



Produção de carvão ativado a partir de resíduos de poda urbana de *Cojoba arborea* e *Mangifera indica* e aplicação na remoção de fármacos em meio aquoso

Production of activated carbon from urban pruning residues of *Cojoba arborea* and *Mangifera indica* and its application in the removal of pharmaceuticals from aqueous media

F. S. Davies¹; L. P. Lucas²; E. S. Heilmann²; R. M. Giona^{1,2}; I. L. Costa Junior^{1*}

¹Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PPGTAMB-MD)/Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 85884-000, Medianeira-Paraná, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ-CT)/Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 81280-340, Curitiba-Paraná, Brasil

*ismael@utfpr.edu.br

(Recebido em 25 de julho de 2025; aceito em 24 de outubro de 2025)

A produção de carvão ativado (CA) a partir de podas de árvores urbanas representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos. Neste estudo, utilizaram-se resíduos de *Mangifera indica* (mangueira) e *Cojoba arborea* (brinco-de-índio), com ativação química utilizando cloreto de zinco ($ZnCl_2$). Os resíduos foram secos ao ar ($25 \pm 5^\circ C$) por 30 dias, triturados e submetidos à carbonização em forno mufla a $310^\circ C$ por 1 hora. A ativação foi otimizada por Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), variando-se a temperatura de pirólise e a razão $ZnCl_2$ /carvão vegetal ($ZnCl_2/CV$), sendo a resposta a quantidade de grupos ácidos ($mEq g^{-1}$). As condições ideais foram $331^\circ C$ e razão 2,4 para o CA de mangueira (MG-T1) e $239^\circ C$ e razão 2,7 para o CA de brinco-de-índio (BI-T2). Após a otimização, realizaram-se testes de adsorção com seis fármacos (tetraciclina, cloranfenicol, sulfaclorpiridazina (SCP), sulfametoxazol, metformina, ciprofloxacina) em meio aquoso nos pH 2,5, 5,5 e 8,5. Os carvões ativados foram caracterizados quanto ao ponto de carga zero (pH_{ZPC}), morfologia (MEV) e estrutura (DRX), apresentando porosidade e composição adequadas à adsorção. O melhor desempenho foi observado para o CA BI-T2, com remoção de 82,6% da SCP em pH 5,5. Os resultados indicam que os CA produzidos possuem potencial para aplicação em tratamentos de águas contaminadas com fármacos.

Palavras-chave: carvão ativado, adsorção de fármacos, biomassa.

The production of activated carbon (AC) from urban tree pruning waste represents a sustainable alternative for the valorization of lignocellulosic residues. In this study, residues from *Mangifera indica* (mango) and *Cojoba arborea* (indian-earring-tree) were used, with chemical activation employing zinc chloride ($ZnCl_2$). The residues were air-dried ($25 \pm 5^\circ C$) for 30 days, ground, and subjected to carbonization in a muffle furnace at $310^\circ C$ for 1 hour. Activation was optimized using a Central Composite Rotational Design (CCRD), varying pyrolysis temperature and $ZnCl_2$ to charcoal ratio ($ZnCl_2/char$), with the response variable being the amount of acidic functional groups ($mEq g^{-1}$). The optimal conditions were $331^\circ C$ and a ratio of 2.4 for mango-derived AC (MG-T1), and $239^\circ C$ and a ratio of 2.7 for indian-earring-tree-derived AC (BI-T2). After optimization, adsorption tests were performed with six pharmaceuticals (tetracycline, chloramphenicol, sulfaclopyridazine (SCP), metformin, ciprofloxacin) in aqueous media at pH 2.5, 5.5, and 8.5. The activated carbons were characterized for point of zero charge (pH_{ZPC}), morphology (SEM), and structure (XRD), showing porosity and composition suitable for adsorption. The best performance was observed for BI-T2, which achieved 82.6% removal of SCP at pH 5.5. The results indicate that the produced ACs have potential for application in the treatment of pharmaceutical-contaminated water.

Keywords: activated carbon, pharmaceutical adsorption, biomass waste.

1. INTRODUÇÃO

A produção e aplicação de CA a partir de resíduos para a adsorção de poluentes mostra-se relevante devido à sua eficiência, baixo custo e natureza sustentável [1]. A alta capacidade de adsorção dos CA torna-os materiais promissores na remoção de contaminantes em meio aquoso [2]. Dentre os resíduos que podem ser utilizados para a produção de CA estão as podas de árvores (RPA), que representam uma biomassa abundante e de baixo custo, com grande potencial para a

obtenção de diferentes carvões [3, 4]. A geração em larga escala dos RPA é observada em diversas atividades urbanas e rurais, como a manutenção de pomares, olivais, áreas florestais e podas de árvores urbanas de ruas e praças [5].

A composição dos RPA é rica em celulose, hemicelulose e lignina. Essa característica faz com que esses materiais se tornem adequados para a produção de CA por meio de processos de pirólise ou carbonização [4]. A alta concentração de carbono nos RPA é uma característica fundamental para a obtenção de um CA com alta capacidade de adsorção [6]. Assim, diversos estudos têm utilizado diferentes tipos de RPA para a produção de CA, incluindo podas de árvores frutíferas, oliveiras, cerejeiras e ramos de chá [4, 6, 7].

Ao utilizar RPA para a produção de CA realiza-se a valorização desses resíduos, o que se considera como vantagem ambiental e uma alternativa sustentável em substituição ao descarte inadequado como a queima a céu aberto [5, 8]. Por ser um precursor de baixo custo, o preparo do CA torna-se mais econômico. Além disso, é possível aplicar o CA produzido a partir de RPA para a adsorção de poluentes diversos e dessa forma, transformar um resíduo em um produto de valor agregado com aplicações ambientais importantes [6, 8].

O CA é um material altamente poroso e essa característica implica na sua principal aplicação em diversos processos de adsorção. A estrutura porosa é constituída por microporos e mesoporos, proporcionando grande área superficial obtida por meio de um procedimento de ativação, em que o carvão é exposto a temperaturas elevadas e gases [7, 9]. No processo de ativação, o material volátil é removido e a estrutura remanescente é composta de uma matriz de carbono incrustada de espaços vazios rica em sítios ativos para interação com moléculas e íons. Diante disso, é um material aplicado na remoção de toxinas, metais pesados e compostos orgânicos, tanto em fases líquidas quanto gasosas [9, 10].

A produção de CA ocorre a partir de dois métodos principais de ativação: ativação física e ativação química. Ambos os processos são influenciados por fatores, como o tipo de ativador químico, tempo de impregnação, temperatura e duração da carbonização, composição química da matéria-prima, entre outros [8, 11]. A ativação química é um método simples e comum para sintetizar materiais porosos de carbono. Ela geralmente combina os processos de carbonização e ativação.

Nessa abordagem a matéria-prima é impregnada com ativadores químicos como ácidos, álcalis e compostos metálicos, e tratada termicamente em uma atmosfera preferencialmente inerte. O ativador remove a umidade, reduz a temperatura necessária para ativação e promove a formação de estruturas porosas [9]. A ativação química é vantajosa em relação à ativação física devido à maior penetração do ativador na rede de carbono, o que leva a uma estrutura de poros mais desenvolvida, além de menor temperatura de ativação e maiores rendimentos. Os agentes químicos utilizados na ativação química são geralmente o cloreto de zinco ($ZnCl_2$), ácido fosfórico (H_3PO_4), e hidróxido de potássio (KOH), utilizados para impregnar o resíduo de biomassa antes da carbonização ou após a carbonização [6, 7].

Além das aplicações já consolidadas, o CA tem sido proposto na remoção de contaminantes emergentes (CE) como os fármacos em meio aquoso [4, 12, 13]. A elevada área superficial, presença de grupos funcionais na superfície e estrutura porosa favorecem a interação com moléculas orgânicas complexas, como antibióticos, analgésicos, anti-inflamatórios e antidepressivos.

