

## Inibidores de Corrosão Verde: Uma Breve Revisão Bibliométrica

### *Green Corrosion Inhibitors: A Brief Bibliometric Review*

Lucas Costa da Silva,<sup>a</sup>  Maria Alexandra de Sousa Rios<sup>a,\*</sup> 

<sup>a</sup> Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 714, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Inovações Tecnológicas e Especialidades Químicas, CEP 60440-554, Fortaleza-CE, Brasil

\*E-mail: [alexandrarios@ufc.br](mailto:alexandrarios@ufc.br)

Submissão: 26 de Junho de 2024

Aceite: 7 de Agosto de 2024

Publicado online: 20 de Agosto de 2024

Due to corrosion, it is estimated that approximately one-third of steel is lost annually, resulting in a global economic impact equivalent to approximately 3% of GDP. An ecologically accepted approach to dealing with this issue is the use of natural inhibitors, whose effectiveness can reach an impressive 95%. Therefore, due to the importance of this topic, this study aimed to carry out a bibliometric analysis of scientific production related to green corrosion inhibitors. The research was conducted using the Web of Science database, with the search terms “inhibitors and green and corrosion”. The data obtained was analyzed using the VOSviewer software, which synthesizes information into bibliometric networks, allowing the identification of the most cited documents, prominent authors, the main keywords used, in addition to the countries and institutions most active in research. The search for articles on Web of Science resulted in 2868 scientific documents, covering the period from 1981 to 2024. China is the country that produces the most research on green corrosion inhibitors and has the publications best related to other nations. From the results, some research gaps were highlighted, so this work serves as guidance on the proposed topic.

**Keywords:** Bibliometrics; corrosion; green corrosion inhibitors.

### 1. Introdução

A corrosão é um problema crítico que afeta todos os sistemas industriais e também causa danos significativos em residências e no meio ambiente. Estima-se que, devido à corrosão, um terço do aço é perdido anualmente, resultando em um prejuízo econômico global equivalente a cerca de 3% do PIB.<sup>1-2</sup>

Conforme Raja e Sethuraman (2008),<sup>3</sup> para mitigar os efeitos nocivos da corrosão, existem algumas soluções disponíveis incluindo os inibidores inorgânicos, que são conhecidos por sua toxicidade e elevado custo econômico. Recentemente, o uso de extratos vegetais naturais e orgânicos como inibidores de corrosão verde (ICVs) tem atraído a atenção de muitos pesquisadores. Os ICVs têm muitas vantagens, pois geralmente são biodegradáveis, não tóxicos, ecologicamente aceitáveis, baratos, prontamente disponíveis, renováveis e seguros de usar. Conforme dados da Web of Science a aplicação desses inibidores ocorre em diversos setores e áreas de pesquisa, sendo as principais a Química, Ciência de Materiais, Engenharia, Física, Eletroquímica e Metalurgia.

Um exemplo notável de aplicação de ICVs é o trabalho de Al-akhraS e Mashaqbeh (2021),<sup>4</sup> que avaliou o potencial das folhas de eucalipto, *Eucalyptus tereticornis*, como inibidor de corrosão. Neste estudo, o eucalipto foi utilizado como revestimento nas armaduras de aço utilizando quatro concentrações (0%, 20%, 30% e 40%). A inspeção visual das vigas, uma das análises realizadas, demonstrou que a quantidade de produto de corrosão diminuiu com o aumento das concentrações. Basicamente, todos os resultados experimentais mostraram que as folhas de eucalipto têm potencial para serem utilizadas como inibidor de corrosão verde em armaduras de aço. Isso representa um avanço para a área da construção civil, já que a destruição do aço de reforço devido à corrosão tornou-se um problema agudo em muitas estruturas, resultando em grande perda econômica em todo o mundo.

Por sua vez, Valdez-Salas *et al.* (2021),<sup>5</sup> estudaram o comportamento de inibição da corrosão do aço carbono em concreto armado, sob corrosão em meio simulado salino por extrato orgânico natural de neem, *Azadirachta indica*, em comparação com três inibidores inorgânicos comerciais. Os resultados obtidos sugeriram que os tratamentos com neem não alteraram a integridade do concreto e dos parâmetros físico-químicos, conseguindo uma proteção anticorrosiva de longo prazo de 95% após 182 dias de avaliação. Outros trabalhos com concreto armado e objetivos semelhantes podem ser encontrados na literatura.<sup>6-10</sup>

Além da construção civil, a proteção de metais contra a corrosão é preocupação de diversas áreas, tanto na indústria quanto em escala laboratorial. Geralmente, soluções corrosivas como  $H_2SO_4$ ,  $NaOH$ ,  $KOH$ ,  $HNO_3$ ,  $NaCl$ ,  $HCl$  e similares são utilizadas como agentes corrosivos para testar vários tipos de metais. O aço de baixo teor de carbono é frequentemente encontrado em pesquisas de inibição de corrosão, devido à sua ampla aplicabilidade na indústria. Na pesquisa de Eddy, Odoemelam e Ama,<sup>11</sup> foi investigado o extrato etanólico de *Ocimum gratissimum* como inibidor verde da corrosão de aço carbono em  $H_2SO_4$ . Os resultados indicaram que o extrato etanólico de *O. gratissimum* é um inibidor de adsorção para a corrosão do aço. Verificou-se que a eficiência de inibição do extrato diminui com o aumento do período de contato e com o aumento da temperatura, mas aumentou com a concentração do inibidor. A partir da tendência observada para a variação da eficiência de inibição com a temperatura e da faixa de valores obtidos para energia de ativação ( $52,24 - 55,24 \text{ kJ mol}^{-1}$ ) e energia livre de adsorção ( $-19,15$  a  $-17,06 \text{ kJ mol}^{-1}$ ), um mecanismo de adsorção física foi proposto para a adsorção do inibidor na superfície do aço carbono.

Geralmente, os ICVs agem na superfície metálica promovendo a proteção do metal e funcionam como inibidores mistos, ou seja, o mecanismo de adsorção pode ocorrer por quimissorção e fisissorção. É do interesse dos pesquisadores analisar os componentes fitoquímicos presentes em cada tipo de extrato, já que as ações inibitórias dos extratos vegetais são devidas à presença de alguns compostos orgânicos, como saponina, tanino, alcaloide, esteroides, glicosídeos e aminoácidos. A maioria desses compostos possui centros para elétrons  $\pi$  e grupos funcionais como  $-C=C-$ ,  $-OR$ ,  $-OH$ ,  $-COOH$ ,  $-NR_2$ ,  $-NH_2$  e  $-SR$ , que fornecem elétrons facilitando a adsorção do inibidor na superfície do metal.<sup>12</sup>

Considerando a importância deste tipo de pesquisa e seu aumento recente da produção científica, o objetivo deste trabalho foi fazer uma revisão bibliométrica sobre os ICVs a partir de dados de publicações encontradas na Web of Science (WoS). De acordo com os termos de busca “*inhibitors and green and corrosion*”, os dados foram obtidos e tratados no software VOSviewer, gerando mapas bibliométricos que ajudaram a sintetizar o estado da arte sobre a pesquisa com ICVs.

