



**UNIVERSIDAD
MICHOCANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL
Facultad de Ingeniería Química**

**“Adsorción de Contaminantes Emergentes (Ibuprofeno) en Medio
Líquido Empleado Hidrotalcitas Híbridas”**

Tesis

**Para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental**

Presenta:

ROBERTO ADÁN CHÁVEZ ALDERETE

Ingeniero Químico

Asesor de Tesis

DR. ROBERTO GUERRA GONZÁLEZ

Coasesor de Tesis

DR. JOSÉ LUIS RIVERA ROJAS

Morelia, Michoacán de Ocampo, agosto de 2024

ÍNDICE.

ÍNDICE.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
GLOSARIO.	5
RESUMEN.	7
ABSTRACT.....	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Procesos de tratamiento de agua residual.....	12
2.2 Contaminantes emergentes (CE).	14
2.2.1 Ibuprofeno (IBP).	16
2.3 Hidrotalcitas.	17
2.3.1 Síntesis de las hidrotalcitas híbridas.	19
2.3.2 Propiedades de las hidrotalcitas.	20
2.2.3 Adsorción.	22
2.2.4 Aplicaciones de las hidrotalcitas híbridas.	22
2.4 Adsorción.	23
2.4.1 Fisisorción.	24
2.4.2 Quimisorción.....	25
2.4.3 Adsorbentes.....	26
2.4.4 Características de los adsorbentes.	26
2.4.5 Equilibrio de adsorción.	26
III. ANTECEDENTES.	29
3.1 Contaminantes emergentes (CE).....	29
3.2 Ibuprofeno (IBP).....	30
IV. JUSTIFICACIÓN	31

V. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	32
VI. HIPÓTESIS.....	33
VII. OBJETIVO GENERAL	33
7.1 Objetivos particulares.	33
VIII.METODOLOGÍA	34
8.1 Síntesis de las Hidrotalcitas híbridas.	35
8.1.1 Preparación de soluciones.....	35
8.1.2 Síntesis.	37
8.2 Caracterización de las estructuras.....	39
8.3 Técnica de análisis.	39
8.3.1 Preparación de la solución del contaminante.....	39
8.3.2 Adsorción de Ibuprofeno (IBP).....	40
8.3.3 Evaluación de remoción de Ibuprofeno.	40
8.3.4 Modelos de equilibrio de adsorción.....	41
8.3.2 Modelos de cinética de adsorción.....	41
IX. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
9.1 Síntesis de las Hidrotalcitas híbridas.	43
9.2 Caracterización de las estructuras.....	43
9.2.1 Difracción de rayos X (DRX).	43
9.2.2 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	44
9.3 Técnica de análisis.	45
9.3.1 Adsorción de Ibuprofeno (IBP).....	45
9.3.2 Evaluación de remoción de Ibuprofeno.	46
9.3.3 Modelos de equilibrio de adsorción.....	47
9.3.4 Modelos de cinética de adsorción.....	48
X. CONCLUSIONES.....	50
XI. TRABAJO FUTURO.....	51

XII. REFERENCIAS.....	52
ANEXOS.	60
Reporte anti plagio.....	60
Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial.	61

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.	Etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales.....	12
Figura 2.	Diagrama general de un proceso de tratamiento de agua residual.....	13
Figura 3.	Contaminantes Emergentes (CE).....	15
Figura 4.	Estructura del R-ibuprofeno y S-ibuprofeno.....	16
Figura 5.	Estructura de la Hidrotalcita.	18
Figura 6.	Representación de un octaedro y una lámina de brucita ($Mg(OH)_2$).	19
Figura 7.	Intercambio iónico de las Hidrotalcitas.	21
Figura 8.	Aplicaciones de las Hidrotalcitas híbridas.	23
Figura 9.	Adsorción.....	24
Figura 10.	Fisisorción.....	25
Figura 11.	Quimisorción.....	25
Figura 12.	Tipos de isotermas de adsorción.	27
Figura 13.	Metodología experimental.	34
Figura 14.	Preparación de soluciones.....	35
Figura 15.	Agitación y secado de sales.	36
Figura 16.	Solución NaOH 0.1 M.	37
Figura 17.	Sistema de agitación en presencia de Ar.	37
Figura 18.	Mufla de síntesis de la hidrotalcita híbrida.....	38
Figura 19.	Obtención de las hidrotalcitas híbridas.....	38
Figura 20.	Trituración de las tabletas de Ibuprofeno.....	39

Figura 21.	Solución saturada de Ibuprofeno (IBP).....	40
Figura 22.	Alícuotas a diferentes tiempos de contacto.....	40
Figura 23.	Hidrotalcita híbrida sintetizada.....	43
Figura 24.	Patrones DRX de la hidrotalcita híbrida sintetizada.....	43
Figura 25.	Parámetros de red (c) y distancias interplanares (d_{003}).....	44
Figura 26.	Espectro FTIR de la hidrotalcita híbrida sintetizada.....	44
Figura 27.	Difractograma después del proceso de adsorción.....	45
Figura 28.	Espectro FTIR después del proceso de adsorción.....	46
Figura 29.	Espectro FTIR del Ibuprofeno.....	46
Figura 30.	Porcentaje de remoción de Ibuprofeno.....	47
Figura 31.	Isoterma de adsorción a 25° C.....	47
Figura 32.	Ajuste a los modelos de equilibrio de adsorción.....	48
Figura 33.	Cinética de adsorción de las hidrotalcitas híbridas.....	49

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.	Propiedades físicas y químicas del ibuprofeno (IBP).....	17
Tabla 2.	Facilidad de intercambio iónico según la especie interlaminar.....	22
Tabla 3.	Tratamiento de contaminantes emergentes.....	29
Tabla 4.	Adsorción de Ibuprofeno (IBP).....	30
Tabla 5.	Parámetros de los modelos de equilibrio de adsorción.....	48

GLOSARIO.

Adsorción: Fenómeno físico en donde un fluido, denominado adsorbato, se adhiere a la superficie de un sólido, adsorbente, por medio de fuerzas físicas (fisisorción) o por interacciones químicas (quimisorción).

Antiinflamatorio no esteroideo: Refieren a un grupo de fármacos cuya característica principal es la estructura química sin presencia de esteroides que permiten ejercer sus efectos antiinflamatorios, analgésicos y antipiréticos para la inhibición de la enzima ciclooxigenasa, todo ello con una cantidad mínima de efectos secundarios.

Antipirético: Sustancia “anti-febril” que tiene como objeto la reducción de los síntomas de la fiebre por medio de un anulamiento del aumento de temperatura por efecto en el hipotálamo para que el cuerpo tienda a disminuir la temperatura.

Bioluminiscencia: Fenómeno producido por los organismos en los ecosistemas marinos que permite la producción de luz mediante la transformación de energía química.

Brucita: Término atribuido al hidróxido de magnesio cuyas características estructurales es la formación de laminas por intercalación de unidades octaédricas donde se encuentra en el centro el catión Mg^{2+} mientras es rodeado por seis grupos OH^- .

Contaminantes emergentes: Compuestos de origen sintético caracterizados por sus efectos nocivos a la salud de donde se destaca la disrupción endocrina y la alteración del comportamiento.

Coprecipitación: Proceso en el que una especie química forma un precipitado después de encontrarse disuelto en una solución.

Criba: Superficie que permite la separación de partículas de distintos tamaños.

Cristalinidad: Concepto que hace referencia al grado del orden de estructura molecular que presenta un sólido.

Descomposición térmica: Proceso que provoca la separación de un compuesto cuando se somete a un cambio de temperatura.

Desinfección: Proceso que se encarga de inactivar, inhibir o elimina microorganismos presentes en un medio a través de técnicas físicas y/o químicas.

Desorción: Fenómeno físico en el que una sustancia es liberada de la superficie de un material en el que se encontraba adherida.

Disruptor: Término empleado como adjetivo para indicar una ruptura fuerte o bien, que un proceso se ve imposibilitado de su funcionalidad habitual.

Enantiómero: Compuesto que tiene como característica que su imagen especular no puede superponerse sobre sí mismo.

Hidrotalcita: Compuesto octaédrico a base de magnesio empleado con frecuencia en procesos de remediación ambiental gracias a las propiedades de su estructura laminar.

Intercambio iónico: Proceso que consiste en el flujo de dos electrólitos desde una disolución hacia un complejo y viceversa.

Isomórfico: Refiere a compuestos que pueden tener una composición química diferente, sin embargo, presentan igualdad en sus características estructurales.

Metabolismo hepático: Proceso mediante el cual el organismo elimina las sustancias presentes en el cuerpo por medio de la orina.

Quiralidad: Propiedad que posee un átomo de carbono con cuatro grupos distintos unidos a él.

Sinergia: Cooperación o trabajo conjunto.

RESUMEN.

“Adsorción de Contaminantes Emergentes (Ibuprofeno) en Medio Líquido Empleado Hidrotalcitas Híbridas”

Por:

ROBERTO ADÁN CHÁVEZ ALDERETE.

Agosto 2024

Dirigido por:

DR. ROBERTO GUERRA GONZÁLEZ.

DR. JOSÉ LUIS RIVERA ROJAS.

El agua es un recurso natural indispensable para el desarrollo de la biodiversidad del planeta que se ve afectado en su calidad debido al constante desarrollo social y las demandas tecnológicas que buscan satisfacer actividades cotidianas (1), presentando altas cantidades de contaminantes que siguen diversos ordenes en su clasificación. El presente trabajo enfoca sus esfuerzos en los denominados contaminantes emergentes; este tipo de contaminantes engloba compuestos como los cloroalcanos, pesticidas, metabolitos y fármacos (2); el principal efecto que producen estas especies es la alteración en el sistema endocrino y la generación de perturbaciones de las funciones hormonales, aun encontrándose en concentraciones bajas (3). Uno de los fármacos que ha presentado actualmente un aumento en sus concentraciones en aguas residuales es el Ibuprofeno, encontrándose en este medio en valores de hasta 990 µg/L (4). La alta presencia del fármaco se debe principalmente a la automedicación y el fácil acceso de los analgésicos en la sociedad (5).

Diversos estudios han centrado esfuerzos en atender la problemática que estos compuestos representan en el ambiente presentando alternativas de remoción empleando procesos de inmovilización bacteriana (6), nitrificación de fangos (7), uso de reactores de membrana (8), procesos de adsorción con diversos materiales adsorbentes tal como lo es el carbón activado (9), la sílice (10), y compuestos de hibridación como algunos organometales (11) (12) (13), entre otros.

Por otra parte los materiales tipo Hidrotalcita se han estudiado durante los últimos años en procesos de remediación ambiental, pues sus propiedades como intercambiadores iónicos y como agentes adsorbentes los posicionan como alternativas viables en una amplia gama de posibles aplicaciones (14). Estos materiales han sido empleados en la remoción de metales pesados (15) (16), liberación controlada de pesticidas y plaguicidas (17), como soportes catalíticos (18) (19), etc. La razón principal respecto al interés generado por estos materiales es debida a la estructura laminar similar a la del mineral brucita (hidróxido de magnesio), que presenta una alta carga positiva debido a la intercalación

de cationes divalentes y trivalentes, principalmente; carga que es compensada con la presencia de aniones en la region formada entre las láminas (20).

El propósito de este proyecto fue estudiar la adsorción del contaminante emergente ibuprofeno en solución acuosa empleando como agente adsorbente un material híbrido tipo Hidrotalcita de composición ZnMgAl con la finalidad de determinar porcentajes de remoción y el modelo de adsorción del proceso.

