



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIAS E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL

RACHEL LIZANDRA BORBOREMA

**NANOPARTÍCULAS DERIVADAS DE MEDICAMENTO AMOXICILINA VENCIDA:
síntese, caracterização e aplicação como marcador em etanol combustível**

Recife
2026

RACHEL LIZANDRA BORBOREMA

**NANOPARTÍCULAS DERIVADAS DE MEDICAMENTO AMOXICILINA VENCIDA:
síntese, caracterização e aplicação como marcador em etanol combustível**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Química Industrial da Universidade
Federal de Pernambuco, Campus Recife,
como requisito parcial à obtenção do título
Bacharel em Química Industrial.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Elisa Soares Leite

Coorientadora: Ms. Maria Alice de Melo Pinheiro

Recife

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Borborema, Rachel Lizandra.

Nanopartículas derivadas de medicamento amoxicilina vencida: síntese, caracterização e aplicação como marcador em etanol combustível / Rachel Lizandra Borborema. - Recife, 2025.

50 : il.

Orientador(a): Elisa Soares Leite

Coorientador(a): Maria Alice de Melo Pinheiro

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Química Industrial - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. fármacos. 2. amoxicilina. 3. nanotecnologia. 4. pontos de carbono. 5. solvotermal. I. Leite, Elisa Soares. (Orientação). II. Pinheiro, Maria Alice de Melo. (Coorientação). IV. Título.

540 CDD (22.ed.)

RACHEL LIZANDRA BORBOREMA

**NANOPARTÍCULAS DERIVADAS DE MEDICAMENTO AMOXICILINA VENCIDA:
síntese, caracterização e aplicação como marcador em etanol combustível**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Química Industrial da Universidade
Federal de Pernambuco, Campus Recife,
como requisito parcial à obtenção do título
Bacharel em Química Industrial.

Aprovado em: 26/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Elisa Soares Leite (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Ms. Maria Alice de Melo Pinheiro (Coorientadora)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Profº. Dr. Antônio Demóstenes de Sobral (Examinador Interno) Universidade
Federal de Pernambuco - UFPE

Profº. Ms. Nadson Humberto Costa Ferrer (Examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Dedico este trabalho a todas as noites em
claro em que escolhi, sonhando, ser
cientista, pois agora posso dizer que sou.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço aos principais combustíveis que me mantêm todos os dias com forças para seguir em frente, as minhas mulheres: minha avó, mãe, Déborah, Paula e minha sobrinha, Maria, que um dia irá crescer e irá me ver realizada. Vocês são os nutrientes fundamentais dos meus sonhos.

Agradeço à Thamires Tavares, por ser minha companheira e me apoiar em todos os momentos, mas, principalmente, nos mais difíceis.

À minha orientadora Elisa, que, desde o começo da minha graduação, via todo potencial que eu tinha.

Agradeço aos participantes e colaboradores do desenvolvimento dos experimentos e da minha dissertação, Alice e Nadson, que me ajudaram até o fim.

Agradeço especialmente à Clarisse, Carolaine, João, Paulo, Elton e Jurandi, que me ajudaram durante toda a graduação.

Agradeço aos meus melhores amigos por nunca terem desistido de me ouvir falar sobre as frustrações de uma jovem de Química e por me aguentarem pacientemente nos meus dias mais estressantes de estudo.

"Eu leio por prazer e esse é o momento em que mais aprendo."
(ATWOOD, Margaret).

RESUMO

Atualmente, é possível verificar que novas tecnologias e estudos estão sendo desenvolvidos e otimizados a fim de reduzir os impactos causados por descartes inadequados de resíduos medicamentosos em ambientes naturais, tendo como foco alternativas sustentáveis no tratamento destes poluentes. De acordo com estudos recentes sobre nanomateriais, Pontos de Carbono demonstram ser um material versátil para marcação de substâncias orgânicas e identificação de substâncias contaminantes, possuindo potencial para executar diversas aplicações no tratamento de resíduos. No presente trabalho, o material sintetizado, derivado do medicamento amoxicilina vencida (usado como precursor da síntese de nanopartículas), foi estudado como alternativa para nanomarcadores de etanol hidratado combustível. Este estudo incluiu uma comparação com os resultados obtidos em dois trabalhos similares, que também sintetizaram pontos de carbono utilizando amoxicilina e ibuprofeno como precursores. A síntese de pontos de carbono foi realizada através da rota solvotermal, com o medicamento diluído em etanol anidro inserido em um reator de aço inox, a 180 °C por 3 horas com rampa de aquecimento de 5 °C min⁻¹. A síntese obtida foi caracterizada através do espectro de infravermelho, além das análises de espectrometria de absorção, emissão e fluorescência na radiação UV (caracterizações ópticas), e as análises de infravermelho, espalhamento dinâmico de luz e potencial Zeta (caracterizações estruturais). O estudo avaliado obteve resultados satisfatórios nas análises de absorção e emissão em comparação com os trabalhos relacionados, além do material obtido que teve absorção em 358 nm e fluorescência na faixa dos 370 nm e com pH médio de 4,75, efetivamente para a diluição de 1:1000 (v/v) para os solventes utilizados, a fim de verificar sua aplicação como marcador antifraude. O material obteve uma significativa modificação estrutural como previsto de modo a criar um composto fluorescente, o que foi mostrado explicitamente pelo espectro de infravermelho, de UV-Vis e de fluorescência.

Palavras-chave: fármacos; amoxicilina; nanotecnologia; pontos de carbono; solvotermal.

ABSTRACT

Currently, it is possible to observe that new technologies and studies are being developed and optimized to reduce the impacts caused by the improper disposal of pharmaceutical waste in natural environments, focusing on sustainable alternatives for treating these pollutants. According to recent studies on nanomaterials, Carbon Dots have proven to be a versatile material for marking organic substances and identifying contaminants, with the potential to perform various applications in waste treatment. In this study, the synthesized material, derived from expired amoxicillin (used as a precursor for nanoparticle synthesis), was investigated as an alternative for nanomarkers in hydrated fuel ethanol. This research included a comparison with the results obtained in two similar studies, which also synthesized carbon dots using amoxicillin and ibuprofen as precursors. The carbon dot synthesis was carried out through the solvothermal route, with the drug diluted in anhydrous ethanol and placed in a stainless-steel reactor at 180°C for 3 hours, with a heating ramp of 5°C min⁻¹. The obtained synthesis was characterized through infrared spectroscopy, as well as absorption, emission, and fluorescence spectrometry in UV radiation (optical characterizations), and infrared analysis, dynamic light scattering, and Zeta potential measurements (structural characterizations). The evaluated study achieved satisfactory results in absorption and emission analyses compared to related works. Additionally, the synthesized material exhibited absorption at 358 nm and fluorescence in the 370 nm range, with an average pH of 4.75, effectively working at a 1:1000 (v/v) dilution in the tested solvents, to assess its application as an anti-fraud marker. The material underwent significant structural modification as expected, leading to the creation of a fluorescent compound, explicitly demonstrated by infrared, UV-Vis, and fluorescence spectra.

Keywords: drug; amoxicillin; nanotechnology; carbon dots; solvothermal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Diagrama da síntese Solvothermal.....	27
Figura 2 –	Síntese-mãe e as diluições 1:10 ⁻¹ , 1:10 ⁻² , 1:10 ⁻³ e 1:10 ⁻⁴	30
Figura 3 –	Fluorescência das diluições 1:10 ⁻¹ , 1:10 ⁻² , 1:10 ⁻³ e 1:10 ⁻⁴ em etanol anidro na luz UV.....	31
Figura 4 –	Perfil de absorção dos pontos de carbono sintetizados a partir da amoxicilina por rota solvothermal em Etanol Anidro PA.....	32
Figura 5 –	Perfil do espectro de emissão dos pontos de carbono sintetizados em Etanol Anidro PA excitados em 370 nm.....	33
Figura 6A –	Análise de FTIR da amoxicilina vencida.....	34
Figura 6B –	Análise de FTIR dos pontos de carbono produzidos neste trabalho a partir da amoxicilina vencida.....	35
Figura 7 –	Distribuição do potencial Zeta dos pontos de carbono sintetizados na diluição 1:10 ⁻²	37
Figura 8 –	Distribuição do tamanho pela intensidade via análise de DLS na diluição 1:10 ⁻² título	38
Figura 9 –	Fluorescência das diluições 1:10 ⁻¹ , 1:10 ⁻² , 1:10 ⁻³ e 1:10 ⁻⁴ em etanol hidratado combustível na radiação UV.....	39
Figura 10 –	Perfil de absorção dos pontos de carbono sintetizados a partir da amoxicilina aplicados em etanol hidratado combustível	40
Figura 11 –	Espectro de varredura da emissão do etanol hidratado combustível excitado em diferentes comprimentos de onda.....	41

Figura 12 –	Perfil do espectro de emissão dos pontos de carbono aplicados em etanol hidratado combustível excitados em 370nm.....	42
-------------	---	----

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	A problemática do descarte de medicamentos.....	15
2.1.1	Contaminação do solo e da água por medicamentos.....	16
2.2	Nanotecnologia.....	17
2.3	Carbon Dots ou Pontos de Carbono.....	19
2.3.1	História.....	20
2.3.2	Propriedades dos pontos de carbono.....	21
2.3.3	Métodos de síntese dos pontos de carbono.....	21
2.4	A escolha adequada para um precursor sustentável.....	22
2.5	Pontos de Carbono como nanomarcadores em combustíveis.....	24
2.6	Técnicas de caracterização.....	25
2.6.1	Espectrofotometria de absorção e emissão.....	25
2.6.2	Espectroscopia de Infravermelho.....	25
2.6.3	Espalhamento de Luz Dinâmico e Potencial Zeta.....	26
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	Obtenção dos materiais.....	26
3.2	Síntese dos pontos de carbono.....	26
3.2.1	Preparação da amostra.....	26
3.2.2	Síntese solvotermal.....	27
3.2.3	Diluição seriada.....	28
3.3	Caracterização óptica do material.....	28
3.3.1	Espectrofotometria de absorção.....	28
3.3.2	Espectrofotometria de emissão.....	29
3.4	Caracterização estrutural do material.....	29
3.4.1	Espectroscopia de Infravermelho.....	29
3.4.2	Potencial Zeta e Espalhamento de Luz Dinâmico (DLS).....	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1	Síntese dos pontos de carbono.....	30
4.2	Caracterização do material.....	32
4.2.1	Espectrofotometria de absorção.....	32

4.2.2	Espectrofotometria de emissão.....	33
4.2.3	Espectroscopia de Infravermelho (FTIR).....	34
4.2.4	Potencial Zeta e Espalhamento de Luz Dinâmico (DLS).....	37
4.3	Avaliação da aplicação dos pontos de carbono como nanomarcadores de etanol em combustíveis.....	38
5	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

O aumento na comercialização de medicamentos nos últimos 10 anos é uma consequência das ciências farmacêutica e médica, que contribuem significativamente para a qualidade de vida dos seres humanos. O Brasil é considerado como um dos maiores mercados farmacêuticos da América do Sul, podendo alcançar um dos principais mercados globais nos próximos anos, competindo com os EUA, China, Japão e outros países desenvolvidos (Ouriques; Rodrigues, 2023). No entanto, o crescimento da venda de medicamentos, e, consequentemente, o aumento da produção e consumo destes, a presença de produtos farmacêuticos no meio ambiente se tornou cada vez mais uma preocupação mundial, representando riscos nocivos e impactos negativos como contaminantes ambientais (Silva et al., 2023).

Os impactos provenientes do descarte inadequado do medicamento amoxicilina têm causado sérios danos ao meio ambiente e são alvo de diversos estudos quanto aos efeitos causados, pela sua toxicidade, baixa biodegradabilidade, por seu efeito bactericida, podendo atingir corpos hídricos receptores e, posteriormente, entrando em contato com os seres vivos. (Barbosa; Gabriel; Dorigon, 2022). No geral, os fármacos são produzidos sob condições e concentrações para serem resistentes e preservarem suas substâncias para fins terapêuticos, porém, ao serem descartados no meio ambiente, persistem sem qualquer alteração nas suas características químicas por um longo período de tempo (Silva et al., 2023).

