INSTITUTO LATINO-AMERICANO
DE CIÊNCIAS DA VIDA E DA
NATUREZA (ILACVN)

QUÍMICA- LICENCIATURA

USO DE SENSORES COLORIMÉTRICOS PARA A ANÁLISE DE FERRO EM ÁGUAS DE CONSUMO NA CIDADE DE FOZ DO IGUAÇU

CAROLINE DIEL ABREU

Foz do Iguaçu
2025

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

INSTITUTO LATINO-AMERICANO
DE CIÊNCIAS DA VIDA E DA
NATUREZA (ILACVN)

QUÍMICA- LICENCIATURA

USO DE SENSORES COLORIMÉTRICOS PARA A ANÁLISE DE FERRO EM ÁGUAS DE CONSUMO NA CIDADE DE FOZ DO IGUAÇU

CAROLINE DIEL ABREU

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e Natureza (ILACVN) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciatura em Química.
Orientadora: Profª. Drª Paula Andrea Jaramillo Araujo

Foz do Iguaçu
2025

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

CAROLINE DIEL ABREU

USO DE SENSORES COLORIMÉTRICOS PARA A ANÁLISE DE FERRO EM ÁGUAS DE CONSUMO NA CIDADE DE FOZ DO IGUAÇU

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e Natureza (ILACVN) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciatura em Química.

BANCA EXAMINADORA

_____
Orientadora: Profª. Drª Paula Andrea Jaramillo Araujo
UNILA

_____
Profª. Drª Janine Padilha Botton
UNILA

_____
Profª. Drª Marciana Pierina Uliana Machado
UNILA

Foz do Iguaçu, 11 de fevereiro de 2025.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Dedico este trabalho a minha mãe Rejane e ao meu pai Valdir, que são os verdadeiros amores da minha vida.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a minha família, minha mãe Rejane Maria Marques Diel e ao meu Pai Valdir Turíbio de Abreu, que são meu porto seguro, minha razão de viver, tenho total ciência de que tudo o que sou hoje é graças ao trabalho e apoio de cada um, que nunca largaram da minha mão sempre me incentivando a ser melhor e pensar grande. E ao meu namorado Ariel Luiz Marques Leão, por sempre me apoiar e me colocar pra cima com suas palavras calmas e amorosas.

A minha orientadora Paula Andrea Jaramillo Araujo pela total atenção, empenho e paciência para comigo durante o desenvolvimento e realização desta pesquisa.

A Grazielle Setti por me incentivar a desenvolver pesquisas e me apresentar o lado da ciência em laboratório.

Aos amigos de graduação que a Unila me presenteou, Emilene de Carvalho Lourenço; Sabrina Kerkhoff; Guilherme Pavão Gomes e Jorge Luis De Oliveira Gomes. A vocês toda minha gratidão pelos momentos alegres, tornando a graduação mais leve e divertida. A Luciana Milena de Vergines, a amiga que o destino se encarregou de me trazer e me ajudar nas coletas realizadas para o presente trabalho.

Ao laboratório de ensino da Unila, em especial ao Eleandro Miguel da Silva e Paula Regina dos Santos, e ao Núcleo de Análises Físico-Químicas LTDA por me permitirem realizar em suas instalações, os ensaios necessários para o desenvolvimento desta pesquisa, a disponibilidade de ambos foi de grande importância e ajuda.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer a minha pessoa, por ser tão sonhadora e batalhar por tudo que sempre desejou e por aquilo que deseja alcançar.

A todos minha eterna gratidão!

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo da autora: Carol Diel Abreu

Curso: Química - Licenciatura

Tipo de Documento

(X) graduação (…..) artigo

(…..) especialização (X) trabalho de conclusão de curso

(…..) mestrado (…..) monografia

(…..) doutorado (…..) dissertação

(…..) tese

(…..) CD/DVD – obras audiovisuais

(…..) _____

Título do trabalho acadêmico: Uso de sensores colorimétricos para a análise de ferro em águas de consumo na cidade de Foz do Iguaçu

Nome da orientadora: Paula Andrea Jaramillo Araujo

Data da Defesa: 11/03/2025

Licença não-exclusiva de Distribuição
O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* **Licença 3.0 Unported.**

Foz do Iguaçu, ___11_ de __março__ de ____2025_____.

_____

Assinatura do Responsável

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

RESUMO

A qualidade da água para consumo é de grande importância tanto para a fauna quanto para flora do nosso planeta. Com a crescente urbanização, falta de saneamento básico e a agricultura intensiva houve um aumento na contaminação dos corpos d'água, assim muitos métodos para a análise da água são desenvolvidos para manter a qualidade para o consumo humano. Um dos contaminantes presentes na água de consumo é o ferro, sendo o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, encontrado em forma de óxido de ferro, pois oxida rapidamente em contato com oxigênio. A PORTARIA GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021, define que a quantidade máxima permitida de ferro em água de abastecimento é de 0,3 $mg.L^{-1}$, dessa forma o desenvolvimento de análises para a verificação da quantidade permitida em água de abastecimento é de suma importância. Sensores colorimétricos a base de papel é uma solução de grande eficiência para análises de água de abastecimento, por serem de baixo custo de aquisição, facilidade para transporte, armazenagem e pela baixa quantidade de reagentes necessários para seu desenvolvimento final. Desta forma, com o uso dos sensores calorímetros com sua superfície modificada com o reagente ortofenantrolina, pode-se detectar a presença de ferro em água de abastecimento na região da cidade de Foz do Iguaçu no estado do Paraná e determinar se as águas estão dentro do limite aceito pela PORTARIA GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021.

Palavras-chave: água; sensores colorimétricos; ferro; ortofenantrolina; meio ambiente.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

RESUMEN

La calidad del agua potable es de gran importancia tanto para la fauna como para la flora de nuestro planeta. Con la creciente urbanización, la falta de saneamiento básico y la agricultura intensiva, se ha producido un aumento en la contaminación de los cuerpos de agua, por lo que se han desarrollado muchos métodos de análisis del agua para mantener la calidad para el consumo humano. Uno de los contaminantes presentes en el agua potable es el hierro, que es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, que se encuentra en forma de óxido de hierro, ya que se oxida rápidamente al entrar en contacto con el oxígeno. PORTERIA GM/MS N° 888, del 4 de mayo de 2021, define que la cantidad máxima permitida de hierro en el agua de suministro es de 0,3 mg.L-1, por lo tanto es de gran importancia el desarrollo de análisis para verificar la cantidad permitida en el agua de suministro. Los sensores colorimétricos hechos de papel son una solución de alta eficiencia para analizar suministros de agua, ya que son de bajo costo de compra, fáciles de transportar, almacenar y tienen una baja cantidad de reactivos necesarios para su ejecución final. Así, con el uso de sensores calorimétricos con su superficie modificada con el reactivo ortofenantrolina, es posible detectar la presencia de hierro en los suministros de agua de la región de la ciudad de Foz do Iguazu en el estado de Paraná y determinar si las aguas están dentro del límite aceptado por la PORTERIA GM/MS N° 888, del 4 de mayo de 2021.

Palabras clave: agua; sensores colorimétricos; hierro; ortofenantrolina; medio ambiente

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

ABSTRACT

The quality of water for consumption is of great importance for both the fauna and flora of our planet. With increasing urbanization, lack of basic sanitation and intensive agriculture, there has been an increase in the contamination of water bodies, so many methods for analyzing water are developed to maintain quality for human consumption. One of the contaminants present in drinking water is iron, being the fourth most abundant element in the Earth's crust, found in the form of iron oxide, as it oxidizes quickly in contact with oxygen. ORDINANCE GM/MS No. 888, of May 4, 2021, defines that the maximum allowable amount of iron in water supply is 0.3 mg.L-1, therefore the development of analyzes to verify the amount allowed in water supply is of paramount importance. Paper-based colorimetric sensors are a highly efficient solution for water supply analysis, as they are low in acquisition cost, easy to transport and store and because of the low quantity of reagents required for their final development. In this way, using calorimeter sensors with their surface modified with the orthophenanthroline reagent, it is possible to detect the presence of iron in the water supply in the region of the city of Foz do Iguaçu in the state of Paraná and determine whether the waters are within the limit accepted by ORDINANCE GM/MS No. 888, of May 4, 2021.

Keywords: water; colorimetric sensors; iron; orthophenanthroline; environment.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Esquema ilustrativo do preparo do papel para receber a camada hidrofóbica 21

Figura 02: Papel filtro com máscara de transferência e giz de cera.....21

Figura 03: Esquema de aquecimento da barreira hidrofóbica.....22

Figura 04: Representação dos locais de adição dos reagentes e amostras no sensor colorimetrico a base de papel filtro analitico quantitativo, sendo 1 os reagentes e 2 a amostra.....25

Figura 05: Dimensões em unidade de medida milímetros do sensor colorimétrico a base de papel analítico para determinação colorimétrica de ferro em água de consumo.....27

Figura 06:a) Papel filtro com máscara de transferência de baixo tack sendo utilizada na impressora de corte b) Após o corte, retira a parte restante da máscara de transferência deixando apenas o desenho do sensor.....28

Figura 07: Representação da reação de complexação do íon ferroso com 3 moléculas de 1-10-fenantrolina formando o complexo de 3 ligantes (1-10-fenantrolina) com 1 centro metálico (Fe^{2+}) 31

Figura 08: Modo de configuração do aplicativo *PhotoMetrix Pro* para a calibração da análise de ferro em água com a utilização de sensores colorimétricos a base de papel analítico.....33

Figura 09: Imagem dos sensores a base de papel analítico com sua barreira hidrofóbica de giz de cera com a análise de ferro em água nas concentrações de 0,09 $mg.L^{-1}$; 0,1 $mg.L^{-1}$; 0,2 $mg.L^{-1}$ e 0,3 $mg.L^{-}1$.....34

Figura 10: Curva analítica de calibração obtida pelo *photometrix pro,* concentração em função da intensidade da absorbância.....35

Figura 11: Divisão da cidade de Foz do Iguaçu com seus distritos sanitários.....36

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Figura 12: Embalagem para a coleta de amostra de água.....36

Figura 13: Sensores colorimétricos analisado com as amostras coletadas na cidade de Foz do Iguaçu.....38

Figura 14: Curva analítica das concentrações em $mg.L^{-1}$ das amostras de água de consumo coletadas em Foz do Iguaçu – PR, concentração em função da intensidade da absorbância.....39

Figura 15: Espectrofotômetro Nanocolor Advance Visivel.....40

Figura 16: Tabela de concentrações medidas pelo *photometrix pro* (colunas verdes) e espectrofotômetro (colunas azuis) em relação as amostras coletadas.....41