Pesquisas atuais demonstram que CA produzidos a partir de biomassas residuais, como casca de coco, serragem e resíduos de poda, apresentam desempenho comparável ou superior ao carvão ativado comercial [1, 5-8, 13-15]. Dessa forma, o uso desse tipo de CA destaca-se como uma estratégia viável e sustentável para a mitigação de impactos ambientais associados à presença de fármacos em águas residuais e corpos hídricos.

Diante disso, neste estudo foram otimizadas condições preparo, realizada a caracterização e a aplicação de CA obtidos a partir de resíduos de podas de árvores urbanas das espécies mangueira (*Mangifera indica L.*) e brinco-de-índio (*Cojoba arborea L.*) com emprego do $ZnCl_2$ como ativador.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção, processamento e caracterização dos resíduos de poda arbórea

Os resíduos provenientes de podas de árvores urbanas foram obtidos no município de São Miguel do Iguaçu-PR, junto ao setor de limpeza urbana que realiza os serviços de poda e Trituração de galhos. Foram coletados 10 kg de resíduos triturados das espécies brinco-de-índio (*Cojoba arborea*) e mangueira (*Mangifera indica*) proveniente de uma única árvore, sem contaminação, uniforme, sem presença excessiva de folhas ou cascas (Figura 1a).



Figura 1: Material precursor da produção de CA. (a) Resíduos de poda de árvores triturados, (b) Carvão vegetal produzido e (c) Carvão vegetal triturado.

O material foi seco ao ar em temperatura ambiente (25 ± 5 °C) e acondicionado em embalagens plásticas para armazenamento em geladeira a 4 °C. Foi realizada a caracterização imediata do resíduo por meio da determinação da umidade (ASTM D3173-08) [16], material volátil e carbono fixo, cinzas (ASTM D 2415-20) [17].

2.2 Preparo e otimização das condições de produção do carvão ativado

Para a obtenção do CA, primeiramente foi preparado o carvão vegetal (CV) em forno mufla (Jung, modelo 612) empregando rampas de aquecimento com taxa de $1,1$ °C min $^{-1}$ até 125 °C, seguida de taxa de $0,5$ °C min $^{-1}$ até 310 °C durante 1h, com homogeneização manual a cada 15 min (Figura 1b). Após resfriamento, os CV foram triturados em almofariz e pistilo e as partículas foram separadas na granulometria entre as peneiras 18 e 35 mesh (1,00 a 0,50 mm) (Figura 1c).

A ativação química empregou o Cloreto de Zinco ($ZnCl_2$, Merck, PA 99,9%) como agente precursor. Alíquotas de 15 g de CV de cada espécie foram misturadas a porções de $ZnCl_2$ e submetidas a temperaturas de pirólise conforme delineamento composto central rotacional (DCCR). As variáveis otimizadas na produção do CA foram a temperatura e a razão da massa de ativador por massa de CV ($ZnCl_2/ CV$), tomadas nos níveis $-\sqrt{2}$, -1, 0, +1 e $+\sqrt{2}$ (Tabela 1).

O preparo do CA consistiu-se em misturas da alíquota de CV e do precursor $ZnCl_2$ em cadrinho de porcelana com uso de 5 mL de água ultrapura para homogeneização, segundo a condição para a variável $ZnCl_2/ CV$, estabelecida para os onze ensaios (Tabela 1). As misturas foram secas em estufa a 105 °C por 12 h e tratadas termicamente nas temperaturas a serem testadas com base no DCCR (Tabela 1). Após o período de pirólise e o devido resfriamento, lavou-se o material com solução de ácido clorídrico (HCl, Dinâmica, PA 37%) na concentração de 1,0 mol L $^{-1}$ para eliminação do residual de $ZnCl_2$ e sucessivamente com água ultrapura até que fosse obtido valor de pH constante. Por fim, os CA foram secos em estufa a 105 °C por 12 h e realizou-se a desagregação e armazenamento em recipiente plástico.

A avaliação do CA preparados em cada ensaio a partir das combinações de variáveis do DCCR ocorreu por meio da determinação da quantidade de grupos ácido em termos de miliequivivalente (mEq g $^{-1}$). Esse parâmetro é representado por grupos fenólicos, carboxílicos e cetônicos e são

indicativos de sítios disponíveis para a adsorção em materiais produzidos a partir de biomassas vegetais [18]. A quantificação desses grupos ocorreu por meio de titulação, no qual duplicatas de 1g de cada carvão ativado produzido nos onze ensaios foi aferida e inserida em Erlenmeyer de 250 mL, juntamente com 50 mL de solução padrão de NaOH 0,1 mol L⁻¹. As suspensões foram mantidas em agitação por 24 horas em uma incubadora shaker (modelo SL 221 – SOLAB) a 25°C e 175 rpm. Após filtração da mistura, uma alíquota de 10 mL do filtrado foi titulada com solução padrão de HCl 0,1 mol L⁻¹ usando-se o indicador fenolftaleína, a quantidade de grupos ácidos foi calculada estequiométricamente.

Tabela 1 – Variáveis e níveis para o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

Ensaios	Variáveis e níveis				
	Temperatura (°C)		Razão ZnCl ₂ /CV (g g ⁻¹)		
	Codificado	Real	Codificado	Real	
Fatorial 2²	1	-1	250	-1	1,5
	2	+1	450	-1	1,5
	3	-1	250	+1	2,5
	4	+1	450	+1	2,5
Pontos Centrais	5	0	350	0	2,0
	6	0	350	0	2,0
	7	0	350	0	2,0
Pontos axiais	8	-√2	210	0	2,0
	9	+√2	490	0	2,0
	10	0	350	-√2	1,3
	11	0	350	+√2	2,7

O programa computacional *Statistica* 10.0 foi utilizado na análise dos dados obtidos no DCCR usando a quantidade de grupos ácidos (mEq g⁻¹) como resposta. A análise considerou o ajuste de modelos estatísticos aos dados experimentais e a aplicação da metodologia da superfície de resposta. A avaliação do modelo de melhor ajuste foi realizada com base na Análise da Variância (ANOVA) de regressão e a otimização das variáveis temperatura e razão ZnCl₂/CV foi definida com base no ponto máximo na superfície de resposta obtida em termos de quantidade de grupos ácidos.

Para cada espécie foi definida a melhor condição (tratamento) por meio do DCCR e produzido um novo lote de CA usado na caracterização e nos testes de adsorção. Além disso, foram incluídos nos ensaios carvões vegetais antes do processo de ativação. Cada amostra foi designada por um código para identificar a espécie arbórea e condição de tratamento realizada: BI-CAV (Carvão vegetal da espécie brinco-de-índio), MG-CAV (carvão vegetal da espécie mangueira), BI-T1 (CA da espécie brinco-de-índio no tratamento 1), BI-T2 (CA da espécie brinco-de-índio no tratamento 2, MG-T1 (CA da espécie mangueira no tratamento 1 e MG-T2 (CA da espécie mangueira no tratamento 2).

2.3 Caracterização das amostras de carvão

As medidas de difração de raios X (DRX) ocorreram em Difratômetro (Empyrean), cujos auto-orientadores foram colocados em amostras de vidro neutro e as medições foram realizadas no modo de reflexão, K_ACu ($\lambda=1,542$ Å), na faixa de 5 a 100 θ , com um tempo de permanência de 2 min. As medidas de microscopia eletrônica de varredura (MEV), ocorreram em Microscópio Eletrônico (Zeiss EVO-MA10) com detector de elétrons secundários (para alto e baixo vácuo), detector de elétrons retroespalhados, detector de raios X (para EDS/EDX) e detector para STEM. As amostras em pó foram depositadas sob uma fita de cobre dupla-face e recobertas com ouro (metalização) para análise.