Existem diversas rotas de contaminação no meio ambiente, sendo as principais relacionadas ao uso oral ou por injeção, nas quais o medicamento é excretado pela urina ou outras secreções, além do descarte de medicamentos vencidos nos esgotos ou lixo comum, até chegar nos recursos hídricos ou no solo sem a ocorrência de qualquer tipo de tratamento (Pinto et al., 2014). Outra possibilidade é o resíduo farmacêutico passar por um tratamento prévio, porém de forma ineficaz para remoção de todo o resíduo, acarretando na circulação deste resíduo em níveis tróficos (Silva et al., 2023).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei n. 12.305/2010, estabelece diretrizes para o manejo dos resíduos gerados no país, excluindo os rejeitos radioativos (art. 1º, § 2º). Conforme o artigo 3º, os

medicamentos são classificados como resíduos sólidos ou rejeitos. Além disso, o artigo 7º enfatiza a necessidade de buscar a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento adequado dos resíduos sólidos, incluindo a disposição ambientalmente adequada dos rejeitos. Assim, torna-se crucial para o desenvolvimento sustentável do país e a preservação da saúde da população investir em métodos de reutilização e reciclagem dos resíduos sólidos provenientes do excedente de medicamentos.

Como a ocorrência deste antibiótico se tornou cada vez mais frequente no meio ambiente, é necessário realizar intervenções para disseminar este problema. Algumas das possíveis soluções envolvem estudos de métodos de degradação ou remoção, ou seja, tratamento de efluentes contaminados e a eficiência de cada um de acordo com seu potencial de biodegradação (Andrade; Augusto; Jardim, 2010). Além disso, novas estratégias tecnológicas se destacam como alternativas, como a Nanotecnologia, uma ciência aplicada ao domínio da matéria em escalas atômicas e moleculares. A síntese de nanomateriais pode gerar diversos tipos de substâncias químicas importantes e aplicáveis como nanopartículas metálicas, semicondutoras, poliméricas, cerâmicas e nanopartículas de carbono, também chamados de pontos de carbono (Fechine, 2020).

Os pontos de carbono ou carbon dots (C-dots) são uma classe de nanomateriais de carbono, fluorescentes, solúveis em água, solúveis em solventes orgânicos dependendo da funcionalização, com alta fotoestabilidade (apresentam várias propriedades ópticas e eletrônicas) e com diâmetro que varia em torno de 10 nm. Uma de suas aplicações é no setor de combate à fraude e adulteração de combustível, nos quais são usados como nanomarcadores químicos em concentrações mínimas, emitindo uma faixa de fluorescência detectável como um sistema de antifraudes (Ferrer, 2022).

Diante do que foi discutido, o objetivo geral deste trabalho foi sintetizar um nanomarcador fluorescente de pontos de carbono utilizando a amoxicilina fora do prazo de validade como precursor e comparar os resultados obtidos com trabalhos anteriormente realizados no nosso grupo de pesquisa, por Melo (2022) e Souza (2023), a fim de avaliar a eficácia e as diferenças entre os materiais produzidos.

Objetivos específicos:

- Sintetizar nanomarcador fluorescente tipo pontos de carbono utilizando medicamento amoxicilina como precursor;

- Realizar caracterizações ópticas e estruturais dos pontos de carbono obtidos experimentalmente;
- Aplicar os pontos de carbono sintetizados como nanomarcadores em etanol hidratado combustível.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A problemática do descarte de medicamentos

A venda de produtos farmacêuticos aumentou muito nesta última década à medida que houve uma procura maior por métodos e um estilo para uma vida mais saudável, além da expansão do setor de saúde. O comércio e a indústria farmacêutica brasileira representam uma fração grande no mercado global, com previsão de uma quantia prevista de US \$1,5 trilhão até 2028 (Ferro, 2024). No Brasil, os três principais medicamentos mais vendidos são os analgésicos, relaxantes musculares e os medicamentos para tratamento de trombose venosa profunda. Uma consequência para o aumento do consumo de medicamentos é a implicação em maiores quantidades de produtos descartados de forma errônea em diversos ambientes. Estes materiais, por serem produzidos para ter longa duração de prateleira, contém diversos conservantes e outras substâncias químicas que podem causar reações adversas e contaminações em massa de peixes, plantas e outros seres vivos por meio do solo e lençóis freáticos (Carvalho et al., 2009).

A liberação dessas substâncias químicas vai além das descargas de águas residuais industriais totalmente tratadas ou tratadas parcialmente, pois neste tipo de contaminação estão incluídos princípios ativos, micropoluentes descartados por sistemas de saúde e residências, drogas ilícitas como cocaína, metanfetamina e outras, comprometendo a qualidade da água distribuída para a população (Feitosa; Sodré; Maldaner, 2013). A preocupação com este problema se torna maior pois, mesmo em pequenas concentrações, os insumos farmacêuticos ativos (IFAs) descartados incorretamente possuem típica toxicidade e se acumulam significativamente, podendo causar efeito deletério nos seres vivos. Outro fator alarmante é o potencial de persistência destes medicamentos no meio ambiente e no organismo de um ser vivo, aumentando a capacidade de manter os efeitos nocivos dessas substâncias por um longo período (Barbosa; Gabriel; Dorigon, 2022).

2.1.1 Contaminação do solo e da água por medicamentos

As rotas de contaminação são diversas, entre excreção humana e animal, a eliminação pela descarga do vaso sanitário até medicamentos vencidos jogados no lixo comum. Os produtos químicos e os bioativos desses medicamentos, quando não tratados corretamente antes do descarte, se acumulam no solo e ambiente aquático. Os principais medicamentos identificados em análises realizadas por pesquisadores são antibióticos e analgésicos, encontrados em águas residuais que escoam para áreas agrícolas nas quais ocorrem várias atividades e alimentação animal (Souza; Costa; Silva, 2021).

Segundo o estudo realizado por Guerreiro e Rodrigues Junior (2022), a respeito da contaminação, são relatadas escalas de avaliação e ocorrências frequentes da presença de medicamentos no meio ambiente, analisando o impacto destes resíduos, questões legais, práticas que podem diminuir ou até restringir a contaminação ambiental. Neste estudo, foram consideradas questões como a ocorrência, distribuição, destino e efeitos toxicológicos, além do risco potencial para saúde humana e de outros seres vivos. O controle dos efluentes de instalações e indústrias farmacêuticas é citado como uma das alternativas iniciais para esta problemática, de acordo com a Comunidade Europeia (União Europeia, 2019).

De acordo com avaliação de consequências, os estudos sobre os efeitos à vida animal causados por contaminação de medicamentos identificaram a alteração de parâmetros reprodutivos, efeitos de citogenotoxicidade e estabilidade da membrana lisossomal de diversos peixes causados pelo medicamento hipertensivo losartana encontrado no mar (Godoy, 2014). Bila e Dezotti (2003) destacam a detecção frequente de contaminantes medicamentosos na água, principalmente estrogênios e seus metabólitos, quando ingeridos podem aumentar o risco de câncer de mama e distúrbios do sistema reprodutivo, além de insuficiência de alguns órgãos.

Em relação aos antibióticos, pelo objetivo principal de este oferecer ao organismo resistência a microrganismos patogênicos, o seu efeito adverso é proporcional ao consumo expressivo deste medicamento globalmente. A contaminação de resíduos de antibióticos no meio ambiente causa resistência antimicrobiana, disseminando microrganismos resistentes clinicamente que são

difíceis de tratar quando não identificada sua ocorrência. Em águas superficiais, os antibióticos ainda podem estar ativos e persistir por dias, até meses (Carvalho et al., 2009; Chen et al., 2018).

A contaminação do solo e da água por resíduos de medicamentos é um problema ambiental crescente, resultante do descarte inadequado e da baixa eficiência dos sistemas convencionais de tratamento de efluentes. A nanotecnologia surge como uma solução promissora para a remediação desses poluentes, oferecendo nanomateriais como óxidos metálicos e nanopartículas de carbono que apresentam alta área superficial e reatividade química para adsorver e degradar compostos farmacêuticos. Estudos demonstram que nanopartículas de óxido de ferro (Fe_3O_4) funcionalizadas, por exemplo, podem remover eficazmente antibióticos da água contaminada, reduzindo sua toxicidade ambiental (Zhang et al., 2018). Dessa forma, a nanotecnologia representa uma alternativa inovadora e eficiente para mitigar os impactos da contaminação química no meio ambiente.

2.2 Nanotecnologia

O uso de nanopartículas de ouro e prata, partículas coloidais, para a fabricação de vidros na Roma antiga eram estudadas pelo físico inglês Michael Faraday, no entanto, na época a explicação científica dessas partículas não foi conclusiva. Entretanto, atualmente essas nanopartículas são fundamentais para diversos processos. Em 1974, o japonês Norio Taniguchi resolveu nomear esta ciência como Nanotecnologia, e, em 1986, o engenheiro norte-americano Eric Drexler, autor do livro “Engenhos da criação: o advento da era da nanotecnologia” foi o ponto principal para a expansão da ciência ao público geral. Ainda na década de oitenta, moléculas com 60 átomos de carbono (fulerenos) e a invenção do microscópio de força atômica (AFM) abriu ainda mais a gama de possibilidades para a Nanotecnologia (Taniguchi; Arakawa; Kobayashi, 1974).

Conceitualmente, a Nanotecnologia é uma ciência/tecnologia dedicada ao controle, entendimento e usabilidade das propriedades da matéria na escala nanométrica (1 nm equivale a 1×10^{-9} m). Se as dimensões de um material possuem tamanhos nanométricos, este pode apresentar diferentes características, propriedades e aplicações científicas e tecnológicas. Esta ciência não só revolucionou a própria área, mas também setores produtivos, mercados financeiros,

bens de consumo e serviço, e até inovações tecnológicas, farmacêuticas, agronegócio, alimentos, meio ambiente, etc. É considerada uma tecnologia estratégica e a oportunidade para o desenvolvimento socioeconômico das nações (Pereira; Winckler; Teixeira, 2017).

A ideia principal da nanotecnologia consiste em, a partir dos blocos de construção de átomos, moléculas ou um conjunto destes, formar nanocamadas, nanotubos ou nanopartículas, permitindo manipulá-los para sistemas com propriedades e aplicações novas. Um dos feitos mais importantes para o desenvolvimento da nanotecnologia foi a invenção do microscópio de varredura por tunelamento (STM), em 1981, por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer. Esse equipamento possui a função de visualização e manipulação de nanocompósitos (Binnig; Quate; Gerber, 1986).

Desde 1857, quando Faraday sintetizou o ouro coloidal para estudar nanopartículas, vários métodos de obtenção de nanomateriais vêm sendo realizados, desde métodos baseados em fenômenos de auto-montagem, utilização de catalisadores e as abordagens de sínteses bottom-up e top-down (Meinol, 2019). Outra descoberta muito importante foram os nanotubos de carbono por Sumiu Iijima, em 1991, que são definidos como tubos cilíndricos compostos por uma camada única de átomos de carbono com propriedades mecânicas e elétricas específicas (Iijima, 1991).

A respeito das aplicações dessa nanociência, é importante citar a funcionalização de nanopartículas de ouro com biopolímeros para a construção de biossensores detectores de ácidos nucleicos e proteínas. Essa ciência avança cada vez mais na tecnologia de celulares, TVs e outros dispositivos eletrônicos devido às suas propriedades altamente flexíveis e ópticas. Além disso, compósitos nanoestruturados e produtos químicos foram desenvolvidos para síntese de drogas e outras substâncias para o corpo humano. Diversos estudos foram feitos e estão sendo otimizados para analisar o comportamento quântico a condições de diferentes temperaturas e concentrações desses nanomateriais (Ferreira; Rangel, 2009).

Das descobertas, estudos e até às aplicações, é notório o nível de complexidade que apresenta grandes promessas e oportunidades futuras para a ciência com o avanço da nanotecnologia. E cada vez mais se faz necessária a utilização de nanomateriais no dia a dia. Esta ciência tem um impacto profundo na

economia e na sociedade, mostrando cada vez mais soluções inovadoras para muitos problemas enfrentados pela humanidade (Pyrrho; Schramm, 2012).

Os exemplos mais comuns de nanomateriais são: grafeno, nanodiamantes, fulereno C_{60} , nanotubos de carbono de parede única, pontos quânticos e pontos de carbono com diferentes geometrias e propriedades (Oliveira, 2021).