Palabras clave: Adsorción, brucita, contaminantes emergentes, hidrotalcita, ibuprofeno.

ABSTRACT.

Water is an essential natural resource for the development of the planet's biodiversity, which is affected in its quality due to constant social development and technological demands that seek to satisfy daily activities (1), presenting high amounts of contaminants that follow various orders in their classification. This work focuses its efforts on the so-called emerging contaminants; this type of contaminants includes compounds such as chloroalkanes, pesticides, metabolites and drugs (2); the main effect produced by these species is the alteration in the endocrine system and the generation of disturbances in hormonal functions, even when found in low concentrations (3). One of the drugs that has currently shown an increase in its concentrations in wastewater is Ibuprofen, found in this medium in values of up to 990 $\mu\text{g/L}$ (4). The high presence of the drug is mainly due to self-medication and easy access to analgesics in society (5).

Several studies have focused efforts on addressing the problems that these compounds represent in the environment by presenting removal alternatives using bacterial immobilization processes (6), sludge nitrification (7), use of membrane reactors (8), adsorption processes with various adsorbent materials such as activated carbon (9), silica (10), and hybridization compounds such as some organometals (11) (12) (13), among others.

On the other hand, Hydrotalcite type materials have been studied during the last years in environmental remediation processes, since their properties as ion exchangers and as adsorbent agents position them as viable alternatives in a wide range of possible applications (14). These materials have been used in the removal of heavy metals (15) (16), controlled release of pesticides and insecticides (17), as catalytic supports (18) (19), etc. The main reason for the interest generated by these materials is due to the laminar structure similar to that of the mineral brucite (magnesium hydroxide), which has a high positive charge due to the intercalation of mainly divalent and trivalent cations; a charge that is compensated by the presence of anions in the region formed between the laminae (20).

The purpose of this project was to study the adsorption of the emerging contaminant ibuprofen in aqueous solution using as an adsorbent agent a hybrid material type Hydrotalcite of ZnMgAl composition in order to determine removal percentages and the adsorption model of the process.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural indispensable para el desarrollo de la biodiversidad del planeta, sin embargo, el constante desarrollo social y las demandas tecnológicas han llevado al deterioro de cuerpos de agua provocando altos niveles de contaminación por presencia de sustancias biológicamente activas, sintetizadas para uso en actividades industriales, agrónomas, medicas, etc. (1). La clasificación de estas sustancias sigue diversos ordenes, pero se pueden destacar los denominados contaminantes emergentes; este tipo de contaminantes comúnmente se tratan de compuestos cloroalcanos, pesticidas, metabolitos, fármacos, etc. (21). La característica principal de este tipo de contaminantes es la alteración en el sistema endocrino y la generación de perturbaciones de las funciones hormonales, aun encontrándose en concentraciones bajas (3).

Dados los acontecimientos recientes, la pandemia por COVID-19, se han registrado aumentos en las concentraciones de este tipo de contaminantes, principalmente por el uso de fármacos, siendo los hospitales aquellos con mayor impacto en las aguas residuales (22) (4). La propuesta de tratamiento de estos efluentes radica en un proceso de adsorción empleando estructuras sintéticas análogas a la del mineral denominado como Hidrotalcita para remover el medicamento antiinflamatorio no esteroideo, Ibuprofeno (IBP); pues al ser un medicamento de fácil acceso, estudios realizados sobre la caracterización de los efluentes de agua residual, muestran un aumento en la presencia de este fármaco (23); por otra parte, los materiales tipo Hidrotalcita han sido utilizados con éxito en diversos experimentos de remediación ambiental, pues presentan resultados favorables en aplicaciones de remoción de organismos, bacterias, virus, aniones, metales pesados y pesticidas ácidos (24).

Los materiales tipo Hidrotalcita presentan un área superficial considerable, convirtiéndolos en materiales atractivos para ser empleados en procesos de adsorción. Existen diversos estudios en dónde se evaluó la capacidad de adsorción de especies en experimentos de remediación ambiental, logrando la remoción de organismos, como bacterias (*E. coli*) y virus de cepas indicadoras en aguas sintéticas, así como de carga biológica de aguas eutróficas (25), aniones (específicamente fluoruros y ioduros) (26); metales pesados, como Cu(II) (27), Pb(II), Cr(VI), As(V) (15) y pesticidas ácidos como el 2,4-D, MCPA y picloram y nitrofenólicos, como DNP y DNOC (28).

La Hidrotalcita presenta una alta afinidad de retención del ión carbonato, esto representa problemas cuando se buscan reacciones posteriores. Sin embargo, se ha determinado que dicha composición interlamilar posee buenas propiedades para retener dióxido de carbono (CO₂), logrando su transformación en carbonatos de calcio o magnesio. Un adsorbente de CO₂, con las características de los materiales tipo Hidrotalcita puede retener hasta 3 moles del gas de efecto invernadero por cada kg y desorberlo a una temperatura de 400°C (25).

La capacidad de intercambio de aniones en las Hidrotalcitas es bien conocida, sin embargo, pocos estudios han profundizado en el tema y sólo unos cuantos discuten la aplicación de dichos procesos en algún problema real. Resulta interesante entonces, evaluar los factores que controlan la inmovilización de aniones ecotóxicos en Hidrotalcitas de Mg-Zn-Al sintéticas y explorar la posible aplicación de estos sólidos como agentes de retención en tratamientos de efluentes o procesos de remediación con la finalidad de conocer la estabilidad y las condiciones de operación que favorecen la remediación, pues muy poco se conoce respecto a su estabilidad termodinámica y cinética.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Procesos de tratamiento de agua residual.

Una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) puede describirse con simplicidad como una serie de procesos con la finalidad evacuar sólidos, reducir la materia orgánica y los contaminantes para buscar restaurar la presencia de oxígeno (29). La figura 1 muestra un diagrama general de las etapas del proceso de tratamiento.

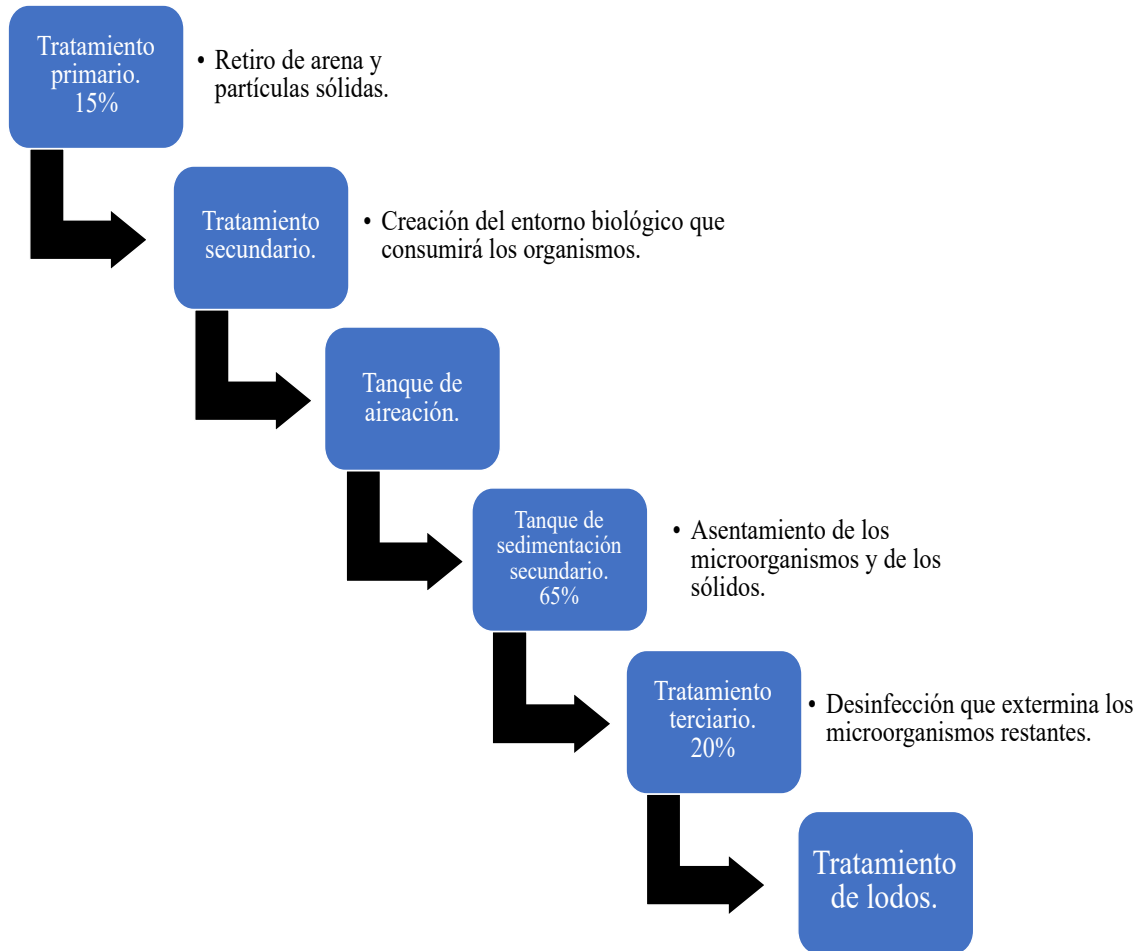


Figura 1. Etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales.

(29)

El tratamiento primario consta del uso de cribas que tienen la finalidad de retener sólidos de gran tamaño permitiendo únicamente el paso al agua y sus contaminantes disueltos, seguido de un tanque de sedimentación donde se concentran en el fondo partículas sólidas para la formación de un lodo primario que será barrido hacia una tolva para su asimilación. El tratamiento secundario busca el crecimiento de microorganismos que son capaces de consumir la materia orgánica por medio de un

tanque de aireación y un segundo tanque de sedimentación tiene el propósito de acumular residuos sólidos y no captados en el primer tanque, el producto de este segundo tanque es mezclado con el del primero para someterse a una digestora de lodos donde son destruidos los materiales degradables causantes del mal olor; esta etapa produce un gas que contiene metano. El tratamiento terciario consiste en una serie de procesos físicos y químicos con el fin de remover compuestos específicos, por ejemplo: fósforo, nitrógeno, metales pesados, compuestos orgánicos, etc. Esta etapa del tratamiento resulta la más costosa, pues comúnmente es seguida de una etapa de desinfección (29).

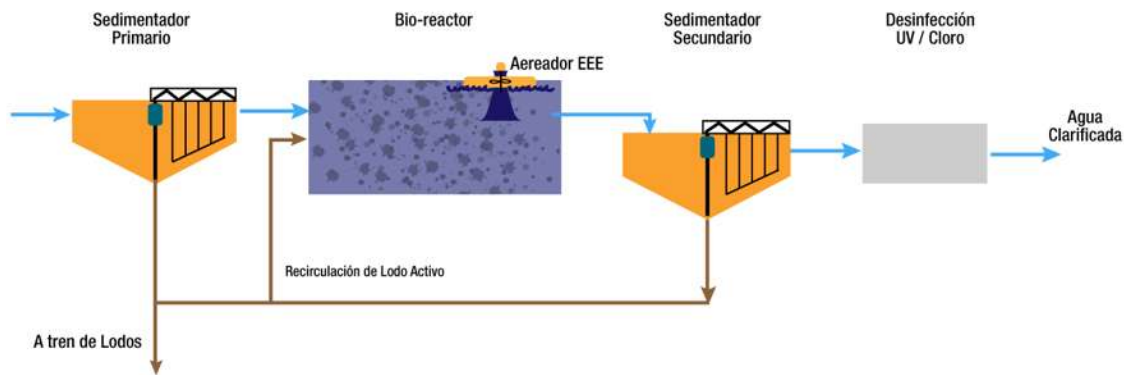


Figura 2. Diagrama general de un proceso de tratamiento de agua residual.

