

Cinética de la Adsorción de Plaguicidas en Compuestos de Grafeno: Una Revisión

Carlos Marcelo Camacho Caero¹

ccamachoc@adm.emi.edu.bo

<https://orcid.org/0000-0002-5083-2572>

Escuela Militar de Ingeniería

Mcal. Antonio José de Sucre

Cochabamba – Bolivia

RESUMEN

El incremento de la concentración de plaguicidas en cuerpos de agua de los últimos años puede eliminarse por adsorción. Esta revisión se tomó los trabajos desde 2010 a 2022 considerando como criterios de selección trabajos se tuvo que sea adsorción de algún plaguicida con compuestos de grafeno y además se haya estudiado su cinética e isoterma de adsorción principalmente, separadas en cuatro etapas: Diseño de la investigación, realización de la revisión, análisis y finalmente la estructuración y redacción. Al analizar los trabajos se encontró que el pH, concentración inicial del plaguicida, relación volumen y adsorbente, temperatura de reacción, tiempo de contacto, temperatura, densidad de electrones π , área superficial específica, tiempo para el estado de equilibrio y condiciones óptimas para la pirólisis (es caso aislado), son factores que pueden influir directamente la cinética de adsorción de los plaguicidas. Este proceso se lleva a cabo por la formación de enlaces π (como enlaces π , π - π , π -alquilo, π -alcalinos, π - σ , π -apiladas y en forma de T), interacciones electrostáticas e iónicas que permiten que el plaguicida se adsorba en los diferentes compuestos de grafeno ayudándose con los átomos capaces de donar electrones como el azufre, nitrógeno, oxígeno, fósforo o precursores de puentes de hidrógeno.

Palabras clave: adsorción; compuestos de grafeno; cinética; plaguicidas.

¹ Autor principal

Correspondencia: ccamachoc@adm.emi.edu.bo

Pesticide Adsorption Kinetics on Graphene Compounds: A Review

ABSTRACT

The increase in the concentration of pesticides in bodies of water in recent years can be removed by adsorption. This review took the works from 2010 to 2022 considering as selection criteria work that had to be adsorption of some pesticide with graphene compounds and also their kinetics and adsorption isotherms have been studied mainly, separated into four stages: Research design, review, analysis, and finally the structuring and writing. When analyzing the works, it was found that the pH, initial concentration of the pesticide, volume, and adsorbent ratio, reaction temperature, contact time, temperature, π electron density, specific surface area, time for equilibrium state, and optimal conditions for the pyrolysis (it is an isolated case) are factors that can directly influence the kinetics of pesticides. This process is carried out by the formation of π bonds (as π , π - π , π -alkyl, π -alkaline, π - σ , π -stacked and T-shaped bonds), electrostatic and ionic interactions that allow the pesticide is adsorbed on the different graphene compounds with the help of atoms capable of donating electrons such as sulfur, nitrogen, oxygen, phosphorus or hydrogen bond precursors.

Keywords: *adsorption; graphene compounds; kinetics; pesticides*

Artículo recibido 12 agosto 2023

Aceptado para publicación: 15 setiembre 2023

:

INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica alrededor del 80% de la población se encuentra cerca de una fuente de agua contaminada con residuos líquidos de los cuales el 70% no recibe ningún tratamiento (Larios et al., 2015). Asimismo, la creciente demografía y la explotación descontrolada de los recursos naturales por la industria, ocasiona un aumento en la concentración de compuestos contaminantes en cuerpos hídricos (Quintero et al., 2010), provocando que emerjan nuevas moléculas más persistentes y difíciles de tratar (Peña-Guzmán et al., 2019). Entre estas los plaguicidas son catalogados en muchos estudios como sustancias químicas altamente tóxicas para los seres humanos y el medio ambiente (Rasheed et al., 2019). Además, su consumo está en aumento debido al incremento de la demanda de alimentos (Kılıç et al., 2020). Diferentes procesos de tratamiento están siendo estudiados para mitigar la contaminación por estos compuestos, por ejemplo, procesos de oxidación avanzada, ozonización, adsorción, biorreactores, biotecnología, combinación de tratamientos, etc. (Saleh et al., 2020; Shah, 2019).

Entre los diversos tratamientos una alternativa es la nanotecnología, debido a su versatilidad de uso en distintos campos porque trabaja en escalas nanométricas (Mamalis, 2007). Siendo el grafeno el compuesto más representativo de esta área ya que posee principalmente por una sola capa de átomos de carbono enlazados por enlaces sp^2 superpuestos (Duplock et al., 2004), dotándole de propiedades como adsorbente, impermeabilidad para los gases, alta conductividad térmica, alta rigidez, masa efectiva de cero, alta movilidad de los portadores de carga, ópticamente transparente (Sheehy & Schmalian, 2009), rígido, duro, fuerte debido a su disposición hexagonal (Lee et al., 2008) y la superficie actúa formando enlaces covalentes y no covalentes donando electrones o aceptando otros (Kong et al., 2014). Este puede presentarse generalmente en tres formas: polvo de grafeno, película de grafeno y líquido de grafeno (Yap & Liu, 2020). La red puede formar algunas estructuras alotrópicas como se ilustra en la [Fig. 1](#) (Geim & Novoselov, 2007; Iqbal et al., 2020; Neto & Antonio, 2006). El plano del grafeno puede recombinarse incluso utilizando otro tipo de átomos para el dopaje mejorando así sus capacidades de adsorción (Yin et al., 2020) u otra propiedad, por ejemplo si se quiere dotar de características fotocatalíticas se adiciona óxido de titanio (IV) (Bhanvase et al., 2017; Luna-Sanguino et al., 2021).

Para predecir la adsorción de los compuestos en la superficie de estos materiales es necesario considerar algunas isothermas de adsorción las cuales se manejan en la Tabla 1 y los modelos cinéticos que se resuelven para este estudio se expresan en la Tabla 2. Con la ayuda de estas isothermas y resoluciones se logra comparar los datos experimentales, prediciendo como ocurren las reacciones de adsorción y desorción, considerando las tasas de unión, desprendimiento y de manera global para poder expresar los compuestos adsorbido en función de otros que son más fáciles de medir (Fogler, 2016).

Adicionalmente el trabajo de J. Wang & Guo, (2020), describe, analiza, evalúa y resuelve los modelos matemáticos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden.

Seudo primer orden (PFO)

El equilibrio de adsorción (q_e), en muchas ocasiones, considerando un modelo lineal para este tipo de cinéticas es representado por $q_e = k_1 C_e$. k_1 con frecuencia se describe como la velocidad en la que la adsorción llega al equilibrio y también se encuentra relacionada con la variación de la adsorción respecto del tiempo (dq/dt).

Azizian, (2004), dedujo un modelo cinético utilizando las isothermas de Langmuir, esta llega a una simplificación debido a que el parámetro $C_0 \gg m q_m \theta / v$:

$$\frac{d\theta}{dt} = k_a C_0 (1 - \theta) - k_d \theta$$

Dónde, θ es la fracción ocupada en los sitios activos (0 a 1), k_a : la constante de velocidad de adsorción ($L \cdot mg^{-1} \cdot h^{-1}$), concentración inicial de adsorbente ($mg \cdot L^{-1}$), k_d : constante de velocidad de desorción (h^{-1}), m : la masa del adsorbente (g), q_m : capacidad máxima de adsorción (mg/g) y v : volumen de la solución (L)

Seudo segundo orden (PSO)

Se puede llegar a una conclusión similar partiendo de la isoterma de Langmuir como en el caso de PFO, pero en este caso la relación dq/dt está relacionado con k_2 y $(q_e - qt)^2$, además, si los parámetros de C_0/β y θ_e (β) se aproximan a 1 puede modelar la fracción de superficie recubierta en equilibrio. Este modelo de segundo orden es el paso final en el proceso de adsorción y en ciertas ocasiones puede existir desviaciones extremas.