## 2. Inibidores de Corrosão Verde (ICVs)

Os ICVs são considerados vantajosos em comparação com os inibidores inorgânicos devido à sua característica renovável e à abundância na natureza. Diversas opções de inibidores naturais não interferem na indústria alimentícia, o que favorece ainda mais sua aplicação em estudos sobre corrosão metálica. Conforme a Figura 1, adaptada de Miralrio e Vázquez,<sup>13</sup> praticamente todas as partes de uma planta podem ser utilizadas na preparação de extratos inibidores de corrosão.

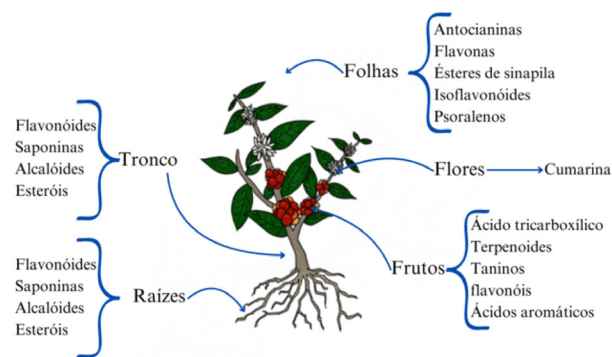


Figura 1. Partes básicas de uma planta e seus compostos ativos comuns

Podemos encontrar na literatura científica diversas pesquisas com a finalidade de analisar extratos verdes e inibidores naturais para corrosão com os mais diferentes tipos de metais, ligas e meios corrosivos. O efeito inibidor do ácido cafeico na corrosão de aço-carbono em  $H_2SO_4$   $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$  foi investigado por Souza e Spinelli (2009),<sup>14</sup> e avaliado por perda de peso, polarização potenciodinâmica, impedância eletroquímica e espectroscopia Raman. As diferentes técnicas confirmaram a adsorção do ácido cafeico na superfície do aço-carbono e conseqüentemente, a inibição do processo de corrosão. O ácido cafeico atua diminuindo a área de reação catódica disponível e modificando a energia de ativação da reação anódica.

Por sua vez Qiang *et al.* (2018),<sup>15</sup> analisaram a inibição da corrosão do aço X70 em  $HCl$   $1 \text{ mol.L}^{-1}$  pelo extrato de folhas de *Ginkgo* (GLE), que foi investigada por meio de medições eletroquímicas. A eficiência de inibição excedeu 90% na presença de  $200 \text{ mg.L}^{-1}$  de GLE em todas as temperaturas testadas. A excelente capacidade de inibição, atribuída à formação de filmes inibidores-adsortivos na superfície do aço X70, foi confirmada por microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo e microscopia de força atômica.

Em outra pesquisa Qiang *et al.* (2017),<sup>16</sup> estudaram quatro líquidos iônicos à base de alil-imidazólio com vários comprimentos de cadeias alquílicas que foram desenvolvidos para a inibição da corrosão do cobre em ácido sulfúrico  $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ . Técnicas eletroquímicas, caracterização morfológica e cálculos teóricos foram combinados para investigar o desempenho e o mecanismo de inibição. Os resultados mostraram que a circunstância de corrosão do cobre em solução aquosa sulfúrica foi eficientemente inibida pelos líquidos iônicos. Seu desempenho favorável é atribuído à formação de filmes de adsorção, que seguem a isoterma de adsorção de Langmuir. Além disso, as eficiências de inibição dos compostos investigados aumentam com o comprimento da cadeia alquílica ligada ao anel imidazólio.

No trabalho de Moretti, Guidi e Grion (2004),<sup>17</sup> os efeitos de inibição da triptamina (TA) no comportamento de corrosão do ferro ARMCO em  $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$  de ácido sulfúrico des aerado (na faixa de temperatura de  $25$  a  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ) foi estudada em testes de curta e longa duração ( $1$ ,  $24$  e  $72 \text{ h}$ ) por meio de curvas potenciodinâmicas (PCM) e espectroscopia

de impedância eletroquímica (EIS). Verificou-se que a TA é um inibidor de corrosão eficaz para o ferro ARMCO, mesmo a 55 °C e 72 horas, mas apenas a 10 milímetros. Nesta concentração os percentuais de inibição, calculados por PCM e EIS, variaram de 90 a 99% e não diminuíram com o tempo e com o aumento da temperatura. A adsorção de TA seguiu a isoterma de Bockris-Swinkels ( $x = 1$ ). Os dados termodinâmicos indicaram que, nas soluções mais concentradas, a TA também foi quimicamente absorvida na superfície do ferro.

O extrato de *T. erecta* (flor de calêndula) [ETE] foi relatado por Mourya, Banerjee e Singh (2014),<sup>12</sup> como um bom inibidor de corrosão de aço carbono em solução de  $H_2SO_4$  0,5 mol.L<sup>-1</sup>. A eficiência de inibição aumentou com a concentração do extrato de calêndula. O efeito inibitório do ETE pode ser explicado em termos de adsorção das formas neutra e protonada da luteína. Os parâmetros de polarização potenciodinâmica revelaram que o inibidor afeta as reações anódicas e catódicas e atua como um inibidor misto. O processo de adsorção seguiu a isoterma de Langmuir, em todas as temperaturas estudadas, e a energia livre e a entalpia de adsorção indicaram que a luteína envolve principalmente a fisissorção. Estudos morfológicos apoiaram a formação de uma camada protetora sobre a superfície do aço. O cálculo químico quântico indicou que a inibição é alcançada majoritariamente pela adsorção da luteína protonada.

Já na pesquisa de Verma *et al.* (2016),<sup>18</sup> os efeitos dos substituintes doadores (-CH<sub>3</sub> e -OH) e retiradores de elétrons (-NO<sub>2</sub>) na eficiência de inibição da corrosão de quatro heterociclos fundidos com pirimidina (CARBs), substituídos à base de glucosamina na corrosão do aço macio em HCl 1 mol.L<sup>-1</sup>, foram investigados usando técnicas gravimétricas, eletroquímicas, de morfologia de superfície microscopia eletrônica de varredura (SEM), microscopia de força atômica (AFM), espectroscopia de raios X dispersiva de elétrons (EDX) e computacionais, no caso, simulação de Monte Carlo. Estudos gravimétricos mostraram que o desempenho de proteção dos compostos aumenta com a concentração. Descobriu-se que ambos os grupos retiradores (-NO<sub>2</sub>) e doadores de elétrons (-CH<sub>3</sub> e -OH) aumentam a eficiência da inibição, mas o efeito é mais pronunciado com os substituintes doadores. Verificou-se que os compostos eram inibidores do tipo catódico, conforme inferido a partir dos resultados de estudos de polarização potenciodinâmica. Estudos EIS sugeriram que os compostos estudados inibem a corrosão metálica por adsorção na superfície metálica. A adsorção das moléculas inibidoras na superfície do aço foi ainda apoiada por análises SEM, AFM e EDX.