(30)

Los procesos empleados con mayor frecuencia en el tratamiento terciario son (31) (29):

- Intercambio iónico. Las resinas empleadas en este proceso tienen como principal característica la capacidad de retener de manera selectiva sobre su superficie.
- Microfiltración. El uso de membranas con un tamaño de poro de 0.1 a 10 μm es útil en la retención de partículas de diámetros superiores a 0.1 mm.
- Ultrafiltración. A diferencia de la micro filtración, el diámetro de las moléculas a retener oscila entre 0.001 y 0.1 μm .
- Ósmosis inversa. Este proceso consiste en mantener una presión mayor a la osmótica para producir el paso del agua desde la solución más concentrada a la menos concentrada hasta producir el equilibrio.
- Adsorción. Proceso empleado para la eliminación de fenoles, hidrocarburos aromáticos nitrados, derivados clorados, etc. Consiste en el uso de materiales con la capacidad de fijar moléculas en su superficie en donde el área de esta última juega un papel importante.

2.2 Contaminantes emergentes (CE).

Los contaminantes emergentes (CE) son sustancias químicas que no se encuentran de manera natural en los cuerpos de agua como lo son los fármacos, compuestos perfluorados, hormonas, drogas de abuso, y productos de cuidado y de higiene personal (32). En los últimos años un creciente aumento en la presencia de contaminantes emergentes (CE) ha sido observado a consecuencia del uso continuo y abusivo de productos empleados en la agricultura, ganadería, cuidado personal y tratamiento de enfermedades; pues es sabido que los medicamentos que ingerimos para el tratamiento de malestares, no son completamente adsorbidos por el cuerpo, excretándose y llegando a cuerpos de agua residual y superficial (5).

La naturaleza de los contaminantes emergentes (CE) es muy diversa, lo cual dificulta su eliminación en los métodos de tratamiento y provoca altos costos de inversión que muy pocas organizaciones gestoras de servicios del agua están dispuestas a asumir; pues algunos de los métodos existentes son el uso de biorreactores de membrana, la ósmosis inversa, la microfiltración o los procesos de oxidación avanzada (32). El riesgo que presenta la ineficiencia de eliminación de los cuerpos de agua recae directamente en los organismos acuáticos alterando su cadena trófica e inevitablemente, la salud del ser humano (33), provocando los efectos adversos que se destacan a continuación:

- Alteraciones en las estructuras de las comunidades microbianas.
- Disminución de algas y bacterias.
- Estrés de oxidación en peces.
- Cáncer en roedores.
- Daño al sistema nervioso afectando la actividad hormonal, la reproducción y la fertilidad humana.
- Interfieren en el sistema endocrino.
- Efectos de feminización en hombres.
- Defectos de nacimiento y retrasos en el desarrollo.
- Incrementan el riesgo de úlceras gastrointestinales y enfermedades del riñón.
- Alteran las branquias de las truchas.
- Inhiben la bioluminiscencia.
- Enfermedades cardiovasculares y tiroideas.
- Efectos en el sistema respiratorio, gastrointestinal y sistema inmune.

(34)

Los ejemplos más representativos de los contaminantes emergentes (CE) son:

Pesticidas.

Cremas, pomadas, lociones.

Productos de higiene.

Detergentes y productos de limpieza.

Plastificantes y aditivos industriales.

Medicamentos.

Drogas ilegales.

Microplásticos.

Disruptores endocrinos u hormonales.

Nanopartículas de plata, oro y óxidos metálicos.

Los efectos tóxicos que producen los contaminantes emergentes (CE) son distintos para los niveles de la cadena trófica, pues aún en niveles bajos de concentración, la alteración a los ecosistemas puede verse reflejada en cambios de conducta de los seres vivos, producir cambios en la expresión genética, funcionar como disruptores endocrinos, y en combinación con otros compuestos, causar un efecto sinérgico nocivo (33).



Figura 3. Contaminantes Emergentes (CE).
(33)

Por otra parte, la farmacontaminación tiene su origen en la excreción a través de la orina, heces o por la eliminación directa de productos no empleados; llegando a alcanzar aguas subterráneas y contaminar acuíferos o bien, acumularse en el suelo afectando directamente a los ecosistemas (2). La ruta que emplean estos contaminantes comienza en las plantas de tratamiento, ya que la fisicoquímica de la diversidad de compuestos presentes dificulta la retención o eliminación de todos y cada uno de ellos; la preocupación generada por estos contaminantes es que a través del ciclo del agua se han encontrado presencia de medicamentos en agua potable, destacando medicamentos como el ibuprofeno, diclofenaco, carbamacepina y el ácido clofíbrico (35).

Los medicamentos analgésicos son los fármacos con mayor consumo mundial debido a la automedicación y al fácil acceso que estos presentan, además, según (5) a través de un estudio de cuantificación de contaminantes emergentes (CE) presentes en el agua residual se determinó que solamente el 26.47% del ibuprofeno (IBP) presente en influentes de plantas de tratamiento como lo son la del Cerro de la Estrella, Coyoacán y CU, es removido o tratado en los procesos empleados.

2.2.1 *Ibuprofeno (IBP).*

El ibuprofeno (IBP) es un medicamento antiinflamatorio no esteroideo con capacidad analgésica de gran uso en la actualidad debido a su fácil acceso y a su efectividad para el alivio de malestares, es un derivado del ácido propiónico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) que posee una acción analgésica, antipirética y antiinflamatoria, teniendo como principal diferencia con los demás derivados de este ácido, sus características farmacocinéticas y su baja probabilidad de producir irritación gástrica y ulceración (36).

Respecto a la estereoquímica del ibuprofeno (IBP), presenta un carbono quiral en la posición α (alfa) del propionato, provocando la existencia de dos enantiómeros, el R-ibuprofeno y el S-ibuprofeno.

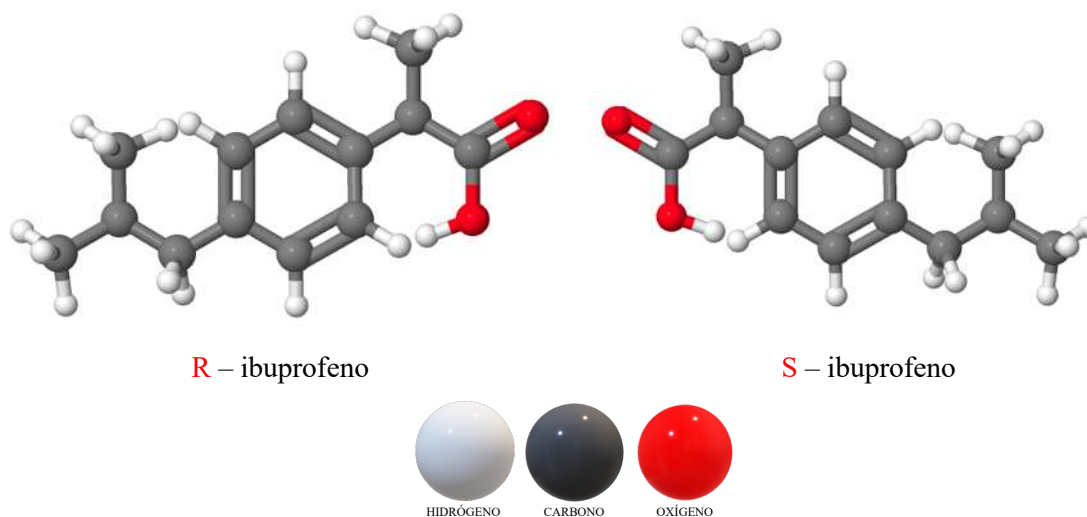


Figura 4. Estructura del R-ibuprofeno y S-ibuprofeno.

(37)

La mezcla racémica no produce efectos en su acción analgésica y antiinflamatoria, pues el enantiómero S es aquel que posee dichas propiedades mientras que el R se convierte lentamente en S dentro del cuerpo (38). La quiralidad es una propiedad que poseen los objetos o en este caso, las

moléculas que no permite superponer con su imagen especular, a estas dos formas se les denomina enantiómeros, mismos que poseen propiedades distintas (39).

Algunas de las propiedades físicas y químicas del ibuprofeno (IBP) se resumen en la siguiente tabla (36):

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del ibuprofeno (IBP)

Fórmula molecular	C ₁₃ H ₁₈ O ₂
Peso molecular	206.281 g/mol
Estado de agregación	Sólido
Color	Blanco
Olor	Inoloro
Sabor	Insípido
Punto de fusión	76° C
Cristalización	Cristales incoloros
Solubilidad	Insoluble en agua (<1 mg/ml) Soluble en solventes orgánicos (etanol, hexano)
pKa	4.40

El ibuprofeno (IBP) presenta además una farmacocinética de adsorción rápida y completa cuando se administra por vía oral siguiendo un metabolismo hepático donde es adsorbido el 90% en derivados hidroxilados y carboxilados, mientras que el 10% restante permanece intacto para su excreción (40).

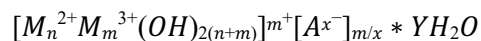
Aunque pueda parecer poca la cantidad presente de ibuprofeno (IBP) en el agua residual, 990 µg/L (4), los efectos que este produce en el ambiente son muy variados, los más destacados son las alteraciones al sistema endocrino bloqueando o perturbando las funciones hormonales y el efecto sinérgico con otros contaminantes en el ambiente que incrementan la incidencia de diferentes tipos de cáncer (41).

2.3 Hidrotalcitas.

Las Hidrotalcitas están conformadas por estructuras sintéticas de láminas de hidróxidos metálicos con cargas positivas, mismas que son estabilizadas con la presencia de aniones interlaminares. Los grupos hidroxilo presentes en las superficies de sus láminas y los aniones intercambiables atribuyen

a la facilidad de obtener compuestos de funcionalización o hibridación con moléculas orgánicas permitiendo la innovación de nuevos materiales con una amplia gama de aplicaciones posibles. (14).

Pueden representarse con la formula general (42):



Dónde M_n^{2+} y M_m^{3+} son cationes de metales divalentes y trivalentes, respectivamente. A, representa al anión interlaminar (normalmente carbonato), y finalmente, Y, el número de moléculas de agua. La amplia gama de aplicación de estos materiales se debe a su variedad de propiedades, donde destacan el intercambio iónico y la adsorción, pues se tratan de superficies porosas de composición química estable que favorece su recuperación para reúso continuo y económico.