Se consideró para la clasificación de los pesticidas criterios de origen, especie de plaga que se quiere tratar específicamente y por su función (Drum, 1980). Y además que puede ser orgánicos naturales, inorgánicos y sintéticos, este último es el más amplio de entre sus grupos se tiene organoclorados, organofosforados, carbamatos y piretroides (Abubakar et al., 2020).

En esta artículo, se trabajó la revisión del estado de arte de la cinética de la adsorción de los plaguicidas en compuestos de grafeno, realizando una recopilación de información científica producida entre 2010 y 2022, considerando parámetros de tipo de adsorbente a base de grafeno, condiciones iniciales, tiempo de contacto, isoterma de adsorción, algunas constantes, cinética de adsorción y analizando como ocurre la adsorción de los pesticidas en agua.

METODOLOGÍA

Según Snyder, (2019) una “Revisión integrativa”, está separada en cuatro etapas:

Diseño de la investigación

Se revisó las plataformas de Sciencedirect, Springer, Taylor & Francis y Google Scholar, centrando la investigación en los artículos que utilizan compuestos de grafeno para la remoción por adsorción de plaguicidas en agua (aunque estas fueran residuales o no) y que estudien sus isotermas y cinética de adsorción.

La recopilación de la información tiene un intervalo entre 2010 a 2022 considerando todo tipo de artículos de investigación, revisiones críticas y de literatura.

Los criterios de selección de los artículos son los siguientes:

Tipo de fuente de agua: Agua residual o agua sintética preparada con los plaguicidas de interés.

Tipo de tratamiento: Adsorción en compuestos de grafeno

Reacción química con otros compuestos: Puede existir o no

Análisis de la cinética de remoción o por lo menos de las isotermas.

Palabras clave: agua residual, plaguicidas, cinética de remoción, adsorción y algunos pesticidas específicos como la atrazina.

Realización de la revisión

Se buscó las combinaciones de las palabras clave los artículos en las bibliotecas elegidas realizando una recopilación de los artículos científicos que en su resumen cumplieran con la mayoría de los criterios de selección. Verificando fuentes bibliográficas y palabras clave.

Análisis

La principal información extraída de los artículos científicos es: tipo de fuente de agua, tipo de grafeno, condiciones del experimento, cinética, isothermas de adsorción, constantes y discusión de resultados. Para posterior depuración de los artículos que no cumplieran los criterios de aceptación y con el objetivo de la investigación.

En caso de ser artículos científicos donde existieron experimentación con diferentes concentraciones, tipos, temperaturas o alguna otra variable solo se consideró los resultados más relevantes alcanzados por los autores.

a) Estructuración y redacción

Con los datos recopilados se sintetizó todo en una tabla, al tratarse de una recopilación de estudios que se centran en la cinética de adsorción en ciertos plaguicidas específicos se hizo una breve discusión de los logros alcanzados hasta el momento y que posibles aplicaciones se pueden dar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron alrededor de 86 artículos, de los cuales se fueron depurando y seleccionando los que cumplieran con los criterios de aceptación, los resultados alcanzados se muestran en la Tabla 3.

Los resultados sugieren que la mayoría de las isothermas siguen el modelo de Langmuir o Freundlich con cinéticas de pseudo primer y segundo orden describiendo el comportamiento de la adsorción de los plaguicidas en estos compuestos de grafeno.

Las estructuras analizadas fueron, láminas, tubos, paredes simples y múltiples, configuraciones 3D, reducido, óxido reducido, dopajes con nanopartículas magnéticas, óxidos metálicos como titanio o hierro, biocarbon, nitrógeno, óxido de sílice (IV), celulosa carbonizada activada, adición de fenilos y polisulfona, polímeros magnéticos

El pH, concentración inicial del plaguicida, relación volumen y adsorbente, temperatura de reacción, tiempo de contacto, temperatura, densidad de electrones π , área superficial específica,

tiempo para el estado de equilibrio y condiciones óptimas para la pirólisis (es caso aislado), son factores que pueden influir directamente la cinética de adsorción de los plaguicidas sobre los compuestos de grafeno. En adición, las variaciones en la composición superficie de las capas del adsorbente pueden favorecer o perjudicar según la estructura química del plaguicida estudiado, llevando a remociones mayores al 90% cambiando las condiciones de algunas variables. Además, el uso de solo la estructura del grafeno aplicado para la adsorción de ciertos compuestos no llega a tener un alto rendimiento, por lo que enriquecerlo con nanopartículas magnéticas, o metálicas, el óxido de grafeno, nanotubos con paredes múltiples y algunos otros compuestos para incorporar, mejora el proceso. Conjuntamente, la fuerza iónica del medio afecta a las interacciones electrostáticas entre los compuestos de grafeno y los plaguicidas.

Los procesos de adsorción se ven relacionados con la transferencia de masa de los plaguicidas del seno del agua a tratar y la difusión externa e interna sobre los compuestos de grafeno, llegando a formar enlaces π , π - π , π -alquilo, π -alcalinos, π - σ , π -apiladas y en forma de T. Las reacciones para generar estos enlaces pueden conservar o cambiar la estructura de la molécula del plaguicida, inclusive hasta eliminar algunos elementos de su cadena para mejorar el proceso. Algunos átomos que pueden coadyuvar en el proceso de adsorción son los que promueven su capacidad de donar electrones como el fósforo, azufre, oxígeno, nitrógeno y promotores de puentes de hidrógeno. Por otro lado, los impedimentos estéricos por aglomeración de partículas en las capas de los compuestos de grafeno pueden modificar la cinética de adsorción, por lo que es necesario en algunos casos dopar la superficie favoreciendo la distribución.

El pH afecta la carga superficial tanto de los compuestos de grafeno como del plaguicida, la temperatura principalmente cuando se ve que la difusión interna y el tiempo que alcanza el equilibrio son pasos limitantes porque estos están directamente relacionados con el tiempo de contacto y la concentración inicial del pesticida y adsorbente.

ILUSTRACIONES, TABLAS, FIGURAS.