Na pesquisa de Quraishi (2010),<sup>19</sup> a inibição da corrosão do aço carbono em soluções de ácido clorídrico e ácido sulfúrico pelo extrato das folhas de *Murraya koenigii* foi estudada utilizando técnicas de perda de massa, espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), polarização linear e polarização potenciodinâmica. Verificou-se que a inibição aumenta com o aumento da concentração do extrato. O efeito da temperatura, tempo

de imersão e concentração de ácido no comportamento de corrosão do aço-carbono em HCl 1 M e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5 mol.L<sup>-1</sup> com adição de extrato também foi estudado. Supôs-se que a inibição ocorresse através da adsorção das moléculas inibidoras na superfície do metal. A energia de ativação, bem como outros parâmetros termodinâmicos (Q, ΔH\* e ΔS\*) para o processo de inibição foram calculados. Os parâmetros termodinâmicos mostraram forte interação entre o inibidor e a superfície do aço carbono. Os resultados indicaram que o extrato das folhas de *M. koenigii* poderia servir como um eficaz inibidor da corrosão do aço-carbono em meio ácido clorídrico e sulfúrico.

Dehghani *et al.* (2019),<sup>20</sup> avaliaram a eficiência de inibição do extrato de flor de borragem, utilizando abordagens eletroquímicas e de análise de superfície. Os resultados esclareceram que, ao aumentar o tempo de imersão e a concentração do inibidor, foi alcançada uma eficiência máxima de 91% no eletrólito contendo 800 ppm de extrato da flor após 2,5 h de imersão. Medidas potenciodinâmicas comprovaram que o inibidor verde atuou como um tipo misto com pouca ação catódica prevalente. As observações morfológicas SEM e AFM mostraram que à medida que a concentração do inibidor aumentava, a superfície do aço tornava-se mais lisa e as fissuras desapareciam. Os resultados do teste de ângulo de contato revelaram que a hidrofobicidade da superfície foi melhorada pelo aumento da concentração do extrato. Os resultados teóricos de simulações moleculares e cálculos de Teoria do Funcional de Densidade evidenciaram a adsorção de ácido láctico, ácido nicotínico e compostos de caroteno do inibidor na superfície do aço por meio de interações de compartilhamento de carga entre moléculas de extrato de flor de borragem e locais de superfície.

Em suma, a atividade de inibição da corrosão em muitos desses extratos vegetais pode ser devida à presença de constituintes heterocíclicos como alcalóides, flavonóides etc. Mesmo a presença de taninos, celulose e compostos policíclicos normalmente aumenta a formação de filme sobre a superfície do metal, auxiliando assim na inibição da corrosão. Na maioria das pesquisas a adsorção do extrato na superfície metálica obedece à isoterma de Langmuir, Equação (1), já que os dados gravimétricos obtidos com extratos verdes apresentam resultados de ajuste satisfatórios quando se utiliza este modelo.

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + c \quad (1)$$

onde, C é a concentração do extrato,  $\theta = \eta / 100$  significa o grau de cobertura de superfície do aço e  $K_{ads}$  é a constante de equilíbrio de adsorção.

A isoterma de adsorção pode ser determinada usando a relação entre o grau de cobertura superficial e várias concentrações de inibidor, ou seja, a partir dos dados dos ensaios de perda de massa. É considerada a isoterma com melhor ajuste aquela que apresenta coeficiente de

correlação ( $R^2$ ) mais próximo de 1. Um notável trabalho cujo processo de adsorção segue a isoterma de Langmuir é a pesquisa de Benahmed *et al.* (2020),<sup>21</sup> que trata de uma investigação sobre as propriedades de adsorção e inibição de corrosão do extrato butanólico de *Elaeoselinum thapsioides* e seu efeito sinérgico com *Reutera lutea* (Desf.) Maires (Apiaceae) em aço carbono A283 em solução de ácido clorídrico.

A partir dos dados obtidos pela isoterma de Langmuir a constante de equilíbrio pode ser determinada. Por sua vez os valores da constante podem ser usados para calcular a energia livre de Gibbs do processo de adsorção, Equação (2).

$$\Delta G_{ads}^0 = -RT \ln(C.k_{ads}) \quad (2)$$

A adsorção pode ser classificado como fisissorção quando os valores de  $\Delta G_{ads}^0 \geq -20$  kJ/mol e é classificado com quimissorção para  $\Delta G_{ads}^0 \leq -40$  kJ/mol. O sinal negativo indica que ocorreu a espontaneidade do processo de adsorção.<sup>22</sup>

Como pode ser observado nas seções subsequentes, a quantidade de publicações sobre ICVs é relativamente grande, o que oportuniza usar recursos de análise bibliométrica para gerar mais *insights* sobre o atual estado destas pesquisas, que são de interesse tanto para a indústria quanto para aplicações laboratoriais que necessitam se tornar cada vez mais sustentáveis.

### 3. Metodologia

Foi realizada a busca por documentos na base de dados Web of Science (WoS) utilizando os termos “*inhibitors and green and corrosion*”, com a aplicação dos seguintes filtros: tipo de documento – artigo, idioma – inglês e foram excluídos documentos de acesso antecipado. A busca foi conduzida para todos os campos dos artigos, incluindo título, resumo, palavras-chave etc. Os dados exportados foram tratados no software VOSviewer e os tipos de análises realizadas podem ser vistas na Figura 2, que demonstra uma síntese das etapas desta pesquisa.



Figura 2. Etapas da pesquisa bibliométrica sobre ICVs

A bibliometria que emprega técnicas estatísticas e matemáticas para analisar dados bibliográficos agregados, desempenha um papel crucial na ampliação do conhecimento em comunidades científicas específicas, além de possibilitar a avaliação dos comportamentos e da qualidade das publicações. Por meio dos métodos bibliométricos, os pesquisadores podem conduzir revisões de literatura de maneira mais eficiente, uma vez que são guiados para os trabalhos mais influentes e conseguem mapear o campo de pesquisa de forma objetiva, sem viés subjetivo.<sup>23-28</sup>

### 4. Resultados e Discussão

Conforme descrito na metodologia, a busca de artigos na Web of Science resultou em 2868 documentos científicos, abrangendo o período de 1981 a 2024. A primeira análise bibliométrica realizada com esses dados foi a identificação dos documentos mais citados. Para criar a rede bibliométrica apresentada na Figura 3, foram selecionados os artigos citados no mínimo 50 vezes, a fim de filtrar os documentos mais relevantes dentro desse conjunto. Mesmo após essa filtragem, um total de 427 documentos foi identificado, formando uma rede de colaboração densa que inclui 15 clusters distintos. Esse resultado sugere uma extensa interconexão entre os pesquisadores na rede.

O VOSviewer representa os documentos citados a partir do nome do primeiro autor, como pode-se notar na Figura 3. Os círculos e nomes com maior destaque representam os documentos que possuem mais força de ligação com outras pesquisas. Com uma observação mais profunda os documentos mais relevantes desta rede são dos pesquisadores Moretti, Guidi e Grion (2004),<sup>17</sup> e Amin *et al.* (2007),<sup>29</sup> e, Souza e Spinelli (2009),<sup>14</sup> Qiang *et al.* (2018),<sup>15</sup> Qiang *et al.* (2017),<sup>16</sup> todos com mais de 400 citações na base de dados WoS. Estes certamente são artigos muito relevantes nas pesquisas sobre ICVs.