Com o intuito de obter informações sobre a carga superficial do CA, foi investigado o pH_{PCZ}. Esse parâmetro é definido como o pH em que a superfície do adsorvente apresenta carga líquida

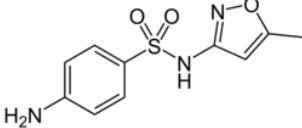
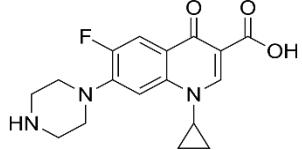
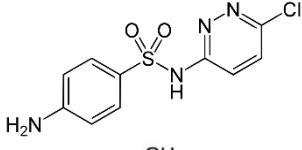
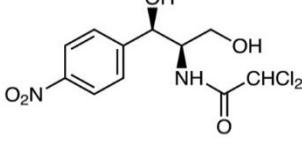
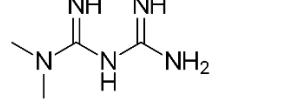
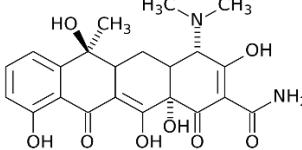
igual a zero, ou seja, o número de cargas positivas é igual ao número de cargas negativas [6]. Assim, duplicatas com 0,01 g de CA foram adicionadas em tubos tipo Falcon com capacidade de 50 mL, juntamente com 25 mL de solução de cloreto de sódio a 0,01 mol L⁻¹ (NaCl, Isofar®, PA 99%), previamente ajustada nos pH 2, 4, 6, 8, 10 e 12, pelo emprego de alíquotas de soluções de ácido clorídrico a 0,01 mol L⁻¹ (HCl, Moderna®, PA 37%) para os valores ácidos e hidróxido de sódio a 0,01 mol L⁻¹ (NaOH, Merck®, PA 98%).

Os frascos foram agitados durante 24 h em incubadora shaker (modelo SL 221 – SOLAB) a 25 °C e 175 rpm. Após esse período, o pH final de cada solução foi medido em potenciômetro de bancada (Even, modelo pHs-3E) e os valores da variação entre o pH final e inicial foram plotados em função do pH inicial para obtenção do pH_{PCZ}.

2.4 Testes de adsorção de fármacos

Para avaliar os carvões produzidos quanto a remoção de fármacos em meio aquoso por adsorção, foram testados os analitos tetraciclina (TCT), cloranfenicol (CFC), sulfaclorpiridazina (SCP), sulfametoazol (SMX), metformina (MTF) e ciprofloxacina (CIP), obtidos na forma de padrão analítico (Sigma Aldrich) (Tabela 2). Para os testes foram preparadas soluções aquosas estoques individuais de cada um dos fármacos a 1000 mg L⁻¹, mantidas sob refrigeração a 4 °C e ao abrigo da luz. Na sequência, prepararam-se soluções de trabalho concentração de 10 mg L⁻¹ nos pH 2,5, 5,5 e 8,5.

Tabela 2 – Características dos fármacos testados.

Fármaco	Fórmula molecular	Fórmula estrutural	Massa molar (g mol ⁻¹)	pK _a	Referência
SMX	C ₁₀ H ₁₁ N ₃ O ₃ S		253,28	1,6 5,6	[19, 20]
CIP	C ₁₇ H ₁₈ FN ₃ O ₃		331,34	6,1 8,7	[20, 21]
SCP	C ₁₀ H ₉ ClN ₄ O ₂ S		284,72	1,9 5,4	[20, 22]
CFC	C ₁₁ H ₁₂ Cl ₂ N ₂ O ₅		323,13	5,5 11,0	[20]
MTF	C ₄ H ₁₁ N ₅		129,16	2,8 11,5	[23]
TCT	C ₂₂ H ₂₄ N ₂ O ₈		444,43	3,3 7,7 9,7	[20]

Os testes foram realizados em bateladas individuais de cada fármaco e com prova em branco isenta dos analitos. Assim, duplicatas das amostras BI-CAV, MG-CAV, BI-T1, BI-T2, MG-T1 e

MG-T2, com massa de 0,01 g foram introduzidas em tubos tipo Falcon com capacidade para 50 mL, juntamente com 25 mL de solução de trabalho a 10 mg L⁻¹ previamente ajustadas no pH de teste.

Os tubos foram agitados durante 24 h em temperatura ambiente (20 ± 5 °C), em incubadora shaker (modelo SL 221 – SOLAB), de modo que o sistema atinja o equilíbrio [24]. Por fim, alíquotas de 5 mL do sobrenadante foram filtradas em membrana de nylon 0,45 µm e encaminhadas para a quantificação da concentração remanescente dos fármacos testados.

As determinações analíticas ocorreram em espectrofotômetro de bancada (Hack DR 2800). Foram preparadas curvas de calibração na faixa de 0,5 a 15 mg L⁻¹ para cada analito nos pH estudados. A porcentagem de remoção atribuída ao processo de adsorção foi calculada com base nas concentrações iniciais e finais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características dos resíduos de podas arbóreas usados no estudo

Por meio de análises imediatas foram determinados os teores de umidade, massa seca, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo nos resíduos de podas arbóreas (RPA) usados como precursores na produção do CA (Tabela 3).

Tabela 3 – Composição imediata dos resíduos arbóreos usados na produção de CA.

RPA	Umidade (%)	Massa seca (%)	Material volátil*	Cinzas * (%)	Carbono fixo* (%)
MG	11,83±0,74	88,17±0,58	93,44±0,05	8,49±2,58	3,98±0,44
BI	10,58±0,84	89,42±0,34	88,73±0,31	8,03±2,44	3,24±0,41

Legenda: RPA - Resíduo de podas de árvores, MG – mangueira, BI – brinco-de-índio.

* Teores calculados sobre a massa seca.

Os teores de umidade nos RPA foram de 11,83% para amostra MG e de 10,58% na amostra BI. Esses valores são considerados adequados para processos de pirólise e para utilização da biomassa como fonte precursora de carvão ativado [25, 26]. Comparativamente, os teores de materiais voláteis no RPA MG (93,44%) foram maiores que no RPA BI (88,73%) e sugerem maior conteúdo orgânico suscetível a perda por conversão gasosa nos processos de pirólise. Além disso, a liberação de gases durante a carbonização contribui para a formação de poros no carvão [27]. De modo análogo, menores teores de cinzas sugerem CA de melhor qualidade, com maior área superficial e melhor capacidade de adsorção [28]. As amostras MG e BI apresentaram teores de cinzas de 8,49% e 8,03% respectivamente.

Para carbono fixo, o RPA MG obteve 3,98% e o RPA BI 3,24%. Esse parâmetro representa o resíduo sólido que permanece após a remoção dos voláteis e das cinzas durante a pirólise e os teores mais altos geralmente indicam que o precursor tem maior potencial emprego na produção de CA. Em geral, os baixos teores apresentados pelos RPA são compatíveis com resíduos de biomassa vegetal lignocelulósica e indicam menores rendimentos na produção de CA, comparadas com biomassas com teores de carbono fixos elevados [25].

3.2 Otimização do preparo do CA

Para otimizar a condição de preparo do CA em termos de a temperatura e a razão da massa de ativador por massa de CV (ZnCl₂/CV) utilizou-se como resposta na quantidade de grupos ácidos (mEq g⁻¹). Assim, foi conduzida uma análise dos dados obtidos pelo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2² (Figura 2). Para o CA obtido a partir do RPA MG foram verificados valores de grupos ácidos na faixa de 3,4 a 4,3 mEq g⁻¹ nos ensaios de 3 a 11 e para o proveniente do RPA BI, foram verificados melhores valores nos ensaios 1, 3, 6 e 11, cujos grupos ácidos apresentaram-se na faixa de 5,3 a 6,7 mEq g⁻¹.