Figura 1. Estructura fundamental de todos los alótropos de carbono (Iqbal et al., 2020)

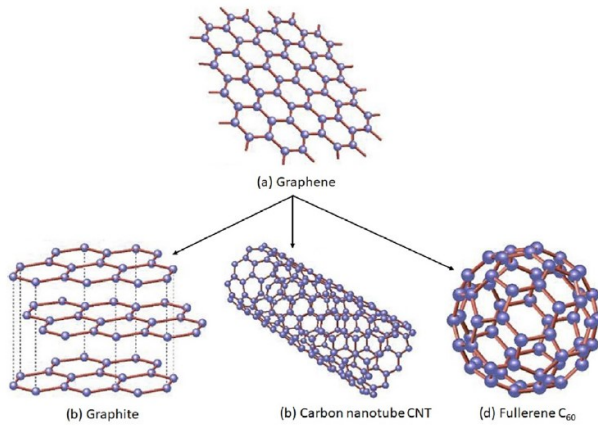


Tabla 1.
Isotermas de adsorción

Expresión	Parámetros	Descripción	Isoterma
$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_e} + \frac{C_e}{q_m}$	2: $\frac{1}{q_m K_e}$ y $\frac{1}{q_m}$	Reacciones sólido-gas	Langmuir
$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e$	2: $\log K_F$ y $\frac{1}{n}$	Aplicable para fases heterogéneas	Freundlich
$\beta_s \ln C_e = -\ln\left(\frac{K_s}{q_e}\right) + \ln(a_s)$	3: A, B y β	Combinación entre Langmuir y Freundlich	SIPS
$q_e = \frac{RT}{b} \ln K_T + \frac{RT}{b} \ln C_e$	2: b, K_T	Se asume un calor de adsorción y efectos indirectos entre adsorbente/adsorbato	Temkin
$\frac{q_e}{C_e} = K_s(Q_s - q_e)$	2: K_s y Q_s	Representa situación intermedia muy cercana a la isoterma de Langmuir	Scatchard
$\log(q_e) = \log(Q_0) + a \left(\frac{\varepsilon_{sw}}{V_s}\right)^b$	$\varepsilon_{sw} = RT \ln\left(\frac{C_{sw}}{C_e}\right)$	Expresión modificada	Polanesi-Manes

Nota: Tabla basada en los estudios de Ayawei et al., (2017); Ohtani, (2011); Rashed, (2018); Xia & Ball, (1999); Xu et al., (2013)

Tabla 2

Modelos cinéticos de adsorción en su forma diferencial e integrada

Modelo	Ecuación diferencial	Forma integrada	Autor
PFO	$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	Lagergren, (1898)
PSO	$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t}$	Ho et al., (1996)
Langmuir- Hinshelwood	$-\frac{dC}{dt} = \frac{k_T \cdot KC}{1 + KC}$	$-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = k_1 t (KC \gg 1)$	Kumar et al., (2008)
Elovich	$\frac{dq_t}{dt} = \alpha e^{-\beta q_t}$	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t)$	Elovich & Larinov, (1962)

Nota: Tabla basada en los estudios de Kumar et al., (2008); J. Wang & Guo, (2020)

Tabla 3. Tabla 3. Estudios realizados de adsorción con compuestos de grafeno para diferentes plaguicidas en aguas

Nº	Tipo de grafeno	Plaguicidas	Condiciones experimentales	Eficiencia	Tiempo de tratamiento	Isoterma y Cinética	Constantes	Fuente
1	Fe ₃ O ₄ -TiO ₂ /rGO (FTG)	Atrazina	Luz solar Diferentes pH Co = 15 mg/L	98% 100% (a pH 3)	40 min	Langmuir-Hinshelwood pseudo primer orden	Constante cinética 0,1062 min ⁻¹ (a pH 3) 0,0917 min ⁻¹ (a pH 5)	Boruah & Das, (2020)
2	rGO con biocarbón	Atrazina	Capacidad de adsorción 67,55 mg/g	81%	Tratamiento en continuo	Langmuir Seudo primer Orden Freunlich Seudo segundo orden	RGO-BC q _e (mg/g) = 58,13855 k ₁ (1/h) = 2,02988 RGO-BC q _e (mg/g) = 68,11989 k ₂ (g/(mg/h)) = 0,01995	Zhang et al., (2018) en Thakur & Kandasubramanian, (2019)
3	MGO-NGC	Hexaconazol (H) y clorpirifos (C)	pH 3 a 10 Co = 5 a 100 mg/L		90 min	Langmuir Seudo segundo orden	C: q _e (mg/g) = 78,74 k _L (L/mg) = 1,12 H: q _e (mg/g) = 93,46 k _L (L/mg) = 0,89 Cinética k ₂ (g/mg·min) = 0,0037 (C) y 0,0038 (H)	Nodeh et al., (2019)
4	Óxido de grafeno	Clorpirifos (c) y malatión (m)	Adsorbente: 0,5 g/L pH = 7 Conc. Clorpirifos = 27,96 mg/L Conc. Malatión = 61,5 mg/L	89,03% (Malatión) 88,17% Clorpirifos)	50 min	Langmuir Seudo segundo orden	C: q _{max} (mg/g) = 98,039 k _L (L/mg) = 0,1335 R _L = 0,21129 q _e (mg/g) = 53,1914 k ₂ (g/mg·min) = 0,0048 M: q _{max} (mg/g) = 1666,7 k _L (L/mg) = 0,0036 R _L = 0,97781 q _e (mg/g) = 109,8901 k ₂ (g/mg·min) = 0,0159	Yadav et al., (2019)
5	Puntos cuánticos de grafeno	Oxamil	En el equilibrio pH = 8 Co = 100 mg/L	Aprox. 40 a 95%	25 min	Langmuir Seudo segundo orden	K _L (L/g) = 0,2557 q _m (mg/g) = 125,00 R _L = 0,5	Agarwal et al., (2016)

			Agitación = 250 rpm 0,6g de adsorbente			PSO $q_e(\text{mg/g}) = 84,03$ $k_2(\text{g/mg}\cdot\text{min}) = 0,0082$ $q_{e,\text{exp}}(\text{mg/g}) = 84,11$	
6	Nanotubo de carbono de pared simple (SWCNT)	Ácido 4-Cloro-2metilpenoxiacético (MCPA)	Co= 2,5 a 100 mg/L pH = 5 1 g de SWCNT Condiciones nativas	>99% con dos ciclos		Freunlich $\text{Log}K_f = 4,41 \pm 0,025$ $1/N = 0,52 \pm 0,02$ $K_d = 11871$	De Martino et al., (2012)
7	Nanocompuesto de óxido de grafeno (GO-Fe ₃ O ₄)	Dicuat	Co = 10 a 100 mg/L pH = 3-8 T = 25, 35 y 50°C Cinética Co = 10, 20 y 50 mg/L adsorbente 1 mg/mL a	96,60%	30 min	Langmuir Seudo segundo orden Mejores resultados Constantes cinéticas $C_o = 50 \text{ mg/L}$ $k_2 (\text{g/mg}\cdot\text{h}) = 0,6092$ $q_{e,\text{cal}}(\text{mg/g}) = 44,8431$ Isoterma Para 25°C $q_m(\text{mg/g}) = 74,85$ $K_L (\text{L/mg}) = 0,527$ $R_L = 0,019 \text{ a } 0,159$	Hao et al., (2015)
8	Óxido de grafeno/mesoporos de sílica (GO/SiO ₂)	Paraquat	Mejores resultados 0,02 g de GO/SiO ₂ Co = 14 mg/L pH = 7	93,50%	2 min para el equilibrio	Langmuir $q_m(\text{mg/g}) = 29,15$ $K_L(\text{L/mg}) = 0,585$ $R_L = 0,108$	Dehghani et al., (2021)
9	Óxido de Grafeno Magnético (MGO)	Malation	pH = 3-11 Concentración: 25, 50, 75, 100, 125 y 150 mg/L	70,88 a 91,92%	150 min para el equilibrio	Langmuir Seudo segundo orden $q_m(\text{mg/g}) = 43,29$ $b(\text{L/mg}) = 0,413$ $R_L = 0,088$	Kalantary et al., (2016)