Los iones que se emplean de manera frecuente en las estructuras de estos materiales son Mg^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} . (43)

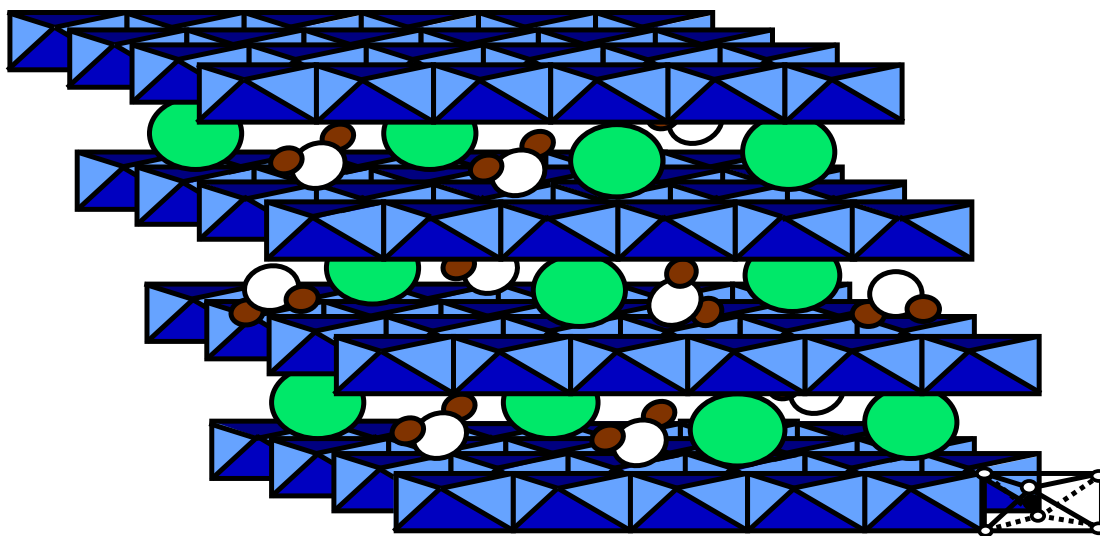


Figura 5. Estructura de la Hidrotalcita.

(Autoría propia)

Estos materiales son altamente llamativos, pues dentro de sus propiedades se puede destacar la estabilidad térmica y química que presentan sus estructuras, los procesos de obtención son metodologías sencillas y en la mayoría de los casos, muy económicas; además que los productos de síntesis presentan excelente biocompatibilidad. La descripción de la estructura de la Hidrotalcita parte

de la estructura del hidróxido de magnesio, $Mg(OH)_2$, también denominado brucita (Figura 6) (20), de donde se es sustituida fraccionalmente, cationes de magnesio por algún catión trivalente (M_m^{3+}), generando láminas con una densidad de carga positiva, misma que logra estabilizarse por la adición de aniones interlaminares (14).

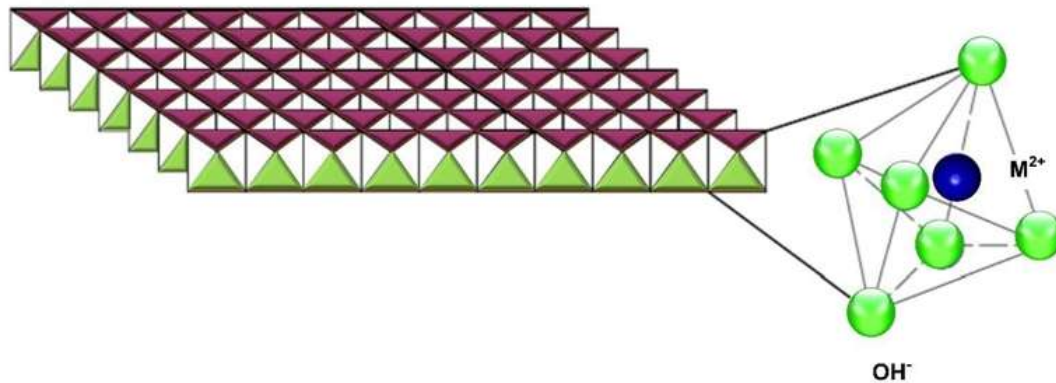


Figura 6. Representación de un octaedro y una lámina de brucita ($Mg(OH)_2$).

(44)

La selección de anión en la región interlaminares puede ser variada y esta elección muestra diferentes propiedades para el sólido cristalino, éstos pueden ser de naturaleza orgánica o inorgánica según las propiedades requeridas. De esta manera es que los compuestos tipo Hidrotalcita presentan una amplia gama de aplicaciones ha estudiar (43).

2.3.1 Síntesis de las hidrotalcitas híbridas.

Los métodos de obtención más comunes par este tipo de materiales se describen a continuación, sin embargo, existen métodos de síntesis que funcionan como alternativas tal como es el caso de la reconstrucción por efecto memoria, la hidrólisis inducida, técnica sol-gel, electrosíntesis, métodos asistidos con tratamiento hidrotermal, ultrasonido y microondas (45).

1. Método de coprecipitación a baja saturación de sales metálicas

Este método se realiza por adición lenta (goteo) y paulatina de soluciones que contengan una mezcla de sales de cationes divalentes y trivalentes con un anión común, a un recipiente con agua destilada; posteriormente, una segunda solución alcalina cuyo contenido son los aniones deseados para la región interlaminares, se añade simultáneamente al recipiente a una velocidad tal que permita mantener el pH constante en un valor seleccionado para que conduzca a la coprecipitación de la Hidrotalcita. Este método permite obtener sólidos que al precipitarse muestran una mayor

cristalinidad debido a que la velocidad de crecimiento del cristal es superior a su velocidad de nucleación (42).

2. Método de coprecipitación a alta sobresaturación de sales metálicas

El punto de partida es de dos soluciones, una que contenga la mezcla de cationes divalentes y trivalentes, y otra de características alcalinas que contenga los aniones que se desean tener en el espacio interlaminar. La solución de cationes se agrega sobre la solución básica o viceversa, este procedimiento tiene como característica que la velocidad de nucleación de los cristales es mayor a su velocidad de crecimiento, por lo tanto, se producen materiales con menor cristalinidad. Además, debido a que se presenta un cambio continuo en el pH de la solución, se obtiene la formación de impurezas de tipo $M(OH)_2$ o $M(OH)_3$ (24).

3. Método de coprecipitación homogénea con urea

Los cationes a utilizar para emplear este método de síntesis se reduce al uso del Zn^{2+} y Al^{3+} , estos son llevados a precipitación en forma de estructuras tipo Hidrotalcita gracias a la hidrólisis de urea, reacción que es posible a 90 °C cuando se toma como punto de partida una solución de nitratos de Zn y Al durante un periodo de 10 h. Para evitar la intercalación del CO_3^{2-} que proviene de la hidrólisis de la urea se introduce un exceso de NH_4NO_3 que proporciona iones NO_3^- en la solución y asegura que éste anión se mantenga presente en la región interlaminar (46).

2.3.2 *Propiedades de las hidrotalcitas.*

Algunas de las propiedades que hacen interesante el estudio de los procesos que involucran el uso de materiales tipo Hidrotalcita se pueden describir a continuación. Dichas propiedades presentan un sin fin de posibles aplicaciones útiles en la remediación ambiental debido a la diversa naturaleza que presentan los contaminantes (47).

- Efecto memoria.

La evolución estructural de una Hidrotalcita depende de la temperatura, de lo cual se pueden destacar los siguientes puntos (48):

1. A temperaturas menores a 150 °C no existe modificación alguna a la estructura laminar, aun considerando que las moléculas de agua adsorbidas físicamente pueden llegar a perderse.
2. A temperaturas encontradas en el rango de 300 a 500 °C se produce la deshidroxilación de las láminas, fenómeno que tiene como consecuencia el colapso de la estructura laminar.

Cuando la estructura laminar se ha perdido por efecto de la temperatura, el sólido puede ponerse en contacto con una solución que contenga aniones, éste proceso tendrá como consecuencia la

reformación de la estructura laminar original, esta capacidad de reconstruir su estructura característica recibe el nombre de efecto memoria (49).

- Intercambio iónico

Los aniones polivalentes presentan mayor afinidad con el espacio interlaminar que los aniones monovalentes, esto debido a las presencias electrostáticas fuertes, es decir, es más fácil reemplazar aniones monovalentes inicialmente presentes en la región interlaminar por aniones divalentes, trivalentes, etc. (50). Especialmente hablando de moléculas orgánicas, éstas se ven mayormente atraídas a las laminas cuando inicialmente se tiene nitratos o cloruros en el espacio interlaminar, caso contrario a cuando se tiene inicialmente carbonatos, estos aniones suelen presentar una alta competencia con los demás aniones, por ello es más difícil lograr el intercambio (20).

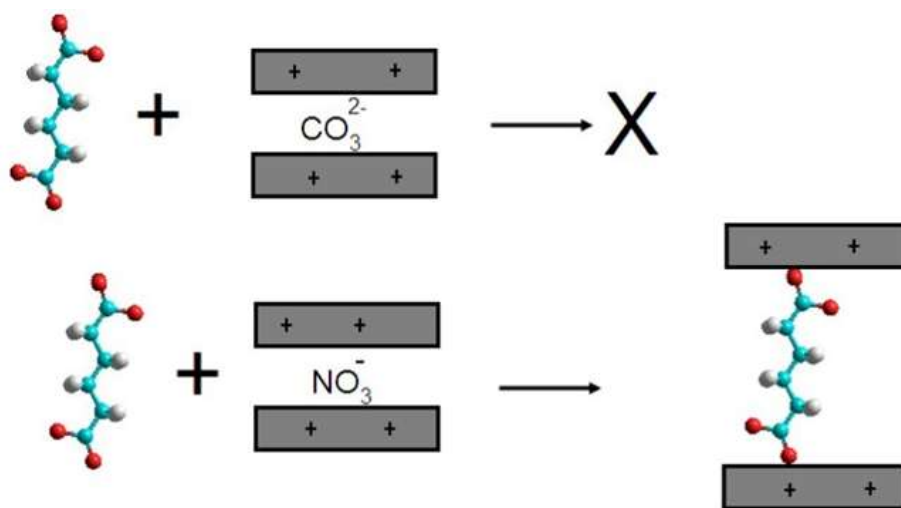



Figura 7. Intercambio iónico de las Hidrotalcitas.

(20)

El intercambio iónico permite reemplazar los aniones originales de la región interlaminar en las estructuras de las Hidrotalcitas por medio de un proceso que consiste en la sustitución isomórfica del contenido interlaminar modificando el tamaño del espacio de esta región mientras que la estructura laminar se mantiene inalterada. El proceso consiste en el contacto de la Hidrotalcita con una solución concentrada del anión de interés para intercambiar, cabe destacar que debe considerarse que este nuevo anión presente una mayor afinidad hacia las láminas; dicha afinidad puede apreciarse de acuerdo con la siguiente tabla (42):

Tabla 2. *Facilidad de intercambio iónico según la especie interlaminar.*

<p>Facilidad de intercambio</p>  <p>Dificultad de intercambio</p>	NO_3^-
	Br^-
	Cl^-
	F^-
	OH^-
	MoO_4^{2-}
	SO_4^{2-}
	CrO_4^{2-}
	HAsO_4^{2-}
	HPO_4^{2-}
	CO_3^{2-}

2.2.3 Adsorción.

Diversos estudios han centrado sus esfuerzos en la evaluación de la capacidad de adsorción de los materiales tipo Hidrotalcita, principalmente para remover aniones presentes en solución, especies que comunmente tienen como característica su efecto nocivo cuando se encuentra en el medio ambiente, tal como es el caso del As (V) (15), Cr (VI) (16), CO_3^{2-} (24), PO_4^{3-} (51), virus y bacterias (52), entre muchos otros. Esta capacidad de adsorción se debe a la alta intensidad de carga que presentan sus estructuras laminares y la capacidad de intercambiar aniones, sin embargo, la adsorción con estos materiales presentan variaciones en su efectividad de acuerdo con los parámetros como lo son, el pH del medio, tamaños de partícula, temperatura y competitividad de aniones (53).