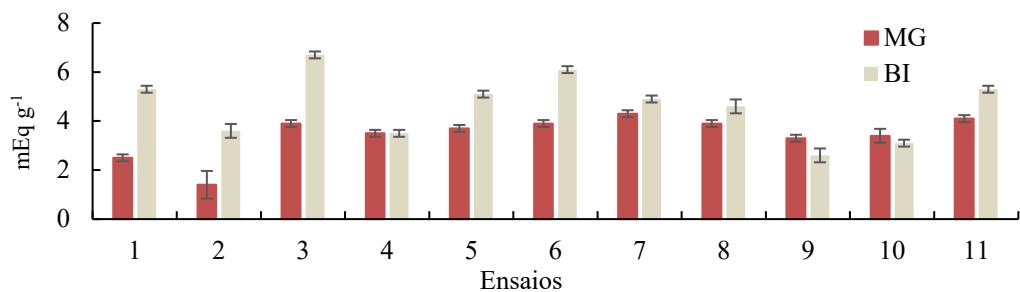


Figura 2: Quantidade de grupos ácidos ($mEq\ g^{-1}$) obtidas por meio do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

A partir desses valores foi realizada a ANOVA para avaliação dos dados de regressão do modelo estatístico quadrático para relacionar a quantidade de grupos ácidos com as variáveis temperatura e razão $ZnCl_2/CV$ num intervalo de confiança de 95% (Tabela 4). Observou-se que a razão do F_{cal}/F_{tab} foi maior que 1 para a ANOVA de regressão do modelo quadrático de ambos os CA. Esse dado sugere que o modelo foi estatisticamente significativo para representar a relação entre as variáveis e a resposta.

Tabela 4 - ANOVA do modelo quadrático para a quantidade de grupos ácidos segundo o DCCR.

RPA	Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_{cal} (95%)	F_{tab} (95%)	F_{cal}/F_{tab}
MG	Regressão	5,84	5	1,2	6,0	5,0	1,2
	Resíduos	1,10	5	0,2	-	-	-
	Total	6,94	10	-	-	-	-
BI	Regressão	14,00	5	2,8	5,6	5,0	1,1
	Resíduos	2,40	5	0,5	-	-	-
	Total	16,40	10	-	-	-	-

Legenda: RPA - Resíduo de podas de árvores, MG – mangueira, BI – brinco-de-índio.

Com a aceitação do modelo, observou-se que os efeitos lineares e quadráticos das variáveis estudadas, bem como a interação entre eles sobre a quantidade de grupos ácidos (Figura 3). A razão $ZnCl_2/CV$ linear foi a principal variável que contribuiu para o aumento na quantidade de grupos ácidos no carvão produzido a partir do RPA MG.

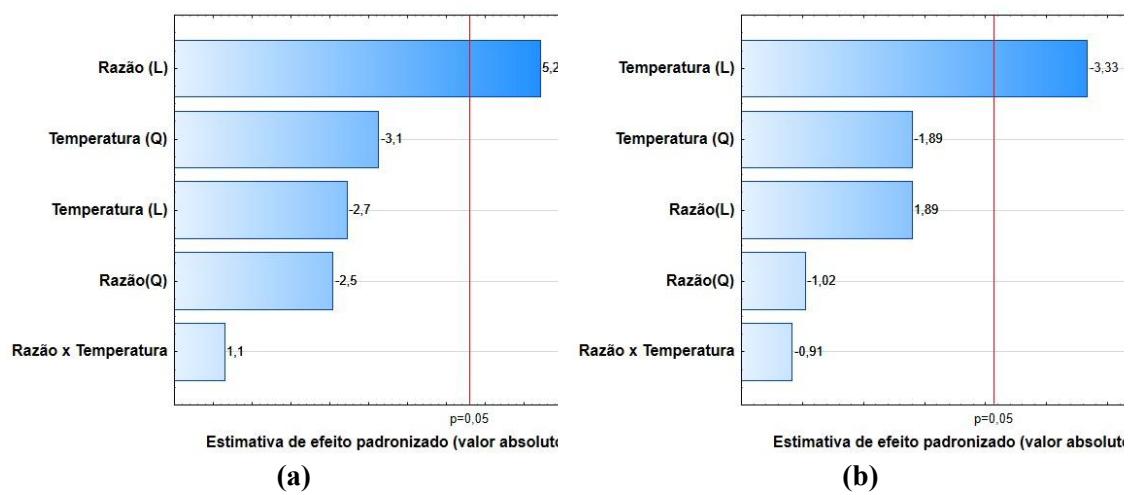


Figura 3: Gráficos de Pareto segundo o DCCR. a) MG e b) BI.

Para o carvão preparado com o RPA BI, a redução da temperatura linear foi a principal característica que contribuiu para o aumento da quantidade de sítios ácidos no material. Com o aceite do modelo estatístico, também foram obtidos os gráficos de contorno para os CA MG e BI tendo em vista a maximização da quantidade de grupos ácidos a partir da interação entre as variáveis consideradas na otimização (Figura 4).

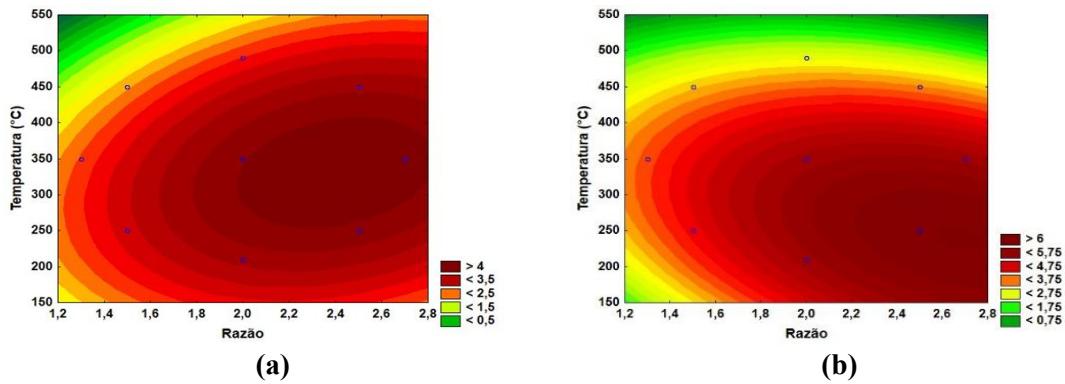


Figura 4: Gráficos de contorno obtidos no DCCR. a) MG e b) BI.

A partir dos gráficos, foi possível identificar a existência de pontos de máximos para a produção dos carvões. Para CA MG, esses pontos se distribuem entre as razões de 2,0 a 2,8 e temperaturas de 250 a 400 °C e para o CA BI entre as razões de 2,2 a 2,8 e temperaturas de 150 a 300 °C. Com isso, obtiveram-se condições estatisticamente ideais de 331 °C e 239 °C para temperatura e de 2,4 e 2,7 para a relação $ZnCl_2/CV$ para os CA MG e BI respectivamente. Pelo fato de cada amostra ter apresentada uma condição otimizada em particular, essas condições foram chamadas de tratamentos 1 e 2 (T1 e T2). Assim, o processo de preparo do CA para cada RPA foi reproduzido segundo as condições dos tratamentos T1 e T2.

3.3 Caracterização do CA produzido

O aspecto morfológico dos CA preparados na condição otimizada foi avaliado por meio de micrografias (Figura 5). Por comparação das imagens, antes dos tratamentos (BI-CAV e MG-CAV) e após o processo de ativação (BI-T1, BI-T2, MG-T1 e MG-T2), observa-se que o aspecto fibroso (Figuras 5a e 5d) passa a ser mais irregular e rugoso (Figuras 5b, 5c, 5e e 5f).