		Adsorbente: 0.8 a 4.8 g/L			$k_2(\text{g}/\text{mg}\cdot\text{min}) = 0,1717$ $q_{e,\text{cal}} = 10,48$ (para $C_o=25$ mg/L)			
10	Óxido de grafeno reducido magnético (MrGO)	4-heptylphenol (4-HP), 4-tert-octylphenol (4-OP), and 4-nonylphenol (4-NP)	pH = 4-11 $C_{\text{NaCl}}=0$ a 25% $C_{\text{Ácido Húmico}} = 0$ a 20 mg/L $C_o = 5-100$ mg/L	Cercano al 100% en las mejores condiciones	Llega al 90% de remoción con 30 min en las mejores condiciones	Freundlich Seudo segundo orden	4-HP $k(\text{g}/\text{mg}\cdot\text{min})=0,006$ $q_e(\text{mg}/\text{g})=50,00$ 4-OP $k(\text{g}/\text{mg}\cdot\text{min})=0,008$ $q_e(\text{mg}/\text{g})=50,00$ 4-NP $k(\text{g}/\text{mg}\cdot\text{min})=0,026$ $q_e(\text{mg}/\text{g})=50,00$	J. Li et al., (2021)
11	Óxido de grafeno magnético-beta-ciclodextrina (M-MOF)	Tiametoxam, imidacloprid, acetamiprid, nitenpiram, dinotefuran, clotianidina y tiacloprid	$C_o = 0,5-100$ mg/L Conc. del adsorbente = 5mg/mL		30 min	Langmuir y Freundlich Seudo segundo orden	Tiacloprid(L) $y=3,6381x+0,3214$ (IsoT) $y=0,5148x+6,6917$	G. Liu et al., (2017)
12	Nanoláminas de óxido de grafeno	Atrazina	$C_o = 10, 20, 30, 40$ y 50 mg/L $T = 27,69$ °C $\text{pH} = 5,37$		180 min	Langmuir	Se probaron Ho, Sobkowsk-Czerwi y Avrami Mejor Avrami $C_o=50$ mg/L (existe para todas las concentraciones) $Q_e(\text{mg}/\text{g})=152,66$ $K_{av}(1/\text{min})=0,0106$ $n_{Av}=0,1031$	Muthusaravanan et al., (2021)
13	Oxido de grafeno Grafeno Nanotubos de paredes	Acetamiprid	$C_o = 10$ ppm	Oxido de grafeno (92,5%) Grafeno (97,5%)	15 min llega al equilibrio (Óxido de grafeno)	Langmuir Seudo segundo orden	Oxido de Grafeno $E_{ads} = +0,28$ (kcal/mol) MWNT $E_{ads} = +0,95$ (kcal/mol)	Razavi et al., (2022)

	múltiples (MWCNT)			MWCNT (93,5%)				
14	Varios compuestos de grafeno estudiados	Clorpirifos (C), paratión (P) y malatión (M)	Co = de 0.3 a 5 ug/L pH 3 a 11 T=25°C t 0 a 1 h	25.6 mg/g, 135 mg/g y 61.9 mg/g respectivamente	0 a 1 h	SIPS y Langmuir Seudo segundo orden	SIPS: P: $K_s(L/mg)=13.8$; $a_s(L/mg)=1.07$; $b_s=2.60$. M: $K_s(L/mg)=47.7$; $a_s(L/mg)=4.24$; $b_s=3.65$. C: $K_s(L/mg)=24.2$; $a_s(L/mg)=1.63$; $b_s=1.49$.	Wanjeri et al., (2018) en Garba et al., (2021)
15	Variedad de compuestos de grafeno	Principalmente Acetamiprid, o-nitrofenol, Imidacloprido	pH 2 a 7 Co=0.2ppm a 300 mg/L	<75% a 99.4%	30 a 1200 min	Langmuir Freundlich Seudo segundo orden		Rana et al., (2021)
16	Óxido de grafeno y nanopartículas magnéticas	Dieldrin y endrin	pH = 4 T. Ambiente Co=5 mg/L	86% y 74%	30 min	Langmuir Seudo segundo orden y seudo primer orden	3.89 mg/g·min (dieldrin) 1.55 mg/g·min (endrin)	Shrivastava et al., (2017)
17	Óxido de grafeno y celulosa carbonizada activada	Pesticidas organofosforados (Clorpirifos y otros: diclorovos, dimetoato, clorfenfenfos, metidatión y profenofos)	Co=2 mg/L 5 a 120 mg compuesto 0 a 5 min agitación pH 1 a 11 Oscilación: 170 rpm de 1 a 300 min T: 298, 308 y 318 K	>80%	Variable, para obtener datos	Langmuir Seudo segundo orden	$Q_m(mg/g) = 135.14$ $K_L(L/mg) = 1.6817$ a 308 K; $R^2 = 0.9976$	Suo et al., (2018)
18	Grafeno magnético modificado con fenilo/sílice mesoporosa (MG-MS-Ph)	Avermectina, imidacloprid, acetamiprid, pyridaben, phoxim, dursban,	Co=391, 1859, 1776, 4514, 7830, 4955, 46138 y 48430 µg/L respectivamente	Aproximadamente entre 5 y 80%	140 min	Seudo primer orden		X. Wang et al., (2017)

		isocarbophos y dichlorvos						
19	Óxido de grafeno-Fe ₃ O ₄	2,4-diclorofenoxiacético	Co=50-750 mg/L pH = 3.0	65.48%	160 y 470 min	Freundlich Seudo segundo orden	K _F (L/g)=16.933 N=3.624 k ₂ (g/mg·min)=0.0124 q _e (mg/g)=14.8148 para 75 mg/L	Nethaji & Sivasamy, (2017) en Marcelo et al., (2021)
20	Tridimensional/óxido de grafeno/magnético	2,4-diclorofenoxiacético		88%	120 min	Langmuir Seudo segundo orden	Q _{max} (mg/g)=5.62 K _L (L/mg)=0.62 R _L =0.03 q _e (mg/g)=4.32 k ₂ (g/mg·min)=0.006	Hajighasemkhan et al., (2022)
21	Nanopartículas magnéticas compuestas incorporadas en láminas GO (GO@ α-γ-Fe ₂ O ₃)	Atrazina	Co=1-80 mg/L 0.5-4.0 g/L adsorbente pH 2 - 12 T=15 a 45°C	71%	4 h y 8 h para el equilibrio	Langmuir Seudo segundo orden	Isoterma T=25°C q _{max} (mg/g)=38.814 K _L =0.044 Cinética K ₂ (g/mg·min) = 0.067 q _{ecal} (mg/g) = 15.793	Andrade et al., (2019)
22	MWCNT MWCNT-PEA MWCNT-PEA-DOM	Malation	Co = 2 a 10 ppm 1 a 10 mg de adsorbente T = 5 a 55°C pH = 2 a 12	98.34%	5-90 min (50 min)	Langmuir Seudo segundo orden	MWCNT-PEA Q _o (mg/g) = 17.11 K _L (L/mg) = 10.99 q _e (mg/g·min) = 12.01 k ₂ (mg/g·min) = 0.06	Massad et al., (2022)
23	NTPM magnético con marcos de imidazolato zeolítico-67 (Fe ₃ O ₄ -MWCNT-ZIF67)	Butacloro	Co = 2 a 17 ppm (50 mL de solución) 0.01 a 0.09 g del adsorbente pH 3 a 9 T = 20 a 40 °C	Aprox. 80%	5 a 125 min	Temkin Seudo segundo orden	B _T (J/mol) = 1.7659 K _T (L/g) = 4.6427	Azizzadeh et al., (2022)