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Distribuição da coleta das amostras de água para análise nos sensores.....37

Tabela 02: Dados obtidos das concentrações das amostras coletadas em Foz do Iguaçu por meio de dois instrumentos de validação.....40

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

µL	micro litros
µm	micro metro
ABNT NBR	Normas Técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ca^{2+}	Íon cálcio
Fe^{2+}	Ferro II
Fe^{3+}	Ferro III
g/m^2	Grama por metro quadrado
GM / MS	Gabinete do Ministro do Ministério da Saúde
HCl	Ácido clorídrico
ILACVN	Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e Natureza
$l/s.m^2$	Litro por segundo em razão do metro quadrado
$mg.L^{-1}$	Miligrama por litro
Mg^{2+}	Íon magnésio
mL	Mililitro
nm	Nanômetros
PA	Para Análise
pH	Potencial hidrogeniônico
PPM	Parte por milhão
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15
2. OBJETIVOS 19
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....19
3. METODOLOGIA.....20
3.1 PRODUÇÃO DOS SENSORES A BASE DE PAPEL FILTRO ANALÍTICO.....20
3.2 MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO PAPEL FILTRO PARA ANÁLISE COLORIMÉTRICA.....22
3.2.1 Análise De Ferro.....22
3.3 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO.....24
3.4 ANÁLISE DA ÁGUA DE CONSUMO DA CIDADE DE FOZ DO IGUAÇU.....25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....27
4.1 PRODUÇÃO DOS SENSORES A BASE DE PAPEL FILTRO ANALÍTICO.....27
4.2 MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO PAPEL FILTRO PARA ANÁLISE COLORIMÉTRICA.....29
4.3 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO.....32
4.4 DETECÇÃO DE FERRO EM ÁGUA DE CONSUMO NA CIDADE DE FOZ DO IGUAÇU.....35
5. CONCLUSÃO.....44
REFERÊNCIAS 45

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

1. Introdução

A qualidade da água é uma grande discussão na atualidade, dada a sua importância para a sobrevivência e bem-estar, tanto dos humanos, quanto para a fauna e flora do nosso planeta (Funasa, 2013). A crescente urbanização, a agricultura intensiva e as mudanças climáticas, tem levado a um aumento para os desafios ambientais de manutenção dos corpos d'água. Em meio a este cenário, a avaliação e preservação da qualidade da água, geram um trabalho para a manutenção da vida em nosso planeta (Ferreira, 2015).

De toda a água doce disponível na Terra, apenas 1% é própria para o consumo humano, porém vem sendo cada vez mais contaminada. Segundo a Secretária de Vigilância em Saúde, a qualidade da água tem sido comprometida desde os rios e lagos, devido os lançamentos de efluentes e resíduos nos corpos d'água, gerando consequentemente um aumento nas dosagens de produtos nas estações de tratamento para garantir a qualidade da água. Além disso, a decaída da qualidade ocorre também pela falta de sistema de saneamento básico em vários municípios, precárias instalações hidráulicas nos domicílios, falta de manutenção dos reservatórios e pelo manuseio inadequado da água (Fundação Nacional De Saúde, 2006).

Para garantir uma qualidade de água própria para consumo humano, deve--se seguir alguns parâmetros de análise, onde podemos destacar os parâmetros da qualidade química da água. Nesta análise, é utilizada a identificação dos componentes na água por meio de métodos laboratoriais específicos, onde localiza componentes químicos que não devem estar acima de certas concentrações determinadas pelo Ministério da Saúde (Funasa, 2018). Existem dois grupos de substâncias químicas que precisam ser analisadas com cuidado, que são as substâncias químicas inorgânicas (metais pesados) e as substâncias químicas orgânicas (solventes) pois se ultrapassados os limites das mesmas, estas podem causar sérios problemas a saúde pública (Ersoz, 2012).

Tendo em vista a água de consumo, a mesma pode apresentar vestígios do elemento ferro, um metal geralmente encontrado em águas que se infiltraram em solos e rochas, dissolvendo todos os elementos presentes nas mesmas e arrastando consigo. Dessa forma, o ferro passa a ser parte da composição da água

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

subterrânea ou água de rio, que serão captados pelas estações de tratamento ou bombas de poços artesianos para o consumo (Carmo, 2015).

Desta forma, podemos citar que o ferro é quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, ficando apenas atrás do oxigênio, silício e alumínio. É conhecido desde a antiguidade, sendo utilizado para construções de todos as áreas das engenharias, mas raramente se encontra em sua forma natural, pois ele oxida rapidamente em contato como o oxigênio do ar, formando a hematita (Fe_2O_3) e a magnetita (Fe_3O_4) que são óxidos muito estáveis e pouco solúveis. Além do mais, pode-se encontrar ferro em fragmentos dispersos no Universo, como asteróides e poeira interestelar (Espósito, 2022).

A PORTARIA GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021 define que a quantidade máxima permitida de ferro em água de abastecimento é de 0,3 $mg.L^{-1}$ (Brasil, 2021). O elemento ferro não apresenta inconvenientes à saúde nas concentrações normais aceitas, o que pode ocorrer é um processo estético de mancha de roupas ou prejudicar o uso da água em indústrias (BRASIL, 2006). Mas, o consumo de ferro em excesso, acima de 0,5 ppm, pode causar vômitos, diarreia e lesões intestinais. Caso o consumo perdure por um longo período, pode causar danos ao fígado e ao coração (Johnson, 2023).

Contudo, a busca por dispositivos de fácil acesso e manuseio para a determinação da qualidade da água de consumo, tem gerado cada vez mais pesquisas sobre o assunto. A utilização de sensores tem demonstrado grande eficiência na análise de compostos presentes em diferentes amostras como produtos industriais, água, gases atmosféricos, fluídos biológicos e o solo. (Abe, 2008). Algumas características marcantes dos sensores é serem de baixo custo de produção, possuir dimensões minimizadas, versatilidade, boa sensibilidade e confiabilidade nos resultados obtidos. (Oliveira, 2017)

O uso do papel filtro analítico quantitativo na fabricação de sensores pode ser muito vantajoso, pois apresenta um baixo custo de aquisição, facilidade de transporte e armazenagem, é encontrado em grandes quantidades, possui acessibilidade global, alta bio-degrabilidade, flexibilidade, disponível em diferentes formas e tamanhos, possui uma excelente compatibilidade com a química, podendo ser envolvido em aplicações de diferentes áreas utilizando vários métodos de detecção (Garcia, 2014). Segundo Kung e colaboradores, a utilização de sensores

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

a base de papel filtro pode ser de grande importância para a humanidade devido a sua variedade de aplicações de monitoramento e análise de compostos, como diagnóstico de doenças, segurança alimentar, monitoramento e análise de solos, ar e água (Kung *et al.*, 2019).

Métodos colorimétricos de detecção são os mais usados nos sensores de papel filtro, por permitir que sejam utilizados em ensaios clínicos de diferentes analitos simultaneamente. Segundo Silva e colaboradores, a utilização de sensores a base de papel filtro analítico quantitativo de 80mg.m^2 para a determinação de íons Ca^{2+} e Mg^{2+} e fenóis totais em água por meio da determinação colorimétrica, desempenha uma versatilidade e simplicidade operacional na análise de amostras de água de consumo, sendo uma forma viável e barata para se monitorar a qualidade da água de forma simultânea com analitos diferentes (Silva *et al.*, 2020).O método colorimétrico é baseado em uma mudança de coloração dentro das áreas de detecção dos dispositivos promovido por uma substância após a reação com o analito. Dessa forma, a área colorida pode ser capturada por um dispositivo de captação de imagens e a intensidade da cor ser relacionada com a concentração do analito (Garcia, 2017).

Segundo a ABNT NBR 13934 (Brasil, 1997) a detecção colorimétrica de ferro em água pode ser realizada com o auxílio do reagente ortofenantrolina para ferro total em água, que forma um complexo de cor vermelho alaranjada, sendo utilizado como um método sensível para a determinação do ferro em água. Seguindo o mesmo reagente, podemos citar o trabalho de Miranda, onde o mesmo realizou a detecção de ferro em águas de rio com o auxílio de um equipamento portátil, onde consistia no uso do reagente ortofenantrolina (Miranda, 2011).

O composto ortofenantrolina, conhecido também como 1-10-fenantrolina é um composto orgânico que forma um complexo estável com os íons ferro II. O Fe^{2+} e o Fe^{3+} podem estar presentes em amostras de água que contenham ferro em sua composição, desta forma, para garantir que a detecção do ferro total presente na amostra seja eficaz, é preciso reduzir toda quantidade de íons Fe^{3+} para Fe^{2+}. Está redução ocorre com o auxílio do reagente hidroxilamina, atuando como agente redutor na análise (Cruz, 2018).

Desta forma, com os íons ferro todos reduzidos a Fe^{2+}, a ortofenantrolina que é um ligante quelante, ou seja, é um ligante polidentado que se liga a um íon

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

metálico por mais de um átomo doador, forma um complexo estável e intensamente colorido de coloração vermelho alaranjada na presença de ferro na amostra. Esse complexo absorve luz na faixa do vermelho alaranjado permitindo sua quantificação espectrofotométrica em 510nm (Matias, 2019).

Um aplicativo livre para smartphone foi desenvolvido em 2017 por Helfer e colaboradores, que é denominado *PhotoMetriz PRO* (Helfer *et al*., 2017) tendo a capacidade de fotografar e analisar as imagens através de modelos matemáticos uni variados e multivariados. Este aplicativo foi utilizado em uma pesquisa para o ensino de química, onde Lourenço e colaboradores fizeram o uso do mesmo para a determinação do teor de ferro em aulas experimentais por meio da complexação com tiocianato em diferentes amostras, em especial a água de torneira. (Lourenço, 2020). Este aplicativo tem ganhado cada vez mais utilização nos meios de pesquisa e afins, devido ao seu baixo custo e fácil manuseio.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

2. OBJETIVOS

Analisar o teor de ferro em água de consumo na cidade de Foz do Iguaçu utilizando um sensor colorimétrico modificado a base de papel filtro analítico quantitativo.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adaptar as metodologias existentes na literatura para a detecção de ferro em água de consumo com o auxílio de sensores de papel modificados.
- Utilizar o aplicativo *PhotoMetrix PRO* para a análise de dados coletados com os sensores.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos citados anteriormente, o estudo foi dividido em 4 etapas, sendo elas:

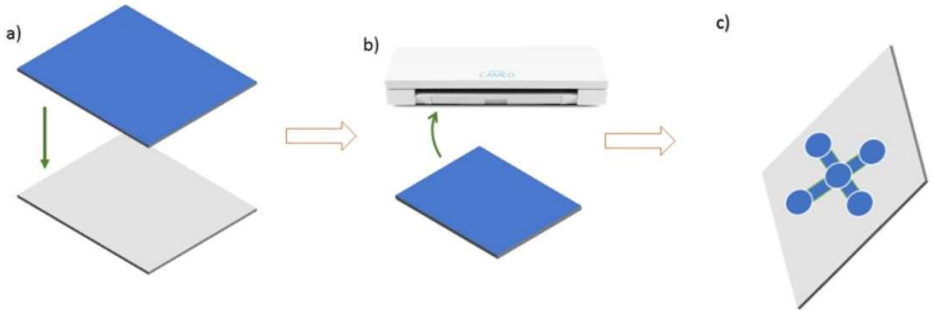
I. Produção do sensor a base de papel filtro quantitativo;
II. Modificação da superfície do papel filtro para a análise colorimétrica;
III. Construção da curva de calibração;
IV. Detecção de Ferro em água de consumo na cidade de Foz do Iguaçu.