No que diz respeito aos autores mais citados entre os 2868 artigos, que envolvem um total de 8461 autores e coautores, optou-se por gerar a rede bibliométrica apresentada na Figura 4, selecionando no VOSviewer os autores com no mínimo 10 publicações e que foram citados no mínimo 10 vezes. Essa configuração resultou em 107 pesquisadores distribuídos em 6 clusters. A análise também evidencia a qualidade da rede de colaboração entre os pesquisadores, o que por sua vez influencia significativamente o avanço das pesquisas relacionadas aos ICVs.

Por outro lado, os países mais relevantes envolvidos na pesquisa de ICVs podem ser observados na Figura 5. Entre as 93 nações representadas pelos pesquisadores, optou-se por incluir aquelas com pelo menos 10 publicações e 10 citações, resultando em 49 países que atendem a esses critérios. Isso sugere um crescimento significativo nesse campo de pesquisa. Os países líderes nessa rede incluem China, Irã, Egito e Arábia Saudita.



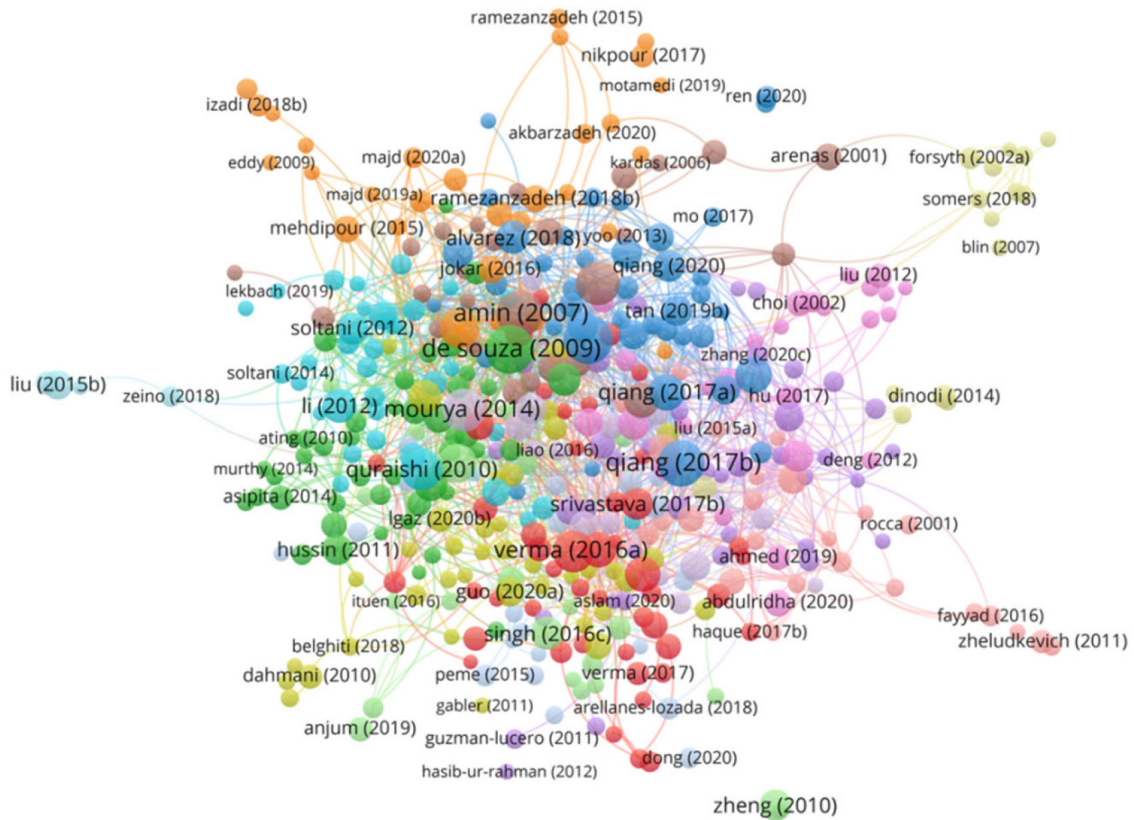


Figura 3. Rede bibliométrica dos artigos mais citados entre as pesquisas com inibidores de corrosão verdes (ICVs)

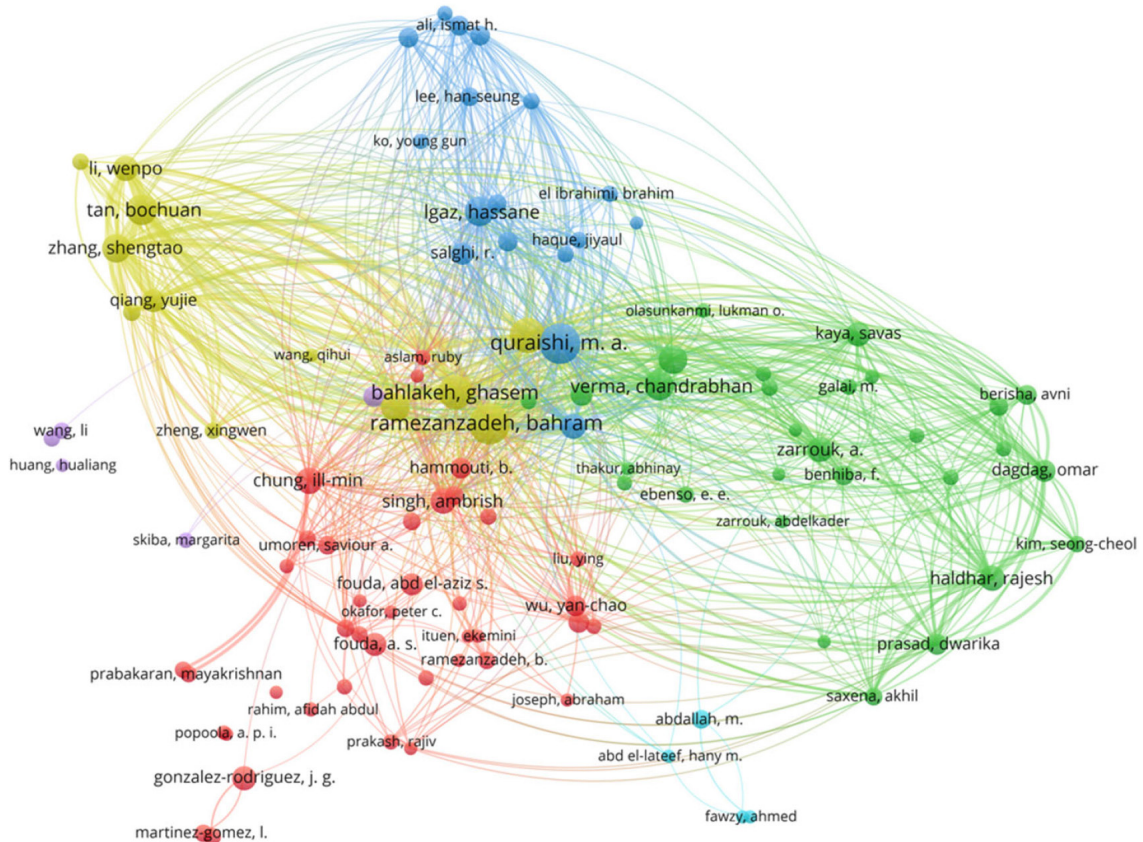


Figura 4. Rede bibliométrica dos autores mais citados entre as pesquisas com inibidores de corrosão verdes (ICVs)