24	GO - plata	Lindano	Co = 2 mg/L	99.9%	15 min	Seudo primer orden		Sen Gupta et al., (2015)
25	MWCNT	Malation	Co = 6 mg/L 0.1 a 0.5 g/L Adsorbente pH = Neutro	57%	2 a 30 min	Seudo segundo orden		Burakov et al., (2020)
26	GO/TiO ₂ /polisulfona	2,4-D, glifosato, trifluralina y butacloro	Para la adsorción Co = 3 a 21 ppm T = 25°C 10g/L adsorbente	Para 10% de TiO ₂ Glifosato (53%) 2,4 D (61%) Butacloro (69%) Trifluralina (73%)	24 h de agitación	Langmuir	Para 1 g/L, q _{max} (mg/g) Glifosato (26.59) 2,4 D (19.08) Butacloro (9.44) Trifluralina (7.69)	Hosseini & Toosi, (2019)
27	Óxido de grafeno reducido magnético (rGO/Fe ₃ O ₄)	Glifosato	Co = 40 a 140 mg/L (10 mL) pH = 5.5 (variación 3 a 10) 10 mg de adsorbente Fuerza iónica del medio (0.001 a 0.1 mol/L)	Mayor alcanzado 86%	24 h agitación (colecta de muestra cada 20 min)	Langmuir Seudo segundo orden	b(L/mg) = 0.0013 q _m (mg/g) = 65.402	Y. Li et al., (2018)
28	Ferrihidrita cargada en el óxido de grafeno (FeOOH-GO) y GO	Diazinón	Co = 2.5 a 50 mg/L (50 mL) 40 mg de adsorbente	60 a > 90% (40% de FeOOH en FeOOH-GO)	250 min	Langmuir	GO K = 136.0576 Q _m = 37.3901 FeOOH-GO K = 1.0521 Q _m = 23.2003	X. Li et al., (2020)
29	Sílice recubierta de grafeno	11 diferentes plaguicidas	Co = 10 mg/L (20 mL)	9/11 >90%	5 min	Clorfenvinfos Freundlich Malation	Clorfenvinfos K _F (mg/g)(L/mg) ^{1/n} = 1.1790 n = 1.4780	X. Liu et al., (2013)

			90 a 170 mg adsorbente pH = 3 a 11			Langmuir	Malation $q_m(\text{mg/g}) = 4.8780$ $K_L(\text{L/mg}) = 0.4606$	
30	GO funcionalizado por nanopartículas magnéticas de óxido de hierro ($\alpha\text{-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)	Glifosato	Co = 20 ppm (20 mL) con 20 mg adsorbente. Co = 1 a 80 mg/L pH = 2 a 12 (0.5 a 3.0 g/L de adsorbente). T = 15-45°C	92%	2 h	Langmuir Seudo segundo orden	$K_2(\text{g/mg}\cdot\text{min}) = 0.024$ $q_{\text{ecal}}(\text{mg/g}) = 18.733$ T=15°C $q_m(\text{mg/g}) = 46.844$ $K_L = 0.436$ T=25°C $q_m(\text{mg/g}) = 41.925$ $K_L = 0.295$	Santos et al., (2019)
31	MWCNT	Diurón	Co = 25 a 150 $\mu\text{g/L}$ 2 g/L adsorbente pH = 2-8 T = 20 – 35°C	90%	60 min	Freundlich Seudo primer orden	$k_F(\mu\text{g/L}) = 4.26$ $n(\mu\text{g/L}) = 1.01$ $k_1(1/\text{min}) = 0.052$ $q_e(\mu\text{g/g}) = 45.50$	Al-Shaalan et al., (2019)
32	OMWCNT, OMWCNT-Fe ₃ O ₄ y OMWCNT- κ -carragenano-Fe ₃ O ₄	Dibromuro de dicuat	Co = 5.43; 10.9; 16.3 mg/L pH = 6.5	OMWCNT>O MWCNT-Fe ₃ O ₄ > OMWCNT- κ -carragenano-Fe ₃ O ₄	24 h	Langmuir Seudo segundo orden	OMWCNT $k_2(10^{-2} \text{ g/mg}\cdot\text{min}) = 17.3$ $h(\text{mg/g}\cdot\text{min}) = 29.1$ $q_{\text{max}}(\text{mg/g}) = 58.3$ $K_L(\text{L/mg}) = 1.20$	Duman et al., (2019)
33	Nanotubo de carbono	Fenurón	Co = 25 – 150 $\mu\text{g/L}$ 25 – 300 mg/L CNT pH = 2 a 8	90%	60 min	Freundlich Seudo primer orden	$k_1(1/\text{min}) = 0.051$ $q_e(\mu\text{g/g}) = 45.0$ $k_F(\mu\text{g/g}) = 4.25$ $n(\text{L}/\mu\text{g}) = 0.99$	Ali et al., (2019)
34	Fe ₃ O ₄ /CNTs con polidopamina (PDA)	Metribuzina	Co = 5 mg/L 10 mg del adsorbente a 10 mL de sol	74% (100% a pH 6)	40 min	Freundlich Seudo segundo orden Freundlich	$q_e(\text{mg/g}) = 5.77$ $K_2 = 0.016$ $K_F(\text{L/mg}) = 3.314$ $1/n = 0.594$	Elmi et al., (2020)

35	Polímeros magnéticos molecularmente impresos basados en CNT	Propoxur, pirimicarb y promecarb	Co = 1 mg/L 10 mg de adsorbente en 10 mL de sol.	90.5 y 98.6%		Scatchard Seudo segundo orden	Q/C = 0.21-0032Q K _d = 31.2 g/L Q _{max} (mg/g) = 6.6	Gao et al., (2015)
36	CNT	Atrazina	Co = 1 a 30 mg/L T = 288, 296 y 304 K Vol. Sol. 23 mL Con 13.4 a 63.9 mg/g de adsorbente	Para 30 mg/L 63.9 mg/g Mayor remoción	84 h	Polanyi-Manes (PMM) Seudo segundo orden	Co(mg/L) = 1.0 q _{e,cal} (mg/g) = 13.8 k ₂ (g/mg·g) = 0.011 T=296 K log(Qo)(cm ³ /g) = 1.696 a(mg/L) = -0.002 b(mg/L) = 1.361	Rambabu et al., (2012)
37	CNT magnéticos de paredes múltiples (Fe ₃ O ₄ -MWCNT)	Carbarilo	Co=10 mg/L (50 mL) pH = 6 0.2 g/L adsorbente 150 rpm agitación	>90%	120 min	Langmuir Seudo segundo orden	Co(mg/L) = 20.0 q _{e,cal} (mg/g) = 97.57 k ₂ (g/mg·g) = 0.0017 q _{max} (mg/g) = 68.2 b(L/mg) = 0.212	Khaghani et al., (2020)
38	GO, rGO y nanoplaquetas	Atrazina	Experimento batch T = 22°C Co = 6.25 a 150 g/mL	98.7%	9 h	SIPS Elovich	rGO K _s (L/mg) = 0.0001 a _s (L/mg) = 9.66E-8 b _s = 4.40 α(mg/g) = 2.77E+6 β(g/mg) = 0.0114	Cheng et al., (2022)
39	(Escoria Angelicae Dahuricae	Isoprocarb, metomilo y carbarilo	Co=4-100 mg/L pH=7	70%	30 min equilibrio	Metomilo: Freundlich	K _F (mg/g)=0.01257 1/n=4.46 Q _c (mg/g)=38.92	Du et al., (2021)