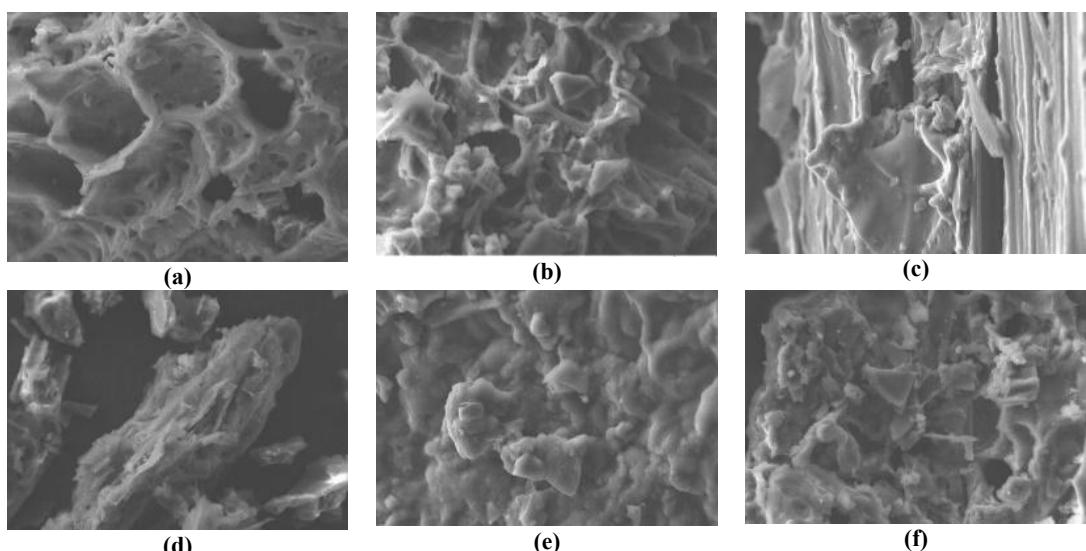


Figura 5: Micrografias das amostras de carvões. a) BI-CAV, b) BI-T1, c) BI-T2, d) MG-CAV, e) MG-T1 e f) MG-T2.

De modo geral, as micrografias revelaram que a micromorfologia do material é composta de estruturas não uniformes, e com a presença de poros em sua superfície. Com o tratamento de ativação (T1 e T2), as estruturas são aumentadas. O material pode ser classificado como sendo de estruturas fibrosas, alargadas e irregulares. As partículas fibrosas possuem formas lineares e esqueléticas, sendo observada na sua superfície a presença de buracos o que sugerem uma micromorfologia porosa [29].

A partir das determinações EDS realizadas em conjunto com as micrografias foi estimada a composição das amostras em termos de elementos mais abundantes de modo semiquantitativo (Tabela 5). Nos carvões vegetais BI-CAV e MG-CAV foram observados teores semelhantes de carbono, oxigênio, potássio e cálcio, sugerindo que a composição dos resíduos de ambas as espécies é parecida e com predomínio provável de celulose. Contudo, ao passarem pelos tratamentos T1 e T2, as amostras apresentam composição diferenciada. Para BI foi observado um aumento da quantidade de carbono (BI-T1 = 81% e BI-T2 = 86%) em relação ao carvão vegetal (BI-CAV = 69,8%). Para a amostra de MG verificou-se uma redução (MG-T1 = 68,8% e MG-T2 = 66,7%) no teor desse elemento em relação ao carvão vegetal usado (MG-CAV = 69,6%).

Tabela 5 - Composição semiquantitativa dos carvões obtidas por EDS.

Elemento (%)	BI-CAV	BI-T1	BI-T2	MG-CAV	MG-T1	MG-T2
C	69,8	81,0	86,0	69,6	68,8	66,7
O	26,3	16,6	12,8	27,4	23,7	23,4
N	-	-	-	-	7,1	8,9
K	1,4	-	-	1,5	-	-
Ca	1,7	-	-	1,1	-	-
Outros	0,8	2,4	1,2	0,4	0,4	1,0

Legenda: CAV – carvão vegetal, MG – mangueira, BI – brinco-de-índio, T1 – tratamento 1, T2 -tratamento 2.

As amostras MG-T1 (23,7%) e MG-T2 (23,4%) apresentaram maior abundância de oxigênio quando comparadas as amostras BI-T1 (16,6%) e BI-T2 (12,8%). Em ambos os tratamentos houve redução no teor de O em relação ao carvão vegetal (BI-CAV=26,3% e MG-CAV=27,4%). Quanto aos demais elementos identificados, Ca e K foram detectados nas amostras de carvão vegetais (BI-CAV e MG-CAV), porém não estiveram presentes após os tratamentos T1 e T2, o que pode ser relacionado solubilidade e com a lixiviação decorrente da lavagem com HCl 1,0 mol L⁻¹ após a pirólise.

Nos difratogramas (Figuras 6a e 6b) é possível verificar que a intensidade dos picos diminui das amostras de carvão vegetal (BI-CAV e MG-CAV) em relação àquelas tratadas (BI-T1, BI-T2, MG-T1 e MG-T2), o que sugere a redução da cristalinidade dos materiais, devido a degradação da celulose.

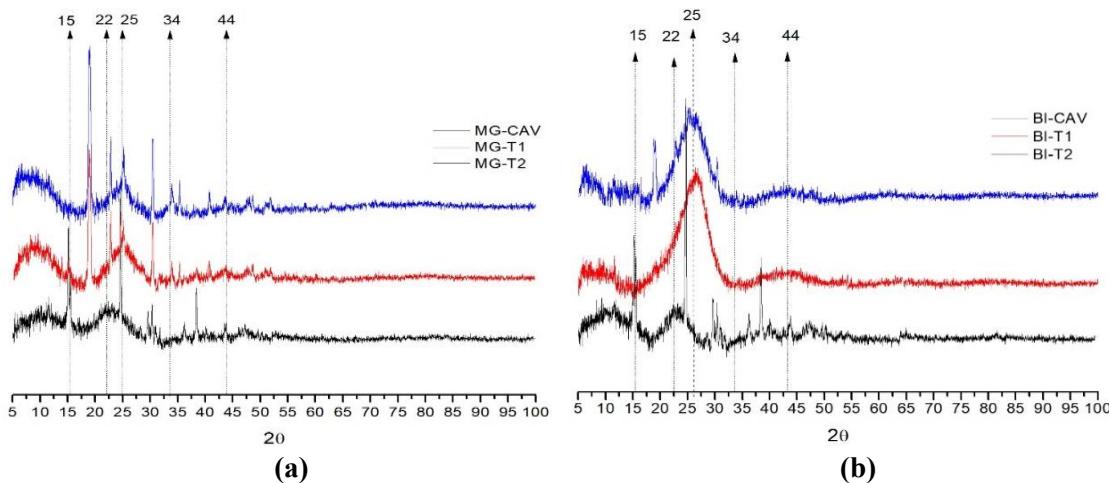


Figura 6: Difratogramas das amostras de carvões. a) MG e b) BI.

Além disso, as amostras BI-CAV e MG-CAV apresentaram picos cristalográficos semelhantes nos ângulos de Bragg (2θ) de 15° , 22° e 34° que estão associados a regiões amorfas e cristalinas de fibras de celulose [30, 31]. Para as amostras de CA (BI-T1, BI-T2, MG-T1 e MG-T2), as regiões e picos em $2\theta = 25^\circ$ e 44° indicam a presença de material cristalino que podem ser relacionados ao carbono e grafite. A região entre 20° e 30° refere-se a estruturas de empilhamento de camadas grafite e o alargamento se deve às pequenas dimensões dos cristalitos perpendiculares às camadas [32].

Para os valores de pH_{PCZ} (Figura 7a) foi possível verificar comportamento distinto nas amostras BI-CAV e MG-CAV das demais. Essa diferenciação está relacionada à composição original dos carvões vegetais e sugere que os tratamentos realizados para a produção do CA causaram alterações no material. Dessa forma, a modificação do pH_{PCZ} após os tratamentos T1 e T2 indica alteração na composição química da superfície dos CA [17].