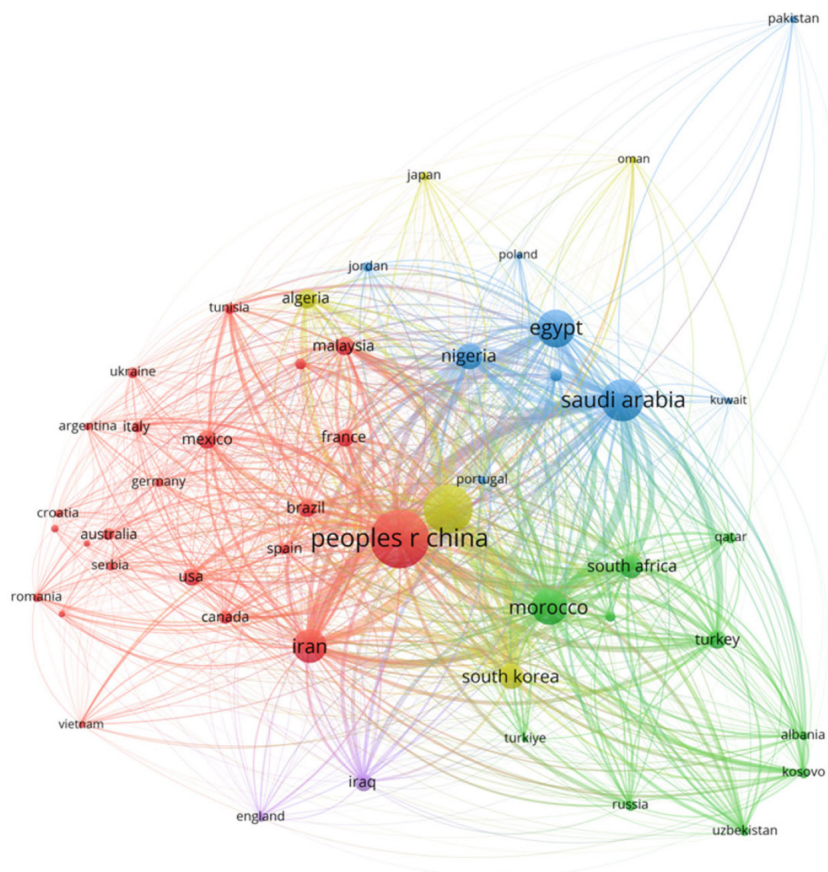
Da mesma forma que nas configurações da rede bibliométrica anterior, a Figura 6 ilustra a interconexão entre as instituições de pesquisa mais citadas no contexto das pesquisas sobre ICVs, resultando em uma rede composta por 126 instituições distribuídas em 6 clusters.

A última análise bibliométrica realizada foi a das palavras-chave, que desempenha um papel crucial na compreensão do estado atual das pesquisas sobre ICVs e na identificação de possíveis lacunas, oferecendo assim novas oportunidades de contribuição para a área de pesquisa em questão. A Figura 7 apresenta a rede bibliométrica das principais palavras-chave relacionadas à pesquisa sobre ICVs. Essa rede foi formada com termos citados no mínimo 30 vezes nas publicações, resultando em 151 termos que se enquadram nessa configuração.

É perceptível que os metais mais frequentemente testados nas pesquisas são alumínio, ferro, aço macio e aço carbono. Além disso, as soluções corrosivas de HCl e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> são as mais utilizadas nos estudos. Há um interesse recorrente na análise por FTIR dos extratos verdes, possivelmente para uma melhor compreensão de sua composição e de que forma contribuem para a inibição da corrosão. Observa-se também que o estudo da adsorção dos extratos na superfície metálica é um tema central, uma vez que os extratos vegetais geralmente atuam como inibidores de corrosão mistos e interagem com os metais e ligas por meio de quimissorção e fisissorção.

Quando alterou-se a visualização na Figura 7 para o formato de escala temporal, obteve-se a Figura 8, na qual pode-se observar os termos mais comuns ao longo do tempo e aqueles recentemente incorporados às pesquisas com ICVs. Percebe-se que os termos menos comuns incluem líquidos iônicos e o uso de óleos, possivelmente como agentes corrosivos, juntamente com análises eletroquímicas. Isso está em linha com o termo “óleo”, pois análises eletroquímicas utilizando óleos ou biodiesel como eletrólitos implicam em modificações nas células eletroquímicas devido à baixa condutividade desses eletrólitos. Além disso, surgem como tendências menos exploradas o uso de recursos de simulação, como métodos de Monte Carlo, dinâmica molecular e teoria do funcional de densidade. Também é possível observar uma descoberta recente indicando que a Isoterma de Langmuir é a mais apropriada para ajustar dados de pesquisas de corrosão metálica com extratos verdes.

Um fato relevante em grande parte das pesquisas sobre inibidores de corrosão verdes é a ausência de testes específicos que comprovem a não toxicidade dos extratos utilizados. Além disso, raramente um composto é isolado e identificado como o principal agente inibidor de corrosão nos extratos. Isso provavelmente se deve à dificuldade de acesso a equipamentos e testes que facilitem o fracionamento dos extratos e a identificação precisa desses compostos. Países como China, Irã, Arábia Saudita e Egito demonstram estar