	Radix), hierro nano-cero-valente y óxido de grafeno (AS/NZVI/GO)					Seudo segundo orden	$K_2(\text{g/m}\cdot\text{min})=0.0026$	
40	Óxido de grafeno magnético y carboximetilcelulosa	Clorpirifos	Co = 2 a 20 m/L pH = 7 Tiempo de contacto 28 min Conc. Adsorbente 0.15g/L	93.1%	28 min	Langmuir Seudo segundo orden	$K_c(\text{L/mg})=2.3$ $q_m(\text{mg/g})=108.3$ $q_e(\text{mg/g})=97.3$ $k_2(\text{g/mg}\cdot\text{min})=0.037$	Dolatabadi et al., 2022)
41	MOF MIL 101(Cr) decorado con nanocapas de óxido de grafeno	2.4-diclorofenoxiacético	pH=3-8 Co=25 a 200 mg/L Conc. Adsorbente 10 a 50 mg/L	93.7	125 min	Langmuir Seudo Segundo orden	$K_c(\text{L/mg})=0.292$ $q_m(\text{mg/g})=476.9$ $q_e(\text{mg/g})=454.6$ $k_2(\text{g/mg}\cdot\text{min})=0.00024$	Khaloo et al., (2022)

CONCLUSIONES

Los diferentes compuestos de grafeno estudiados en este artículo muestran una amplia gama de variantes que pueden ser utilizadas para la adsorción de los plaguicidas en el agua, utilizando nanocompuestos que actualmente su investigación cuenta con varios avances. Se observa también que no solo el grafeno en su estructura más simple es el compuesto principal para el tratamiento sino otros como óxidos, nanoaluminas, óxido de grafeno magnético, nanotubos, entre otros.

Los plaguicidas en la actualidad conllevan una contaminación bastante problemática debido a sus características fisicoquímicas, ya que con ínfimas cantidades pueden llegar a generar contaminaciones altamente peligrosas. Se están desarrollando diferentes métodos para la remoción aplicando nanomateriales debido a su selectividad, amplitud de rangos y características químicas y físicas.

Al estudiar los modelos cinéticos y de adsorción en compuestos de grafeno los resultados muestran que una gran mayoría de los plaguicidas siguen una cinética de pseudo primer y segundo orden con isothermas de Langmuir y Freundlich. Los factores que pueden afectar a la cinética de adsorción son el pH, concentración inicial del plaguicida, relación volumen y adsorbente, temperatura de reacción, tiempo de contacto, temperatura, densidad de electrones π , área superficial específica y tiempo para el estado de equilibrio. Estos procesos generan diferentes tipos de enlaces π (como enlaces π , π - π , π -alquilo, π -alcalinos, π - σ , π -apiladas y en forma de T), interacciones electrostáticas e iónicas que permiten que el plaguicida se adsorba en los diferentes compuestos de grafeno, pero en algunos casos como las estructuras de estos compuestos son muy variables se necesitan adsorbentes específicos con dopajes que ayuden a mejorar para la eliminación de los pesticidas en el agua. Así mismo, los átomos capaces de donar electrones como el azufre, nitrógeno, oxígeno, fósforo o precursores de puentes de hidrógeno ayudan al proceso de eliminación.

LISTA DE REFERENCIAS

Abubakar, Y., Tijjani, H., Egbuna, C., Adetunji, C. O., Kala, S., Kryeziu, T. L., Ifemeje, J. C., & Patrick-Iwuanyanwu, K. C. (2020). Chapter 3 - Pesticides, History, and Classification (C. Egbuna & B. B. T.-N. R. for P. Sawicka Disease and Weed Control, Eds.; pp. 29–42).

- Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819304-4.00003-8>
- Agarwal, S., Sadeghi, N., Tyagi, I., Gupta, V. K., & Fakhri, A. (2016). Adsorption of toxic carbamate pesticide oxamyl from liquid phase by newly synthesized and characterized graphene quantum dots nanomaterials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 478, 430–438. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.06.029>
- Ali, I., Alharbi, O. M. L., AlOthman, Z. A., Al-Mohaimed, A. M., & Alwarthan, A. (2019). Modeling of fenuron pesticide adsorption on CNTs for mechanistic insight and removal in water. *Environmental Research*, 170, 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.066>
- Al-Shaalan, N. H., Ali, I., AlOthman, Z. A., Al-Wahaibi, L. H., & Alabdulmonem, H. (2019). High performance removal and simulation studies of diuron pesticide in water on MWCNTs. *Journal of Molecular Liquids*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111039>
- Andrade, M. B., Santos, T. R. T., Fernandes Silva, M., Vieira, M. F., Bergamasco, R., & Hamoudi, S. (2019). Graphene oxide impregnated with iron oxide nanoparticles for the removal of atrazine from the aqueous medium. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 54(16), 2653–2670. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1549077>
- Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>
- Azizian, S. (2004). Kinetic models of sorption: A theoretical analysis. *Journal of Colloid and Interface Science*, 276(1), 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.03.048>
- Azizzadeh, A., Amooey, A. A., & Ghasemi, S. (2022). Ternary metal-organic framework/multi-walled carbon nanotube/iron oxide nanocomposite for removal of butachlor pesticide. *Environmental Sciences Europe*, 34(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00627-x>
- Bhanvase, B. A., Shende, T. P., & Sonawane, S. H. (2017). A review on graphene–TiO₂ and doped graphene–TiO₂ nanocomposite photocatalyst for water and wastewater treatment. In *Environmental Technology Reviews* (Vol. 6, Issue 1, pp. 1–14). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1264489>

- Boruah, P. K., & Das, M. R. (2020). Dual responsive magnetic Fe₃O₄-TiO₂/graphene nanocomposite as an artificial nanozyme for the colorimetric detection and photodegradation of pesticide in an aqueous medium. *Journal of Hazardous Materials*, 385, 121516. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121516>
- Burakov, A. E., Burakova, I. V, Galunin, E. V, Mkrtychyan, E. S., & Melezhik, A. V. (2020). Highly Efficient Graphene-Based Nanocomposites for Environmental Application.
- Cheng, C., Shi, X., Yin, G., Peng, F., Hou, W., Zhang, W., Lin, X., Li, J., & Wang, X. (2022). Atrazine adsorption by graphene-based materials: Interaction mechanism and application in real samples. *Environmental Technology and Innovation*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102823>
- De Martino, A., Iorio, M., Xing, B., & Capasso, R. (2012). Removal of 4-chloro-2-methylphenoxyacetic acid from water by sorption on carbon nanotubes and metal oxide nanoparticles. *RSC Advances*, 2(13), 5693–5700. <https://doi.org/10.1039/c2ra00038e>
- Dehghani, Z., Sedghi-Asl, M., Ghaedi, M., Sabzehmeidani, M. M., & Adhami, E. (2021). Ultrasound-assisted adsorption of paraquat herbicide from aqueous solution by graphene oxide/ mesoporous silica. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105043. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105043>
- Dolatabadi, M., Naidu, H., & Ahmadzadeh, S. (2022). Adsorption characteristics in the removal of chlorpyrifos from groundwater using magnetic graphene oxide and carboxy methyl cellulose composite. *Separation and Purification Technology*, 300, 121919. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121919>
- Drum, C. (1980). *Soil Chemistry of Pesticides*. PPG Industries, Inc, USA.
- Du, H., Lei, Y., Chen, W., Li, F., Li, H., Deng, W., & Jiang, G. (2021). Multifunctional magnetic bio-nanoporous carbon material based on zero-valent iron, *Angelicae Dahuricae Radix* slag and graphene oxide: An efficient adsorbent of pesticides. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(8). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103267>
- Duman, O., Özcan, C., Gürkan Polat, T., & Tunç, S. (2019). Carbon nanotube-based magnetic and non-magnetic adsorbents for the high-efficiency removal of diquat dibromide