2.3 Carbon Dots ou Pontos de Carbono

Os pontos quânticos, ou quantum dots, são nanomateriais com formato de cristais semicondutores que possuem diversas propriedades ópticas e eletrônicas interessantes, e estão confinados quanticamente em três dimensões, permitindo a mudança de emissão no espectro de acordo com seu tamanho. O tamanho e a forma determinam os níveis de energia e espaçamento entre eles, tornando-se viável ajustar as propriedades eletrônicas e ópticas das partículas, quando se faz necessária a manipulação das dimensões do confinamento. Esses níveis de energia são determinados por uma fonte de energia (luz ou corrente elétrica), permitindo que as nanopartículas emitam luz com comprimentos de onda específicos (Siraj et al., 2016).

Os Carbon Dots, do português Pontos de Carbono (PCs) são uma classe de nanomateriais compostos por átomos de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, com dimensões entre 2 a 10 nm (Fechine, 2020). São nanopartículas que apresentam baixa citotoxicidade, alta solubilidade em água, resistência à fotodegradação e funcionalização orgânica (Xu et al., 2004). A composição destes nanomateriais é relativamente simples, despertando cada vez mais o interesse de cientistas para a síntese e estudos de novos compostos (Marciano, 2022).

A composição química dos pontos de carbono depende do precursor de carbono utilizado na síntese e das condições de preparação. Esses nanomateriais, gradualmente, vêm sendo mais utilizados devido à sua fonte de síntese ser derivada de materiais carbonosos, simples, de fácil procura e baratos. Contudo, é possível afirmar que essas nanopartículas de carbono consistem basicamente de carbono sp^2 e sp^3 , além de apresentar grupos hidroxila, carboxila, epóxidos e carbonos aromáticos (Lima; Machado; Schiavon, 2023). Geralmente, esses nanomateriais são usados como fotossensibilizadores para fabricação de celulares solares, pois possuem a capacidade de transferência de grandes quantidades de elétrons por

radiação. Além disso, podem ser usados como semicondutores em dispositivos de alta eficiência, como LEDs de alta qualidade de cor (Kwak et al., 2015).

2.3.1 História

Durante um experimento de separação e purificação de carbono por meio de isolamento de fuligem bruta pelo método eletroforético, os pontos de carbono foram descobertos acidentalmente em 2004 por Xu et al. A nomenclatura "pontos de carbono" diferencia nanopartículas fluorescentes de outros tipos de nanopartículas de carbono, pois é possível verificar componentes fluorescentes de luz UV e comprimento de onda de 365 nm (Liu et al., 2019). Outros estudos e experimentos tinham sido realizados para obter mais materiais com propriedades semelhantes às nanopartículas de silício, solúveis em água e com objetivo de fazer marcações celulares (Florence; Silva, 2024).

Além disso, é possível verificar o aprimoramento das sínteses, caracterização e elucidação de suas propriedades. As sínteses dos pontos de carbono, após seu descobrimento, se tornaram também uma alternativa aos pontos quânticos semicondutores devido às suas características vantajosas, tais como menor toxicidade, compatibilidade com organismos vivos, custo reduzido e estabilidade química, além de apresentarem propriedades de fluorescência (Lim; Shen; Gao, 2015).

Desde sua descoberta até os dias atuais, os pontos de carbono desempenham um papel decisivo na série de novos campos emergentes, incluindo a eletrocatalise, armazenamento de energia e agricultura, possuindo diversas vantagens estruturais descobertas. Algumas avaliações e estudos não são claras em relação a umas propriedades-chave, tendo como dificuldade a obtenção de amostras padrão consistentes, caracterização e estudo aprofundado de seus mecanismos de fluorescência. Todavia, algumas características promissoras já identificadas em relação à aceitação e doação de elétrons podem otimizar desempenhos catalíticos no futuro (Yao et al., 2019).

Atualmente, umas das aplicações mais notórias dos pontos de carbono, devido às suas propriedades fundamentais na óptica e eletrônica, é a utilização desses nanomateriais como agentes de imagem para diagnósticos e terapia, além

de serem usados para marcação e rastreabilidade de moléculas, células e tecidos do corpo (Hassan et al., 2021).

2.3.2 Propriedades dos pontos de carbono

Os pontos de carbono apresentam formas cristalinas ou amorfas, dependendo das condições de produção, por diferentes métodos físicos ou químicos de síntese. Todavia, a sua fabricação e apresentação de diferentes formas, origem da fluorescência ainda estão sendo estudados (Wang et al., 2014). Os grupos funcionais polares presentes nesse nanomaterial permitem a interação entre moléculas orgânicas por ligações não covalentes como a ligação de hidrogênio e forças de van der Waals, tornando as estruturas nanométricas mais adsorventes (Zhang et al., 2018). Outro ponto importante é que os grupos na superfície dos pontos de carbono possuem interferência direta sobre o comportamento óptico do material, interferindo também no comprimento de onda de emissão devido ao aumento da disponibilidade de elétrons na superfície. São classificados de acordo com a predominância das ligações entre os átomos em seu núcleo (Vaz et al., 2015).

Graças a sua absorção óptica na região do UV (podendo se estender até a região do visível) e suas propriedades de fotoluminescência, que dependem diretamente do tamanho das nanopartículas, os pontos de carbono possuem a assinatura clássica de confinamento quântico. Contudo, a propriedade de fluorescência está sendo estudada com mais detalhes, pois não há estabelecida completamente uma origem para esta. O confinamento quântico, a influência do estado de superfície (passivação, interação com solventes e pH) são algumas das atribuições a essa possível origem (Wu et al., 2021).

A absorção óptica encontra-se na faixa de 260 a 300 nm devido às transições de ligações π - π^* derivados das duplas ligações entre carbonos. Já em relação à emissão, é possível verificar sinais entre 420 a 450 nm para materiais contendo ligações C-OH, devido à alta fotoluminescência. Uma das hipóteses relatada em artigos é que a fluorescência se origina de diferentes sítios ativos presentes nas superfícies dos pontos de carbono, resultantes da oxidação da superfície do nanocristal e permitindo a sua fluorescência característica (Bao et al., 2011).

2.3.3 Métodos de síntese dos pontos de carbono

Atualmente, existem dois métodos de síntese de pontos de carbono: bottom-up (de baixo para cima) e top-down (de cima para baixo). O método bottom-up, também conhecido como nanotecnologia molecular, consiste em criar o material a partir de precursores moleculares, formando pequenas estruturas e, posteriormente, formando os pontos de carbono. Essa síntese ocorre geralmente em meio aquoso, utilizando opcionalmente gás inerte e atmosfera controlada. Alguns exemplos deste método são: hidrotérmico, decomposição térmica, pirólise e outros (Nascimento, 2022). As abordagens bottom-up permitem a preparação de nanopartículas mais homogêneas, porém, sob condições específicas como tempo, tipos de matérias-primas empregadas e consumo de energia quando o foco principal é a produção em larga escala com boa qualidade do produto (Siddiqi et al., 2018).

Já o método top-down possui uma abordagem voltada para estruturas maiores que reduzem de tamanho para nanoescala, porém ainda mantendo suas propriedades originais sem controle de nível atômico. O material em estado sólido é decomposto em pequenas partículas, formando as nanopartículas. Alguns exemplos deste método são: oxidação eletroquímica, ablação a laser e tratamento com plasma. Esse método possui algumas vantagens em relação ao método bottom-up tais como: simplicidade, alto desempenho, não libera gases tóxicos e capacidade de produção em grande escala (Yao et al., 2019).

Outra abordagem, considerada uma das mais simples, para criação de pontos de carbono é por meio de uma passivação rápida das nanopartículas de carbono em etanol, acetona ou água por ablação a laser. Sínteses oriundas de fontes renováveis, químicas e de biomassa são as mais utilizadas como precursores com fonte de carbono que são utilizados para criação de pontos de carbono. Vale ressaltar que essas sínteses dependem, intrinsecamente, da finalidade da aplicação deste nanomaterial. Por fontes renováveis, alguns cientistas têm procurado matérias-primas que não possuem mais utilidade, e que, possivelmente, podem contaminar o meio ambiente, como é o caso de medicamentos vencidos, demonstrando uma nova aplicação industrial. Portanto, pode significar uma ótima alternativa para indústrias e serviços de saúde utilizarem esta aplicação para destinar seus resíduos ao tratamento mais adequado (Cui et al., 2021).

2.4 A escolha adequada para um precursor sustentável

Uma abordagem sustentável para síntese de pontos de carbono envolve o uso de precursores renováveis, como biomassa, resíduos agroindustriais e carboidratos naturais, reduzindo a dependência de reagentes tóxicos e diminuindo impactos ambientais. Estudos mostram que pontos de carbono sintetizados a partir de resíduos de casca de laranja ou borra de café podem apresentar excelente fotoluminescência e alta eficiência na remoção de poluentes. Já os pontos de carbono derivados de medicamentos podem apresentar propriedades fluorescentes e bioativas que os tornam úteis em aplicações como sensores, bioimagem e remediação ambiental (Wang et al., 2014).

A escolha da amoxicilina como precursor sustentável para a síntese de pontos de carbono por meio da rota solvotermal em etanol anidro é uma abordagem inovadora no campo dos nanomateriais. Esse antibiótico, amplamente utilizado na medicina, apresenta uma estrutura química rica em nitrogênio e carbono, favorecendo a conversão em nanopartículas por métodos térmicos. A degradação térmica controlada do anel β -lactâmico e outros grupos funcionais da amoxicilina permite a formação de produtos fluorescentes, propriedades fundamentais para seu uso como nanomarcadores em aplicações biomédicas e ambientais (Bezerra, 2016; Baricatti et al., 2008) .

A rota solvotermal emprega etanol anidro como solvente, promovendo um ambiente homogêneo e livre de água, essencial para a obtenção de partículas uniformes e estáveis. Estudos anteriores indicam que o uso de solventes orgânicos na modificação de antibióticos pode facilitar a quebra e a reorganização molecular, formando estruturas altamente organizadas. Esses avanços reforçam o potencial da amoxicilina não apenas como fármaco, mas como precursor químico sustentável em processos de nanotecnologia (Baricatti et al., 2008).

Além disso, a abordagem descrita destaca o compromisso com práticas mais sustentáveis em relação à utilização de medicamentos vencido, pois estes descrevem uma perda do princípio ativo comparado com a concentração original, os antibióticos são maléficos ao meio ambiente se descartado inadequadamente, podendo acarretar o desenvolvimento de superbactérias (Ecdc, 2009).

Ao contrário de métodos tradicionais que utilizam metais pesados ou solventes tóxicos, a escolha da amoxicilina e do etanol reduz os resíduos perigosos e a pegada ambiental. Isso está alinhado com a tendência de desenvolver

tecnologias verdes no setor de materiais avançados. Essa combinação de benefícios torna a síntese de pontos de carbono a partir da amoxicilina um campo promissor, com aplicações que vão desde sensores químicos até dispositivos médicos (Bezerra, 2016).

2.5 Pontos de Carbono como nanomarcadores em combustíveis

Atualmente, os marcadores químicos desempenham um papel crucial na identificação de fraudes e adulterações em combustíveis, especialmente em escala internacional. Detectar adulterações, como a adição de hidrocarbonetos ou misturas em pequenas quantidades, é uma tarefa desafiadora devido à falta de um padrão universal para comparação. Essa dificuldade é agravada pela diversidade regional nas composições de combustíveis, o que exige métodos analíticos altamente seletivos e sensíveis para diferenciar compostos similares (Takeshita et al., 2008).

Um estudo realizado por Nascimento (2021) buscou desenvolver um marcador invisível e comercializável, comparável a um "DNA" para combustíveis automotivos nacionais. A pesquisa também explorou o uso de nanomateriais como potenciais marcadores químicos. Um exemplo desse tipo de marcação é a "marcação silenciosa", onde o marcador, em concentrações extremamente baixas, é indetectável a olho nu e requer utilização espectrofotômetros e espectrofluorímetros portáteis para sua identificação. Esses equipamentos facilitariam as fiscalizações nos postos de gasolina sem a necessidade de laboratórios. Além disso, o equipamento pode ser operado por qualquer pessoa treinada previamente, sem a necessidade de uma alta qualificação técnica.

Ferrer (2022) demonstrou que pontos de carbono sintetizados a partir de bagaço de cana, utilizando a rota solvotermal, podem ser eficazes como marcadores de etanol hidratado combustível. Esses pontos de carbono apresentam propriedades que permitem sua detecção por emissão e absorção de luz, com potencial de deslocar o comprimento de onda de fluorescência para evitar interferências causadas por contaminantes no etanol. Além disso, sua aplicação em concentrações abaixo de 1 ppm pode otimizar a eficácia da marcação, tornando esse método promissor tanto na indústria de combustíveis quanto em outros setores, como o farmacêutico, devido à flexibilidade na utilização de moléculas precursoras.