**Figura 5.** Rede bibliométrica dos países mais citados entre as pesquisas com inibidores de corrosão verdes (ICVs)



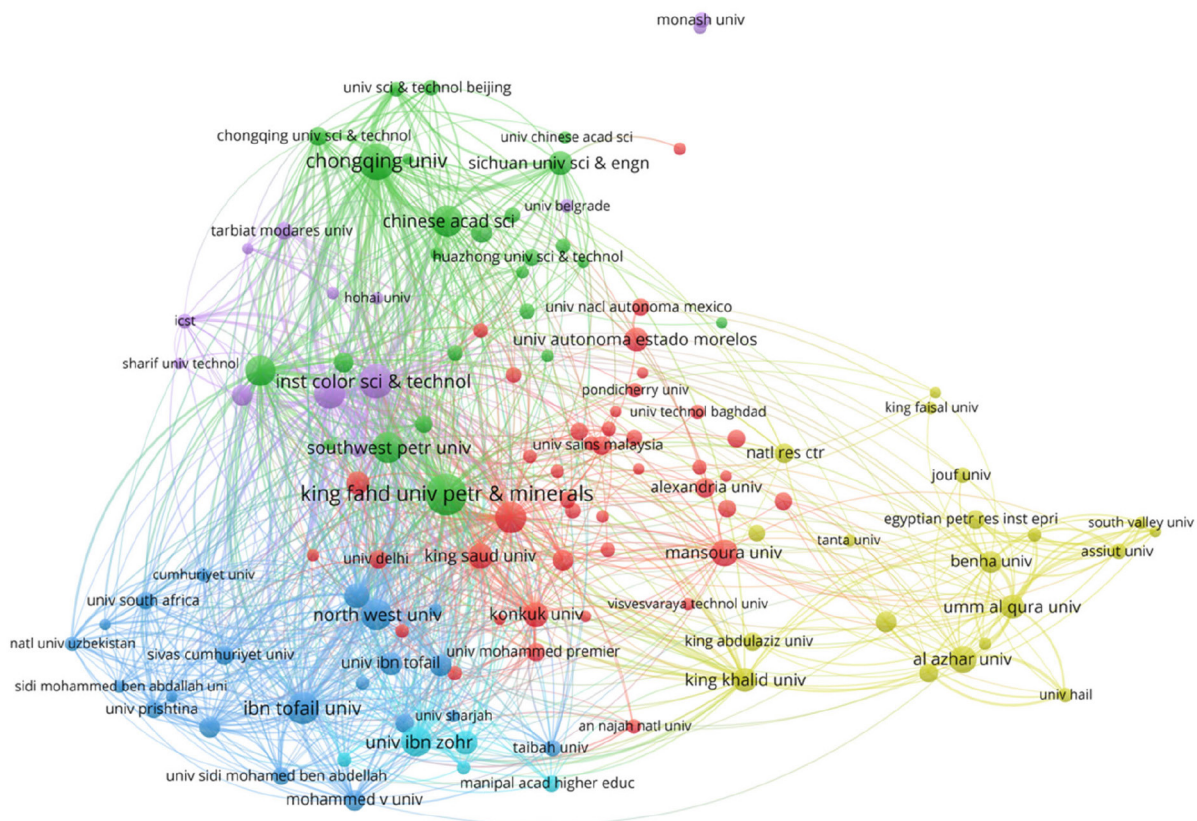


Figura 6. Rede bibliométrica das instituições de pesquisa mais citadas entre as pesquisas com inibidores de corrosão verdes (ICVs)

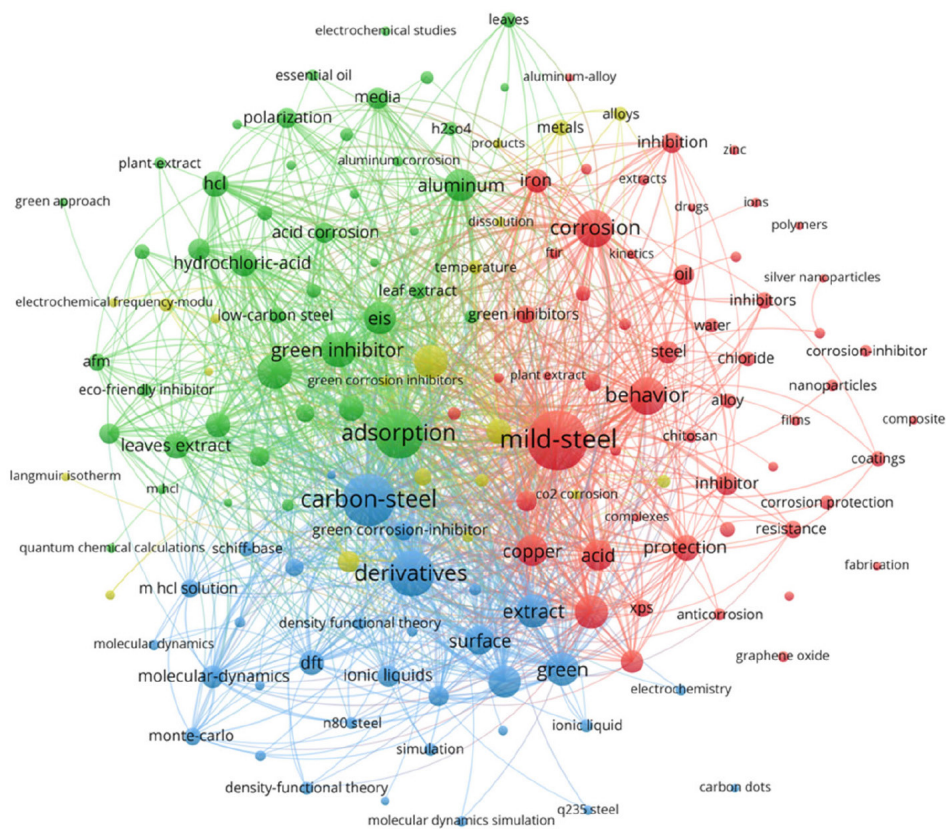
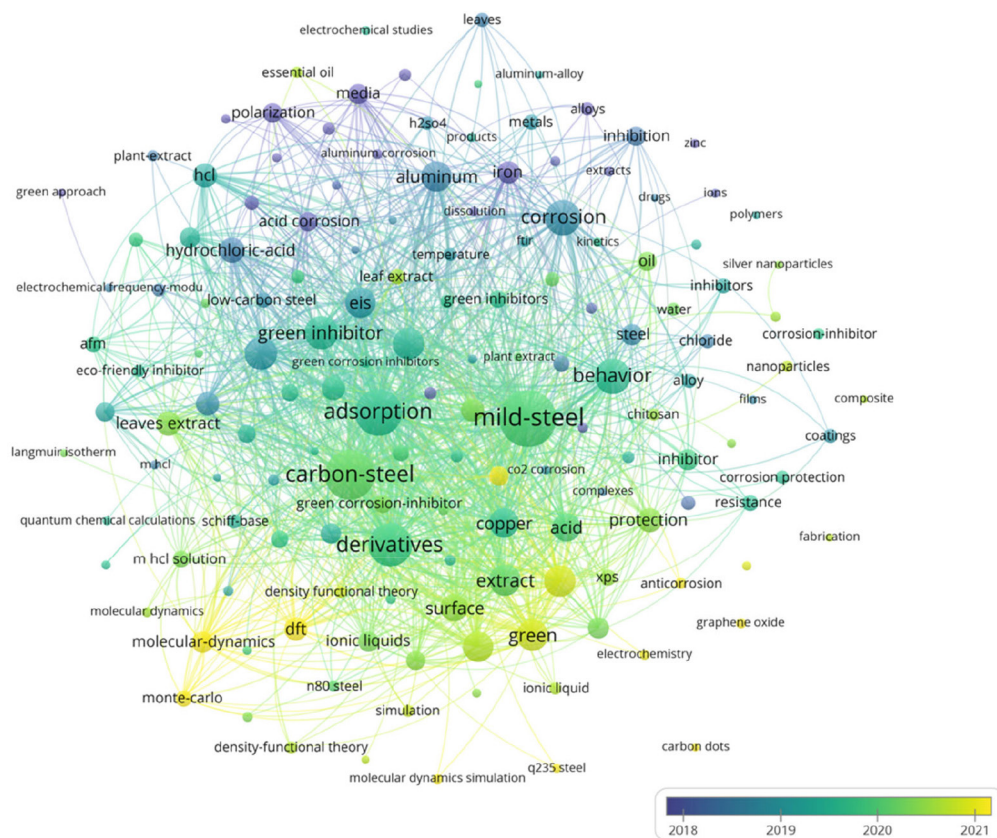


Figura 7. Rede bibliométrica das palavras-chave mais citadas entre as pesquisas com inibidores de corrosão verdes (ICVs)



**Figura 8.** Rede bibliométrica em escala temporal das palavras-chave mais citadas entre as pesquisas com inibidores de corrosão verdes (ICVs)

na vanguarda das pesquisas, conforme evidenciado pela rede bibliométrica da Figura 5.