- herbicide from water: OMWCNT, OMWCNT-Fe₃O₄ and OMWCNT-K-carrageenan-Fe₃O₄ nanocomposites. *Environmental Pollution*, 244, 723–732. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.071>
- Duplock, E. J., Scheffler, M., & Lindan, P. J. D. (2004). Hallmark of Perfect Graphene. *Physical Review Letters*, 92(22), 225502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.225502>
- Elmi, F., Mohammadi Damghani, F., & Shokrollahzadeh Taleshi, M. (2020). Kinetic and Isotherm Studies of Adsorption of the Metribuzin Herbicide on an Fe₃O₄/CNT@PDA Hybrid Magnetic Nanocomposite in Wastewater. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59(20), 9604–9610. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b07077>
- Elovich, S. Y., & Larinov, O. G. ., (1962). Theory of adsorption from solutions of non-electrolytes on solid (I) equation adsorption from solutions and the analysis of its simplest form, (II) verification of the equation of adsorption isotherm from solutions. *Izv. Akad. Nauk. SSSR, Otd. Khim. Nauk*, 2, 209–216.
- Gao, L., Chen, L., & Li, X. (2015). Magnetic molecularly imprinted polymers based on carbon nanotubes for extraction of carbamates. *Microchimica Acta*, 182(3–4), 781–787. <https://doi.org/10.1007/s00604-014-1388-1>
- Garba, Z. N., Abdullahi, A. K., Haruna, A., & Gana, S. A. (2021). Risk assessment and the adsorptive removal of some pesticides from synthetic wastewater: a review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s43088-021-00109-8>
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nat Mater*, 6(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- Hajighasemkhan, A., Taghavi, L., Moniri, E., Hassani, A. H., & Panahi, H. A. (2022). Adsorption kinetics and isotherms study of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid by 3dimensional/graphene oxide/magnetic from aquatic solutions. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(5), 1171–1191. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1734194>
- Hao, Y., Wang, Z., Gou, J., & Wang, Z. (2015). Kinetics and thermodynamics of diquat removal

- from water using magnetic graphene oxide nanocomposite. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93(10), 1713–1720. <https://doi.org/10.1002/cjce.22278>
- Ho, Y. S., Wase, D. A. J., & Forster, C. F. (1996). Removal of lead ions from aqueous solution using sphagnum moss peat as adsorbent. *Water S.A.*, 22, 219–224.
- Hosseini, N., & Toosi, M. R. (2019). Removal of 2,4-D, glyphosate, trifluralin, and butachlor herbicides from water by polysulfone membranes mixed by graphene oxide/TiO₂ nanocomposite: Study of filtration and batch adsorption. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17(1), 247–258. <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00344-3>
- Iqbal, A. A., Sakib, N., Iqbal, A. K. M. P., & Nuruzzaman, D. M. (2020). Graphene-based nanocomposites and their fabrication, mechanical properties and applications. *Materialia*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100815>
- Kalantary, R. R., Azari, A., Esrafil, A., Yaghmaeian, K., Moradi, M., & Sharafi, K. (2016). The survey of Malathion removal using magnetic graphene oxide nanocomposite as a novel adsorbent: thermodynamics, isotherms, and kinetic study. *Desalination and Water Treatment*, 57(58), 28460–28473. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1178605>
- Khaghani, R., Esrafil, A., Zeynalzadeh, D., & Asl, F. B. (2020). Synthesis of magnetic multiwalled carbon nano tubes and investigation of isotherm and kinetic models for cleanup of carbaryl pesticide. *Global Nest Journal*, 22(3), 281–288. <https://doi.org/10.30955/gnj.002895>
- Khaloo, S. S., Bagheri, A., Gholamnia, R., & Saedi, R. (2022). Graphene oxide/MIL 101(Cr) (GO/MOF) nano-composite for adsorptive removal of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4 D) from aqueous media: synthesis, characterization, kinetic and isotherm studies. *Water Science and Technology*, 86(6), 1496–1509. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.282>
- Kılıç, O., Boz, İ., & Eryılmaz, G. A. (2020). Comparison of conventional and good agricultural practices farms: A socio-economic and technical perspective. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120666. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120666>
- Kong, L., Enders, A., Rahman, T. S., & Dowben, P. A. (2014). Molecular adsorption on graphene. In *Journal of Physics Condensed Matter* (Vol. 26, Issue 44). Institute of Physics

Publishing. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/26/44/443001>

- Kumar, K. V., Porkodi, K., & Rocha, F. (2008). Langmuir-Hinshelwood kinetics - A theoretical study. *Catalysis Communications*, 9(1), 82–84. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2007.05.019>
- Lagergren, S. (1898). About the Theory of So-Called Adsorption of Soluble Substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24, 1–39.
- Larios, F., Gonzáles, C., & Morales, Y. (2015). Aguas residuales y sus Consecuencias en el Perú. *Universidad San Ignacio de Loyola*, 2(12), 9–25.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385–388. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>
- Li, J., Wu, Y., Bai, H., Wen, X., Zhou, Q., Yuan, Y., Liu, Y., Chen, C., & Guo, L. (2021). Highly efficient adsorption and mechanism of alkylphenols on magnetic reduced graphene oxide. *Chemosphere*, 283(June), 131232. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131232>
- Li, X., Elgarhy, A. H., Hassan, M. E., Chen, Y., Liu, G., & ElKorashey, R. (2020). Removal of inorganic and organic phosphorus compounds from aqueous solution by ferrihydrite decoration onto graphene. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08325-y>
- Li, Y., Zhao, C., Wen, Y., Wang, Y., & Yang, Y. (2018). Adsorption performance and mechanism of magnetic reduced graphene oxide in glyphosate contaminated water. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(21), 21036–21048. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2282-x>
- Liu, G., Li, L., Xu, D., Huang, X., Xu, X., Zheng, S., Zhang, Y., & Lin, H. (2017). Metal–organic framework preparation using magnetic graphene oxide– β -cyclodextrin for neonicotinoid pesticide adsorption and removal. *Carbohydrate Polymers*, 175, 584–591. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.06.074>
- Liu, X., Zhang, H., Ma, Y., Wu, X., Meng, L., Guo, Y., Yu, G., & Liu, Y. (2013). Graphene-coated silica as a highly efficient sorbent for residual organophosphorus pesticides in

- water. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(5), 1875–1884.
<https://doi.org/10.1039/c2ta00173j>
- Luna-Sanguino, G., Ruíz-Delgado, A., Duran-Valle, C. J., Malato, S., Faraldos, M., & Bahamonde, A. (2021). Impact of water matrix and oxidant agent on the solar assisted photodegradation of a complex mix of pesticides over titania-reduced graphene oxide nanocomposites. *Catalysis Today*, 380, 114–124.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.03.022>
- Mamalis, A. G. (2007). Recent advances in nanotechnology. *Journal of Materials Processing Technology*, 181(1-3 SPEC. ISS.), 52–58.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.052>
- Marcelo, L. R., de Gois, J. S., da Silva, A. A., & Cesar, D. V. (2021). Synthesis of iron-based magnetic nanocomposites and applications in adsorption processes for water treatment: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 2, pp. 1229–1274). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01134-2>
- Massad, Y., Hanbali, G., Jodeh, S., Hamed, O., Bzour, M., Dagdag, O., & Samhan, S. (2022). The efficiency of removal of organophosphorus malathion pesticide using functionalized multi-walled carbon nanotube: Impact of Dissolved Organic Matter (DOM). *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 57(1), 1–12.
<https://doi.org/10.1080/01496395.2021.1881118>
- Muthusarayanan, S., Balasubramani, K., Suresh, R., Ganesh, R. S., Sivarajasekar, N., Arul, H., Rambabu, K., Bharath, G., Sathishkumar, V. E., Murthy, A. P., & Banat, F. (2021). Adsorptive removal of noxious atrazine using graphene oxide nanosheets: Insights to process optimization, equilibrium, kinetics, and density functional theory calculations. *Environmental Research*, 200(June), 111428.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111428>
- Nethaji, S., & Sivasamy, A. (2017). Graphene oxide coated with porous iron oxide ribbons for 2, 4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) removal. *Ecotoxicology and Environmental*