2.2.4 Aplicaciones de las hidrotalcitas híbridas.

Entre algunas de las aplicaciones más destacables de las hidrotalcitas híbridas son:

- Catálisis. Los óxidos metálicos mixtos obtenidos por descomposición térmica suelen presentar un área superficial con propiedades alcalinas, además de una dispersión térmicamente estable y homogénea. Todo ello favorece, cuando la selección de los metales es compatible con la reacción a catalizar, el emplear como soporte catalítico composiciones de Cu/Zn/Al en la hidroxilación del fenol (54), composiciones de Zn/Al en la deshidrogenación del etano (18). Además se tienen estudios donde se han empleado en reacciones catalíticas para la reducción de aldehídos a alcoholes (55), fotodegradación de compuestos fenólicos (19) y en la hidrólisis de nitrilos aromáticos (56).
- Poliméros. Tal como el hidróxido de magnesio es empleado como agente para retardar la ignición de diversos poliméros, por semejanza estructural y composiciones químicas, las

Hidrotalcitas comparten dichas propiedades, además de permitir combinar la matriz polimérica de la Hidrotalcita con la de especies orgánicas por intercalación. Combinaciones poliméricas se han estudiado entre el poliestireno y composiciones de Mg/Al (57), policaprolactona con Hidrotalcitas cuyo anión interlaminar es el cloruro o los nitratos (58).

- Medicina. La liberación controlada y la disolución de fármacos hidrofóbicos son las principales aplicaciones en esta área para las Hidrotalcitas, sin embargo se han realizado estudios para determinar la posibilidad de emplearlas como vectores ni víricos en la transferencia de material genético (59), captación celular (17), intercalación de ADN en una matriz de Mg/Al (60), toxicidad celular (61), entre otras aplicaciones.



Figura 8. Aplicaciones de las Hidrotalcitas híbridas.

(20)

2.4 Adsorción.

La adsorción estudia la capacidad que presentan algunos sólidos para retener sustancias específicas en su superficie, separando de esta manera los componentes de soluciones líquidas y gaseosas por medio de un proceso de contacto (62). Los componentes presentes en el fluido que son atraídos a la superficie del sólido por medio de fuerzas intermoleculares débiles se denominan adsorbatos, mientras que el material sólido, con características porosas reciben el nombre de adsorbentes. El área superficial juega un papel importante en este proceso, es por ello que el

adsorbente presenta diámetros de poro pequeños con el fin de incrementar esta última, además de que el proceso puede darse en monocapa o multicapa de acuerdo con las características y propiedades del adsorbente, así como la interacción entre este último y el adsorbato.

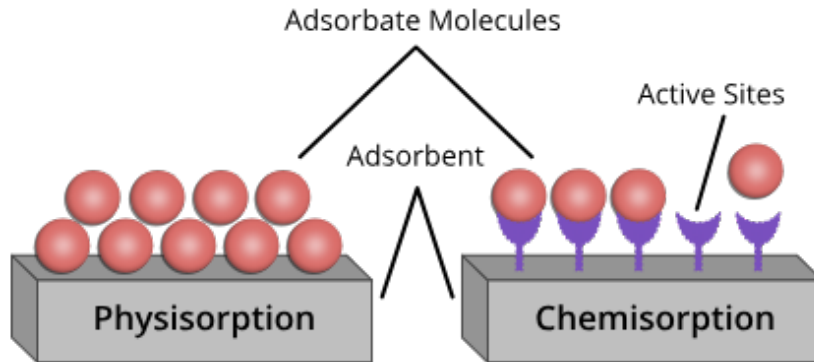


Figura 9. Adsorción.
(63)

Los materiales que son empleados con mayor frecuencia dadas estas características son el carbón activado, el óxido de aluminio, el gel de sílice, de sodio o calcio; zeolitas sintéticas (tamices moleculares), etc. (64).

2.4.1 Fisisorción.

La fisisorción se caracteriza por ser un proceso fácilmente reversible, además de ser el resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción (fuerzas de van de Waals) entre las moléculas del adsorbente y el adsorbato (62). Entre las propiedades de la fisisorción podemos destacar (65):

- Interacción molecular débil.
- El adsorbato mantiene sus propiedades químicas debido a que la energía es lo suficientemente pequeña como para romper enlaces.
- Puede haber distorsión en la geometría del adsorbato.
- Se produce una adsorción en multicapa.
- Proceso exotérmico donde el calor liberado se encuentran en el rango de 4 a 40 KJ/mol.
- La energía liberada es adsorbida en forma de vibración por la red del adsorbente, aumentando de esta manera su temperatura.

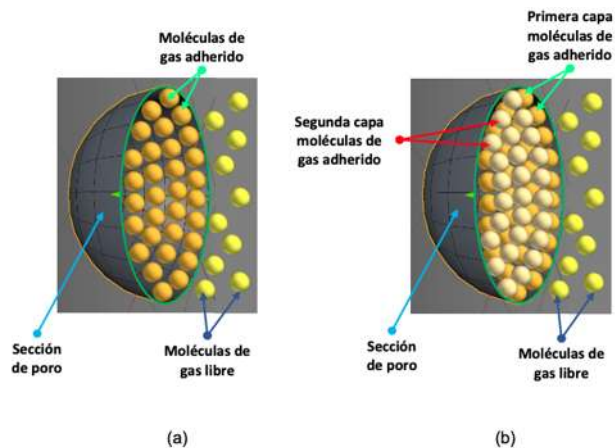


Figura 10. Fisisorción.

a. monocapa; b. multicapa

(66)

2.4.2 Quimisorción.

La quimisorción es un proceso espontáneo que tiene como resultado la interacción química entre el adsorbente y el adsorbato, es decir, se forma un enlace químico fuerte por lo tanto, la característica principal de este tipo de adsorción es la formación de una capa de adsorbato sobre la superficie del adsorbente, aunque esto no descarta la posibilidad de tener multicapas tras una fisisorción entre las primeras capas de adsorbato (62). El calor que se libera durante el proceso es comúnmente grande, muy parecido en magnitud al del calor en una reacción química, además de ser, generalmente irreversible debido a que tras someterse a una desorción, el material adsorbente puede sufrir daños y/o cambios en su superficie (64).

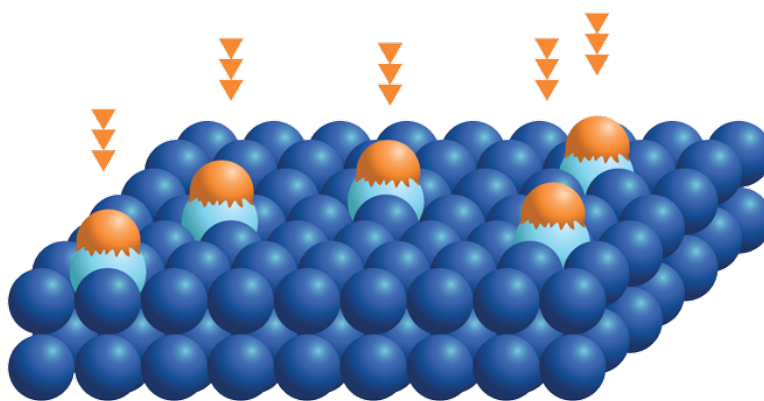


Figura 11. Quimisorción.

(67)

2.4.3 Adsorbentes.

Los adsorbentes son sólidos con la característica fundamental de superficie específica alta, es decir, la relación entre el área superficial total y la masa del sólido. Esta relación se consigue con una superficie microporosa. Además de la superficie específica se destacan las características:

- Capacidad (“carga”): refiere a la cantidad de adsorbato que es retenida por unidad de masa o volumen de adsorbente.
- *Selectividad*: cociente entre las capacidades de adsorción entre dos o más adsorbentes en relación con un adsorbato en común.
- Regeneración: mide la fracción que es recuperada tras regenerar el adsorbente, además de determinar la energía y el tiempo requerido.
- Propiedades mecánicas: refiere a la resistencia mecánica cuando los sólidos son empleados en un lecho fijo; y resistencia a la abrasión, cuando el proceso se realiza sobre lechos móviles, fluidizados o tanques agitados.

2.4.4 Características de los adsorbentes.

Para ser adecuado para su uso comercial, un adsorbente debe tener como características primordiales (68):

- Alta selectividad.
- Alta capacidad para minimizar la cantidad de adsorbente.
- Favorables para una adsorción rápida.
- Estabilidad química y térmica.
- Alta resistencia a la suciedad para una larga vida.
- Sin tendencia a promover reacciones químicas no deseadas.
- Capacidad de regeneración.
- Bajo costo.

2.4.5 Equilibrio de adsorción.

El equilibrio de adsorción se representa de acuerdo con la relación entre la cantidad adsorbida y la presión (para el caso de gases), o la concentración en la fase líquida (cuando es el caso de adsorción de líquidos), para una temperatura constante. Esta relación se conoce como isoterma de adsorción.

Brunauer clasificó las isotermas de adsorción en seis tipos (Figura 12), dicha clasificación es recomendada actualmente por la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry).

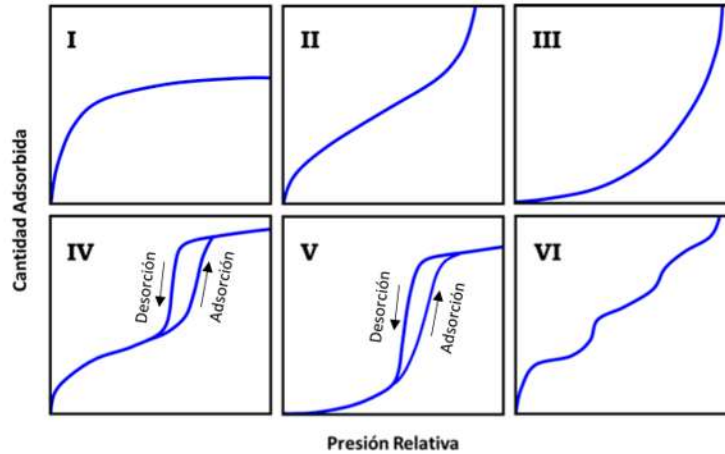


Figura 12. Tipos de isothermas de adsorción.

(66)

- La isoterma de tipo I es también denominada como isoterma de Langmuir, presenta una simetría cóncava en el eje de abscisas, mientras que la cantidad adsorbida se aproxima a un valor constante al aumentar la presión relativa, esto corresponde a una adsorción en monocapa que culmina el proceso cuando toda la superficie de adsorbente es cubierta. Las isothermas de este tipo están asociadas a materiales microporosos y el límite de adsorción está dado por el volumen accesible de material y no por el tamaño de poro.
- La isoterma de tipo II representa una adsorción en multicapa en donde el ascenso pronunciado al iniciar el gráfico corresponde a la formación de una primera capa de adsorbato, dándose lugar a la formación de las demás capas conforme aumenta la presión relativa. Para favorecer este tipo de adsorción es necesaria una alta afinidad entre el adsorbato y el adsorbente, ésta debe ser incluso mayor que la afinidad del adsorbato por sí mismo.
- La isoterma de tipo III corresponde a una adsorción multicapa en donde la constante de equilibrio de formación de la primera capa es igual a la constante de formación de las siguientes capas, es una isoterma característica de materiales macroporosos o incluso materiales sin porosidad y se manifiesta cuando la afinidad entre adsorbato y adsorbente es poca significativa, por ello la adsorción es sólo relevante a altas presiones.
- La isoterma de tipo IV presenta un ciclo de histéresis inducido por una porosidad muy pequeña, esto provoca que el poro puede ocupar toda su área disponible antes de adsorber todo lo que se podría, dando lugar a una saturación de adsorbatos en la superficie del adsorbente.