3.1 PRODUÇÃO DOS SENSORES A BASE DE PAPEL FILTRO ANALÍTICO

Para iniciar a produção dos sensores colorimétricos, houve-se o desenvolvimento de um designer para que o sensor suprisse a necessidade da detecção, onde toda a amostra e os reagente utilizados para a análise, fossem comportados no sensor, sem ocorrer vazamentos. Este processo foi realizado pelo *software* denominado Silhouette Studio 4.1, próprio da máquina Silhouette, utilizada para a construção dos sensores. A figura 01 demonstra o esquema de recorte, sendo a etapa A, adição da máscara de transferência de baixo tack (adesivo que permite transferir recortes para superfícies sem deixar resíduos de cola, é ideal para aplicações que exigem precisão, durabilidade e estabilidade) sobre o papel filtro quantitativo de 80 g/m^2 com permeabilidade de 55l/s.m^2 e com a maioridade dos poros no diâmetro de 25 µm; na etapa B, realizado o recorte do *layout* do sensor na máscara de transferência utilizando a impressora de corte e assim obtendo o *designer* desejado, onde é possível observar a formato do sensor (etapa C), onde serão adicionados futuramente os reagentes e amostras.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Figura 01: Esquema ilustrativo do preparo do papel para receber a camada hidrofóbica



Fonte: A autora, 2025.

Após o recorte finalizado, o próximo passo é a produção da barreira hidrofóbica, que irá atuar para limitar a área de reação dos reagentes e analitos da detecção. Nessa etapa, foi utilizada giz de cera de coloração vermelho, para se obter um sensor lúdico e visualmente demonstrativo, onde o mesmo foi passado com bastante intensidade ao redor do sensor. Está etapa ocorre após a retirada da máscara de transferência de baixo tack ao redor do sensor, deixando apenas a máscara de transferência de baixo tack em cima da área de ação do sensor, como mostra a figura 02. Depositando dessa forma uma grande quantidade de parafina para criar a barreira hidrofóbica necessária.

Figura 02: Papel filtro com máscara de transferência e giz de cera

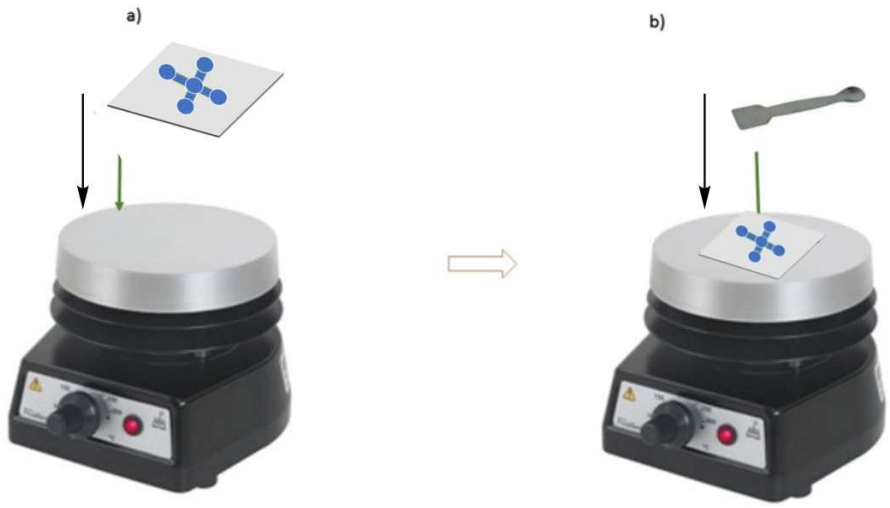
Fonte: A autora, 2025.

.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Para a parafina proveniente do giz de cera, adentrar as fibras do papel, é ncessesário um aquecimento acima de 62°C, que é o seu ponto de fusão. Com uma chapa aquecedora a uma temperatura de 80°C, adiciona-se o sensor em cima da chapa e prensiona o mesmo com o auxílio de uma espátula de laboratório, durante 5 segundos cronômetrados, conforme a Figura 03. Após o aquecimento é retirada a máscara de transfência do sensor para assim ocorrer a modificação da superfície para análise colorimétrica.

Figura 03: Esquema de aquecimento da barreira hidrofóbica



Fonte: A autora, 2025.

3.2 MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO PAPEL FILTRO PARA ANÁLISE COLORIMÉTRICA

O desenvolvimento dos sensores colorimétricos tem a etapa da modificação da superficie do papel filtro como principal fase para o bom desenvolvimento. Esta etapa tem como finalidade adicionar o reagente na superfície do papel filtro para posterior determinação de ferro em água.

3.2.1 Análise De Ferro

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Segundo a ABNT NBR 13934 (BRASIL, 1997) a detecção colorimétrica de ferro em água pode ser realizada com o auxílio do reagente ortofenantrolina para ferro total em água, formando um complexo vermelho servindo como um método sensível para a análise.

Desta forma, houve a modificação das quantidades de reagentes para se adaptar ao sensor de baixo custo e para desenvolver sensores que contenham uma toxicidade e poluição ambiental reduzidas, que estão listadas a seguir:

Material

Béquer de 100 mL; balão volumétrico de 50 mL; chapa aquecedora; pipeta volumétrica de 1 mL e 2 mL e micropipetas de graduação de 20 a 1000 µL; paple filtro analitico quantitativo de 80 g/m^2 com permeabilidade de 55l/s.m^2 e com a maioridade dos poros no diâmetro de 25µm e máscara de transferência de baixo tack.

Reagentes

Foram necessárias as seguintes soluções para esse ensaio: ácido clorídrico P.A; hidroxilamina 10%; solução tampão de acetato de amônio; solução de ortofenantrolina 10% e solução estoque de ferro 20 mg.L^{-1}, todos adquiridos comercialmente.

Procedimento

Foram preparadas soluções padrão de ferro nas concentrações de 0,05 mg.L^{-1}, 0,07 mg.L^{-1}, 0,09 mg.L^{-1}, 0,1 mg.L^{-1}, 0,2 mg.L^{-1}, 0,3 mg.L^{-1}, 0,4 mg.L^{-1} e 0,5 mg.L^{-1} com volume de 50 mL cada, partindo da solução estoque de 20 mg.L^{-1}. Na sequência foram transferidos para béqueres de 100 mL e adicionado com auxílio de um pipeta volumétrica, 2 mL de ácido clorídrico P.A e 1 mL de hidroxilamina 10%, levando a uma chapa aquecedora regulada a 300°C, deixando ebulir até se obter 20 mL da amostra. Após a ebulição, esperou-se que a amostra alcançasse à

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

temperatura ambiente.

Como o objetivo do estudo é desenvolver sensor colorimétrico a base de papel filtro quantitativo, foram adicionados 6,0 µL de tampão acetato de amônio em cada extremidade do sensor nas áreas de detecção, após a absorção do reagente ao papel, foi adicionado a mesma quantidade novamente do reagente. Na sequência foi adicionado 6,0 µL da solução fenantrolina 10%, após o reagente adentrar ao papel filtro, foi adicionado a mesma quantidade do reagente fenantrolina 10% para uma melhor absorção dos reagentes ao papel filtro nas áreas de detecção. As alíquotas dos reagentes, foram adicionadas bem no centro da área de detecção, para que assim eles pudessem adentrar e se espalhar de de forma uniforme na capilaridade do papel filtro.

Com a superfície do sensor modificada com os reagentes que formam o complexo com a amostra de ferro, pode-se adicionar 15 µL da solução de cada padrão de ferro com as concentrações conhecidas, ao centro do sensor.

Para se analisar e validar a formação do complexo de Fe^{2+} com o reagente ortofenantrolina, é necessario a espera de 30 minutos para que toda o complexo seja formado. Após esse tempo, o Fe^{2+} começa oxidar em contato com o ar, formando uma coloração marrom, caracteristico da oxidação do ferro com oxigênio.

3.3 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO

Após o preparo dos sensores com as soluções de concentrações conhecidas de Fe^{2+} e seu complexo formado com a fenantrolina, esses foram analisados para a obtenção da curva de calibração com a ajuda do *software* chamado, *photometrix PRO.*

Para o uso do *photometrix PRO,* faz-se a utilização de uma câmera de celular para a captura das colorações obtidas pela análise de cada analito. Para construir uma curva de qualidade, é necessário tomar alguns cuidados para padronizar a quantificação, como usar o mesmo ângulo de captura de imagens juntamente com a mesma iluminação para todos os sensores, criando assim a curva de calibração. Uma informação bastante relevante para a análise dos resultados, é que se deve fazer a mesma logo após o tempo de formação do complexo. Pois, a solução de ferro perde a sua coloração no sensor rapidamente,

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

devido a exposição do mesmo com a luz e o oxigênio do ar.

As imagens coletadas dos complexos nos sensores ocorreram no centro das áreas de detecção, para assegurar que a formação dos complexos tenha ocorrido de forma uniforme e para padronizar a captura das imagens, que foram coletadas no mesmo ângulo, mesma distância entre o *smartphone* e o sensor, e mesma intensidade de luminosidade.

3.4 ANÁLISE DA ÁGUA DE CONSUMO DA CIDADE DE FOZ DO IGUAÇU

Para a determinação de ferro em água de consumo da cidade de Foz do Iguaçu, foi utilizada a mesma metodologia para o preparo da curva de calibração com as soluções de concentrações de ferro conhecidas; porém utilizando as amostras coletadas; sendo o preparo das amostras, modificação da superfície do papel filtro com a adição dos reagentes de tampão acetato de amônio e fenantrolina 10% nas áreas de detecção com a alíquota de 6 µL , juntamente com a adição de 15 µL da amostra ao centro do sensor, conforme imagem 04 apresenta e identifica as áreas.