2.6 Técnicas de caracterização

2.6.1 Espectrofotometria de Absorção e Emissão

A espectrofotometria de absorção e emissão permite analisar transições eletrônicas em moléculas e átomos, oferecendo insights sobre suas estruturas químicas. Essas técnicas baseiam-se na interação de radiação eletromagnética com a matéria. Avanços recentes destacam a capacidade de espectrômetros modernos em detectar comprimentos de onda com maior precisão, melhorando a análise de espectros contínuos e discretos. Por exemplo, o uso de espectrofotômetros de alta resolução tornou possível determinar melhor os picos de absorção e emissão, o que é essencial em aplicações como análises farmacêuticas e estudos ambientais (Pavia et al., 2010; Filho et al., 2010).

A integração com tecnologias de detecção de luz, como sensores CCD (Dispositivos de Carga Acoplada), oferece maior sensibilidade para medições em concentrações extremamente baixas (Pavia et al., 2010). Adicionalmente, a fluorescência molecular, uma forma de emissão, está cada vez mais aplicada em estudos biológicos, pois permite rastrear moléculas específicas em ambientes complexos, como células vivas (Cosgrove, 2005).

2.6.2 Espectroscopia de Infravermelho

A espectroscopia de infravermelho (IR) continua a ser uma técnica indispensável para a identificação de grupos funcionais em moléculas. Recentes avanços incluem o uso de espectrômetros de transformada de Fourier (FTIR), que agora possuem interfaces para análise em tempo real e softwares de interpretação de dados, permitindo maior rapidez e precisão na caracterização química. As aplicações estendem-se à análise de contaminantes em polímeros e ao controle de qualidade em alimentos e fármacos (Pavia et al., 2010; Filho et al., 2010). Além disso, novas técnicas, como espectroscopia IR em reflexão total atenuada (ATR), possibilitam a análise de amostras sólidas sem necessidade de preparação elaborada, tornando a técnica mais prática e acessível em laboratórios (C2Lab, 2022).

2.6.3 Espalhamento de Luz Dinâmico e Potencial Zeta

O espalhamento de luz dinâmico (DLS) é amplamente utilizado para determinar o tamanho de partículas em dispersões coloidais. Avanços recentes incluem sistemas de laser de alta intensidade, que aumentam a precisão das medições, mesmo em dispersões diluídas. A técnica também é aplicada para monitorar a estabilidade de nanopartículas e emulsões, sendo crucial para a indústria de cosméticos e fármacos (Cosgrove, 2005; C2Lab, 2022).

Por sua vez, o potencial zeta fornece informações essenciais sobre a estabilidade coloidal, indicando a repulsão entre partículas. Tecnologias modernas agora combinam medições de potencial zeta e DLS, permitindo análises simultâneas de estabilidade e tamanho de partículas em uma única execução. Essas inovações são fundamentais em pesquisas relacionadas a nanopartículas e biomateriais (Alexandrino, 2013).

3 METODOLOGIA

3.1 Obtenção dos materiais

O medicamento amoxicilina (Prati-Donaduzzi) foi obtido para realização de experimentos e pesquisas, por intermédio do projeto de extensão do Departamento de Farmácia da UFPE que realiza coleta de remédios vencidos para o descarte correto dos medicamentos. O etanol anidro e hidratado combustível foram obtidos do Laboratório de Combustíveis da Universidade Federal de Pernambuco (LAC-UFPE). Os demais materiais necessários para a síntese dos Pontos de Carbono foram obtidos do Laboratório de Química Analítica e Inorgânica (LAIIn) localizado no Departamento de Engenharia Química da UFPE.

3.2 Síntese dos pontos de carbono

A síntese foi realizada no Laboratório de Interfaces, Nanomateriais e Sistemas Coloidais (LINSCL), no Departamento de Ciências Farmacêuticas da UFPE.

3.2.1 Preparação da amostra

O procedimento ocorreu a partir da preparação de uma solução de 1 g de amoxicilina (Prati-Donaduzzi), na qual duas cápsulas de 500 mg foram pesadas separadamente na balança analítica, inseridas no reator de inox, dissolvidas com 15 mL de Etanol Anidro P.A. e homogeneizadas com o auxílio de um bastão de vidro. O procedimento foi realizado em duplicata.

3.2.2 Síntese solvotermal

A síntese solvotermal foi realizada utilizando a metodologia de Ferrer (2022) com adaptação que incluiu uma etapa de pós-tratamento via banho de ultrassom (Altsonic, Clean 9IA, 40 KHz) por 30 minutos, para o melhoramento de seus índices de polidispersão e de extração de pontos de carbono. O sistema utilizado para síntese pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Diagrama da síntese Solvotermal.



Fonte: O autor (2025).

A solução etanólica realizada no item 3.2.1 foi levada à mufla (EDG 3000 3P) para aquecimento por 3 horas, com rampa de aquecimento de 5 °C min⁻¹ até atingir a temperatura de 180 °C. Posteriormente, o reator foi resfriado até temperatura ambiente por meio de ventilação natural. A solução então foi colocada em frascos de Eppendorf e centrifugada por 15 minutos a 13000 rpm na centrífuga MiniSpin. O

sobrenadante (síntese-mãe) foi colocado em banho ultrassônico e filtrado em membrana PTFE de 0,22 μm e armazenado em frascos de vidro transparente de 10 mL. O precipitado foi deixado para secar naturalmente por 5 dias e o pó resultante da evaporação do solvente foi utilizado para caracterização estrutural (técnica de espectroscopia no infravermelho).

3.2.3 Diluição seriada

Foi realizada uma diluição seriada da síntese-mãe para realização dos procedimentos de caracterização, na qual a amostra foi diluída em Etanol Anidro PA nas proporções de 1:10⁻¹, 1:10⁻², 1:10⁻³ e 1:10⁻⁴ (v/v). As mesmas proporções foram realizadas para as diluições utilizando etanol hidratado combustível como solvente para a execução da marcação do combustível (aplicação para testar a marcação antifraude).

Ambas diluições com solventes diferentes foram feitas para as caracterizações de espectrofotometria absorção e emissão, todavia, as análises de Espalhamento de Luz Dinâmico (DLS) e potencial Zeta foram realizadas para as diluições em etanol anidro. Já para a análise de Espectroscopia de Infravermelho foi utilizada a síntese-mãe pelo processo de centrifugação e secagem natural do solvente sem diluições. Antes da realização das caracterizações, as amostras diluídas foram levadas para avaliação de fluorescência com lâmpada UV exc. 365 nm, no Laboratório de Química Analítica e Inorgânica (LaIn) do Departamento de Engenharia Química da UFPE.

3.3 Caracterização óptica do material

3.3.1 Espectrofotometria de absorção

As sínteses diluídas foram caracterizadas na Central Analítica do DQF-CCEN UFPE através da análise de Espectroscopia de absorção ou Espectrofotometria de UV-Vis, utilizando um espectrofotômetro de absorção eletrônica (PerkinElmer, Lambda 650), em uma cubeta de quartzo com caminho óptico de 10 mm e varredura com passo de 1 nm, executando uma varredura na

faixa de 200 a 600 nm. Com essa análise, foi possível determinar a região de maior intensidade de absorção dos materiais no espectro.

3.3.2 Espectrofotometria de emissão

A análise espectrofotométrica por fluorescência foi conduzida em um espectrofluorímetro (PerkinElmer, LS55) no Laboratório de Biofísica do Centro de Ciências da Saúde da UFPE. Para a realização dos experimentos, foram utilizadas fendas de entrada e saída de 15 nm e 5 nm, respectivamente, com um comprimento de onda de excitação de 370 nm, selecionado com base nos espectros de absorção. As amostras, previamente diluídas, foram colocadas em uma cubeta de 10 mm. A comparação entre os espectros de absorção obtidos e aqueles disponíveis na literatura foi essencial para complementar a caracterização do perfil de fluorescência dos pontos de carbono analisados.

3.4 Caracterização estrutural do material

3.4.1 Espectroscopia de Infravermelho

Para a caracterização estrutural e físico-química dos pontos de carbono sintetizados, foi realizada uma análise por espectroscopia no infravermelho utilizando um espectrômetro PerkinElmer, modelo Spectrum 400, equipado com um acessório de reflectância total atenuada (UATR Spectrum 100) e um cristal de seleneto de zinco (ZnSe). As amostras, previamente secas em microtubos Eppendorf, foram transferidas para o prato de pequena quantidade de pó

(L120-2049) com o auxílio de uma espátula, garantindo a cobertura total do cristal. Os espectros foram obtidos na faixa espectral de 4000 a 550 cm^{-1} , com 32 acumulações por espectro. Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Combustíveis (LAC) da UFPE.

3.4.2 Potencial Zeta e Espalhamento de Luz Dinâmico (DLS)

A determinação do tamanho das nanopartículas por espalhamento dinâmico de luz (DLS) e a estimativa da carga superficial por potencial Zeta foram realizadas

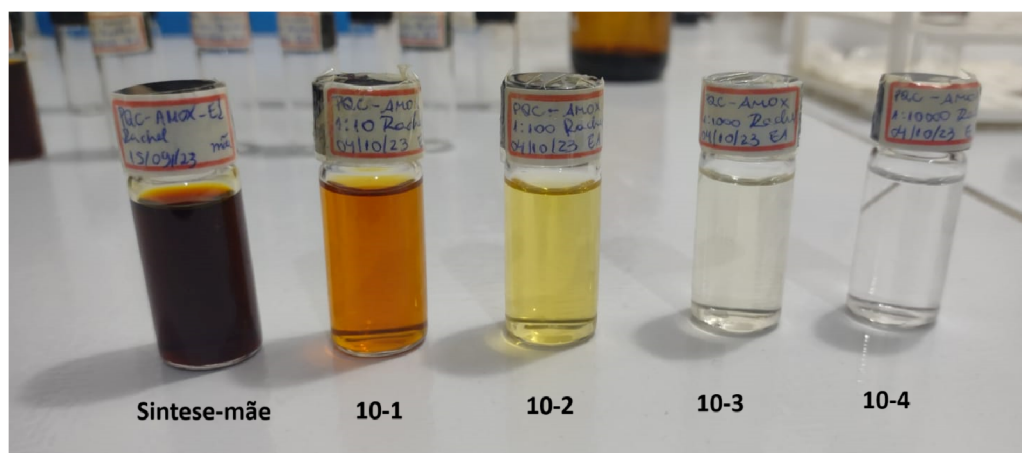
utilizando o equipamento Zetasizer Nano, modelo ZEN3690. As análises ocorreram no Laboratório de Nanotecnologia Farmacêutica da UFPE, empregando etanol como dispersante e conduzindo os experimentos a uma temperatura de 25 °C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Síntese dos pontos de carbono

O material obtido teve aspecto límpido (sem precipitações), de coloração âmbar e pH médio de 4,75. A síntese-mãe e as diluições em etanol anidro 1:10⁻¹, 1:10⁻², 1:10⁻³ e 1:10⁻⁴ (v/v) podem ser vistas na Figura 2. Fatores como a disponibilidade do precursor e o processo da utilização de medicamentos vencidos como alternativa sustentável foram levados em consideração para a realização deste trabalho. A escolha da rota de síntese considerou o uso de etanol anidro devido à sua menor polaridade em comparação com a água, o que facilita a dispersão de compostos orgânicos (Morelli, 2014).

Figura 2: Síntese-mãe e as diluições 1:10⁻¹, 1:10⁻², 1:10⁻³ e 1:10⁻⁴.