- La isoterma de tipo V presenta similitud a la de tipo III, además de contar con la característica principal de que las interacciones adsorbato – adsorbente son sumamente débiles.
- La isoterma de tipo VI representa una adsorción en multicapa sobre una superficie uniforme y no porosa, el comportamiento escalonado se debe a cada capa formada. Este tipo de isothermas son muy poco frecuentes.

La interpretación para las curvas características de la isoterma tipo I se designan como “favorables” en la captación del soluto; a diferencia de las curvas mostradas en las isothermas tipo III, representan mecanismos “desfavorables” para la captación de soluto.

III. ANTECEDENTES.

3.1 Contaminantes emergentes (CE).

La presencia de contaminantes emergentes (CE) en el agua ha producido una serie de investigaciones donde se dan propuestas de solución para remover, degradar o eliminar estos agentes, algunas de las alternativas estudiadas son los tratamientos biológicos, tal como es el caso del proceso de eliminación por lodos activos de ibuprofeno y diclofenaco por medio de la transformación en especies iónicas realizado en 2005 por Kikuta (69). Algunos trabajos con metodologías para el tratamiento de estos contaminantes se citan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Tratamiento de contaminantes emergentes.

Estudio.	Alternativa.	Autor (es).
Inmovilización bacteriana.	Filtro percolador, lecho bacteriano o filtro biológico.	(6)
Degradación del etinilestradiol.	Nitrificación de fangos.	(7)
Remoción y degradación de contaminantes emergentes (CE).	Coagulación y floculación.	(70)
Remoción de ciclofosfamida y ciprofloxacina.	Bioreactores de membrana.	(8)
Fitorremediación de contaminantes emergentes de origen farmacéutico.	Humedales flotantes	(71)

3.2 Ibuprofeno (IBP).

Por otra parte el ibuprofeno ha sido estudiado en diversas ocasiones con la finalidad de remover su presencia en medios acuáticos, tal como se muestra a continuación:

Tabla 4. Adsorción de Ibuprofeno (IBP).

Adsorbente.	Cinética de adsorción.	Equilibrio de Adsorción.	Referencia.
Corcho activado con carbonato de potasio.	Pseudo segundo orden.	Langmuir.	(72)
Silice natural.	Pseudo segundo orden.	Langmuir.	(10)
Lignosulfonato (MgO-SiO ₂).	Pseudo segundo orden.	Langmuir.	(73)
Estructura organometálica de 1,4-dicarboxibenceno.	Pseudo segundo orden.	Langmuir.	(11)
Estructura organometálica de Níquel 74(Ni).	Pseudo segundo orden.	No reportado.	(12)
Estructura organometálica a base de Circonio (UiO-67(Zr)).	No reportado.	Langmuir.	(13)
Arcilla caolinita.	No reportado.	No reportado	(74)
Quitosano-óxido de grafeno.	Pseudo primer orden.	Freundlich.	(75)

IV. JUSTIFICACIÓN

El Ibuprofeno es ampliamente utilizado para la remediación y tratamiento de malestares físicos en la vida cotidiana, sin embargo, el organismo no logra metabolizar por completo este medicamento provocando su presencia en aguas residuales, teniendo un efecto negativo en los organismos vivos perjudicando severamente el ambiente y la salud humana, pues puede producir alteraciones en el sistema endocrino y perturbar las funciones hormonales aun encontrándose a bajas concentraciones.

El empleo de estructuras de Hidroalcita como agentes de inmovilización de contaminantes requiere el conocimiento de su estabilidad bajo las condiciones de operación en las que se lo planea usar. Curiosamente, la estabilidad termodinámica y cinética de estas fases es prácticamente desconocida.

V. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años ha aumentado la contaminación del agua, especialmente por procesos químicos en actividades industriales que generan vertimientos con altas concentraciones de contaminantes emergentes que afectan no solo el recurso hídrico sino también la flora, la fauna y la salud del ser humano.

Estos contaminantes presentan toxicidad y muchos de ellos son mutagénicos dificultando su eliminación por métodos químicos y biológicos propagándose con mayor velocidad y facilidad debido al medio en el que son descargados.

El Ibuprofeno (IBP) es uno de los contaminantes emergentes que se puede encontrar en los vertimientos (agua residual) generados por distintas poblaciones, ya que su acceso es prácticamente universal debido a sus propiedades antiinflamatorias y analgésicas. El metabolismo del cuerpo humano excreta aproximadamente el 10% de las dosis consumidas de este medicamento, reflejando un aumento de concentración en efluentes de agua residual y afectando de manera directa e indirecta la flora y fauna local, pues este tipo de contaminantes son conocidos por ser fuertes disruptores endocrinos.

Por otra parte, los materiales tipo Hidrotalcita poseen una estructura cristalina hexagonal u octaédrica que consta de la formación láminas por intercalación de cationes metálicos, además, esta superficie laminar tiene la presencia de grupos hidroxilo, mientras que en la región intermedia se encuentran aniones que compensan la carga positiva en las láminas y moléculas de agua. Las Hidrotalcitas híbridas son compuestos que han sido estudiados y evaluados en procesos de remediación ambiental gracias a sus propiedades, tales como la estabilidad térmica y química que presentan sus estructuras, los procesos de obtención con metodologías sencillas y en la mayoría de los casos, muy económicas; además de que los productos de síntesis presentan excelente biocompatibilidad.

El propósito de este trabajo fue revisar el comportamiento de adsorción del contaminante emergente Ibuprofeno (IBP) en solución acuosa sobre Hidrotalcitas híbridas de composición ZnMgAl a través de un método de lotes.

VI. HIPÓTESIS

La síntesis y aplicación de los materiales Hidrotalcita híbridos sobre efluentes con presencia de contaminantes emergentes (Ibuprofeno), producirá la remoción del contaminante por medio de un proceso de adsorción en dónde el anión nitrato será intercambiado por la molécula de contaminante.

VII. OBJETIVO GENERAL

Evaluar Hidrotalcitas híbridas de composición ZnMgAl como agentes adsorbentes de contaminantes emergentes (Ibuprofeno) disueltos en agua.

7.1 Objetivos particulares.

- a. Obtener Hidrotalcitas híbridas a partir de óxidos de Zn, Mg y Al por el método de coprecipitación de sales metálicas a baja sobresaturación.
- b. Determinar las propiedades fisicoquímicas de los sólidos mediante técnicas de caracterización por difracción de rayos-X y espectroscopia de infrarrojo.
- c. Determinar a qué modelo de equilibrio de adsorción se ajustan los valores obtenidos en la experimentación.
- d. Obtener el modelo de cinética del proceso de adsorción.

VIII. METODOLOGÍA

El procedimiento experimental empleado en el presente trabajo puede resumirse por medio del diagrama de la figura 13 de donde podemos destacar que la metodología consistió en tres etapas fundamentales, la etapa de síntesis, la etapa de caracterización y análisis, y la etapa de pruebas de adsorción.

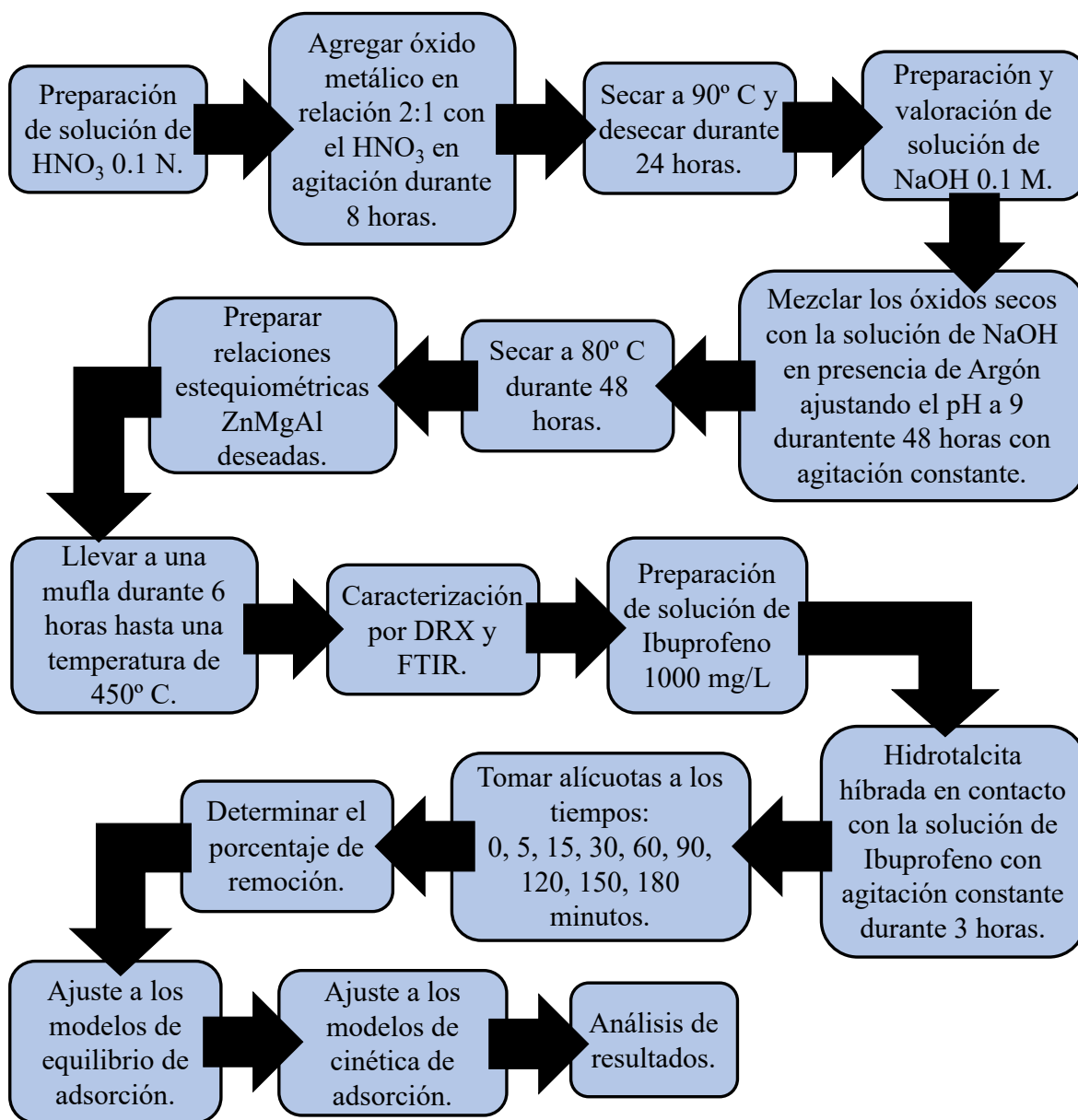


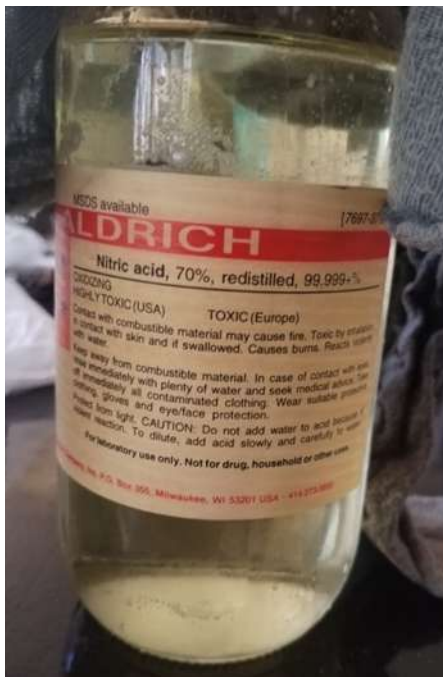
Figura 13. Metodología experimental.