Por outro lado, países ricos em biomassas, como o Brasil, ainda precisam prestar contribuições mais relevantes. O Brasil apresenta apenas 87 publicações entre as 3425 encontradas na Web of Science com os termos de busca especificados na metodologia, sem aplicação de filtros de pesquisa. Entre essas 87 publicações, as mais relevantes de acordo com o relatório de citações da Web of Science estão

listadas na Tabela 1, que também mostra os inibidores de corrosão utilizados nas pesquisas.

## 5. Considerações Finais

A partir das 2868 publicações encontradas na Web of Science entre 1981 e 2024, foram realizadas análises bibliométricas detalhadas utilizando o software

**Tabela 1.** Relevância dos artigos científicos de pesquisadores brasileiros sobre inibidores de corrosão verde com base no número de citações.

Meio corrosivo	Material testado	Inibidor de corrosão	Nº de citações na WoS	Referência
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Aço macio	Ácido cafeico	507	Souza e Spinelli (2009) <sup>14</sup>
HCl	Aço macio	1-benzil-4-fenil-1 H -1,2,3-triazol	201	Fernandes <i>et al.</i> (2019) <sup>30</sup>
HCl	Aço carbono	1,3-Dibenziltioureia (DBTU), 1-Benzil-3-diisopropiltioureia (DPTU) e 1,3-Dibenzilureia (DBU)	172	Torres <i>et al.</i> (2014) <sup>31</sup>
HCl	Aço macio	Extrato bruto de <i>Ircinia strobilina</i>	117	Machado <i>et al.</i> (2019) <sup>32</sup>
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Cobre	Caféina	83	Souza <i>et al.</i> (2012) <sup>33</sup>
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Aço macio	Extrato de <i>Hymenaea stigonocarpa</i>	61	Policarpi e Spinelli (2020) <sup>34</sup>
HCl	Aço carbono	Extratos aquosos de casca de manga e laranja	51	Rocha, Gomes e D'Elia (2014) <sup>35</sup>
HCl	Aço carbono	Líquido da casca da castanha de caju (LCC)	38	Furtado <i>et al.</i> (2019) <sup>36</sup>
HCl	Aço macio	1,3-Benzodioxol-5-carboxaldeído (Piperonal ou Heliotropina), 2-cianoguanidina ou Heliotropina), 2-cianoguanidina 4-metoxibenzaldeído (p-anisalaldeído) e tris(hidroximetil) aminometano	37	Fernandes <i>et al.</i> (2020) <sup>37</sup>
HCl	Aço carbono	Extratos de bagaço de uva	33	Rocha <i>et al.</i> (2012) <sup>38</sup>



VOSviewer, destacando a relevância dos inibidores de corrosão verdes em diversas áreas de pesquisa. A rede bibliométrica entre os pesquisadores revela relações sólidas e uma densa interconexão entre as principais instituições de pesquisa, sugerindo que a investigação sobre inibidores de corrosão verdes está em crescimento. As publicações destacam os compostos fitoquímicos bioativos que proporcionam a inibição da corrosão, mas raramente fracionam os extratos para identificar o composto predominante como inibidor de corrosão. Também foi identificada uma lacuna na necessidade de analisar a toxicidade dos extratos, comprovando que não são nocivos à saúde humana ou ao meio ambiente. Em suma, nesta breve revisão, o leitor encontrará um direcionamento das pesquisas sobre inibidores de corrosão verdes, incluindo os extratos vegetais e suas aplicações em estudos de corrosão, principalmente em materiais como aço carbono, aço macio, cobre, entre outros.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (402757/2023-8, 310037/2023-9); FUNCAP (PS1-00186-00255.01.00/21; 07548003/2023); FINEP e CAPES (código de financiamento 001).

## Referências Bibliográficas

- Chowdhury, M. A.; Hossain, N.; Ahmed, M. M. S.; Islam, M. A.; Islam, S.; Rana M. M.; Green tea and tulsi extracts as efficient green corrosion inhibitor for aluminum alloy in alkaline medium. *Heliyon* **2023**, *9*, 6. [Crossref]
- Hossain, N.; Chowdhury, M. A.; Kchaou, M.; An overview of green corrosion inhibitors for sustainable and environment friendly industrial development. *Journal of Adhesion Science and Technology* **2021**, *35*, 673. [Crossref]
- Raja, P. B.; Sethuraman, M. G.; Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review. *Materials Letters* **2008**, *62*, 113. [Crossref]
- Al-akhraS, N.; Mashaqbeh, Y.; Potential use of eucalyptus leaves as green corrosion inhibitor of steel reinforcement. *Journal of Building Engineering* **2021**, *35*, 101848. [Crossref]
- Valdez-Salas, B.; Vázquez-Delgado, R.; Salvador-Carlos, J.; Beltrán-Partida, E.; Salinas-Martinez, R.; Cheng, N.; Curiel-Alvarez, M.; Azadirachta indica leaf extract as green corrosion inhibitor for reinforced concrete structures: corrosion effectiveness against commercial corrosion inhibitors and concrete integrity. *Materials* **2021**, *14*, 3326. [Crossref]
- Lame, A.; Kokalari E.; Jano, A.; Use of green inhibitors for concrete armor protection against H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> corrosion. *Asian Journal of Chemistry* **2013**, *25*, 17. [Crossref]
- Asipita, S. A.; Ismail, M.; Majid, M. Z. A.; Majid, Z. A.; Abdullah, C. S.; Mirza, J.; Green Bambusa Arundinacea leaves extract as a sustainable corrosion inhibitor in steel reinforced concrete. *Journal of Cleaner Production* **2014**, *67*, 139. [Crossref]
- Palanisamy, S. P.; Maheswaran, G.; Kamal, C.; Venkatesh. G.; PROSOPIS JULIFLORA—A green corrosion inhibitor for reinforced steel in concrete. *Research on Chemical Intermediates* **2016**, *42*, 7823. [Crossref]
- Ramesh, T.; Chauhan, D. S.; Quraishi, M. A.; Coconut Coir Dust Extract (CCDE) as green corrosion inhibitor for rebar steel in concrete environment. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition* **2021**, *10*, 618. [Crossref]
- Dacio, L. J. P.; Rincón, O. M. T. DE; Álvarez, L. X.; Castañeda, H.; Román, L. Q.; Troconis, B. C. R.; Evaluating 1-Benzyl-4-Phenyl-1H-1, 2, 3-Triazole as a Green Corrosion Inhibitor in a Synthetic Pore Solution to Protect Steel Rebars. *Corrosion* **2023**, *79*, 405. [Crossref]
- Eddy, N. O.; Odoemelam, S. A.; Ama, I. N.; Ethanol extract of Ocimum gratissimum as a green corrosion inhibitor for the corrosion of mild steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Green Chemistry Letters and Reviews* **2010**, *3*, 165. [Crossref]
- Mourya, P.; Banerjee, S.; Singh, M. M.; Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by Tagetes erecta (Marigold flower) extract as a green inhibitor. *Corrosion Science* **2014**, *85*, 352. [Crossref]
- Miralrio, A.; Espinoza Vázquez, A.; Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: a review. *Processes* **2020**, *8*, 942. [Crossref]
- Souza, F. S. de.; Spinelli, A.; Caffeic acid as a green corrosion inhibitor for mild steel. *Corrosion Science* **2009**, *51*, 642. [Crossref]
- Qiang, Y.; Zhang, S.; Tan, B.; Chen, S.; Evaluation of Ginkgo leaf extract as an eco-friendly corrosion inhibitor of X70 steel in HCl solution. *Corrosion Science* **2018**, *133*, 6. [Crossref]
- Qiang, Y.; Zhang, S.; Guo, L.; Zheng, X.; Xiang, B.; Chen, S.; Experimental and theoretical studies of four allyl imidazolium-based ionic liquids as green inhibitors for copper corrosion in sulfuric acid. *Corrosion Science* **2017**, *119*, 68. [Crossref]
- Moretti, G.; Guidi, F.; Grion, G.; Tryptamine as a green iron corrosion inhibitor in 0.5 M deaerated sulphuric acid. *Corrosion Science* **2004**, *6*, 387. [Crossref]
- Verma, C.; Olasunkanmi, L. O.; Ebenso, E. E.; Quraishi, M. A.; Obot, I. B.; Adsorption behavior of glucosamine-based pyrimidine-fused heterocycles as green corrosion inhibitors for carbon steel: experimental and theoretical studies. *The Journal of Physical Chemistry* **2016**, *21*, 11598. [Crossref]
- Quraishi, M. A.; Singh, A.; Singh, V. K.; Yadav, D. K.; Singh, A. K.; Green approach to corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid and sulphuric acid solutions by the extract of Murraya koenigii leaves. *Materials Chemistry and Physics* **2010**, *122*, 114. [Crossref]
- Dehghani, A.; Bahlakeh, G.; Ramezanzadeh, B.; Ramezanzadeh, M.; Potential of Borage flower aqueous extract as an environmentally sustainable corrosion inhibitor for acid corrosion of mild steel: electrochemical and theoretical studies. *Journal of Molecular Liquids* **2019**, *277*, 895. [Crossref]
- Benahmed, M.; Selatnia, I.; Djeddi, N.; Akkal, S.; Laouer, H.; Adsorption and corrosion inhibition properties of butanolic