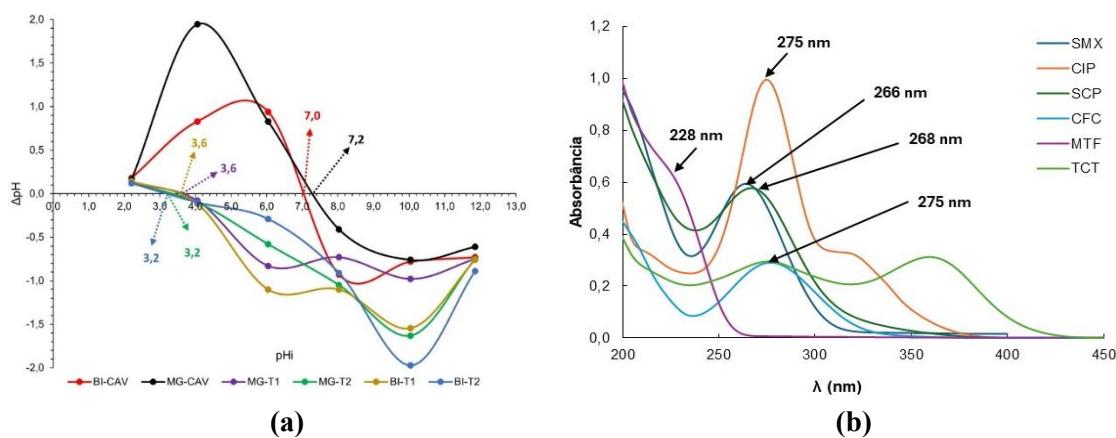


Figura 7: a) pH_{PCZ} e b) Espectros UV-Vis dos fármacos na concentração de 10 mg L^{-1} e $\text{pH} 5,5$.

Diversos fatores podem influenciar o pH_{PCZ} de um material, incluindo a presença de grupos funcionais ácidos ou básicos na superfície. Tratamentos químicos, como aqueles realizados nas condições T1 e T2, podem introduzir ou remover grupos funcionais, alterando o pH_{PCZ} , e impactando a capacidade de adsorção do carvão ativado. Para ambos os tratamentos se obtiveram pH_{PCZ} de 3,2 e 3,65 tanto para o CA BI quanto para o CA MG, com isso, a utilização de um pH do meio no intervalo acima desse valor é favorável ao processo de adsorção de espécies catiônicas e abaixo de espécies aniônicas [33].

Em linhas gerais, as caracterizações realizadas sugerem que os CA apresentam aspectos favoráveis a aplicação como adsorventes.

3.4 Testes da adsorção de fármacos empregando os CA produzidos

Para os testes de adsorção dos fármacos em meio aquoso, inicialmente foi estabelecido o perfil espectroscópico de cada um dos analitos testados e para a definição das bandas máximas de monitoramento nos ensaios (Figura 7b). Assim, foram utilizados os comprimentos de 228 nm para MTF, 266 nm para SMX, 268 nm para SCP e 275 nm para TCT e CIP. Os percentuais de remoção dos fármacos considerando o tempo de 24 h e as concentrações iniciais e finais na solução aquosa são apresentados na Figura 8.

A eficiência de remoção pelos carvões nas três condições de pH (2,5; 5,5 e 8,5) apresentou menor desempenho dos carvões vegetais (BI-CAV e MG-CAV) em todas as condições, com valores inferiores a 20% para todos os analitos. Em contraste, os CA produzidos (MG-T1, MG-T2, BI-T1 e BI-T2) demonstraram remoções superiores e mais consistentes. Esse resultado mostra que os carvões ativados tiveram sua superfície alterada de modo a aumentar a sua capacidade de adsorção [12, 34].

Para adsorção do antibiótico SMX (Figura 8a), destaca-se o CA BI-T2, que atingiu a maior eficiência de remoção (~65%) em pH 5,5 e apresentou desempenho semelhante em pH 2,5 e 8,5 (~60%). Em seguida, os CA MG-T1 e MG-T2 obtiveram taxas de remoção entre 45% e 55% em pH 2,5. Em relação à CIP, o CA MG-T1 apresentou melhores percentuais (50 a 60%) em todos os pH, sugerindo menor efeito das variações e melhor estabilidade na adsorção. Os CA BI-T2 e BI-T1 também apresentaram capacidade de adsorção (38 a 58%), sendo o pH 8,5 ligeiramente mais favorável. O CA MG-T2 demonstrou desempenho inferior ao de MG-T1 e BI-T2, visto que os percentuais apresentados foram na faixa de 32 a 42%.

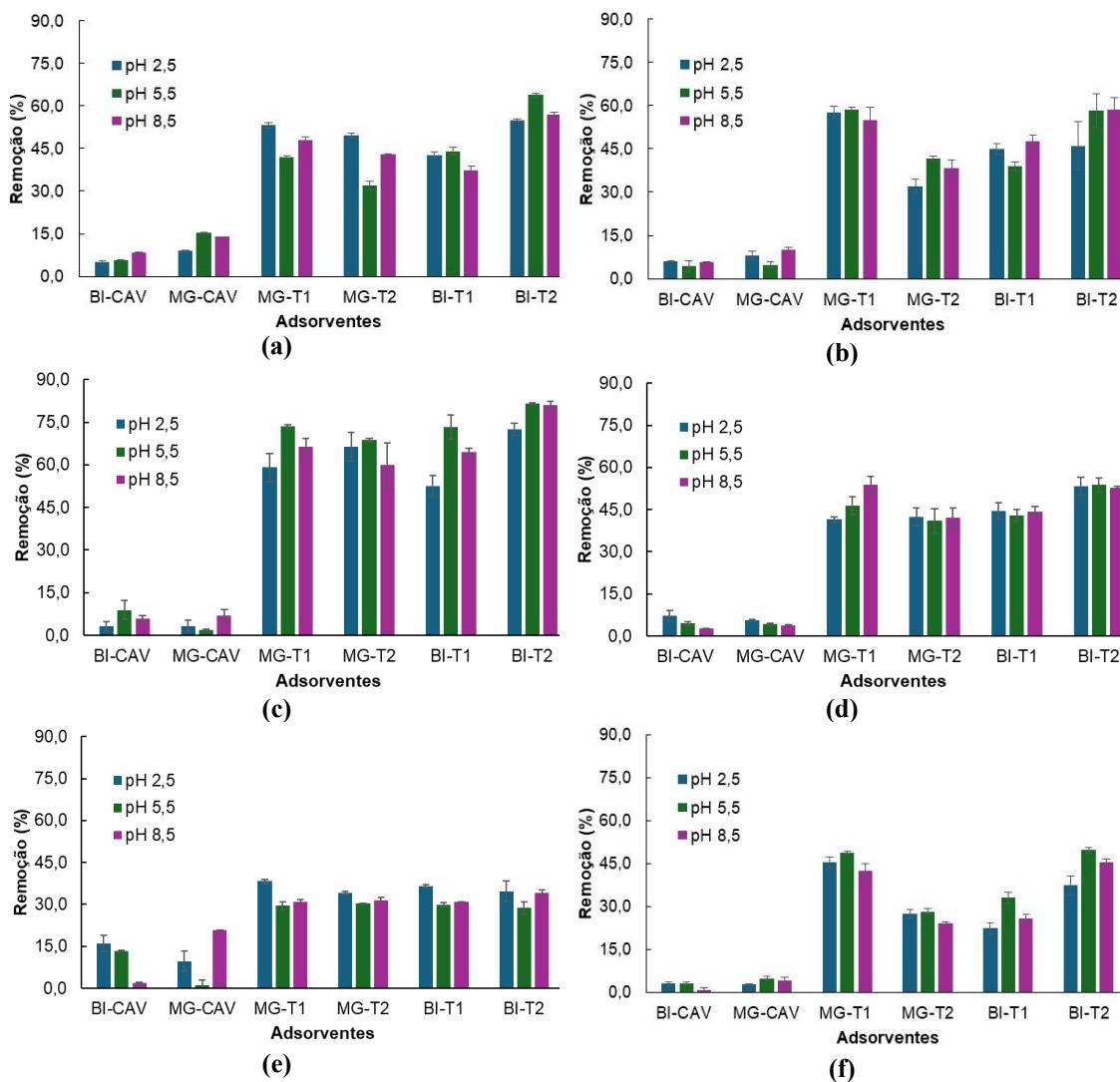


Figura 8: Testes de remoção de fármacos por adsorção. a) SMX. b) CIP. c) SCP. d) CFC. e) MTF. f) TCT.

A SCP foi mais bem removida no CA BI-T2, na qual atingiu as maiores taxas de remoção entre os analitos e CA testados (72 a 82%). O pH 5,5 obteve o melhor desempenho (82%), seguido do pH 2,5 e 8,5, cujos percentuais foram 72 e 80% respectivamente. Os CA BI-T1, MG-T1 e MG-T2 demonstraram remoções de mesma ordem (53 a 74%) o que indica afinidade da SCP em condições menos restritas de características do absorvente e do pH.