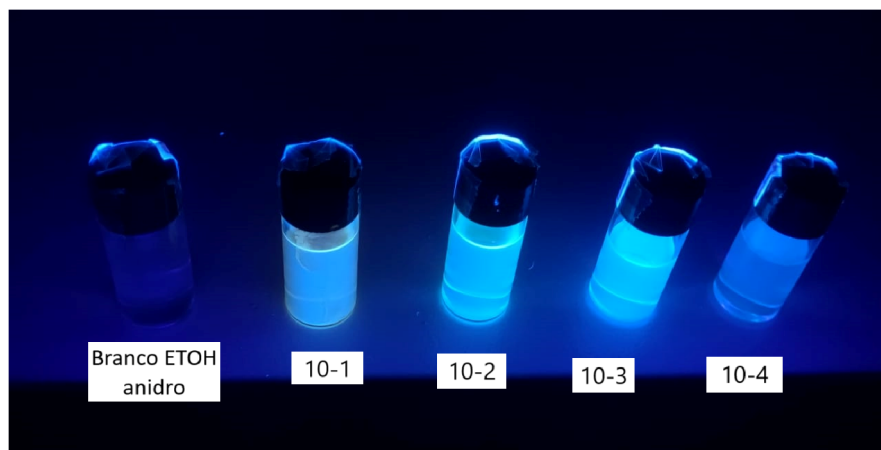


Fonte: O autor (2025).

Ao serem irradiados com luz UV exc. 365 nm, como mostra a Figura 3, os pontos de carbono obtidos nas diluições 1:10⁻² e 1:10⁻³ exibiram fluorescência intensa na faixa do azul, enquanto a diluição 1:10⁻¹ obteve fluorescência moderada e a diluição 1:10⁻⁴ apresentou a fluorescência com menor intensidade comparada

às outras diluições, devido à menor concentração dos pontos de carbono na amostra.

Figura 3: Fluorescência das diluições $1:10^{-1}$, $1:10^{-2}$, $1:10^{-3}$ e $1:10^{-4}$ em etanol anidro na luz UV.



Fonte: O autor (2025).

Segundo Abdolkarimi-Mahabadi, Bayat e Mohammadi (2021), o comportamento da fluorescência depende da interação entre a intensidade de absorção da luz UV e a quantidade de moléculas presentes na solução. Se a concentração for muito baixa, haverá poucas moléculas para absorver a luz UV e emitir fluorescência (como no caso da diluição $1:10^{-4}$); se for muito alta, as moléculas

contidas no meio saturam-se e diminuem ou não geram fluorescência, sofrendo outros tipos de interações como auto-absorção, como no caso da diluição $1:10^{-1}$.

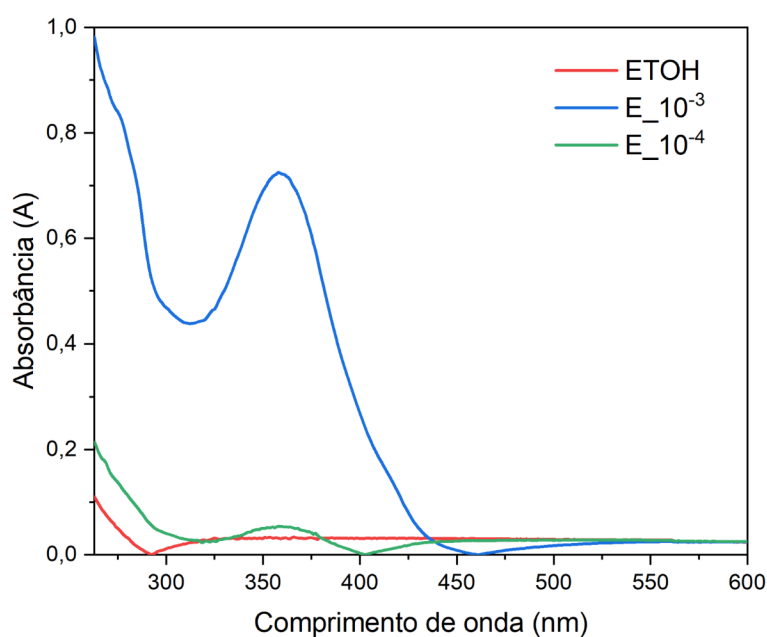
Ao irradiar as amostras com luz UV nas mesmas diluições $1:10^{-1}$, $1:10^{-2}$, $1:10^{-3}$ e $1:10^{-4}$, Melo (2022) observou emissão na faixa do azul apenas para a diluição $1:10^{-3}$, indicando que a rota hidrotermal pode ter gerado um material cuja eficiência de emissão depende da formação de estados eletrônicos emissivos. Já no presente trabalho, todas as diluições analisadas apresentaram emissão de luz, com a intensidade máxima na diluição $1:10^{-3}$. Esse resultado sugere que a síntese solvotermal pode conferir aos pontos de carbono uma maior estabilidade e eficiência na emissão, permitindo a fluorescência mesmo em concentrações mais elevadas ou mais diluídas.

4.2 Caracterização do material

4.2.1 Espectrofotometria de absorção

Os pontos de carbono apresentaram uma banda de absorção em 358 nm, conforme evidenciado pelas bandas das diluições $1:10^{-3}$ e $1:10^{-4}$ na Figura 4. Para a diluição $1:10^{-3}$ é possível verificar uma banda de absorção mais atenuada com absorbância de 0,73, e a diluição $1:10^{-4}$ obteve uma banda de absorção bem leve com absorbância de 0,05, ambas no mesmo comprimento de onda, sugerindo que os pontos de carbono absorvem parcialmente nessa região, mas a concentração afeta a intensidade do sinal (Atkins; Jones, 2011).

Figura 4: Perfil de absorção dos pontos de carbono sintetizados a partir da amoxicilina por rota solvotermal em Etanol Anidro PA.



Fonte: O autor (2025).

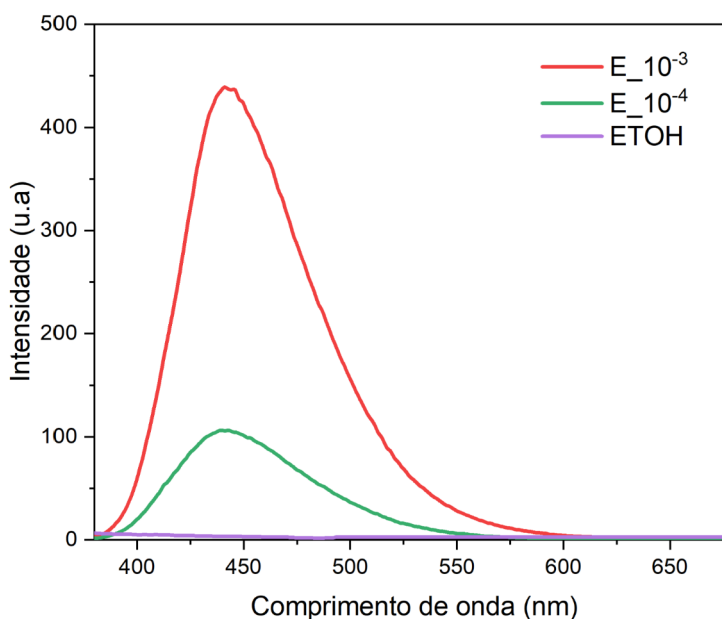
Ao plotar o gráfico da Figura 4, foi identificado que as diluições $1:10^{-1}$ e $1:10^{-2}$ tiveram valores de absorbância acima do limite aceito pelo equipamento, ocorrido pela alta concentração do material particulado no meio dispersante (efeito de saturação da luz incidente), delimitando a análise do espectro, e, portanto, sendo removidas da análise em questão.

Comparado ao trabalho realizado por Melo (2022), o espectro de absorção mais satisfatório foi também a diluição $1:10^{-3}$ com duas bandas de absorção entre 270 a 360 nm, com absorbância menor que 0,50. Essa diferença sugere que a rota solvotermal favorece a formação de pontos de carbono com maior capacidade de absorção de luz, possivelmente devido a um controle mais eficiente da morfologia e do tamanho das partículas (Lopes, 2020).

4.2.2 Espectrofotometria de emissão

De acordo com a Figura 5, a diluição $1:10^{-3}$ atingiu um valor de intensidade de 438 u.a. e a diluição $1:10^{-4}$ um valor de intensidade de 106 u.a., ambos na região dos 440 nm, tendo seu pico de maior intensidade na diluição $1:10^{-3}$, o que corrobora os dados de absorção, sugerindo que essa concentração favorece a excitação e a subsequente emissão dos pontos de carbono. Similarmente ao que ocorreu na análise de absorção, foi identificado que para as diluições em etanol anidro, $1:10^{-1}$ e $1:10^{-2}$ tiveram fluorescências acima do limite aceito pelo equipamento, sendo também desconsideradas dos resultados.

Figura 5: Perfil do espectro de emissão dos pontos de carbono sintetizados em Etanol Anidro PA excitados em 370 nm.



Fonte: O autor (2025).

A diluição ideal para detecção de fluorescência nos pontos de carbono foi, portanto, a diluição $1:10^{-3}$, pois concentrações mais altas sofrem a reabsorção de fótons devido à alta densidade óptica, reduzindo a emissão detectável. Esse fenômeno ocorre porque, em soluções mais concentradas, os pontos de carbono excitados emitem fótons que acabam sendo reabsorvidos por outros presentes, diminuindo a intensidade do sinal (Santos Júnior, 2021). Já em soluções muito diluídas (menores de $1:10^{-4}$), a fluorescência se torna indetectável devido à baixa concentração de pontos de carbono na solução.

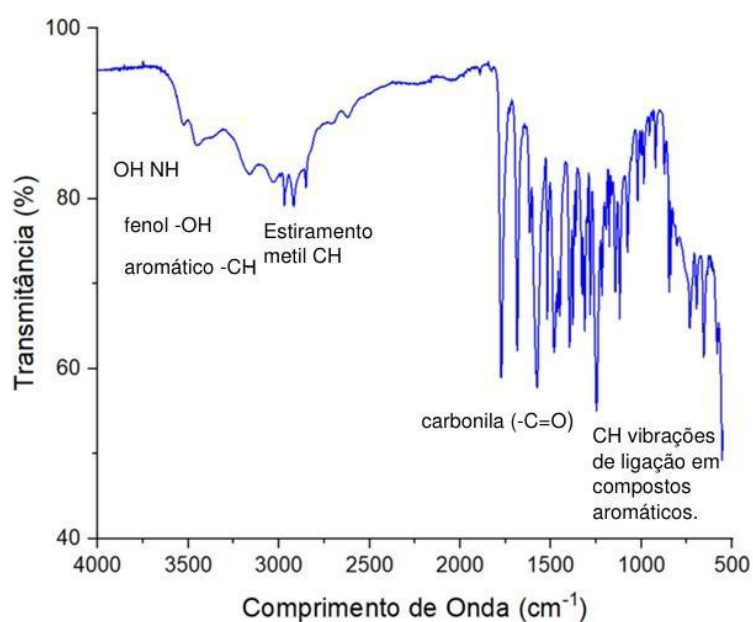
No estudo realizado por Melo (2022), a diluição $1:10^{-3}$ também foi a que apresentou a melhor resposta no espectro de emissão, porém com uma intensidade superior, próxima de 600 u.a. Além disso, a diluição $1:10^{-4}$ no estudo de Melo (2022)

teve um desempenho ligeiramente melhor do que o observado neste trabalho, apresentando uma intensidade de aproximadamente 130 u.a. O comparativo entre os trabalhos sugere que a rota hidrotermal pode ter favorecido a formação de estados eletrônicos mais eficientes para a emissão de luz, resultando em uma intensidade maior na diluição $1:10^{-3}$, chamado também de efeito solvatocrômico, no qual o efeito do solvente pode influenciar na intensidade fluorescência. Por outro lado, a rota solvothermal demonstrou constância na emissão entre as diluições, mantendo a fluorescência em concentrações variadas.

4.2.3 Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

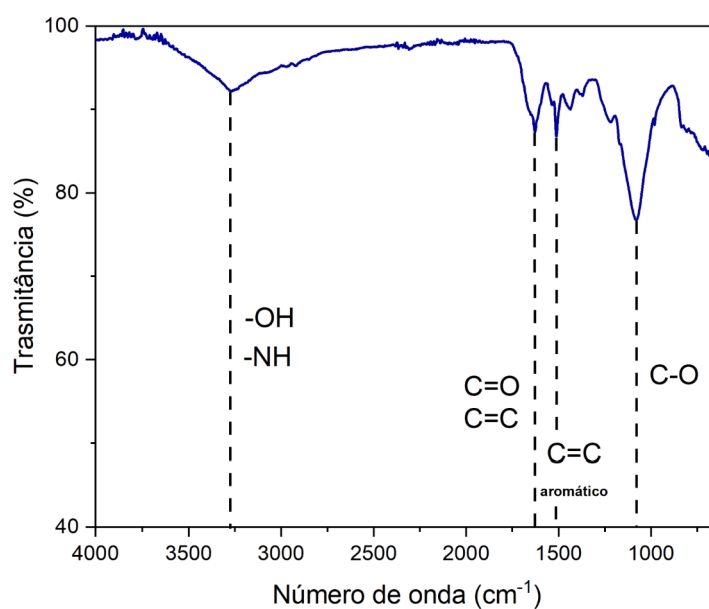
A amoxicilina vencida foi escolhida como fonte de carbono devido à presença de grupos funcionais relevantes para a síntese eficiente dos pontos de carbono, como NH_2 , $\text{C}=\text{O}$ e COOH (Bebu, 2011). Nas Figuras 6A e 6B, é possível visualizar onde estão dispostas as linhas de transmitância tanto da cápsula de amoxicilina quanto do material sintetizado a partir da mesma na análise da Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier. A Figura 6A foi coletada do trabalho realizado por Melo (2022) que utilizou a mesma amostra, marca e lote utilizados neste trabalho.

