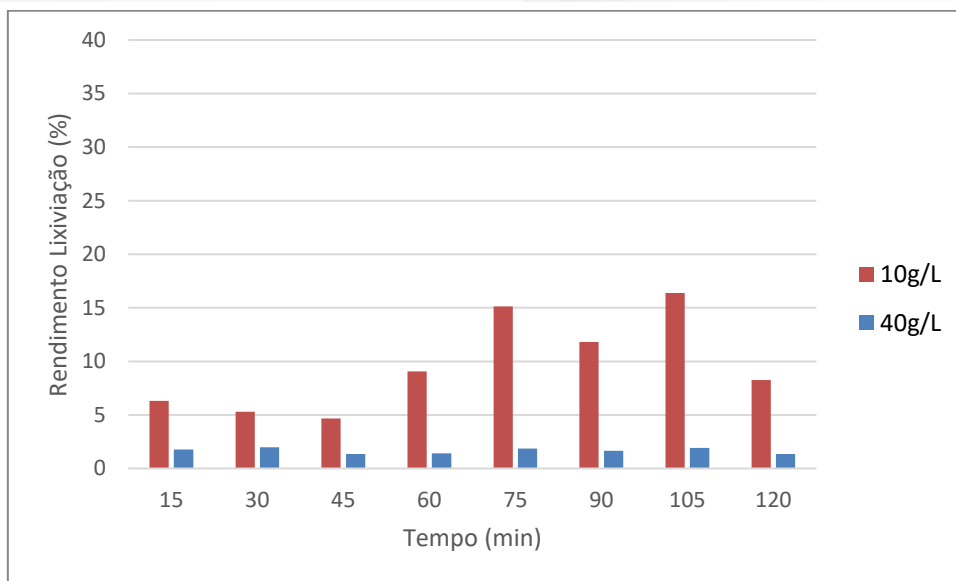


Figura 4. Gráfico comparativo da média de rendimento da lixiviação com tiouréia para as duas diferentes proporções sólido líquido-analisada, a 25°C e sob agitação magnética.

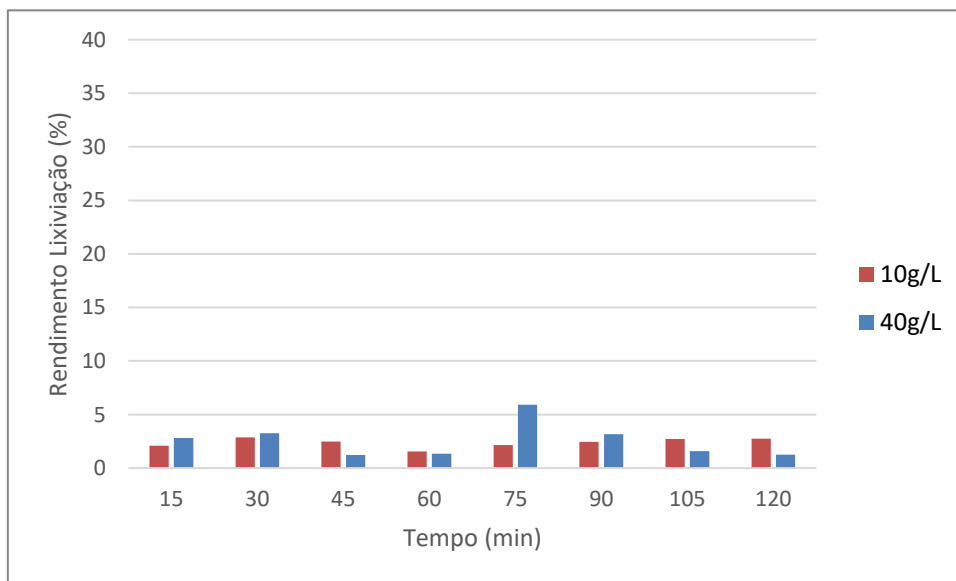


Figura 5. Gráfico comparativo entre a média de rendimento da lixiviação com tiouréia para as duas diferentes proporções sólido-líquido analisada, a 30°C e sob agitação magnética.