Figura 04: Representação dos locais de adição dos reagentes e amostras no sensor colorimétrico a base de papel filtro analítico quantitativo, sendo “1” os reagentes e “2” a amostra

Fonte: A autora, 2025

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Além do aplicativo *photometrix PRO,* foi realizado a análise dos sensores por meio qualitativo, utilizando como base a formação da coloração pelo complexo formado entre a reação da ortofenantrolina com o ferro presente na água de consumo coletadas investigado.

Para validar os dados obtidos pelo aplicativo e pelo método qualitativo, houve a quantificação por meio de espectrofotômetro em laboratório de apoio Núcleo de Análises Físico-Químicas LTDA. Foi realizado o mesmo procedimento de preparo da amostra por meio da acidificação com 2 mL do ácido clorídrico PA e 1 mL do agente redutor hidroxilamina na alíquota de 50 mL da amostra. Após o processo de ebulição da amostra até 20 mL e resfriamento da mesma em béqueres na chapa aquecedora a 300°C, adicionou-se o volume de 20 mL da amostra em um balão volumétrico de 50 mL, na sequência pipetou-se 10 mL do tampão acetato de amônio juntamente com 4 mL de solução fenantrolina 10% e completando o volume do balão volumétrico. Após 30 minutos de complexação dos íons ferrosos com o reagente ortofenantrolina, houve-se a leitura das amostras em uma cubeta de 10mm em um comprimento de onda de 510nm.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

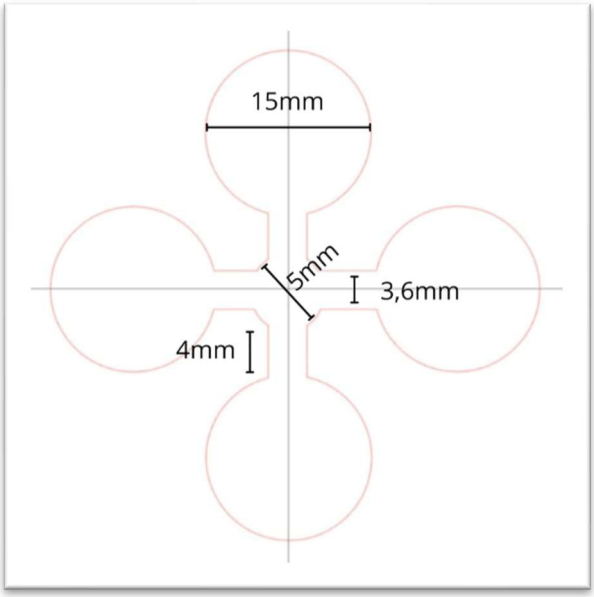
4 RESULTADOS E DISCUSÃO

4.1 PRODUÇÃO DOS SENSORES A BASE DE PAPEL FILTRO ANALÍTICO

Durante a produção do dispositivo, desenvolveu-se um *designer* que comportasse a necessidade das análises que seriam feitas. As dimensões deveriam ser minimizadas, pois o sensor é de fácil manuseio e de baixo custo de aquisição. Uma das características do sensor são suas áreas de detecção que consiste em quatro extremos, que atuam como quadruplicatas simultâneas de análises da mesma amostra. Essas dimensões devem suportar uma quantidade específica de analito, para que ocorra a coloração apenas em seu meio.

A figura 05 demonstra o *designer* obtido do sensor para a determinação de ferro em água de consumo, onde a mesma comporta as quantidades de reagentes necessários para o desenvolvimento da análise.

Figura 05: Dimensões em unidade de medida milímetros do sensor colorimétrico a base de papel analítico para determinação colorimétrica de ferro em água de consumo



Fonte: A autora, 2025.

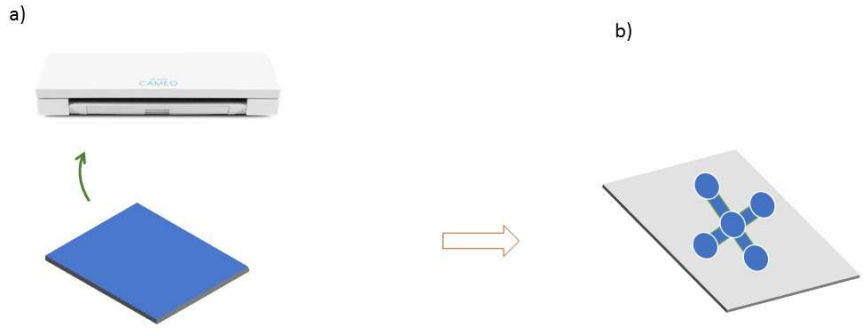
Com a definição do sensor minimizado para poder ser utilizado de forma fácil e rápida, começa o processo de preparo do papel para receber posteriormente a barreira hidrofóbica e reagentes de análises. Nessa etapa ao adicionar a máscara

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

de transferência em cima do papel filtro quantitativo, certos cuidados devem ser tomados, como a aderência por completo no papel e a máscara de transferência ser de baixo tack, ou seja, possuir uma quantidade de cola reduzida, para que esta máscara não grude com muita força ao papel analítico, podendo causar rupturas nas cerdas do papel ao ser retirada posteriormente.

Com o papel preparado, configura-se a profundidade da impressora de corte em seu *software* para que recorte apenas a máscara de transferência. Isso deve ocorrer para que posteriormente a barreira hidrofóbica, seja construída apenas na delimitação desejada e sem vazamentos por fora do papel. Em seguida, pode-se retirar a sobra da máscara de transferência, deixando apenas o desenho do sensor conforme a figura 06.

Figura 06: a) Papel filtro com máscara de transferência de baixo tack sendo utilizada na impressora de corte b) Após o corte, retira a parte restante da máscara de transferência deixando apenas o desenho do sensor



Fonte: A autora, 2025.

Com o sensor recortado, o próximo objetivo é a delimitação da área de detecção do analito no papel filtro quantitativo, sendo utilizado giz de cera. Esse material foi escolhido por possuir em sua composição a parafina, que é um composto orgânico que possui regiões estruturais hidrofílicas e hidrofóbicas que se associam espontaneamente e de forma dinâmica em soluções aquosas. Além do mais, o giz de cera é de fácil aquisição sendo encontrado em vários lugares e preços e possuir uma coloração viva que pode trazer aparência de ludicidade aos sensores.

Para que a parafina presente no giz de cera adentre as fibras do papel, é

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

preciso haver um aquecimento acima de 62°C, por ser o ponto de fusão da parafina. Durante o processo de formação da barreira hidrofóbica, utilizou-se diferentes cores do giz de cera para a sua produção, juntamente com o aquecimento em uma chapa aquecedora, porém não se obteve resultados coerentes com a utilização de cores diferentes do vermelho, as barreiras hidrofóbicas ficaram falhas e os reagentes e analitos não ficavam na área de detecção, causando distorção nos resultados. Desta forma, utilizou-se o giz de cera na coloração vermelho por melhor aderência ao papel e delimitação da barreira ser mais eficiente.

O giz de cera de coloração vermelha possui como mistura em sua fabricação, a cera de parafina e compostos químicos para adquirir a coloração vermelha. Os compostos do pigmento vermelho, podem ser naturais ou sintéticos e geralmente são feitos de minerais ou de compostos orgânicos. Os principais materiais utilizados para a pigmentação do giz de cera é os minerais hematita, cinábrio e o ocre vermelho ou os compostos orgânicos naturais provenientes da beterraba (betanina) e do tomate (licopeno) (Veloso, 2012).

4.2 MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO PAPEL FILTRO PARA A ANÁLISE COLORIMÉTRICA

Com o sensor construído, houve a modificação da superfície do mesmo para detecção de ferro em água de consumo. A metodologia usada foi com o reagente ortofenantrolina, conhecido também como 1-10-fenantrolina, que é um ligante quelante, forma um complexo polidentado que se liga a um íon metálico, que no caso do estudo é o ferro, porém o mesmo pode ser complexado com outros cátions divalentes, porém a fenantrolina tem seletividade com o Fe^{2+}, pois os íons ferrosos tem maior afinidade com os átomos de nitrogênio da fenantrolina, formando um complexo muito estável.

Desta forma, com a barreira hidrofóbica definida, adicionou-se nas áreas laterais do sensor, com a ajuda de uma micropipeta de graduação, 6,0 µL do reagente tampão acetato de amônio, tendo como função manter o pH da solução entre 3,5 a 5,5, evitando a oxidação do Fe^{2+} (íon ferroso) para Fe^{3+} (íon férrico), garantindo assim a reação completa com a ortofenantrolina.

Na sequência após a absorção do reagente ao papel, foi adicionado, com a

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

ajuda de uma micropipeta de graduação, 6,0 µL de fenantrolina 10% nas áreas laterais do sensor, adentrando ao papel.

Cada reagente adicionado a área de detecção, após adentrar ao papel filtro, foi adicionado novamente a mesma quantidade para se obter uma melhor absorção dos reagentes ao papel filtro.

Para a formação do complexo ocorrer, a amostra precisa passar por um método de redução dos seus íons para uma determinação de ferro total. Assim, a amostra passa por um processo de acidificação por meio da adição de ácido clorídrico PA, pois o mesmo melhora a eficiência da redução do Fe^{3+} para Fe^{2+}, proporcionando um meio ácido adequando para a futura ação da hidroxilamina nos sensores.

O uso da hidroxilamina é de grande importância para a análise e para a modificação da superfície do sensor. Esse reagente atua como agente redutor, reduzindo o Fe^{3+} (íon férrico) para Fe^{2+} (íon ferroso), pois para se forma o complexo com a ortofenantrolina, o ferro presente na água precisa estar como íon ferroso. A equação abaixo apresenta a redução dos íons férricos em íons ferrosos.

Equação de redução do íon férrico para íon ferroso com o agente redutor hidroxilamina (NH_2OH)

$$4Fe^{3+} + 2NH_2OH \longrightarrow 4Fe^{2+} + N_2O + 4H^+ + H_2O$$

Fonte: A autora, 2025.

Com a amostra acidificada e com o agente redutor, ocorre o processo de aquecimento até redução da amostra para 20 mL, pois padroniza a concentração final do analito e garante que o ferro esteja na forma adequada para reagir com o reagente colorimétrico resultado em uma determinação mais confiável e precisa da concentração de ferro na amostra, além de ajudar na aceleração da redução dos íons férricos para íons ferroso, auxiliar na evaporação do ácido clorídrico que venha ficar em excesso na amostra, pois pode competir com o reagente ortofenantrolina na hora de formar o complexo com os íons ferroso.