Figura 6A: Análise de FTIR da amoxicilina vencida.



Fonte: Melo (2022).

Figura 6B: Análise de FTIR dos pontos de carbono produzidos neste trabalho a partir da amoxicilina vencida.



Fonte: O autor (2025).

O espectro de infravermelho da amoxicilina vencida realizado por Melo (2022), apresentado na Figura 6A, exibiu um padrão similar ao descrito na literatura (Perveen, 2020). Foi identificada uma banda entre $3500\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$, correspondente

ao estiramento de ligações fenólicas (O-H). Além disso, os estiramentos das ligações metil (CH_3) alifáticas foram registrados em 2980 e 2918 cm^{-1} . Também foram observadas bandas atribuídas a grupos carbonila e vibrações características de ligações aromáticas na faixa de 2400 a 1000 cm^{-1} .

O espectro de FTIR da Figura 6B apresentaram bandas de absorção em 3275, 1624, 1510 e 1088 cm^{-1} , indicando a presença de diferentes grupos funcionais. A banda em 3275 cm^{-1} pode ser atribuída ao estiramento -OH, característico de álcoois ou fenóis, e/ou ao estiramento -NH, comum em aminas e amidas. A absorção em 1624 cm^{-1} pode estar associada a ligações C=C aromáticas ou a estiramentos C=O de carbonilas, como em cetonas, aldeídos ou amidas. Já a banda em 1510 cm^{-1} está relacionada a vibrações C=C em anéis aromáticos, sugerindo a presença de estruturas benzênicas. Por fim, a banda em 1088 cm^{-1} indica possíveis ligações C-O.

Realizando uma análise comparativa entre as estruturas das Figuras 6A e 6B, sugere-se que a reação do precursor em etanol anidro modificou sua estrutura química, reduzindo a presença de grupos metílicos alifáticos e promovendo a formação de novas ligações C-O. Além disso, demonstrou-se a degradação parcial da estrutura original, preservando apenas algumas características aromáticas e carbonílicas.

O espectro de FTIR realizado por Melo (2022) também identificou estiramentos e bandas associadas aos mesmos grupos funcionais encontrados no precursor utilizado na síntese dos pontos de carbono. Isso sugere que houve uma preservação dos grupos funcionais originais na superfície dos PCs sintetizados. Entretanto, um dos principais diferenciais do estudo de Melo (2022) foi uma definição mais clara das ligações funcionais presentes, permitindo a identificação de ligações C=C tanto próximas ao anel aromático quanto diretamente ligadas a ele, além da presença de carbonilas e ligações nitrogenadas do tipo C=N, podendo influenciar diretamente as propriedades dos pontos de carbono, como sua solubilidade, funcionalidade química e interações com outros materiais.

A análise espectrofotométrica do presente trabalho revelou uma banda de absorção em 358 nm, característica de estruturas conjugadas e/ou grupos cromóforos na amostra. A presença dessas bandas sugere a existência de sistemas eletrônicos conjugados, como duplas ligações C=C ou grupos carbonílicos (C=O) em

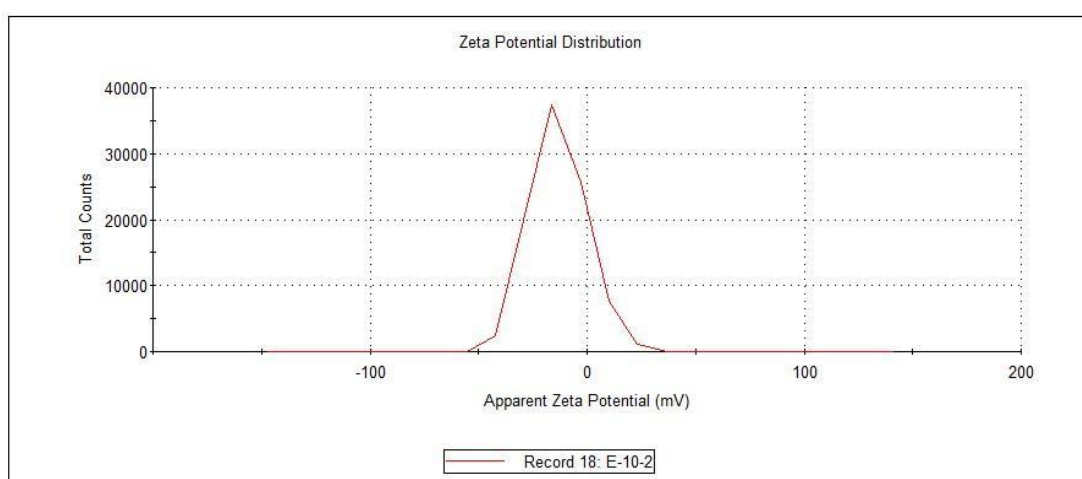
ressonância, compatíveis com os picos observados no espectro de FTIR (Silverstein; Webster; Kiemle, 2014).

4.2.4 Potencial Zeta e Espalhamento de Luz Dinâmico (DLS)

A análise do Potencial Zeta da dispersão apresentou um valor de -16,1 mV para a diluição $1:10^{-2}$ (Figura 7), indicando, conforme o manual do equipamento analítico (Malvern, 2013), que a amostra possui instabilidade incipiente, uma vez que valores entre ± 10 mV e ± 30 mV são considerados nessa faixa. Comparando esse resultado com o estudo de Melo (2022), que obteve um valor de -38,5 mV, verifica-se que a solução sintetizada em solvente água apresenta uma estabilidade moderada.

A medição do Potencial Zeta é influenciada por diversos fatores, incluindo as características das partículas, como o tipo de material e suas condições superficiais, bem como pelo meio dispersante. A composição e a concentração de eletrólitos dissolvidos no líquido desempenham um papel essencial nesse processo, impactando diretamente os valores obtidos (Sides; Prieve, 2016). Dessa forma, para melhorar a estabilidade da solução, a utilização de água como solvente pode ser uma alternativa mais adequada.

Figura 7: Distribuição do potencial Zeta dos pontos de carbono sintetizados na diluição $1:10^{-2}$.

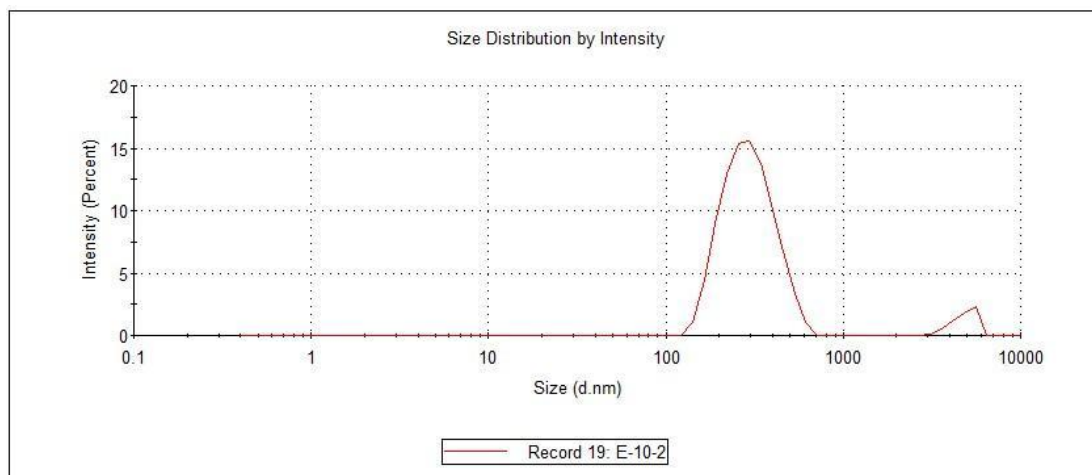


Fonte: O autor (2025).

A análise de espalhamento de luz dinâmico (DLS), apresentada na Figura 8, revelou dois tamanhos distintos de partículas. O primeiro pico, com intensidade de

94,4% (fração predominante de partículas na amostra), foi identificado na faixa de 295,3 d.nm, enquanto o segundo, menos expressivo, apresentou 15,5% de intensidade em 5560 d.nm.

Figura 8: Distribuição do tamanho pela intensidade via análise de DLS na diluição 1:10⁻².



Fonte: O autor (2025).

O primeiro pico sugere o fenômeno de polidispersividade, em que as nanopartículas estão bem dispersas e não estão dentro da faixa esperada para esse tipo de material, pois, em geral, as nanopartículas dispersas apresentam tamanhos entre 1 nm e 10 nm. Já o segundo pico aponta para a formação de aglomerados de nanopartículas, que pode ser resultado de interações intermoleculares, forças de van der Waals ou até mesmo da estabilização inadequada das partículas no meio dispersante. O surgimento de um pico secundário em uma faixa de tamanho muito maior é um indicativo clássico da tendência de aglomeração, o que pode comprometer a uniformidade e a estabilidade da dispersão (Dialetachi, 2017).

De acordo com o resultado obtido de Melo (2022), este obteve o tamanho de 503,7 d.nm, no qual é possível considerar a imprecisão do valor obtido para partículas fluorescentes que apontam para possíveis erros de medição devido à fluorescência. Portanto, a análise de espalhamento de luz dinâmico não é um indicador ideal para comprovação de pontos de carbono, mas para outras variedades de nanopartículas.

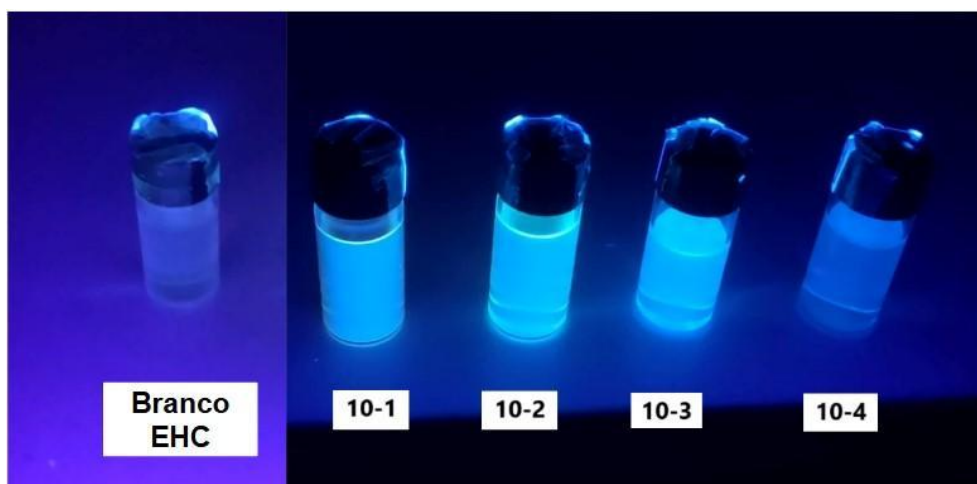
4.3 Avaliação da aplicação dos pontos de carbono como nanomarcadores de etanol em combustíveis

De acordo com a Resolução ANP Nº 902 de 18/11/2022, que estabelece os requisitos necessários para o fornecimento de um produto marcador em combustíveis, foi realizada a aplicação dos pontos de carbono sintetizados como marcadores no etanol hidratado combustível. Para atender às exigências da resolução, que incluem a detecção eficaz do marcador no combustível, foram realizadas diluições da solução-mãe nas proporções 1:10⁻¹, 1:10⁻², 1:10⁻³ e 1:10⁻⁴

(v/v) neste solvente, a fim de determinar concentração ideal que proporcionasse a fluorescência mais intensa e, conseqüentemente, uma melhor resposta analítica para a identificação do marcador no combustível (Figura 9). Todavia, as diluições

1:10⁻¹ e 1:10⁻⁴, diluídas em etanol anidro (Figura 2) e etanol hidratado combustível (EHC), apresentaram baixa fluorescência ainda comparadas com as diluições 1:10⁻² e 1:10⁻³.