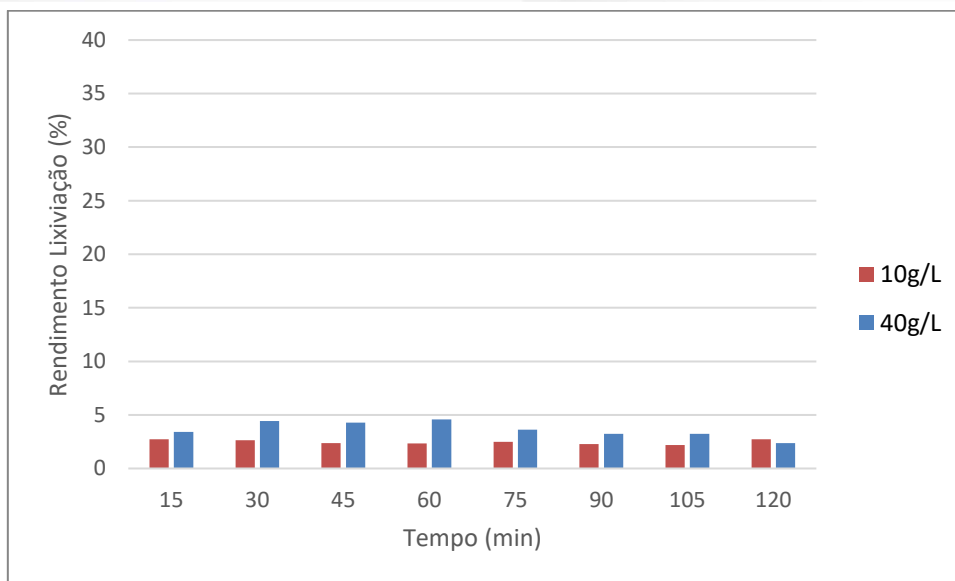


Figura 6. Gráfico comparativo entre a média de rendimento da lixiviação com tiouréia para as duas diferentes proporções sólido-líquido analisada, a 35°C e sob agitação magnética.

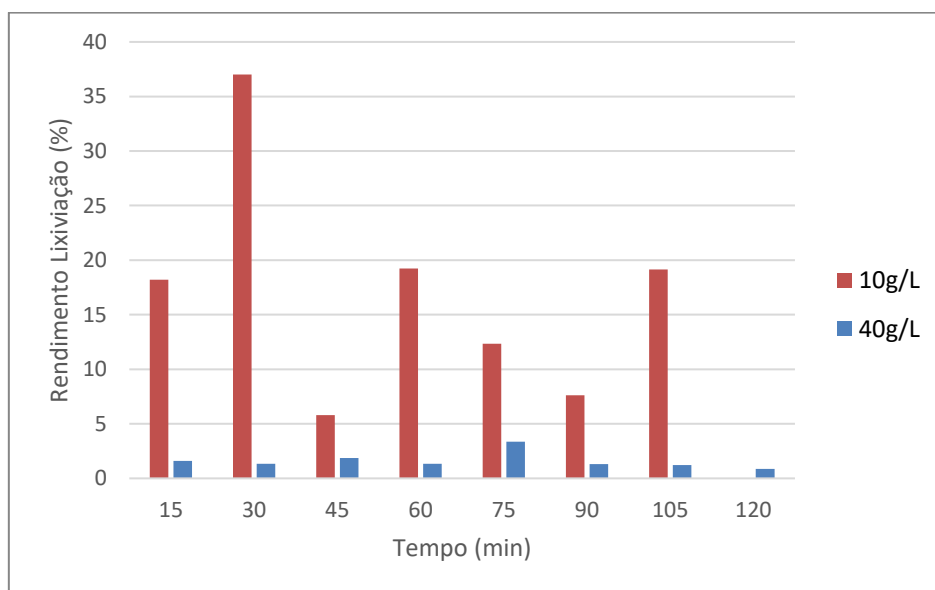


Figura 7. Gráfico comparativo entre a média de rendimento da lixiviação com tiouréia para as duas diferentes proporções sólido-líquido analisada, sob ultrassom.

Para ambas as proporções sólido-líquido estudadas, observa-se que o aumento da temperatura de 25°C para 30°C e 35°C resultou em uma diminuição significativa no rendimento da lixiviação com tiouréia. Esses valores indicam que praticamente nenhum ouro foi extraído das amostras nessas condições mais



elevadas de temperatura. Esse comportamento pode ser atribuído à decomposição térmica da tiouréia em temperaturas mais elevadas, reduzindo sua eficácia como agente lixiviante. Além disso, a presença de cobre na amostra pode ter um efeito deletério, causado pelos íons cuproso e cúprico, que oxidam a tiouréia e catalisam sua oxidação pelo ferro (III) (BIRLOAGA et al., 2013). A tiouréia oxidada forma dissulfeto de formamidina, que se decompõe em cianamida e enxofre elementar, formando uma camada de passivação na superfície do ouro e diminuindo o desempenho da lixiviação (RAY et al., 2022).