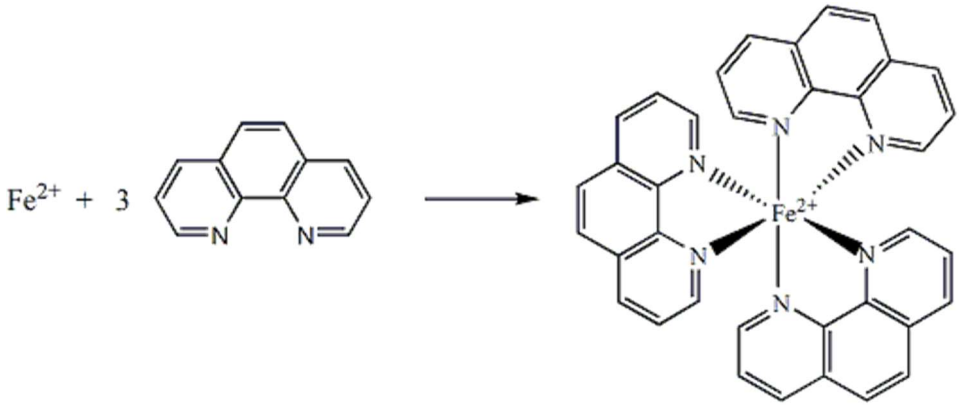
Após a amostra preparada, uma alíquota de 15 µL é adicionada ao centro do sensor, onde irá percorrer o sensor por meio da capilaridade presente no papel até chegar as áreas laterais de detecção, que contém o reagente ortofenantrolina,

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

que irá reagir com os íons ferroso presente na amostra formando o complexo ilustrado na figura 07.

Com base nas alíquotas utilizadas de cada reagente, observa-se que por serem quantidades bem reduzidas, os sensores colorimétricos a base de papel quantitativo, possuem uma característica de sustentabilidade, evitando o desperdício e a poluição do meio ambiente, diminuindo drasticamente a toxicidade em suas diferentes análises possíveis.

Figura 07: Representação da reação de complexação do íon ferroso com 3 moléculas de 1-10-fenantrolina formando o complexo de 3 ligantes (1-10-fenantrolina) com 1 centro metálico (Fe^{2+})



Fonte: A autora, 2025.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

4.3 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO

Para a validação do método utilizou-se padrões de ferro nas concentrações de 0,05 $mg.L^{-1}$; 0,07 $mg.L^{-1}$; 0,09 $mg.L^{-1}$; 0,1 $mg.L^{-1}$; 0,2 $mg.L^{-1}$; 0,3 $mg.L^{-1}$; 0,4 $mg.L^{-1}$ e 0,5 $mg.L^{-1}$, sendo os mesmos preparados a partir de um padrão de ferro comercial de 20 $mg.L^{-1}$.

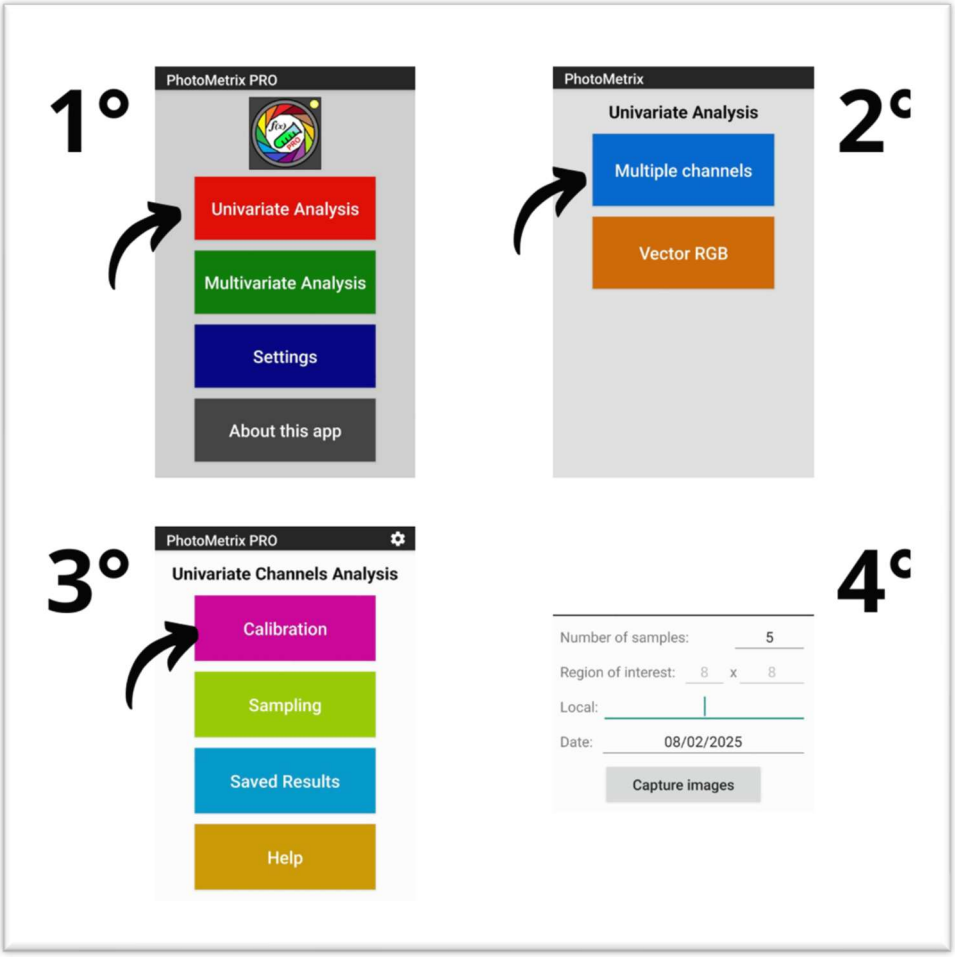
Após todo o processo de redução dos íons férrico para íons ferroso nas amostras conhecidas, e serem analisadas pelo sensor colorimétrico a base de papel, os dados foram analisados com a ajuda do aplicativo *PhotoMetrix PRO* que tem como função ser uma ferramenta de análise multivariada e de calibração uni variada.

Para a análise multivariada e calibração, os sensores seguiram padrões de comportamento para poder obter um resultado por igual, sendo eles; a utilização do mesmo tempo de secagem em cada amostra; tempo de reação da complexação e formação da coloração por 30 minutos; mesma intensidade de luz e distância entre o sensor e o *smartphone* para a captura das imagens.

Dessa forma, para se usar a calibração do aplicativo *PhotoMetrix PRO*, seguiu os seguintes comandos, disponível na figura 08, sendo a primeira etapa selecionar a opção “Univariate Analysis”, na segunda etapa selecionar “Multiple channels”, terceira etapa selecionar “Calibration” e na quarta etapa configurar os comando conforme o sensor, sendo o “number of samples” a quantidade de amostras a serem calibradas pelo aplicativo, “region of interest” já calibrado com a região a ser fotografada em 8 milímetros, “Local” é o nome do arquivo da análise e por fim selecionar “Capture imagens”, onde se inicia o processo de calibração da análise.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Figura 08: Modo de configuração do aplicativo *PhotoMetrix Pro* para a calibração da análise de ferro em água com a utilização de sensores colorimétricos a base de papel analítico



Fonte: A autora, 2025.

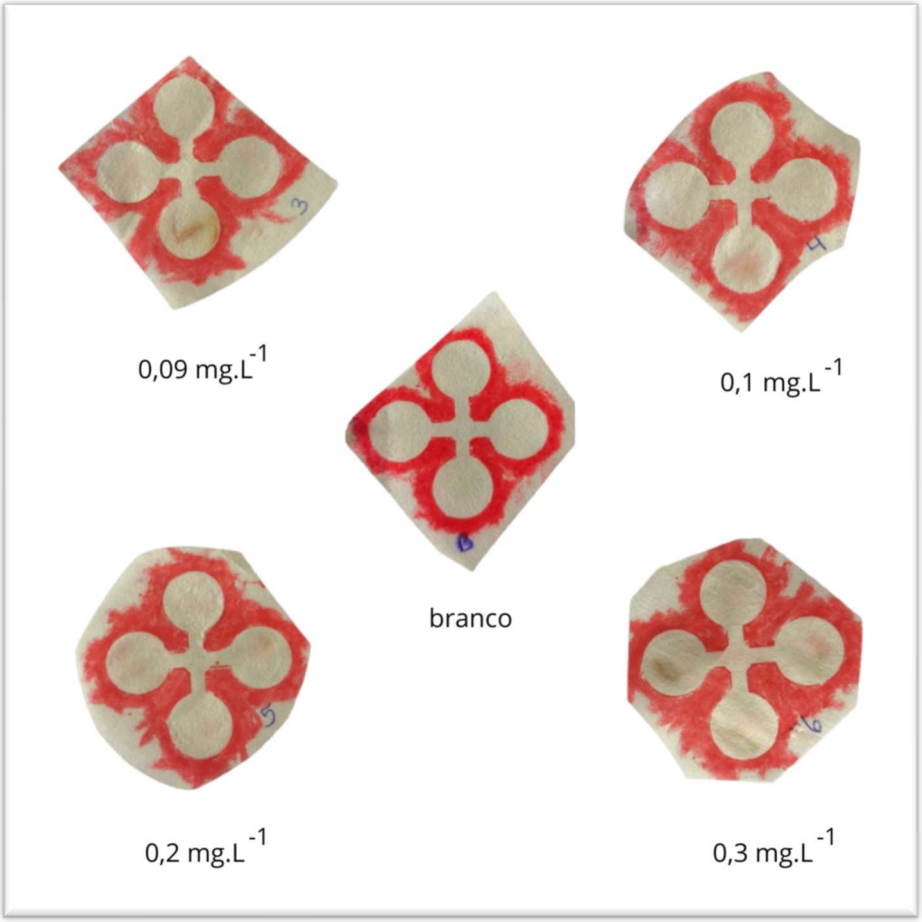
Para a calibração do aplicativo *PhotoMetrix PRO* foram utilizados os sensores das concentrações de 0,09 $mg.L^{-1}$; 0,1 $mg.L^{-1}$; 0,2 $mg.L^{-1}$ e 0,3 $mg.L^{-1}$. Essas concentrações foram escolhidas, pois são as que desenvolveram melhor o complexo da ortofenantrolina com os íons ferroso presente nas amostras, pois como o aplicativo registra imagens, as intensidades das cores formadas com os padrões de concentrações baixas não adquiriram uma coloração possível de ser captada com o *smartphone.*

A figura 09 apresenta os sensores produzidos juntamente com a análise realizada nas concentrações citadas. Podemos analisar a coloração vermelho alaranjada as áreas de detecção, característica essencial do desenvolvimento do complexo de 3 ligantes (1-10-fenantrolina) com 1 centro metálico (Fe^{2+}). Porém, alguns sensores possuem uma coloração indo para o tom marrom, devido a

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

oxidação do ferro com oxigênio do ar, porém a curva de calibração foi construída e registrada dentro do prazo de 30 minutos antes de ocorrer a oxidação do Fe^{2+} para Fe^{3+}.