Tal comportamento também foi observado para o CFC, uma vez que a faixa de remoção em todos os CA e pH foi de 40 a 55%. O MG-T1 foi o carvão que apresentou a maior eficiência para esse analito, atingindo cerca de 55% em pH 8,5. Já BI-T1 e BI-T2 alcançaram percentuais mais estáveis, 43 a 46% e 51 a 53%, respectivamente, sugerindo pouca dependência do pH.

Para a MTF, foram verificados os menores percentuais de remoção empregando os CA produzidos (27 a 38%) dentre os fármacos e condições testadas. Nesse contexto, o CA MG-T1 obteve a melhor remoção de 38 % em pH 2,5, resultado este que foi da mesma ordem nos demais pHs e demais adsorventes (MG-T2, BI-T1 e BI-T2). Nos ensaios com TCT, foi observado que o CA MG-T1 apresentou o melhor desempenho, atingindo remoção de 50% em pH 5,5, e valores entre 42–45% nos demais pH. O CA BI-T2 também se mostrou promissor, com remoções entre 37% e 48%, sendo o melhor percentual no pH 5,5.

Do ponto de vista comparativo quanto ao pH, a maioria dos CA apresentou maior potencial de remoção em pH 5,5, especialmente para os fármacos SMX, SCP, CIP e TCT. Essa faixa intermediária indica favorecer a interação entre os grupos funcionais dos CA e as espécies ionizadas dos fármacos, pois nesse ponto há equilíbrio entre o estado de ionização dos fármacos e a carga da superfície do carvão ativado, promovendo interações responsáveis pela adsorção [12, 34, 35]. Por outro lado, o pH 2,5 foi mais favorável à remoção de MTF, indicando que a forma predominante nesse pH tem maior afinidade com a superfície dos carvões ativados. Já para CFC, observou-se melhor desempenho em pH 8,5, particularmente com o adsorvente MG-T1, sugerindo que a adsorção desse fármaco é favorecida em alcalino.

A eficiência de remoção dos fármacos pelos CA também pode ser associada à sua especiação química em diferentes valores de pH. Essa especiação é determinada pelos valores de constante de dissociação ácida (pK_a) (Tabela 2), que definem o estado iônico predominante das moléculas nas condições do meio e, consequentemente, suas interações com os grupos funcionais presentes nos adsorventes [15, 34].

O SMX ($pK_{a1} = 1,6$ e $pK_{a2} = 5,6$) e a SCP ($pK_{a1} = 1,9$ e $pK_{a2} = 5,4$) apresentaram maior eficiência para suas remoções em pH 5,5. Nessa faixa predominam suas formas anionicas parcialmente desprotonadas. Essa condição pode favorecer as interações eletrostáticas com grupos catiônicos ou neutros dos CA [19, 20], com destaque para o adsorvente BI-T2, visto que, nesse pH, o pH_{PCZ} dos CA tendem a possuir carga superficial negativa. Além disso, o efeito dessa interação somado à possibilidade das formas neutras ou zwitteriônicas das moléculas estabelecerem ainda ligações hidrogênio e interações $\pi-\pi$ com a superfície porosa do material justificaria o melhor desempenho de adsorção desses dois analitos [12, 34].

Para a CIP ($pK_{a1} = 6,1$ e $pK_{a2} = 8,7$), TCT ($pK_{a1} = 3,3$, $pK_{a2} = 7,7$ e $pK_{a3} = 9,6$) e CFC ($pK_{a1}=5,5$ e $pK_{a2}=11,0$), sugere-se que interações do tipo eletrostática seja menos favorecida. Com isso, associa-se o desempenho de remoção ao comportamento típico de espécie zwitteriônica, pela coexistência de formas neutras e parcialmente ionizadas com adsorção por múltiplos mecanismos.

Em relação à MTF ($pK_{a1} = 2,8$ e $pK_{a2}=11,5$), o fato de ter sido mais eficientemente removida em pH 2,5, quando sua forma catiônica predominante apresenta maior ocorrência e a carga superficial também apresenta-se positiva, sugere mecanismo distinto à interação eletrostática, possivelmente decorrentes de interações intermoleculares de menor abrangência e estabilidade decorrente de sua estrutura polar.

De forma geral, os dados indicam que no pH 5,5 houve condição mais favorável à adsorção da maioria dos fármacos, possivelmente por comportar espécies neutras ou zwitteriônicas, que apresentam maior afinidade com os grupos funcionais oxigenados e aromáticos das superfícies dos carvões ativados produzidos.

4. CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos, foi possível verificar que as variáveis razão da massa de ativador por massa de CV ($ZnCl_2/CV$) e a temperatura foram importantes para a obtenção dos CA, considerando o quantitativo de grupos ácidos. Com a utilização do DCCR foram obtidas condições ótimas para a produção, viabilizando dessa forma o preparo de carvões a partir de RPA das espécies mangueira (*Mangifera indica*) e brinco-de-índio (*Cojoba arborea*).

As micrografias indicam que os tratamentos realizados contribuíram para aumentar a área superficial dos CA produzidos com ambos os RPA precursores, revelando que as superfícies não são uniformes, com a presença de poros e de estruturas fibrosas, alargadas e irregulares. Esses

aspectos são reforçados pela atenuação das intensidades dos picos de difração obtidos nas amostras de carvão vegetal em relação aos CA, associado a perda de cristalinidade devido à degradação da celulose.

Os valores de pH_{PCZ} sugeriram comportamento distinto entre as amostras de carvão vegetal (BI-CAV e MG-CAV) e as amostras tratadas (BI-T1, BI-T2, MG-T1 e MG-T2). Essa diferença corrobora para a alteração na composição química da superfície do material após os tratamentos T1 e T2.

Por fim, os testes de adsorção realizados com os seis fármacos (SMX, CIP, SCP, CFC, MTF e TCT) confirmaram o potencial dos CA produzidos na remoção de fármacos em processos por bateladas em meio aquoso. A SCP apresentou a maior remoção percentual, atingindo 82% com o carvão BI-T2 em pH 5,5. Com isso, reforça a importância das alternativas sustentáveis em substituição ao descarte inadequado e a agregação de valor a resíduos de biomassa como a RPA investigada neste estudo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, (408343/2023-0) e a Fundação Araucária (576/2022 Nº MUL2022201000058) pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Niero G, Rodrigues CA, Almerindo GI, Corrêa AXR, Gaspareto P, Feuzer-Matos AJ, et al. Using basic parameters to evaluate adsorption potential of alternative materials: example of amoxicillin adsorption by activated carbon produced from termite bio-waste. *J Environ Sci Health. Part A*. 2020 Oct;56(1):32-43. doi: 10.1080/10934529.2020.1835125
2. Komatsu JS, Souza FM, Pinheiro VS, Böhnstedt P, Pape PWG, Mandelli D, et al. Cotton fabric derived α Fe magnetic porous carbon as electrocatalyst for alkaline direct ethanol fuel cell. *Catal Today*. 2021 Dec;381:65-75. doi: 10.1016/j.cattod.2020.09.003
3. Ocal B, Recepoglu YK, Yuksel A. Thermal liquefaction of olive tree pruning waste into bio-oil in water and ethanol with NaOH catalyst. *J Energy Inst*. 2024 Apr;113:101533. doi: 10.1016/j.joei.2024.101533
4. Lladó J, Díaz AM, et al. Lignocellulosic pruning waste adsorbents to remove emerging contaminants from tyre wear and pharmaceuticals present in wastewater in circular economy scenario. *Bioresour Technol*. 2024;395:131847. doi: 10.1016/j.biortech.2024.131847
5. Mesquita RMF, Schneider WDH, Longo V, Baudel HM, Diebold E, Rencoret J, et al. Tuning antisolvent precipitation for the synthesis of lignin nanoparticles using lignin extracted from different agro-industrial wastes. *Int J Biol Macromol*. 2025 May;306(4):141676. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.141676
6. Ramos PB, Mamaní A, Erans M, Jerez F, Ponce MF, Sardella MF, et al. CO_2 Capture from porous carbons developed from olive pruning agro-industrial residue. *E&F*. 2024 Mar;38(7):6102-15. doi: 10.1021/acs.energyfuels.3c04383
7. Liu X, Ren X, Dong J, Wang B, Gao J, Wang R, et al. Preparation and physicochemical properties of biochar from the pyrolysis of pruning waste of typical fruit tree in north china. *BioResour*. 2023 Oct;18(4):8536-56. doi: 10.15376/biores.18.4.8536-8556
8. Saleem M. Sustainable production of activated carbon from indigenous *Acacia etbaica* tree branches employing microwave induced and low temperature activation. *Heliyon*. 2024;10(2):e24113. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24113
9. Baytar O, Ceyhan AA, Sahin O. Production of activated carbon from *Elaeagnus angustifolia* seeds using H_3PO_4 activator and methylene blue and malachite green adsorption. *Int J Phytoremediation*. 2020 Nov;23(7):693-703. doi: 10.1080/15226514.2020.1849015
10. Qi W, Yang Y, Xu Y, Teng X, Ma J, Xu W, et al. Synergistic effects of unmodified tea leaves and tea biochar application on remediation of Cr-contaminated soil. *Toxics*. 2024 Dec;12(12):888. doi: 10.3390/toxics12120888
11. Gayathiri M, Pulingam T, Lee KT, Sudesh K. Activated carbon from biomass waste precursors: Factors affecting production and adsorption mechanism. *Chemosphere*. 2022 May;294:133764. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133764