Figura 9: Fluorescência das diluições 1:10⁻¹, 1:10⁻², 1:10⁻³ e 1:10⁻⁴ em etanol hidratado combustível na radiação UV.



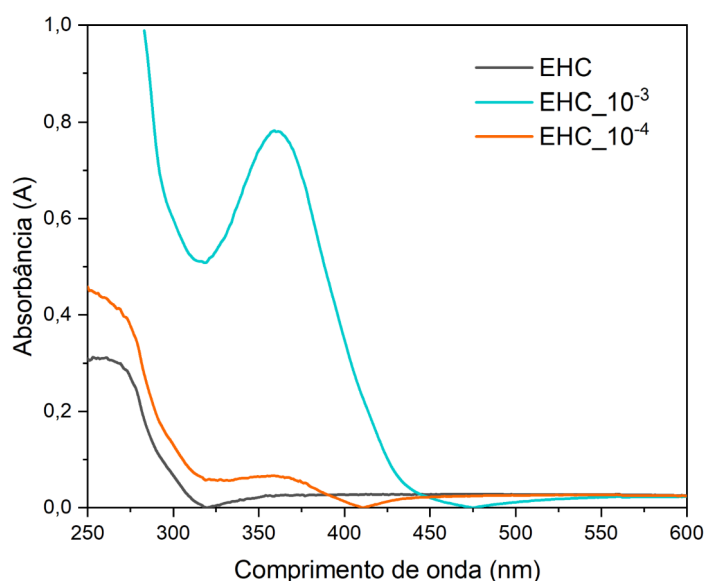
Fonte: O autor (2025).

Comparando as Figuras 2 e 9, é possível observar uma maior fluorescência dos pontos de carbono diluídos em etanol anidro PA em comparação com os pontos de carbono diluídos em etanol hidratado combustível. Isso pode ser atribuído a três fatores principais: a pureza do solvente, pois impurezas comprometem a organização estrutural do material; a passivação superficial é mais eficiente em etanol anidro, pois a ausência de água reduz a hidrólise de grupos funcionais

essenciais para a fluorescência, favorecendo a emissão óptica devido ao aumento dos estados eletrônicos ativos (Zhu et al., 2015).

De acordo com a Figura 10, a amostra de etanol hidratado combustível apresentou uma absorção significativa na faixa de 250 a 270 nm, o que pode estar relacionado à presença de impurezas naturais do etanol hidratado, como traços de água e outros compostos orgânicos. Com relação aos pontos de carbono diluídos no etanol hidratado combustível, estes apresentaram absorção 358 nm para a concentração de $1:10^{-3}$. Comparado à amostra de combustível, a presença dos pontos de carbono aumentou significativamente a absorção nessa região, sendo na diluição $1:10^{-4}$ ainda possível observar uma assinatura óptica distinta. Esse comportamento sugere que os pontos de carbono possuem um potencial promissor como marcadores ópticos para combustíveis.

Figura 10: Perfil de absorção dos pontos de carbono sintetizados a partir da amoxicilina aplicados em etanol hidratado combustível.



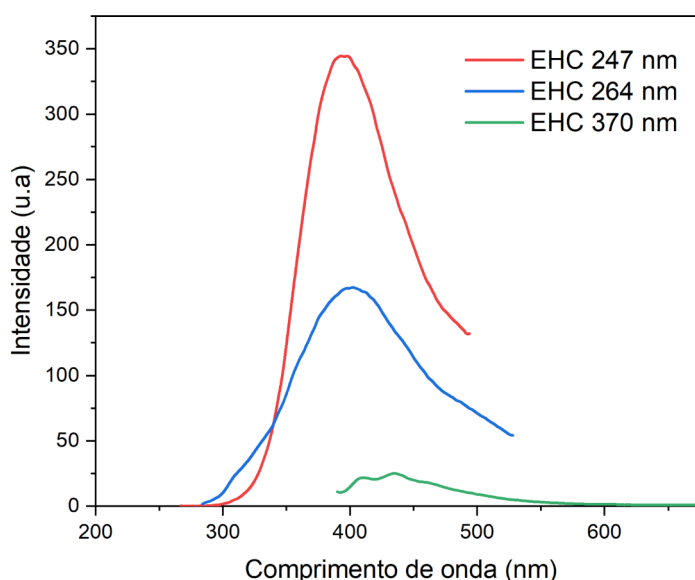
Fonte: O autor (2025).

No estudo realizado por Souza (2023), os pontos de carbono sintetizados a partir do ibuprofeno em rota solvotermal e diluídos na mesma amostra de etanol hidratado combustível apresentaram forte absorção na faixa de 200 a 300 nm, com um pico máximo próximo a 280 nm. Essa diferença espectral entre o resultado de Souza (2023) e o resultado do presente trabalho é importante, pois a absorção dos

pontos de carbono derivados do ibuprofeno ocorre em uma região onde o próprio combustível já apresenta sinal significativo, o que dificulta a distinção do marcador.

Para analisar o espectro de emissão do etanol hidratado combustível, foi realizada uma varredura em diferentes comprimentos de excitação (247, 264 e 370 nm) para identificar a intensidade de fluorescência mais significativa, conforme demonstrado na Figura 11. Os resultados encontrados no espectro de varredura indicam que a emissão do etanol hidratado combustível foi mais eficiente em menores comprimentos de onda, com intensidade máxima em 350 u.a. no comprimento de onda de 400 nm.

Figura 11: Espectro de varredura da emissão do etanol hidratado combustível excitado em diferentes comprimentos de onda.

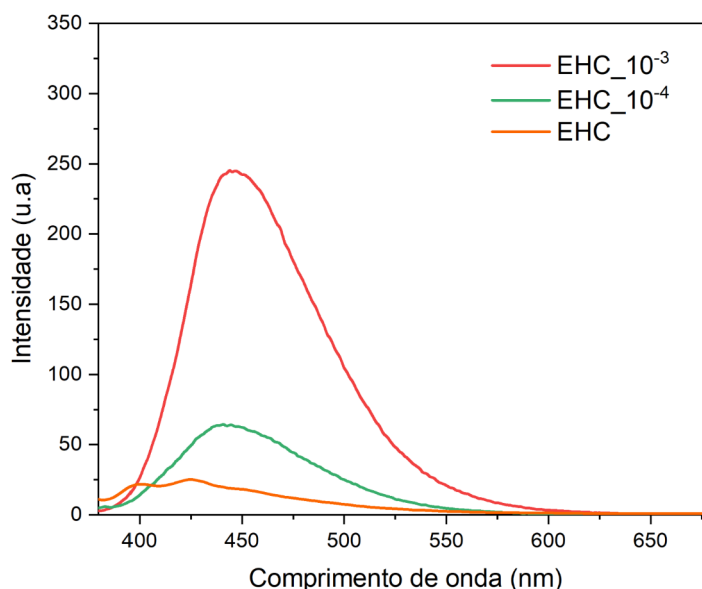


Fonte: O autor (2025).

Ao realizar a análise de emissão do etanol hidratado combustível marcado com os pontos de carbono, Figura 12, observou-se banda de emissão em 440 nm quando excitados a 370 nm, enquanto o combustível sem marcador exibiu uma pequena banda de emissão com intensidade discreta em um comprimento de onda inferior a 440 nm quando excitados na mesma região, que pode ser atribuído à presença de contaminantes. Isso sugere que o marcador pode ser usado como uma "assinatura" única do etanol hidratado combustível, e pode ser detectado pela análise de emissão, garantindo que o combustível comercializado seja autêntico.

Isso significa que a substituição ou adulteração do combustível com água ou metanol pode ser detectada por meio da presença ou ausência do marcador.

Figura 12: Perfil do espectro de emissão dos pontos de carbono aplicados em etanol hidratado combustível excitados em 370 nm.



Fonte: O autor (2025).

A diferença de intensidade entre os combustíveis com e sem marcador pode servir como um critério para detectar a presença dos pontos de carbono nos mesmos. Todavia, se fazem necessários testes adicionais para verificar se o etanol hidratado combustível possui compostos contaminantes que possam estar contribuindo para esse efeito. Comparativamente, o trabalho realizado por Souza (2023) obteve a intensidade das bandas de absorção e emissão dos pontos de carbono mascarada pela emissão do etanol hidratado combustível, além de apresentarem um maior alargamento das bandas.

5 CONCLUSÃO

A síntese de pontos de carbono a partir da amoxicilina vencida, utilizando a rota solvotermal, demonstrou ser uma abordagem eficiente para aplicação como nanomarcador fluorescente. O material obtido exibiu emissão de fluorescência sob

excitação por luz ultravioleta até a diluição de $1:10^{-4}$ (v/v), tanto em etanol anidro quanto em etanol hidratado combustível, este último utilizado como referência para a marcação com os pontos de carbono sintetizados.

Do ponto de vista óptico, os pontos de carbono sintetizados apresentaram absorção em 358 nm e emissão em 440 nm, sendo que a diluição $1:10^{-3}$ apresentou melhor desempenho em termos de absorção e intensidade de fluorescência. Em comparação com o estudo realizado por Melo (2022), observa-se que, na análise de absorção, o presente trabalho obteve um desempenho superior na mesma diluição, sugerindo que a rota solvothermal favorece a obtenção de pontos de carbono com maior capacidade de absorção de luz. No entanto, em relação à emissão, a rota hidrotermal empregada por Melo (2022) resultou em estados eletrônicos mais eficientes, intensificando a emissão em $1:10^{-3}$. Já a rota solvothermal proporcionou

uma emissão mais homogênea, mantendo a fluorescência em diferentes concentrações.

As caracterizações estruturais realizadas demonstraram modificações químicas significativas no precursor após a síntese, conforme indicado pela análise no infravermelho. Houve redução de grupos metílicos alifáticos e a formação de novas ligações C-O, evidenciando uma degradação parcial da estrutura original. Em comparação com os resultados obtidos por Melo (2022), este último apresentou uma caracterização mais detalhada das ligações funcionais, permitindo uma análise mais aprofundada da influência das estruturas químicas nas propriedades dos pontos de carbono. Quanto à estabilidade da dispersão, o potencial Zeta medido foi de -16,1 mV, indicando uma estabilidade incipiente. O estudo de Melo (2022), que obteve um potencial Zeta de -38,5 mV, revelou maior estabilidade quando a síntese foi realizada em meio aquoso. Dessa forma, sugere-se a inclusão de uma etapa de pós-tratamento para estabilização dos pontos de carbono sintetizados no presente estudo.

Na análise de absorção do combustível, foi identificada uma banda de absorbância entre 250 e 270 nm, possivelmente associada à presença de impurezas no etanol combustível. O presente estudo apresentou absorção dos pontos de carbono distinta do combustível, com pico em 358 nm, enquanto na emissão, exibiram fluorescência mais intensa e definida quando excitados a 370 nm. No trabalho de Souza (2023), os pontos de carbono sintetizados a partir do ibuprofeno tiveram absorção sobreposta à do combustível e na emissão os sinais foram

mascarados, dificultando a distinção e indicando que os pontos de carbono da amoxicilina são mais adequados como marcadores ópticos, pois possuem uma assinatura espectral diferenciada e detectável no combustível.

As concentrações utilizadas para diluição dos pontos de carbono ultrapassaram o limite permitido pela Resolução ANP Nº 902, de 18/11/2022, que estabelece uma diluição máxima de $1:10^{-6}$. Para esta pesquisa, tal diluição resultaria em uma absorção e emissão muito baixa, sendo necessários novos experimentos, incluindo o aumento do tempo de síntese e controle mais rigoroso da temperatura, para otimizar a produção de pontos de carbono de amoxicilina pela rota solvotermal.

Conclui-se, portanto, que o material estudado apresenta grande potencial na nanotecnologia, destacando-se como uma molécula simples e acessível, cujo reaproveitamento para novas aplicações tecnológicas contribui para um futuro mais sustentável. Entre os desdobramentos futuros desta pesquisa, destacam-se a possibilidade de realizar um planejamento fatorial da síntese e o desenvolvimento de novas rotas sintéticas.