Das condições em que se variou apenas de temperatura, mas se manteve o mesmo método de agitação, o melhor resultado obtido foi a 25°C, atingindo 16,38% de extração, aos 105 minutos de lixiviação na razão 10g/L (Figura 4).

Na Figura 5 e 6 é possível observar que o poder extrativo de tiouréia-sulfato férrico se inicia com um rápido aumento na extração, mas diminui com o passar do tempo. Esse fenômeno está relacionado à passivação da superfície do ouro pelo enxofre (LI; MILLER, 2007). Esse fato fica ainda mais evidente quando comparamos, entre si, os resultados para cada uma das condições de 30 e 35°C. Ou seja, os resultados para a condição de 10g/L representam uma lixiviação menos eficiente quando comparamos com os resultados com razão sólido-líquido de 40g/L. Isso ocorre por que apesar do sulfato férrico exercer a função de agente oxidante ele também facilmente oxida a tiouréia, formando dissulfeto de formamidina quando a concentração de tiouréia é alta. Com isso, a tiouréia se decompõem em soluções ácidas, produzindo cianoamida e enxofre passivando camada superior de ouro (JING-YING; XIU-LI; WEN-QUAN, 2012).

Por outro lado, a utilização de agitação ultrassônica apresentou os melhores resultados em termos de rendimento de extração de ouro, atingindo 37,02% após 30 minutos de lixiviação da solução com 10g/L (Figura 7) e a solução apresentando 40°C ao final da lixiviação. Esse efeito positivo pode ser explicado pela intensificação da transferência de massa promovida pela cavitação ultrassônica, que aumenta a eficiência do processo de lixiviação. O ultrassom age por cavitação, gerando pequenas bolhas de gás que criam um ambiente de alta temperatura e pressão quando estouram, liberando uma grande quantidade de energia (B E NOLTINGK; E A NEPPIRAS, 1950). Essa energia pode destruir estruturas de óxido e facilitar a recuperação de metais, porém essa alta energia também pode oxidar matéria orgânica e decompô-la nessas condições (GUI et al., 2023).

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste estudo, é possível concluir que a temperatura e o método de agitação exercem uma influência significativa no processo de lixiviação de ouro com tiouréia a partir de



pinos de conexão de drones agrícolas. O aumento da temperatura de 25°C para 30°C e 35°C resultou em uma diminuição substancial no rendimento da lixiviação, o que pode ser atribuído à decomposição térmica da tiouréia em temperaturas mais elevadas, reduzindo sua eficácia como agente lixiviante.

Por outro lado, a utilização de agitação ultrassônica demonstrou ser uma estratégia promissora para melhorar a eficiência do processo de lixiviação com tiouréia, apresentando os melhores resultados em termos de rendimento de extração de ouro, atingindo 37,02 % na melhor condição testada. Esse efeito positivo pode ser explicado pela intensificação da transferência de massa promovida pela cavitação ultrassônica, que aumenta a eficiência do processo de lixiviação.

No entanto, mesmo na melhor condição com tiouréia, o rendimento de extração de ouro foi inferior ao obtido com cianeto. Esse resultado corrobora com dados da literatura que indicam que a tiouréia ainda enfrenta desafios para se estabelecer como uma alternativa viável ao cianeto em escala industrial.

Portanto, os resultados obtidos neste estudo confirmam que, nas condições testadas, a tiouréia não alcançou o desempenho do cianeto na recuperação de ouro a partir dos pinos de conexão de drones agrícolas. Para o avanço do conhecimento nessa área, estudos adicionais são necessários para otimizar as condições operacionais do processo de lixiviação com tiouréia, como a concentração do agente lixiviante, a razão sólido-líquido, o tempo de lixiviação e a influência de outros parâmetros relevantes. Além disso, é fundamental avaliar a viabilidade técnica e econômica dessa rota alternativa em comparação com o processo convencional à base de cianeto, considerando aspectos como custo, impacto ambiental e segurança operacional.

Por fim, é importante ressaltar que a busca por alternativas sustentáveis para a recuperação de ouro a partir de resíduos eletrônicos, como os provenientes de drones agrícolas, é uma área de pesquisa em constante evolução. Os insights fornecidos por este estudo podem contribuir para o desenvolvimento de processos mais eficientes e ambientalmente amigáveis, alinhados com os princípios da economia circular e da sustentabilidade.