Figura 09: Imagem dos sensores a base de papel analítico com sua barreira hidrofóbica de giz de cera com a análise de ferro em água nas concentrações de 0,09 $mg.L^{-1}$; 0,1 $mg.L^{-1}$; 0,2 $mg.L^{-1}$ e 0,3 $mg.L^{-1}$

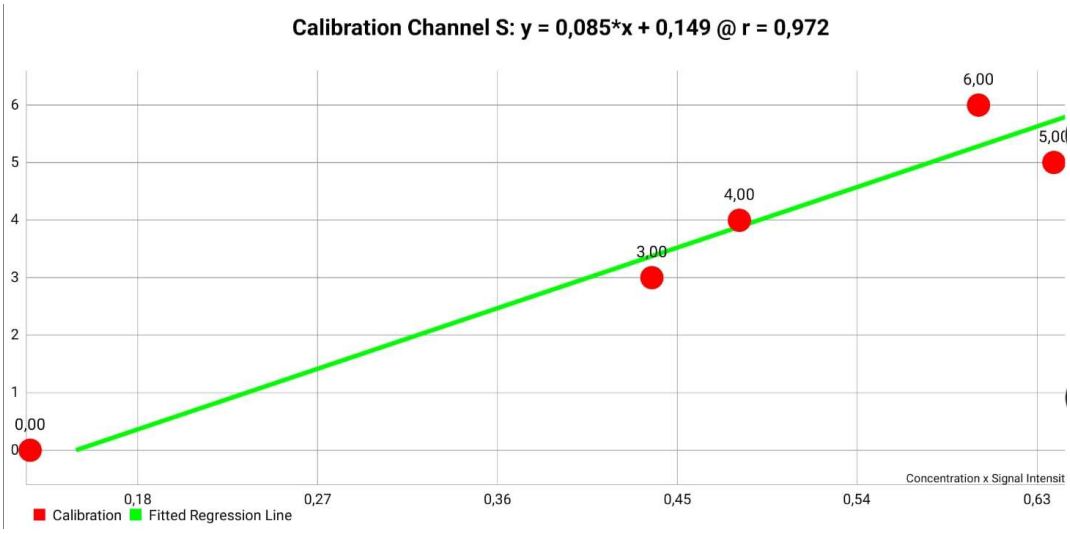


Fonte: A autora, 2025.

Seguindo todos os comandos da calibração do aplicativo, obteve-se a curva de calibração representada na figura 10, tendo como R um valor de 0,972.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Figura 10: Curva analítica de calibração obtida pelo *photometrix pro,* concentração em função da intensidade da absorbância



Fonte: A autora, 2025.

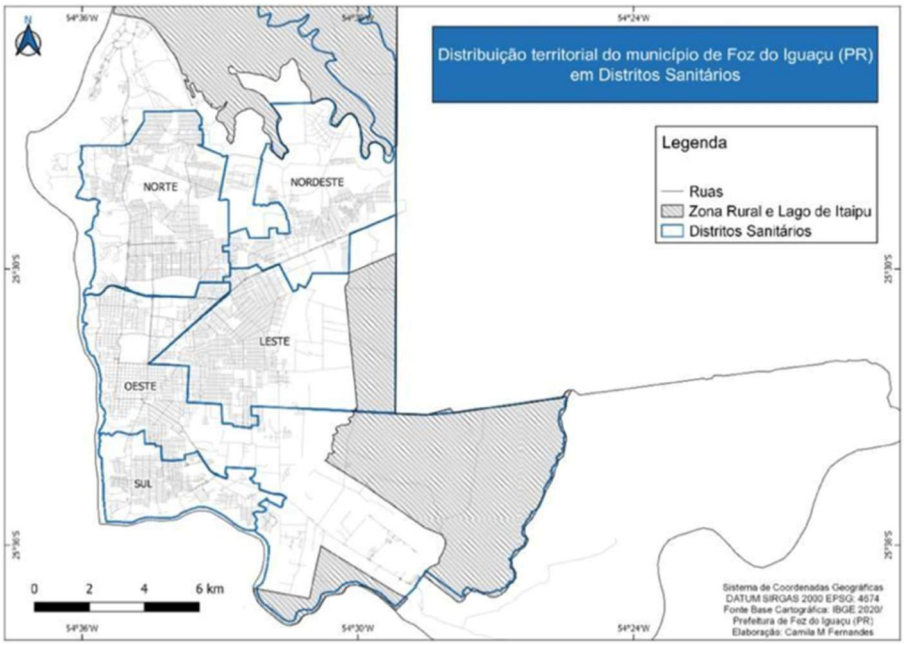
4.4 DETECÇÃO DE FERRO EM ÁGUA DE CONSUMO NA CIDADE DE FOZ DO IGUAÇU

A cidade de Foz do Iguaçu, localizada ao oeste do estado do Paraná, possui uma área territorial de 614,407 km^2, dos quais 61,200 km^2 estão em perímetro urbano. Sua população é de 285.415 habitantes conforme o censo de 2022 realizado.

Para a análise das águas de consumo em Foz do Iguaçu, a cidade foi dividida em 5 distritos sanitários, norte sul, leste, oeste e nordeste, conforme a figura 11 (Fernandes, 2020). Assim, houve a coleta das amostras de água de consumo diretamente das torneiras das residências, sendo utilizado luvas para o manuseio e um frasco de polietileno para a armazenagem da amostra. Para reduzir qualquer meio de interferência, a coleta das amostras seguiu a norma da ABNT NBR 9898 (Brasil, 1987) que determina o prazo máximo de ensaio das amostras coletas até 180 dias com adição de 2mL ácido clorídrico concentrado a cada 100mL de amostra, onde o frasco deve ser completado por inteiro sem deixar bolhas de ar.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Figura 11: Divisão da cidade de Foz do Iguaçu com seus distritos sanitários



Fonte: Fernandes, 2020

Cada amostra coleta, foi etiquetada com a numeração da ordem de coleta e a fonte da água, conforme a figura 12. A numeração das amostras e origem de coleta está disponível na tabela 01.

Figura 12: Embalagem para a coleta de amostra de água

Fonte: A autora, 2025.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Tabela 01: Distribuição da coleta das amostras de água para análise nos sensores

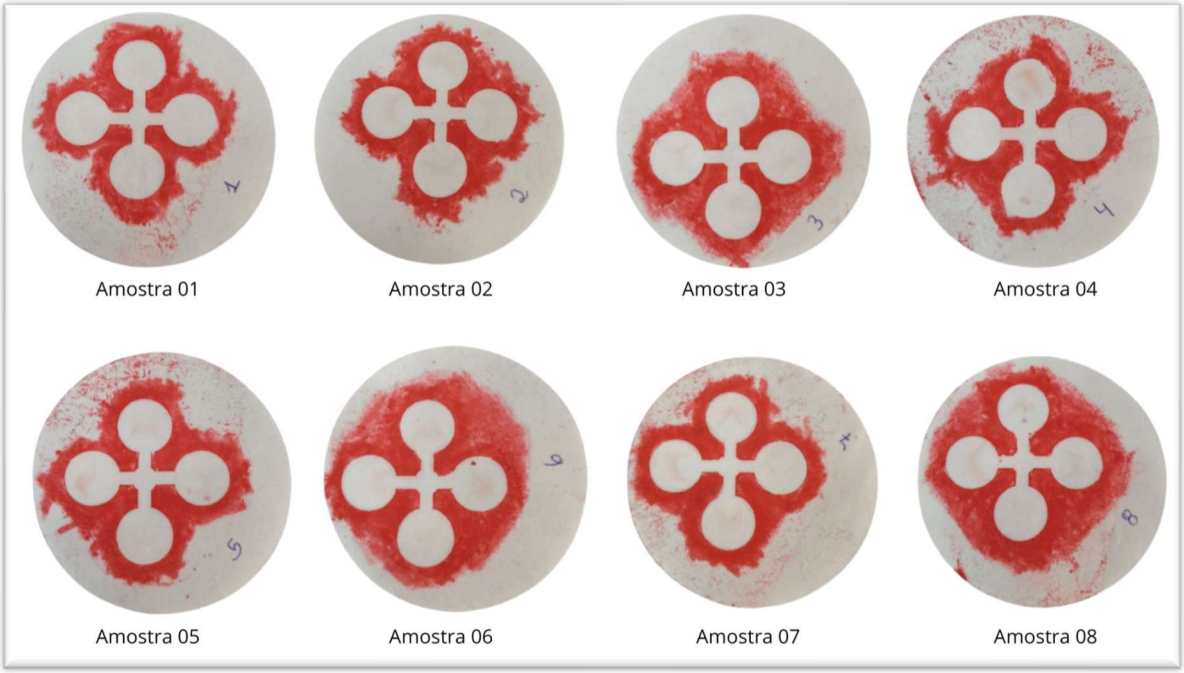
AMOSTRA	ORIGEM	LOCALIDADE/ REGIÃO
AMOSTRA 01	Água de abastecimento - Poço	Norte
AMOSTRA 02	Água de abastecimento – Torneira residencial	Norte
AMOSTRA 03	Água de abastecimento – Torneira Residencial	Nordeste
AMOSTRA 04	Água de abastecimento – Torneira Residencial	Sul
AMOSTRA 05	Água de abastecimento – Torneira Residencial	Leste
AMOSTRA 06	Água de abastecimento – Torneira Residencial	Oeste
AMOSTRA 07	Água de abastecimento – Torneira Residencial	Sul
AMOSTRA 08	Água de abastecimento – Caixa d'água	Nordeste

Fonte: A autora, 2025.