8.1 Síntesis de las Hidrotalcitas híbridas.

La etapa de síntesis se describe a continuación por medio del siguiente diagrama, proceso que constó de dos etapas principales, la preparación de soluciones y el proceso de síntesis.

8.1.1 Preparación de soluciones.

Se preparó una solución de ácido nítrico (HNO_3) 0.1 N. empleando un reactivo de la marca Aldrich al 70%



Se pesaron los óxidos grado comercial en una relación 2:1 y se aforaron con 100 mL de HNO_3 0.1 N.

- ZnO .



- MgO-FeO (3:1).



- Al_2O_3 .



Figura 14. Preparación de soluciones.

Durante un periodo de 8 horas en agitación, se mantuvieron las soluciones para posteriormente someterse a un proceso de secado a 90°C en un horno durante 2 horas y 24 horas en un desecador.

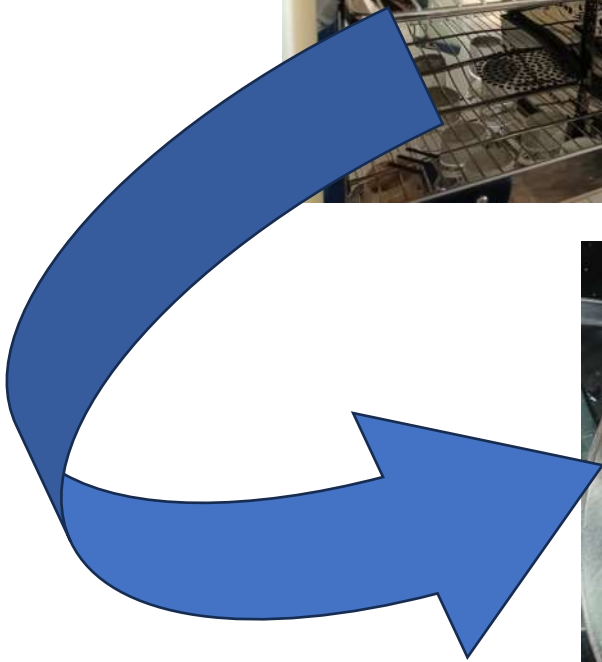


Figura 15. Agitación y secado de sales.

8.1.2 Síntesis.

Se trituro, peso y aforo Hidróxido de Sodio (NaOH) grado reactivo de la marca Golden Bel para preparar una solución 0.1 M., misma que se valoró con biftalato ácido de potasio ($\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$) disuelto en 25 mL de agua destilada y fenofaleína, para crear un medio básico con un pH de 9 en un matraz de tres bocas que contenía las sales obtenidas y Argón (Ar), proceso que tuvo una duración de 48 horas con agitación constante a 3000 rpm.

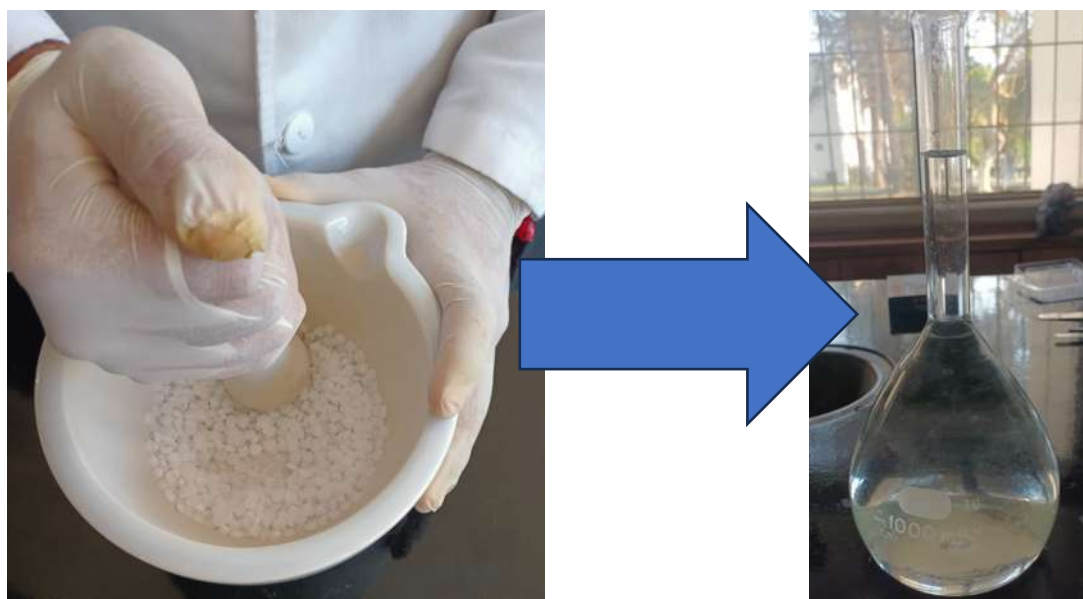


Figura 16. Solución NaOH 0.1 M.



Figura 17. Sistema de agitación en presencia de Ar.

Un proceso de secado a 50° C durante 48 horas nos permitió preparar una relación ZnMgAl (1:1.8:1.5) para la formación de la hidrotalcita híbrida, mezcla que fue sometida a una mufla durante un periodo de 6 horas a una temperatura máxima de 450° C.



Figura 18. Mufla de síntesis de la hidrotalcita híbrida..



Figura 19. Obtención de las hidrotalcitas híbridas.

8.2 Caracterización de las estructuras.

Para identificar los grupos funcionales, estructura y propiedades fisicoquímicas de las Hidrotalcitas híbridas se usaron las técnicas de difracción de rayos X y espectroscopia de infrarrojo.

8.3 Técnica de análisis.

Una técnica de análisis busca determinar la magnitud de alguna propiedad física o química de una sustancia de interés, en el presente trabajo la propiedad a estudiar es la adsorción del material sintetizado, es por ello que una tercera etapa consistió en la preparación de una solución del contaminante emergente (Ibuprofeno), de 1000 mg/L para llevarla a contacto y agitación constante con la Hidrotalcita híbrida sintetizada; sometiendo los resultados a técnicas de caracterización para comprobar la modificación de las estructuras laminares y detectar que los nuevos grupos funcionales presentes correspondan a aquellos característicos del contaminante emergente (Ibuprofeno); posteriormente se evaluó la cantidad adsorbida por las Hidrotalcitas por medio de la técnica de espectrofotometría UV-Vis con el fin de determinar el modelo cinético de adsorción que describe el proceso.

8.3.1 Preparación de la solución del contaminante.

Se empleó Ibuprofeno comercial para preparar una solución de 1000 mg/L.



Figura 20. Trituración de las tabletas de Ibuprofeno.



Figura 21. Solución saturada de Ibuprofeno (IBP).

8.3.2 Adsorción de Ibuprofeno (IBP).

Esta etapa consistió en el contacto de la hidrotalcita híbrida con la solución de 1000 mg/L de ibuprofeno (IBP) con agitación constante de 2000 rpm en un agitador magnético de la marca Arsa, tomando alícuotas de la solución a tiempo 0, 5, 15, 30, 60, 90, 120, 150, y 180 minutos para su posterior evaluación de remoción.



Figura 22. Alícuotas a diferentes tiempos de contacto.

8.3.3 Evaluación de remoción de Ibuprofeno.

El uso de un espectrofotómetro UV-Vis fue empleado para obtener la curva de calibración del Ibuprofeno y de esta manera, determinar la concentración de cada alícuota tomada.

8.3.4 Modelos de equilibrio de adsorción.

Los modelos de equilibrio de adsorción a evaluar son los siguientes (76):

- a. Modelo de Langmuir.

$$q_e = q_{m\acute{a}x} \left(\frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \right) \quad (\text{Ecuación 1})$$

- b. Modelo de Freundlich.

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde:

q_e : concentración en equilibrio del adsorbato (mg/g)

$q_{m\acute{a}x}$: capacidad máxima de adsorción

C_e : concentración en equilibrio en la fase líquida (mg/L)

8.3.2 Modelos de cinética de adsorción

La evaluación de estos modelos nos permitirá predecir la tasa a la cual ocurrirá la adsorción y el tiempo de residencia del adsorbato en el sistema, para ello emplearemos las ecuaciones:

- a. Pseudo-primer orden (76).

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (\text{Ecuación 3})$$

- b. Pseudo-segundo orden (76).

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (\text{Ecuación 4})$$

- c. Elovich (77).

$$q_t = \left(\frac{1}{\beta} \right) \ln(\alpha\beta) + \left(\frac{1}{\beta} \right) \ln(t) \quad (\text{Ecuación 5})$$

d. Difusión intraparticular (78).

$$q_t = k_i t^{1/2} + C \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde:

q_t : concentración en la fase sólida a un tiempo t (mg/g)

t : tiempo en minutos

C : intercepto

IX. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

9.1 Síntesis de las Hidrotalcitas híbridas.

El proceso de síntesis empleado nos dio como resultado un material de color gris y de textura suave, la figura 24 muestra el resultado de síntesis.



Figura 23. Hidrotalcita híbrida sintetizada.

9.2 Caracterización de las estructuras.

9.2.1 Difracción de rayos X (DRX).

La figura 25 muestra la caracterización por DRX del producto de síntesis donde se logra apreciar una estructura laminar cristalina, esto confirmado por los agudos picos de difracción localizados en las reflexiones (003) y (006). Por otra parte se confirma una estructura de red hexagonal con simetría romboédrica en las reflexiones (010) y (013) (79).

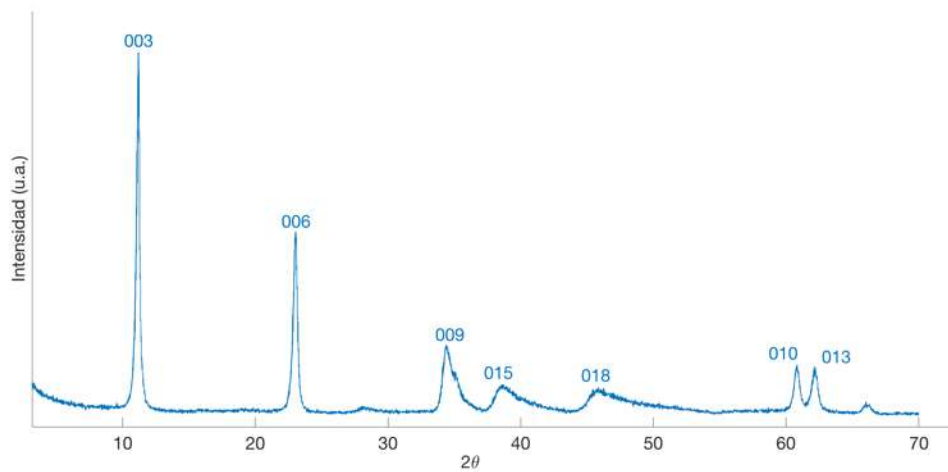


Figura 24. Patrones DRX de la hidrotalcita híbrida sintetizada.