- extract of *Elaeoselinum thapsioides* and its synergistic effect with *Reutera lutea* (Desf.) Maires (Apiaceae) on A283 carbon steel in hydrochloric acid solution. *Chemistry Africa* **2020**, *3*, 251. [[Crossref](#)]
22. Rubaye, A. Y. I.; Abdulwahid, A. A.; Al-baghdadi, S. B.; Alamiery, A. A.; Kadhum, A. A. H.; Mohamad, A. B.; Cheery sticks plant extract as a green corrosion inhibitor complemented with LC-EIS/MS spectroscopy. *International Journal of Electrochemical Science* **2015**, *10*, 8200. [[Crossref](#)]
  23. Ferreira, A. G. C.; Bibliometria na avaliação de periódicos científicos. *DataGramaZero-Revista de Ciência da Informação* **2010**, *11*, 1. [[Link](#)]
  24. Durieux, V.; Gevenoio, P. A.; Bibliometric indicators: quality measurements of scientific publication. *Radiology* **2010**, **255**, 342. [[Crossref](#)]
  25. Zupic, I.; Čater, T.; Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods* **2015**, *18*, 429. [[Crossref](#)]
  26. Donthu, N.; Kumar, S.; Mukherjee, D.; Pandey, N.; Lim W. M.; How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research* **2021**, *133*, 285. [[Crossref](#)]
  27. Pessin, V. Z.; Yamane, L. H.; Siman, R. R.; Smart Bibliometrics: An Integrated Method of Scientific Mapping and Bibliometric Analysis. *Scientometrics* **2022**, *127*, 3695. [[Crossref](#)]
  28. Lazarides, M. K.; Lazaridou, I. Z.; Papanas, N.; Bibliometric analysis: Bridging informatics with science. *The International Journal of Lower Extremity Wounds* **2023**, *1*, 1. [[Crossref](#)]
  29. Amin, M. A.; El-rehim, S. S. A.; El-sherbini, E. E. F.; Bayoumi, R. S.; The inhibition of low carbon steel corrosion in hydrochloric acid solutions by succinic acid: Part I. Weight loss, polarization, EIS, PZC, EDX and SEM studies. *Electrochimica Acta* **2007**, *52*, 3588. [[Crossref](#)]
  30. Fernandes, C. M.; Alvarez, L. X.; dos Santos, N. E.; Barrios, A. C. M.; Ponzio, E. A.; Green synthesis of 1-benzyl-4-phenyl-1H-1, 2, 3-triazole, its application as corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium and new approach of classical electrochemical analyses. *Corrosion Science* **2019**, *149*, 185. [[Crossref](#)]
  31. Torres, V. V.; Rayol, V. A.; Magalhães, M.; Viana, G. M.; Aguiar, L. C. S.; Machado, S. P.; D'elia, E.; Study of thioureas derivatives synthesized from a green route as corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution. *Corrosion Science* **2014**, *79*, 108. [[Crossref](#)]
  32. Fernandes, C. M.; Fagundes, S. F.; Escarpini, N.; Shewry, T.; Rocha, D. M.; Garrett, R.; Ariel, E.; *Ircinia strobilina* crude extract as corrosion inhibitor for mild steel in acid medium. *Electrochimica Acta* **2019**, *312*, 137. [[Crossref](#)]
  33. Souza, F. S.; Giacomelli, C.; Gonçalves, R. S.; Spinelli, A.; Adsorption behavior of caffeine as a green corrosion inhibitor for copper. *Materials Science and Engineering* **2012**, *32*, 2436. [[Crossref](#)]
  34. Policarpi, B. E.; Spinelli, A.; Application of *Hymenaea stigonocarpa* fruit shell extract as eco-friendly corrosion inhibitor for steel in sulfuric acid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* **2020**, *116*, 215. [[Crossref](#)]
  35. Rocha, J. C. D.; Gomes, J. A. D. C. P.; D'Elia, E.; Aqueous extracts of mango and orange peel as green inhibitors for carbon steel in hydrochloric acid solution. *Materials Research* **2014**, *17*, 1581. [[Crossref](#)]
  36. Furtado, L. B.; Nascimento, R. C.; Seidl, P. R.; Guimarães, M. J. O.; Costa, L. M.; Rocha, J. C.; Ponciano, J. A. C.; Eco-friendly corrosion inhibitors based on Cashew nut shell liquid (CNSL) for acidizing fluids. *Journal of Molecular Liquids* **2019**, *284*, 393. [[Crossref](#)]
  37. Fernandes, C. M.; Pina, V. G.; Alvarez, L. X.; Albuquerque, A. C. F.; dos Santos Júnior, F. M.; Barrios, A. M.; Ponzio, E. A.; Use of a theoretical prediction method and quantum chemical calculations for the design, synthesis and experimental evaluation of three green corrosion inhibitors for mild steel. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2020**, *599*, 124857. [[Crossref](#)]
  38. Rocha, J. C.; Gomes, J. P.; D'elia, E.; Cruz, A. G.; Cabral, L. M. C.; Torres, A. G.; Monteiro, M. V. C.; Grape pomace extracts as green corrosion inhibitors for carbon steel in hydrochloric acid solutions. *International Journal of Electrochemical Science* **2012**, *7*, 11941. [[Crossref](#)]