O procedimento de análise das amostras seguiu a metodologia do reagente ortofenantrolina, sendo acidificação, redução e complexação da amostra. A figura 13 apresenta os sensores com seus complexos colorimétricos formados na presença de ferro com a fenantrolina nas amostras coletadas na cidade de Foz do Iguaçu, onde as imagens foram coletadas com o aplicativo *Photometrix PRO* após 30 minutos da adição da amostra ao centro do sensor.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Figura 13: Sensores colorimétricos analisado com as amostras coletadas na cidade de Foz do Iguaçu



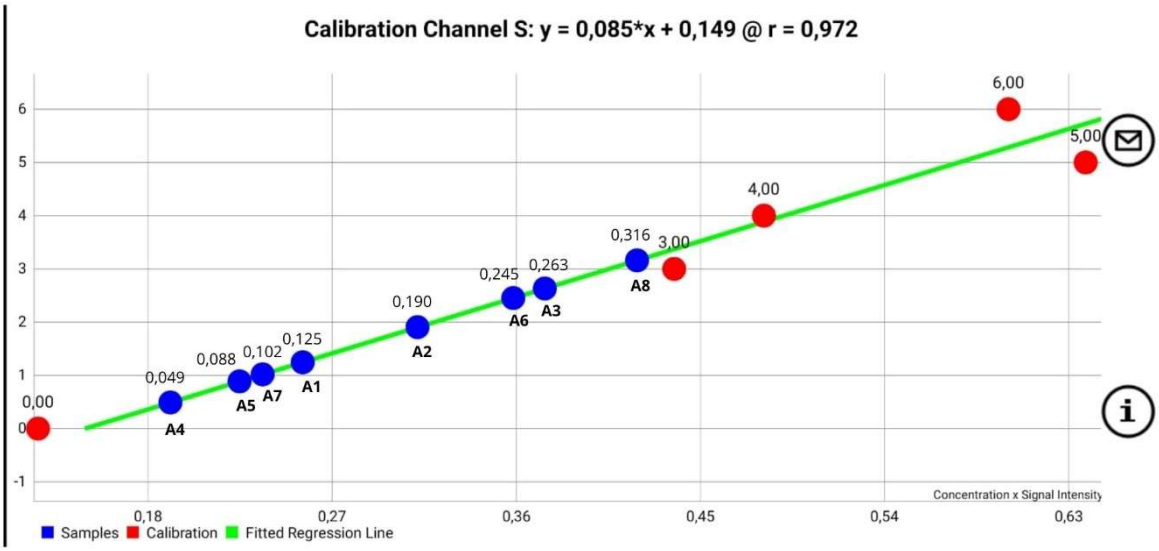
Fonte: A autora, 2025.

Do modo qualitativo, observa-se a formação de coloração vermelho alaranjado nas áreas de detecção do sensor, uma característica marcante da reação entre o íon ferroso presente na água com a fenantrolina que juntos formam um complexo com 3 moléculas 1-10-fenantrolina com 1 centro metálico de Fe^{2+}. As intensidades das cores mudaram conforme a amostra, demonstrando as diferentes concentrações de ferro presentes nas águas de consumo coletadas na cidade de Foz do Iguaçu.

Para quantificar a análise realizada, fez-se o uso do aplicativo *photometrix PRO*, utilizando a curva de calibração feita com os padrões de ferro já conhecidos (figura 10), a figura 14 apresenta as concentrações em $mg.L^{-1}$ de cada amostra coletada determinadas pelo aplicativo com base na tonalidade de cada complexo formado nos sensores, as amostras foram nomeadas no aplicativo como A1 para amostra 01, A2 para amostra 02 e assim sucessivamente.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Figura 14: Curva analítica das concentrações em mg.L^{-1} das amostras de água de consumo coletadas em Foz do Iguaçu – PR, concentração em função da intensidade da absorbância



Fonte: A autora, 2025.

Para confirmar os dados obtidos pelo aplicativo *photometrix pro*, realizou-se o ensaio das amostras para determinação de ferro no laboratório de análises físico-químicas Nucleotec, localizado em Foz do Iguaçu. Os ensaios foram rodados pela própria autora com a mesma metodologia da ortofenantrolina, as concentrações foram obtidas em mg.L^{-1} pelo espectrofotômetro da marca NANOCOLOR ADVANCE VISIVEL (figura 15). Dessa forma, pode-se comparar as concentrações adquiridas pelo aplicativo com o uso dos sensores e pelas concentrações adquiridas pelo ensaio em espectrofotômetro na banda de 510 nm, os dados estão presentes na tabela 02.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Figura 15: Espectrofotômetro NANOCOLOR ADVANCE VISIVEL

Fonte: A autora, 2025.

Tabela 02: Dados obtidos das concentrações das amostras coletadas em Foz do Iguaçu por meio do aplicativo *Photometrix PRO* e do espectrofotômetro NANOCOLOR ADVANCE VISIVEL

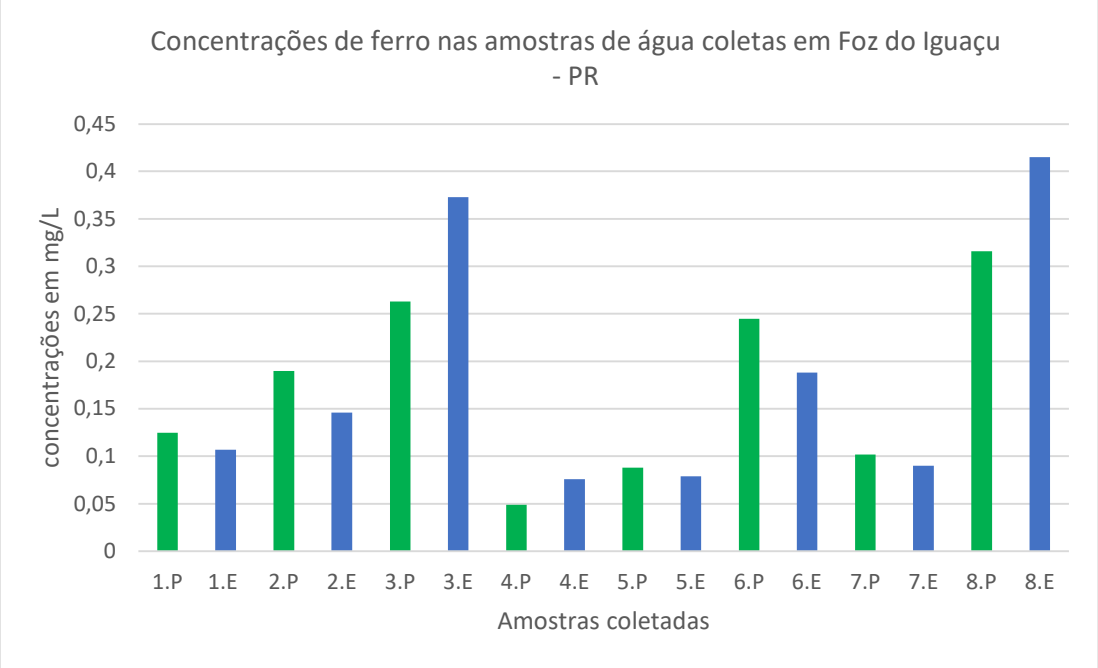
AMOSTRA	CONCENTRAÇÃO MEDIDA PELO APLICATIVO	CONCENTRAÇÃO MEDIDA USANDO ESPECTROFOTÔMETRO
AMOSTRA 01	0,125 $mg.L^{-1}$	0,107 $mg.L^{-1}$
AMOSTRA 02	0,190 $mg.L^{-1}$	0,146 $mg.L^{-1}$
AMOSTRA 03	0,263 $mg.L^{-1}$	0,373 $mg.L^{-1}$
AMOSTRA 04	0,049 $mg.L^{-1}$	0,076 $mg.L^{-1}$
AMOSTRA 05	0,088 $mg.L^{-1}$	0,079 $mg.L^{-1}$
AMOSTRA 06	0,245 $mg.L^{-1}$	0,188 $mg.L^{-1}$
AMOSTRA 07	0,102 $mg.L^{-1}$	0,090 $mg.L^{-1}$
AMOSTRA 08	0,316 $mg.L^{-1}$	0,415 $mg.L^{-1}$

Fonte: A autora, 2025.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Os dados coletados foram adicionados em um gráfico, onde estão relacionados a suas concentrações medidas pelo aplicativo *photometrix PRO* (colunas verdes) e pelo espectrofotômetro (colunas azuis) em relação as amostras coletadas e enumeradas por cada distrito sanitário de Foz do Iguaçu – PR. Como as amostras foram analisadas tanto pelo aplicativo quanto pelo espectrofotômetro, foram diferenciadas no gráfico, seguindo a sua numeração de coleta com a letra P para amostras lidas pelo *photometrix PRO* e E para amostras lidas pelo espectrofotômetro.

Figura 16: Tabela de concentrações medidas pelo *photometrix pro* (colunas verdes) e espectrofotômetro (colunas azuis) em relação as amostras coletadas.



Fonte: A autora, 2025.

Ao avaliar os dados, pode-se observar que em algumas amostras, os valores obtidos pelo espectrofotômetro são superiores aos do aplicativo, como em 3.E (amostra 3 medida pelo espectrofotômetro) e 8.E (amostra 8 medida pelo espectrofotômetro), onde as concentrações de ferro ultrapassaram 0,35 $mg.L^{-1}$. Em outras amostras, como 6.P (amostra 6 medida pelo *photometrix PRO*), o aplicativo apresentou um valor mais alto em relação ao espectrofotômetro. Algumas amostras apresentam valores próximos entre os dois métodos, sugerindo boa correlação entre eles.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

Analisando as concentrações obtidas e a PORTARIA GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021, comparou-se que a maioria da região de Foz do Iguaçu - PR está dentro dos parâmetros permitidos, apenas a região nordeste apresenta ferro em excesso em suas água de consumo, sendo 0,373 $mg.L^{-1}$ para a amostra 03 e 0,415 $mg.L^{-1}$ para a amostra 08, podendo ser uma consequência da contaminação dos encanamentos antigos da região, gerando assim a necessidade de tratamento da água para o consumo. A região sul apresenta a menor quantidade de ferro presente na água de consumo, registrando uma concentração de 0,076 $mg.L^{-1}$ medido pelo espectrofotômetro.

De tal modo, observou-se que o aplicativo *photometrix PRO* consegue detectar e quantificar as concentrações das amostras analisadas e desenvolvidas com a metodologia da ortofenantrolina, sendo uma alternativa viável para a detecção de ferro na água. Porém, pode ocorrer alguns desvios nos valores medidos, devido as amostras possuírem uma baixa concentração de ferro, gerando uma coloração do seu complexo com a fenantrolina de baixa intensidade, dificultando a atuação do aplicativo, com base na captura de imagens, ou até mesmo a iluminação do local. As diferenças nas leituras podem estar associadas à precisão de cada método e as às condições das amostras analisadas.