Agradecimentos

Agradeço o fornecimento de peças pela BRD Drones e apoio financeiro para a condução da pesquisa e também agradeço a Brasil Drones Tecnologia pela consultoria técnica prestada durante o trabalho.

REFERÊNCIAS

ATA AKCIL et al. Precious Metal Recovery From Waste Printed Circuit Boards Using Cyanide and Non-Cyanide Lixiviants - A review. **Waste Management**, v. 45, nov. 2015.

B E NOLTINGK; E A NEPPIRAS. Proceedings of the Physical Society. Section B. **Proceedings of the Physical Society**, v. 63, 9 nov. 1950.



BIRICH, A.; STOPIC, S.; FRIEDRICH, B. Kinetic Investigation and Dissolution Behavior of Cyanide Alternative Gold Leaching Reagents. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 7191, 10 maio 2019.

BIRLOAGA, I. et al. Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery. **Waste Management**, v. 33, n. 4, p. 935–941, abr. 2013.

EUROPEAN COMMISSION. **Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE) - EU rules on treating waste electrical and electronic equipment, to contribute to sustainable production and consumption**. , 17 ago. 2012. Disponível em: <https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en>. Acesso em: 21 set. 2023

GUI, Q. et al. Gold extraction using alternatives to cyanide: Ultrasonic reinforcement and its leaching kinetics. **Minerals Engineering**, v. 191, p. 107939, jan. 2023.

HAMILTON PIRES DE AZEVEDO; JOSÉ WILLIAM GOMES DA SILVA. **Manual Operacional de Drones - Controladoria Geral da União (CGU)**. fev. 2019. Disponível em: <https://repositorio.cgu.gov.br/bitstream/1/44980/5/Manual_Operacional_de_Drones_CGU.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2024.

IAN TISEO. **Projected electronic waste generation worldwide per capita from 2019 to 2030 (in kilograms per capita)**. , 02 2013. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1148086/ewaste-generation-per-capita-outlook-worldwide/#:~:text=Global%20e%2Dwaste%20generation%20per%20capita%20outlook%202019%2D2030&text=In%202019%2C%20the%20average%20volume,kilograms%20per%20capita%20by%202030.>>>. Acesso em: 8 set. 2023

JING-YING, L.; XIU-LI, X.; WEN-QUAN, L. Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones. **Waste Management**, v. 32, n. 6, p. 1209–1212, jun. 2012.

JINSHAN LI. **Reaction kinetics of gold dissolution in acid thiourea solutions**. [s.l.] University of Utah, ago. 2004.

JULIANA MARTINS MEDINA. **O que é agricultura de precisão? Descubra!**, [s.d.]. Disponível em: <<https://agropos.com.br/o-que-e-agricultura-de-precisao/>>. Acesso em: 8 set. 2023

KAMGA, M. A. et al. Perception of the Environmental Degradation of Gold Mining on Socio-Economic Variables in Eastern Cameroon, Cameroon. **European Journal of Sustainable Development Research**, v. 2, n. 2, 11 mar. 2018.

LI, J.; MILLER, J. D. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. **Hydrometallurgy**, v. 89, n. 3–4, p. 279–288, dez. 2007.

RAY, D. A. et al. Thiourea Leaching: An Update on a Sustainable Approach for Gold Recovery from E-waste. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 8, n. 2, p. 597–612, jun. 2022.

RENATO BORGES. **Como escolher drones para a agricultura de precisão. Agointeli - O Futuro do Agro Chegou!**, [s.d.]. . Acesso em: 8 set. 2023

SEBASTIÁN CAMELINO et al. Initial studies about gold leaching from printed circuit boards (PCB's) of waste cell phones. **Procedia Materials Science**, v. 9, 2015.

TAKAMI KAI, et al. Reduction of Thiourea Consumption in Gold Extraction by Acid Thiourea Solutions. [s.d.].

TRINDADE, R. DE B. E. **Tiouréia e bromo como lixiviantes alternativos à cianetação de ouro**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1994.

WEN XIAO; ZIYI ZHONG. **Environmental Functional Nanomaterials**. [s.l.] De Gruyter, 2020.

XURAN JI et al. Current progress on gold recovery from refractory ore and waste electrical and electronic equipment. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 40, n. 9, set. 2024.

INTELLEGEANCE, M. **IT Asset Disposition Market Size & Share Analysis – Growth Trends & Forecasts (2024 – 2029)**. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/it-asset-disposition-market>>. Acesso em: 03 mar. 2024.