- Safety, 138, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.01.001>
- Neto, C., & Antonio, H. (2006). Drawing Conclusions from Graphene. *Bulletin of the American Physical Society*.
- Nodeh, H. R., Kamboh, M. A., Wan Ibrahim, W. A., Jume, B. H., Sereshti, H., & Sanagi, M. M. (2019). Equilibrium, kinetic and thermodynamic study of pesticides removal from water using novel glucamine-calix[4]arene functionalized magnetic graphene oxide. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 21(4), 714–726. <https://doi.org/10.1039/c8em00530c>
- Ohtani, B. (2011). Photocatalysis by inorganic solid materials: Revisiting its definition, concepts, and experimental procedures. In *Advances in Inorganic Chemistry* (Vol. 63, pp. 395–430). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385904-4.00001-9>
- Peña-Guzmán, C., Ulloa-Sánchez, S., Mora, K., Helena-Bustos, R., Lopez-Barrera, E., Alvarez, J., & Rodriguez-Pinzón, M. (2019). Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 237, pp. 408–423). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>
- Quintero, L., Agudelo, E., Quintana, Y., Cardona, S., & Osorio, A. (2010). Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos *Gestión. Revista de La CEPAL*, 13(3), 51–64.
- Rambabu, N., Guzman, C. A., Soltan, J., & Himabindu, V. (2012). Adsorption characteristics of atrazine on granulated activated carbon and carbon nanotubes. *Chemical Engineering and Technology*, 35(2), 272–280. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100376>
- Rana, A. K., Mishra, Y. K., Gupta, V. K., & Thakur, V. K. (2021). Sustainable materials in the removal of pesticides from contaminated water: Perspective on macro to nanoscale cellulose. *Science of the Total Environment*, 797, 149129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149129>
- Rashed, M. N. (2018). Heavy Metals Removal from Wastewater by Adsorption on Modified Physically Activated Sewage Sludge. *Archives of Organic and Inorganic Chemical Sciences*, 1(1). <https://doi.org/10.32474/aoics.2018.01.000102>

- Rasheed, T., Bilal, M., Nabeel, F., Adeel, M., & Iqbal, H. M. N. (2019). Environmentally-related contaminants of high concern: Potential sources and analytical modalities for detection, quantification, and treatment. *Environment International*, 122, 52–66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.038>
- Razavi, R., Basij, M., Beitollahi, H., & Panahandeh, S. (2022). Experimental and theoretical investigation of acetamiprid adsorption on nano carbons and novel PVC membrane electrode for acetamiprid measurement. *Scientific Reports*, 12(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16459-x>
- Saleh, I. A., Zouari, N., & Al-Ghouti, M. A. (2020). Removal of pesticides from water and wastewater: Chemical, physical and biological treatment approaches. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 101026. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101026>
- Santos, T. R. T., Andrade, M. B., Silva, M. F., Bergamasco, R., & Hamoudi, S. (2019). Development of α - and γ -Fe₂O₃ decorated graphene oxides for glyphosate removal from water. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 40(9), 1118–1137. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1411397>
- Sen Gupta, S., Chakraborty, I., Maliyekkal, S. M., Adit Mark, T., Pandey, D. K., Das, S. K., & Pradeep, T. (2015). Simultaneous dehalogenation and removal of persistent halocarbon pesticides from water using graphene nanocomposites: A case study of lindane. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 3(6), 1155–1163. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00080>
- Shah, M. P. (2019). *Wasterwater treatment: Molecularr tools, Techniques and applications* (1st ed.). Taylor & Francis Group.
- Sheehy, D. E., & Schmalian, J. (2009). Optical transparency of graphene as determined by the fine-structure constant. *Physical Review B*, 80(19), 193411. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.193411>
- Shrivasa, K., Ghosale, A., Nirmalkar, N., Srivastava, A., Singh, S. K., & Shinde, S. S. (2017). Removal of endrin and dieldrin isomeric pesticides through stereoselective adsorption

- behavior on the graphene oxide-magnetic nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(32), 24980–24988. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0159-z>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104(March), 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Suo, F., Xie, G., Zhang, J., Li, J., Li, C., Liu, X., Zhang, Y., Ma, Y., & Ji, M. (2018). A carbonised sieve-like corn straw cellulose-graphene oxide composite for organophosphorus pesticide removal. *RSC Advances*, 8(14), 7735–7743. <https://doi.org/10.1039/c7ra12898c>
- Thakur, K., & Kandasubramanian, B. (2019). Graphene and Graphene Oxide-Based Composites for Removal of Organic Pollutants: A Review. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 64(3), 833–867. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b01057>
- Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 390). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>
- Wang, X., Wang, H., Lu, M., Teng, R., & Du, X. (2017). Facile synthesis of phenyl-modified magnetic graphene/mesoporous silica with hierarchical bridge-pore structure for efficient adsorption of pesticides. *Materials Chemistry and Physics*, 198, 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.12.017>
- Wanjeri, V. W. O., Sheppard, C. J., Prinsloo, A. R. E., Ngila, J. C., & Ndungu, P. G. (2018). Isotherm and kinetic investigations on the adsorption of organophosphorus pesticides on graphene oxide based silica coated magnetic nanoparticles functionalized with 2-phenylethylamine. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 1333–1346. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.064>
- Xia, G., & Ball, W. P. (1999). Adsorption-partitioning uptake of nine low-polarity organic chemicals on a natural sorbent. *Environmental Science and Technology*, 33(2), 262–269. <https://doi.org/10.1021/es980581g>
- Xu, Z., Cai, J. G., & Pan, B. C. (2013). Mathematically modeling fixed-bed adsorption in aqueous systems. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 14(3), 155–176.

<https://doi.org/10.1631/jzus.A1300029>

- Yadav, S., Goel, N., Kumar, V., & Singhal, S. (2019). Graphene Oxide as Proficient Adsorbent for the Removal of Harmful Pesticides: Comprehensive Experimental Cum DFT Investigations. *Analytical Chemistry Letters*, 9(3), 291–310. <https://doi.org/10.1080/22297928.2019.1629999>
- Yap, K. L., & Liu, W. W. (2020). Exfoliation of charcoal by electrochemical method to synthesize few layers graphene sheets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 920(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/920/1/012019>
- Yin, Z., Cui, C., Chen, H., Duoni, Yu, X., & Qian, W. (2020). The Application of Carbon Nanotube/Graphene-Based Nanomaterials in Wastewater Treatment. In *Small* (Vol. 16, Issue 15). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/sml.201902301>
- Zhang, Y., Cao, B., Zhao, L., Sun, L., Gao, Y., Li, J., & Yang, F. (2018). Biochar-supported reduced graphene oxide composite for adsorption and coadsorption of atrazine and lead ions. *Applied Surface Science*, 427, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.237>