Assim, o uso dos sensores colorimétricos para detecção de ferro em água de consumo, pode ser utilizado em sala de aula, sendo uma experimentação voltada para a visualização dos alunos para a formação de complexos em água presente em suas casas ou escola, trazendo dessa forma a realidade dos alunos para dentro da sala de aula de forma contextualizada e conscientizando os alunos do cuidado com água em rios, córregos e afins.

Além do mais, com o uso dos sensores para a identificação de ferro em água, a quantidade de reagentes e analitos utilizadas comparadas ao método tradicional de espectrofotômetro é de sustentabilidade e responsabilidade ambiental, pois os sensores utilizam quantidades de 6 µL de reagentes e 15 µL de amostras, já as análises por meio de espectrofotômetro, utiliza-se quantidades de 10 mL de reagentes e 20 mL de amostras. Com os sensores, o descarte de reagentes e amostras reduz em mais de 100% comparado ao método do espectrofotômetro, diminuindo assim a toxicidade gerada e desperdício dos reagentes e a contaminação de solos e corpos d’água no meio ambiente, sendo uma via muito

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

viável para as análises de compostos presentes em água de consumo, em especial o ferro.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

5 CONCLUSÃO

As amostras coletadas na região de Foz do Iguaçu, que foram divididas em 5 regiões sanitárias (sul, norte, leste, oeste e nordeste) conseguiram ser analisadas pelos sensores colorimétricos a base de papel quantitativo, com a sua superfície modificada com o reagente ortofenantrolina. O analito apresentou coloração vermelho alaranjada característica do complexo formado com o íon ferroso (Fe^{2+}) com 3 moléculas de fenantrolina. A quantificação com o aplicativo *photometrix PRO* apresentou alguns desafios a serem superados, porém o aplicativo apresenta uma boa correlação entre os dados comparados com o espectrofotômetro, sendo uma forma viável e de fácil acesso para análise de água de consumo humano. De forma qualitativa, o uso de sensores colorimétricos a base de papel quantitativo é possível dizer a presença ou ausência de íons ferroso em água de consumo, com base no desenvolvimento da cor nas áreas de detecção. Um ponto muito importante presente no uso de sensores colorimétricos é a quantidade mínima necessária de uso dos reagentes para a análise, uma característica sustentável, reduzindo o desperdício e minimizando a poluição ambiental, além de diminuir significativamente a toxicidade ambiental dos reagentes.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

REFERÊNCIAS

ABE. K, et al. Citterio, Inkjet-printed microfluidic multianalyte chemical sensing paper, Analytical Chemistry 80 (2008) 6928-6934.

BALMANN, L *et al*. Uso do aplicativo PhotoMetrix no monitoramento da concentração de flúor em sistemas alternativos de abastaecimento de água: Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2019.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. Manual prático de análise de água. 2a ed. rev. -Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006. 146 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano/ Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. – Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano/ Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. – Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

BRASIL. Normas nº NBR 9898, de junho de 1987. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores, RIO DE JANEIRO - RJ, 1987.

BRASIL. Normas nº NBR 13934, de 4 de agosto de 1997. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Água- Determinação de ferro - Método colorimétrico da ortifenantrolina: seção 1, RIO DE JANEIRO - RJ, 4 ago. 1997.

BRASIL. Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021. Ministério da Saúde. PORTARIA GM/MS: seção 1, Brasília, DF, 4 maio 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 25 fev. 2024.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

BRASIL. Qualidade da água para consumo humano: cartilha para promoção e proteção da saúde- Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Vigilância em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador. – Brasília: Ministério da Saúde, 2018.

CARMO, J. C. C *et al*. A Presença De Ferro Na Água Subterrânea Do Estado Da Bahia. Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia - CERB, [*S. l.*], p. 1-15, 19 fev. 2015.

CATALÃO, K. A. Desenvolvimento de um dispositivo microfluídico em papel para a quantificação de ferro salivar. 2019. Tese de mestrado (engenharia biomédica) - escola superior de biotecnologia – universidade católica portuguesa, [*s. L.*], 2019. Disponível em: https://repositorio.ucp.pt/bitstream/10400.14/31497/1/tese%20de%20mestrado%20-%20karina%20acciainoli.pdf. Acesso em: 24 mar. 2024.

CORRÊA, B. O *et al*. Avaliação do uso do aplicativo PhotoMetriz Pro® na identificação de amostras de uísques falsificados. XXXII CIC Congresso de Iniciação Científica, Pelotas - RS, p. 1-6, 15 jun. 2023

CRUZ, Y. F. S; TÔRRES, A.R. Determinação Espectrofotométrica De Ferro Em Águas De Poços Residenciais De Alguns Municípios Da Região Metropolitana Do Recife. 2018. Tese de Conclusão de Curso (Farmácia) - Faculdade Pernambucana de Saúde, [*S. l.*], 2018.

DUNGCHAI, W *et al*. A low-cost, simple, and rapid fabrication method for paper-based microfluidics using wax screen-printing. Analyst, [*s. l.*], 5 dez. 2012.

ERSOZ, Mustafa *et al*. Best Practice Guide on Metals Removal fron Drinking Water by Treatment. Metals and Related Substances in drinking Water Series, [*s. l.*], 2012.
ESPÓSITO, B. P. Da Morte das Estrelas à Vida como a conhecemos. Sistema CFQ/CRQs: Elementos Químicos - Ferro, [*s. l.*], 24 maio 2022. Disponível em:

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

https://crqsp.org.br/elementos-quimicos-ferro/. Acesso em: 2 fev. 2025.

FERNANDES, C. M. Perfil epidemiológico e distribuição espacial da gravidez na adolescência no município de Foz do Iguaçu (PR) no período de 2013 a 2019. Monografia (Graduação em Saúde Coletiva) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana – Foz do Iguaçu, PR, 2020

FERREIRA S.C, YASMIN *ET AL*. Determinação espectrofotométrica de ferro em águas de poços residenciais de alguns municípios da região metropolitana do recife. Faculdade pernambucana de saúde, recife, 2015.

FERREIRA, P.S. Detecção Colorimétrica de Antocianinas em dispositivo microfluídico a base de papel. Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2016.

FONSECA. W.T. et al. Fast and flexible strategy to produce elestrochemical paper-based analytical devices using a craft cutter printer to create wax barrier and screen-printed electrodes, Talanta – São Paulo, 2019. 480-489 p.

FUNASA, FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. Manual Prático de Análise de Água. Engenharia de Saúde Pública, [*s. l.*], p. 54-59, 2006.

FUNASA, FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. Manual Prático de Análise de Água. Engenharia de Saúde Pública, [*s. l.*], ed. 4° EDIÇÃO, p. 54-59, 2013.

GARCIA, P.T. Desenvolvimento de dispositivos microfluídicos de papel com superfície quimicamente modificada para ensaios clínicos utilizando detecção colorimétrica, Instituto de Química, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014, p. 90.

GARCIA, P.T. Desenvolvimento de sensores colorimétricos e eletroquímicos para aplicações clínicas e forenses. Instituto de Química, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

HELFER, G. A.; MAGNUS, V, S.; BÖCK, F. C.; TEICHMANN, A.; FERRÃO, M, F.; COSTA, A, B. PhotoMetrix: An Application for Univariate Calibration and Principal Components Analysis Using Colorimetry on Mobile Devices. Journal of the Brazilian Chemical Society 2017, 28, 328

JOHNSON, L. E. Excesso de Ferro. Manual MSD: Versão Saúde para a Família, [*s. l.*], 3 jul. 2023. Disponível em: https://www.msdmanuals.com/pt/casa/dist%C3%BArbios-nutricionais/minerais/excesso-de-ferro. Acesso em: 2 fev. 2025.

KUNG, C. *et al*. Microfluidic paper-based analytical devices for environmental analysis of soil, air, ecology and river water. Sensors and Actuators B: Chemical, Taiwan, p. 1-20, 2019.

LI, L. *et al*. Detection of Fe3+ and Al3+ by test paper. Chemical Education, China, 2012. Disponível em: pubs.acs.org/jchemeduc. Acesso em: 27 fev. 2024.

LOURENÇO, E.C *et al*. Determinação do Teor de Ferro Utilizando o Aplicativo PhotoMetrix Pro: a tecnologia a favor do Ensino de Química. Revista Virtual de Química, [*S. l.*], p. 1-15, 20 nov. 2020.

MATIAS, W. G. Determinação Do Ferro Total. 2019. Apostila (Engenharia Sanitária E Ambiental) - Universidade Federal De Santa Catarina Centro Tecnológico, Santa Catarina, 2019.

MIRANDA, J.C. Desenvolvimento de um equipamento portátil e de sistema de análises em fluxo empregando multicomutação. Determinação fotométrica de ferro em águas de rios. Dissertação, Piracicaba, p. 33-40, 2011.

Oliveira. R.A.G. et al. A simple method to produce 2D and 3D microfluidic paper-based analytical devices for clinical analysis, Analytica Chimica Acta 957 (2017) 40-46.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57

PELTON, R. Bioactive paper provides a low-cost platform for diagnostics. Trac-Trends in Analytical Chemistry, v. 28, p. 925-942, 2009.

SANEPAR, Companhia de Saneamento do Paraná *et al*. Relatório anual da qualidade da água 2022 sistema de abastecimento de foz do Iguaçu. Sanepar, Foz do Iguaçu, 2022.

SILVA, V. A. O. P. *et al*. Microfluidic paper-based device integrated with smartphone for point-os-use colorimetric monitoring of water quality index. Elsevier, Goiânia-GO, p. 1-10, 17 mar. 2025.

SRINIVASAN, P T. Aluminium in drinking water: An overview. Faculty of Engenineering, University of Regina, Canadá, p. 1-10, 1 jan. 1999.

TAVARES, M. J. F *et al*. Green Chemistry in Papers Published into Química Nova na Escola: 2011- 2021. Brazilian Journal of Development, [*S. l.*], p. 1-17, 14 fev. 2022. DOI 10.34117/bjdv8n2-189. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/44032/pdf. Acesso em: 24 mar. 2024.

VELOSO, L. A. Corantes e Pigmentos: Dossiê Técnico. Instituto de Tecnologia do Paraná, Curitiba- PR, p. 1-40, 2012.

VENTAPANE, A. L. S.; SANTOS, P. M. L. Aplicação de princípios de Química Verde em experimentos didáticos: um reagente de baixo custo e ambientalmente seguro para detecção de íons ferro em água: Experimentação no Ensino de Química. Química Nova na Escola, São Paulo - SP, v. 43, n. 2, p. 1-5, 24 maio 2021.

Versão Final Homologada
20/03/2025 10:57