REFERÊNCIAS

BDOLKARIMI-MAHABADI, M.; BAYAT, A.; MOHAMMADI, A. Use of UV-Vis spectrophotometry for characterization of carbon nanostructures: a review. **Theoretical and Experimental Chemistry**, v. 57, p. 191–198, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11237-021-09687-1>. Acesso em: 23 fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP Nº 902, de 18 de novembro de 2022**. Estabelece requisitos para fornecimento de produto marcador. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 nov. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 9 mar. 2025.

ALEXANDRINO, J. S. **Correlação entre estado de dispersão, propriedades eletrocinéticas e flotabilidade de hematita**. 2013. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ANDRADE, J. de A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**, v. 35, n. 3, p. 17–43, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-46702010000300002>. Acesso em: 24 nov. 2024.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BAO, L. et al. Electrochemical Tuning of Luminescent Carbon Nanodots: From Preparation to Luminescence Mechanism. **Advanced Materials**, v. 23, n. 48, p. 5801-5806, 6 dez. 2011.

BARBOSA, A. C. E.; GABRIEL, S. C.; DORIGON, E. B. Descarte incorreto de amoxicilina e os riscos ambientais. **Seminário de Iniciação Científica e Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão (SIEPE)**, p. e31643, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/siepe/article/view/31643>. Acesso em: 24 nov. 2024.

BARICCATTI, R. A. et al. Degradação hidrolítica e fotoquímica da amoxicilina na presença de β -ciclodextrina. **Eclética Química**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 79–84, 2008.

BEBU, A. et al. IR, Raman, SERS and DFT study of amoxicillin. **Journal of Molecular Structure**, v. 993, n. 1-3, p. 52–56, maio 2011.

BEZERRA, I. M. **Estudo dos equilíbrios sólido-líquido presentes na síntese enzimática de antibióticos β -lactâmicos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

BHATTACHARJEE, S. DLS and Zeta potential – What they are and what they are not? **Journal of Controlled Release**, v. 235, p. 337-351, 2016.

BILA, D. M.; DEZOTTI, M. Fármacos no meio ambiente. **Química Nova**, v. 26, n. 4, p. 523–530, 2003.

BINNIG, G.; QUATE, C. F.; GERBER, CH. Atomic Force Microscope. **Physical Review Letters**, v. 56, n. 9, p. 930–933, 3 mar. 1986.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, ago. 2010.

CARVALHO, E. V. et al. Aspectos legais e Toxicológicos do descarte de medicamentos. **Revista Brasileira de Toxicologia**, v. 22, p. 1-8, 2009.

CHEN, Y. et al. Occurrence, distribution, and risk assessment of antibiotics in a subtropical river-reservoir system. **Water**, v. 10, p. 104–120, 2018.

COSGROVE, T. (ed.). **Colloid science**: principles, methods and applications. Oxford: Blackwell Pub, 2005.

CUI, L. et al. Carbon dots: synthesis, properties and applications. **Nanomaterials**, v. 11, n. 12, p. 3419, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano11123419>. Acesso em: 26 nov. 2024.

C2LAB. **Espectrometria de absorção atômica**: o que é e como funciona. Maio 2022. Disponível em: <https://c2lab.com.br/blog-espectrometria-de-absorcao-atmica-o-que-e-e-como-funciona/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

DIALETACHI, E. L. G. **Espalhamento dinâmico de luz em sistemas coloidais diluídos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

EUROPEAN CENTRE FOR DISEASE PREVENTION AND CONTROL. **The bacterial challenge, time to react**: a call to narrow the gap between multidrug-resistant bacteria in the EU and the development of new antibacterial agents. Stockholm: Ecdc, 2009.

FECHINE, P. B. A. (org.). **Avanços no desenvolvimento de nanomateriais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020.

FEITOSA, R. S.; SODRÉ, F. F.; MALDANER, A. O. Drogas de abuso em águas naturais e residuais urbanas: ocorrência, determinação e aplicações forenses. **Química Nova**, v. 36, n. 2, p. 291–305, 2013.

FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. do C. Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise. **Química Nova**, v. 32, n. 7, p. 1860–1870, 2009.

FERRER, N. H. C. **Pontos de carbono obtidos do bagaço de cana e sua aplicação como marcadores fluorescentes de etanol combustível**. 2022. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

FERRO, C. **Indústria farmacêutica brasileira deve crescer 30% até 2027**. 2024. Disponível em: <https://panoramafarmaceutico.com.br/industria-farmaceutica-brasileira-2/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

FILHO, H. B. et al. **Espectrofotometria no ultravioleta e visível**. São Paulo: CENA/USP, 2010. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br>. Acesso em: 27 nov. 2024.

FLORENCE, M.; SILVA, M. **Síntese de nanopartículas de silício e aplicações atuais**. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24788.82566>. Acesso em: 26 nov. 2024.

GODOY, A. A. **Avaliação ecotoxicológica dos fármacos cloridrato de propranolol e losartana potássica, em ação individual e combinada, na macrófita Lemna minor L**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, 2014.

HASSAN, H.; ALMARJEH, R. A. B.; ATASSI, Y. In-Vitro Ibuprofen Release Monitoring Using Carbon Quantum Dots. **Journal of Fluorescence**, 2 jan. 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33389412/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, v. 354, n. 6348, p. 56-58, nov. 1991.

JING, S. et al. Facile and High-Yield Synthesis of Carbon Quantum Dots from Biomass Derived Carbons at Mild Condition. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, n. 8, p. 7833–7843, 20 mar. 2019.

KWAK, J. et al. High-Power Genuine Ultraviolet Light-Emitting Diodes Based On Colloidal Nanocrystal Quantum Dots. **Nano Letters**, v. 15, n. 6, p. 3793–3799, 10 jun. 2015.

LIMA, L. C. de O.; MACHADO, W. S.; SCHIAVON, M. A. Pontos de carbono: síntese química, propriedades e aplicações – uma revisão. **Revista Virtual de Química**, 8 fev. 2023.

LIM, S. Y.; SHEN, W.; GAO, Z. Carbon quantum dots and their applications. **Chemical Society Reviews**, v. 44, n. 1, p. 362–381, 2015.

LIU, M. L. et al. Carbon dots: synthesis, formation mechanism, fluorescence origin and sensing applications. **Green Chemistry**, v. 21, n. 3, p. 449–471, 2019.

LOPES, L. T. **Propriedades fotoluminescentes de pontos quânticos de carbono sintetizados a partir de ácido cítrico e da técnica hidrotermal**. 2020. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2020.

MALVERN INSTRUMENTS LTD. **Zetasizer Nano user manual**. MAN0485 Issue 1.1. [S.l.]: Malvern Instruments Ltd., abr. 2013.

MARCIANO, B. Z. **Grafeno e nanotubos de carbono**: propriedades e aplicações. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

MEINOL, K. **Nanotubos de carbono ancorados em filmes de nanopartículas de ouro para futura utilização em sensores ópticos de fibra óptica**. 2019. Dissertação (Mestrado em Química) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

MELO, V. D. **Síntese de pontos de carbono fluorescentes derivados de medicamento amoxicilina vencida**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

MORELLI, C. L. **Processamento e estudo das propriedades de filmes e peças injetadas de nanobiocompósitos de nanocristais de celulose e matrizes biodegradáveis**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Université de Grenoble; Universidade Federal de São Carlos, 2014.

NASCIMENTO, A. S. do. **Desenvolvimento de DNAs para gasolina, diesel e etanol baseados em marcadores fluorescentes com potencial industrial**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

NASCIMENTO, S. M. S. **Síntese, caracterização e aplicações dos carbon dots autodopados com enxofre e nitrogênio**. 2022. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

OLIVEIRA, W. F. **Nanossondas baseadas em pontos quânticos e lectinas para aplicações em glicobiologia**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

OURIQUES, H. R.; RODRIGUES, D. S. N. Brasil, China e Índia nas cadeias globais de valor da indústria farmacêutica. **Tempo Social**, v. 35, n. 2, p. 177–200, 2023.
PAVIA, D. L. et al. **Introdução à Espectroscopia**. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

PEREIRA, R.; WINCKLER, S.; TEIXEIRA, M. M. **A governança dos riscos socioambientais da nanotecnologia e o marco legal de ciência, tecnologia e inovação do Brasil**. São Leopoldo: Karywa, 2017.

PERVEEN, N. Comparative Purity Study by UV Spectrophotometric and Fourier Transform Infrared Spectroscopic (FTIR) Techniques for the Simultaneous Determination of Amoxicillin Tri-hydrate Capsules. **Biomedical Journal of Scientific & Technical Research**, v. 31, n. 3, 28 out. 2020.

PINHEIRO, M. A. D. M. **Desenvolvimento de pontos de carbono a partir de fonte renovável como nanomarcador de combustível**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

PINTO, G. M. F. et al. Estudo do descarte residencial de medicamentos vencidos na região de Paulínia (SP), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 219–224, 2014.

PYRRHO, M.; SCHRAMM, F. R. A moralidade da nanotecnologia. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 11, p. 2023–2033, nov. 2012.

SANTOS JÚNIOR, W. M. **Luminescência de Carbon Dots derivados de Cloreto de Dansil: efeitos térmicos e geração de oxigênio reativo**. 2021. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.

SIDDIQI, K. S.; HUSEN, A.; RAO, R. A. K. A review on biosynthesis of silver nanoparticles and their biocidal properties. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 16, n. 14, p. 2-28, 2018.

SIDES, P. J.; PRIEVE, D. C. On the streaming potential arising from flows having axial symmetry and the determination of zeta potential therefrom. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 24, p. 91-98, 2016.

SILVA, V. W. P. da et al. Descarte de medicamentos e os impactos ambientais: uma revisão integrativa da literatura. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 28, n. 4, p. 1113–1123, 2023.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J. **Spectrometric Identification of Organic Compounds**. 8. ed. John Wiley & Sons, 2014.

SIRAJ, N. et al. Fluorescence, Phosphorescence, and Chemiluminescence. **Analytical Chemistry**, v. 88, n. 1, p. 170–202, 5 jan. 2016.

SOUZA, A. M. A. da S.; COSTA, A. da S.; SILVA, P. V. da. **Descarte de medicamentos**: farmácia comunitária na conscientização da população. 2021. Artigo (Graduação em Farmácia) – Centro Universitário Brasileiro (UNIBRA), Recife, 2021.

SOUZA, P. A. **Síntese de pontos de carbono obtidos por precursor sustentável**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

TAKESHITA, E. V. et al. Influence of solvent addition on the physicochemical properties of Brazilian gasoline. **Fuel**, v. 87, p. 2168–2177, 2008.

TANIGUCHI, N.; ARAKAWA, C.; KOBAYASHI, T. On the basic concept of nanotechnology. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING**, 1974, Tokyo. Proceedings... Tokyo: Tokyo Science University, 1974.

UNIÃO EUROPEIA. **Abordagem estratégica da União Europeia relativa aos produtos farmacêuticos no ambiente**. Bruxelas: Comissão Europeia, 11 mar. 2019. COM(2019) 128 final.

USP. **Espectrofotometria**: princípios e aplicações modernas. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.usp.br>. Acesso em: 27 nov. 2024.

VAZ, R. et al. Preparação de pontos de carbono e sua caracterização óptica: um experimento para introduzir nanociência na graduação. **Química Nova**, v. 38, n. 10, p. 1366–1373, 2015.

WANG, L. et al. Common Origin of Green Luminescence in Carbon Nanodots and Graphene Quantum Dots. **ACS Nano**, v. 8, n. 3, p. 2541–2547, 17 fev. 2014.

WU, L. et al. Low-Temperature Induced Enhancement of Photoelectric Performance in Semiconducting Nanomaterials. **Nanomaterials**, v. 11, n. 5, p. 1131, 27 abr. 2021.

XU, X. et al. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. **Journal of the American Chemical Society**, v. 126, n. 40, p. 12736–12737, 1 out. 2004.

YAO, B. et al. Carbon Dots: A Small Conundrum. **Trends in Chemistry**, v. 1, n. 2, p. 235–246, mai. 2019.

ZHANG, M. et al. Near-infrared light-mediated photodynamic/photothermal therapy nanoplatform by the assembly of Fe₃O₄ carbon dots with graphitic black phosphorus quantum dots. **International Journal of Nanomedicine**, v. 13, p. 2803–2819, mai. 2018.

ZHU, S. et al. The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): current state and future perspective. **Nano Research**, v. 8, n. 2, p. 355–381, fev. 2015.