12. Yu D, He J, Xie T, Xu Q, Li G, Du L, et al. Peroxymonosulfate activation using a composite of copper and nickel oxide coated on SBA-15 for the removal of sulfonamide antibiotics. *Environ Res.* 2022 Apr;206:112301. doi: 10.1016/j.envres.2021.112301
13. Lee SH, Kim N, Park D. Insights into the adsorption performance of emerging contaminants on granular activated carbon. *Separations.* 2023;10(9):501. doi: 10.3390/separations10090501
14. Alves VN, Muniz JS, Siqueira AG, Oliveira JAN, Ferreira MM. Uso do resíduo orgânico de cápsulas de café na adsorção de íons Cu(II), Co(II), Ni(II) e Cd(II) em sistemas aquosos. *Rev Virtual Quím.* 2020 Dec;12(6):1389-97. doi: 10.21577/1984-6835.20200111
15. Ahmed I, Yoon M, Jhung SH. ZIF-8 templated mesoporous triazine covalent-organic polymer for adsorptive removal of sulfonamides from water. *Chem Eng J.* 2024 Mar;484:149578. doi: 10.1016/j.cej.2024.149578
16. American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke. ASTM D3173-08. West Conshohocken: ASTM International; 2008.
17. American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM D2415-20 – Standard test method for ash in coal tar and pitch. West Conshohocken: ASTM International; 2020.
18. Juan Z, Yongke Z, Yaping Z, Qingyun Z, Siyu W. Influence of the acid groups on activated carbon on the adsorption of bilirubin. *Mater Chem Phys.* 2021 Feb;260:124133. doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.124133
19. Delgado-Vargas CA, Espinosa-Barrera PA, Villegas-Guzman P, Garcia-Montoya E, Robledo-Narváez PN, Romero-Cano LA, et al. An efficient simultaneous degradation of sulfamethoxazole and trimethoprim by photoelectro-Fenton process under non-modified pH using a natural citric acid source: study of biodegradability, ecotoxicity, and antibacterial activity. *Environ Sci Pollut Res.* 2022;29:42275-89. doi: 10.1007/s11356-021-17751-5
20. Qiang Z, Adams C. Potentiometric determination of acid dissociation constants (pKa) for human and veterinary antibiotics. *Water Res.* 2004;38(12):2874-90. doi: 10.1016/j.watres.2004.03.014
21. Babić S, Periša M, Kaštelan-Macan M. Determination of pKa values of active pharmaceutical ingredients. *Water Res.* 2007;41(11):2321-30. doi: 10.1016/j.watres.2007.03.005
22. Vieira AP, Rath S, Fostier AH. Sorption of sulfachloropyridazine in Brazilian soils. *J Braz Chem Soc.* 2017;28(1):158-67. doi: 10.5935/0103-5053.20160159
23. Al-Janabi K, Mahmood a, luaibu HM. Determination of the dissociation constants of metformin from a second derivative UV spectrum. *Int J Res Pharm Sci.* 2020;11(1):790-6. doi: 10.26452/ijrps.v11i1.1896
24. Estrela-Filho OA, Rivadeneira-Mendoza BF, Fernandez-Andrade KJ, Zambrano-Intriago LA, Silva FF, Luque R, et al. Imidazolate framework material for crude oil removal in aqueous media: Mechanism insight. *Environ Res.* 2024 Jan;241:117680. doi: 10.1016/j.envres.2023.117680
25. Carvalho NR, Silva MJ, Gomes EC, Oliveira MN, Amaral RCL. Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. *Quim Nova.* 2021;44(1):35-40. doi: 10.21577/0100-4042.20170663
26. Thomaz KTC, Barbosa RLC, dos Santos JP, Gomes SD, de Andrade AD, do Nascimento RF. Removal of Fe and Mn ions from groundwater using activated carbon obtained from waste products of Brazil nut and andiroba cultivation in the Amazon region. *Sustain Mater Technol.* 2023;38:e00737. doi: 10.1016/j.susmat.2023.e00737
27. Vieira AP, Santana SAAB, Melo DQ, Araújo JMF, Melo DMA, Azevedo DCS. Usando carvão ativado produzido a partir do lodo doméstico. *Rev Virtual Quím.* 2019;11(6):1934-48. doi: 10.21577/1984-6835.20190135
28. Castro PM, Oliveira LS, Pereira RCL, Silva LG, Vieira MGA. Preparation and characterization of steam and CO₂ activated carbon from Brazil nut shell. *Biosci J.* 2023;39:e39054. doi: 10.14393/BJ-v39n0a2023-64438
29. Creelman RA, Gupta RP. Ash fusion temperatures and the transformations of coal ash particles to slag. *Fuel Process Technol.* 1998;56(1-2):33-43. doi: 10.1016/S0378-3820(97)00090-8
30. Bansal P, Hall M, Realff MJ, Lee JH, Bommarius AS. Multivariate statistical analysis of X-ray data from cellulose: a new method to determine degree of crystallinity and predict hydrolysis rates. *Bioresour Technol.* 2010;101(12):4461-71. doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.068
31. Khanjanzadeh H, Khodayari A, Amiri S, Shakeri A, Ashori A. Surface chemical functionalization of cellulose nanocrystals by 3-aminopropyltriethoxysilane. *Int J Biol Macromol.* 2017;106:1288-96. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.08.136
32. Shrestha S. Chemical, structural and elemental characterization of biosorbents using FE-SEM, SEM-EDX, XRD/XRPD and ATR-FTIR techniques. *J Chem Eng Process Technol.* 2016;7(3):1000295. doi: 10.4172/2157-7048.1000295

33. Nunes CS, Castillo AS, Ramos JP, Gomes LG, Cardoso FJB, Vilhena KSS. Potencial de resíduo não processado proveniente da obtenção do silício metálico como adsorvente do corante vermelho de metila. *Rev Mater.* 2023 Apr;28(1):e20230018. doi: 10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0018
34. Hu J, Tang X, Qi M, Cheng J. New models for estimating the sorption of sulfonamide and tetracycline antibiotics in soils. *Int J Environ Res Public Health.* 2022 Dec;19(24):16771. doi: 10.3390/ijerph192416771
35. Miranda FR, Lima AS, Oliveira MM, Costa JS, Moreira FMT. Activated carbons for effective pharmaceutical adsorption. *J Environ Chem Eng.* 2025;13(5):110385. doi: 10.1016/j.jece.2025.110385