La constante de red (c) y las distancias interplanares (d_{003}), calculados a través de la ecuación y los índices de Miller; y la relación $c = 3 d_{003}$; se muestran en valores de 2.36 nm y 0.864 nm, respectivamente.

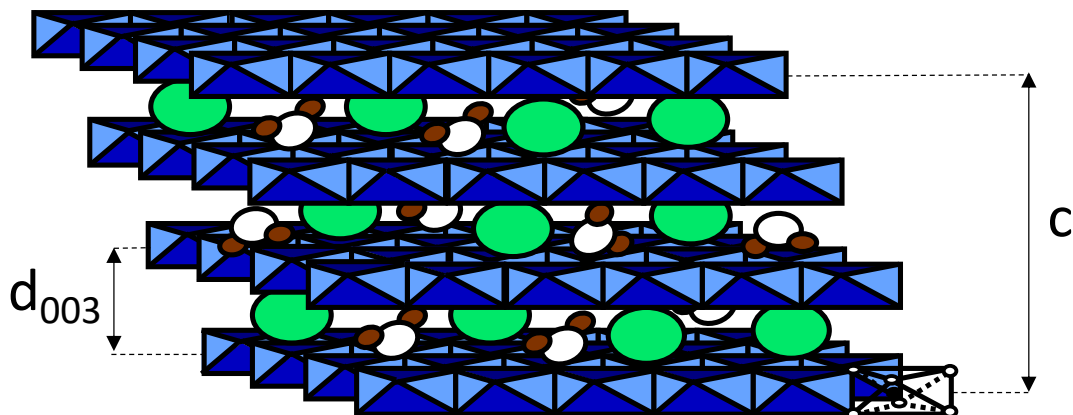


Figura 25. Parámetros de red (c) y distancias interplanares (d_{003}).

9.2.2 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

El espectro FTIR, figura 27, nos muestra una banda alrededor del plano 3400 cm^{-1} , correspondiente a la frecuencia de vibración del óxido de Fe formado en las laminillas; por otro lado, en 1380 cm^{-1} una señal correspondiente al anión de la región interlaminar nitrato (NO_3^-). Las bandas localizadas en 800 cm^{-1} corresponden a las vibraciones del anión localizado en la región interlaminar.

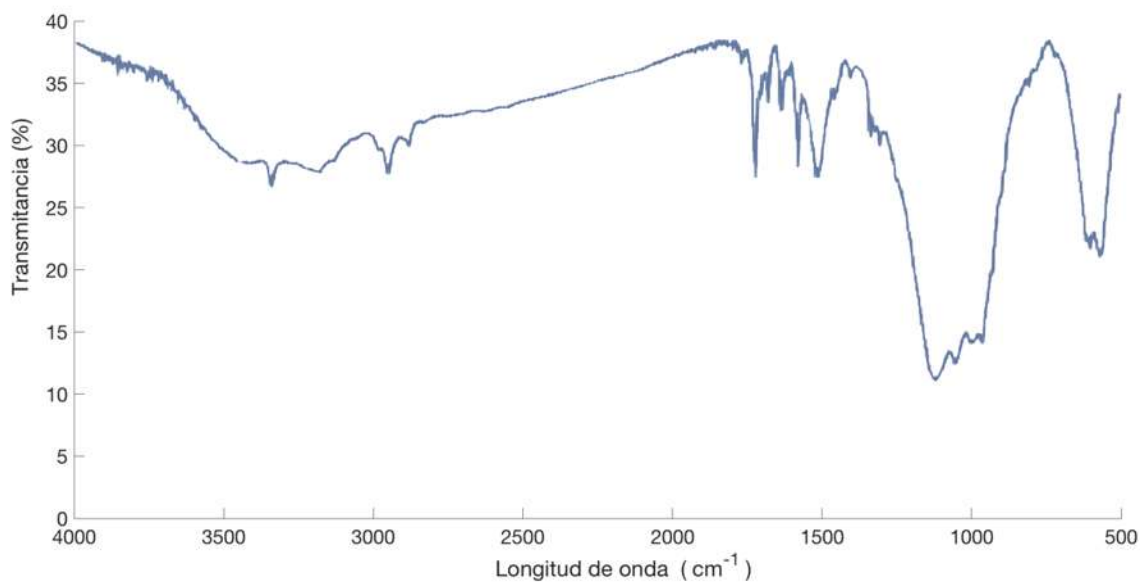


Figura 26. Espectro FTIR de la hidrotalcita híbrida sintetizada.

9.3 Técnica de análisis.

9.3.1 Adsorción de Ibuprofeno (IBP).

Tras somer a contacto la hidrotalcita híbrida con una solución de ibuprofeno a 1000 mg/L, se caracterizó nuevamente el material para comprobar los cambios en la estructura, resultados que se muestran a continuación:

La figura 28 nos muestra que la estructura de las hidrotalcitas se mantiene, mostrando una intercalación de moléculas orgánicas en las reflexiones 8.40, 13.32, 26.50, 28.62 y 31.19; mostrándose además reflexiones pertenecientes a fases que no pudieron ser identificadas. El difractograma permite confirmar la presencia de ibuprofeno en las estructuras, específicamente en la región interlaminar, ya que tras realizarse varios lavados del sólido, la molécula orgánica muestra presencia aun al ser un componente muy soluble en agua.

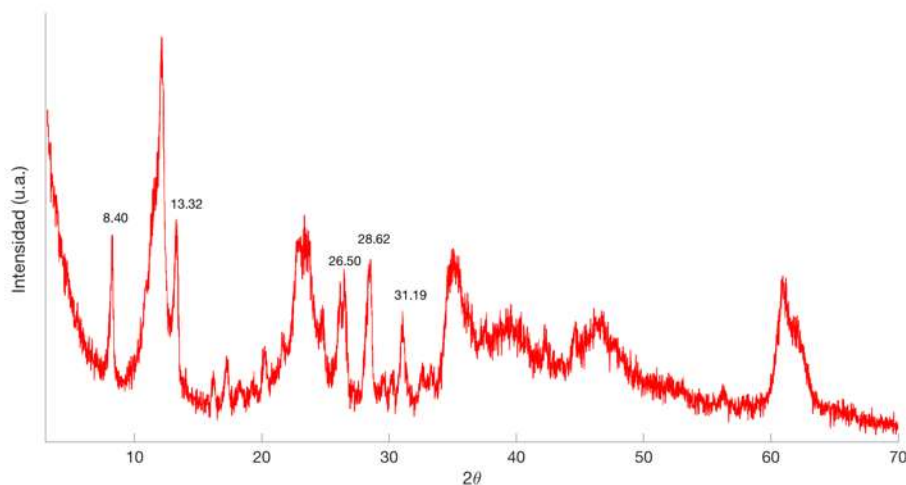


Figura 27. Difractograma después del proceso de adsorción.

La figura 29 muestra el FTIR después del proceso de adsorción identificando un aumento en la banda correspondiente al grupo hidróxilo (3400 cm^{-1}), y al anión nitrato (1380 cm^{-1}), sugiriendo que el ibuprofeno no sólo se depositó en la región interlaminar, si no que además esta presente sobre las mismas laminas de hidróxido. Las bandas ubicadas en los planos 1379 cm^{-1} , 1721 cm^{-1} , 1462 cm^{-1} , 1364 cm^{-1} , 1231 cm^{-1} , 1117 cm^{-1} , 779 cm^{-1} y 668 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de los grupos CH_3 , C=O , $-\text{CH}_2$, $-\text{CH}-$, C-C , $-\text{O}-$, CH_2 y C-H respectivamente, esto último puede corroborarse con la figura 28 correspondiente al espectro FTIR del Ibuprofeno, dónde se aprecian vibraciones en 3091 y 3019 cm^{-1} causadas por los enlaces $=\text{C-H}$ en los anillos de benceno.

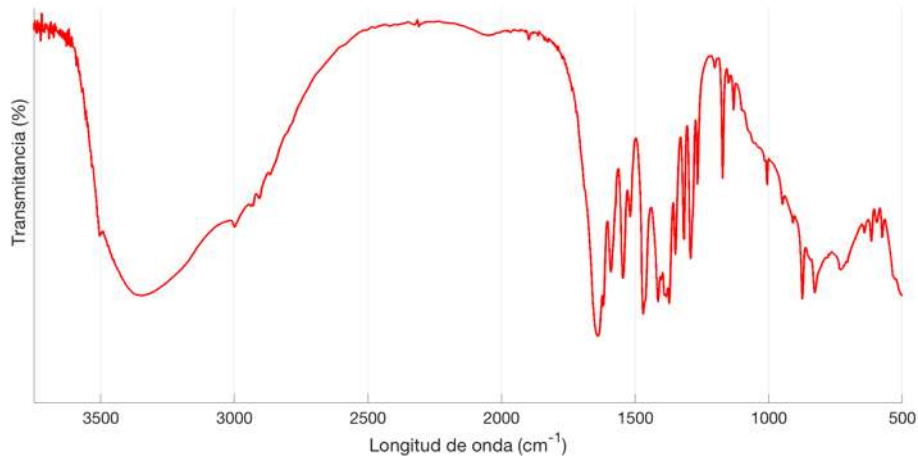


Figura 28. Espectro FTIR después del proceso de adsorción.

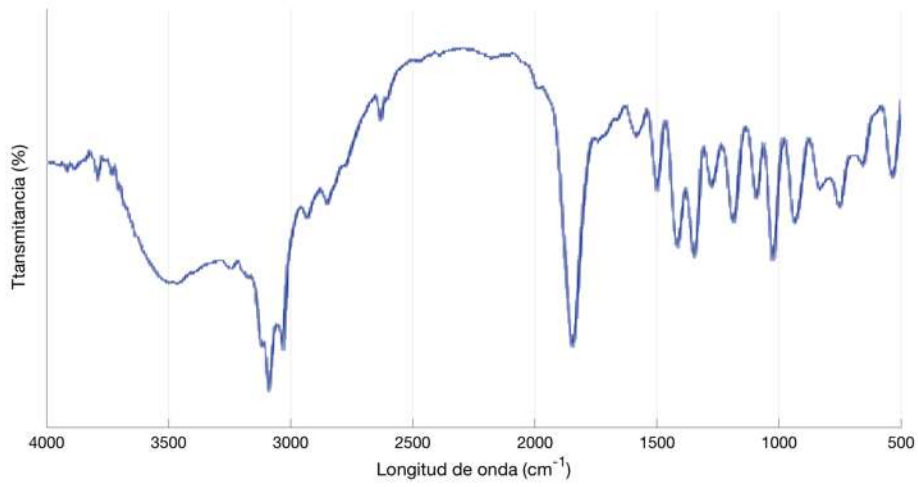


Figura 29. Espectro FTIR del Ibuprofeno.

9.3.2 Evaluación de remoción de Ibuprofeno.

Por medio de un espectrofotometro UV-Vis se obtuvieron las concentraciones de ibuprofeno de las alícuotas tomadas a los tiempos mencionados con anterioridad, resumiendo los resultados en la figura 31 en dónde se aprecia además que la máxima remoción obtenida fue de apenas el 55% durante un periodo de 3 horas.

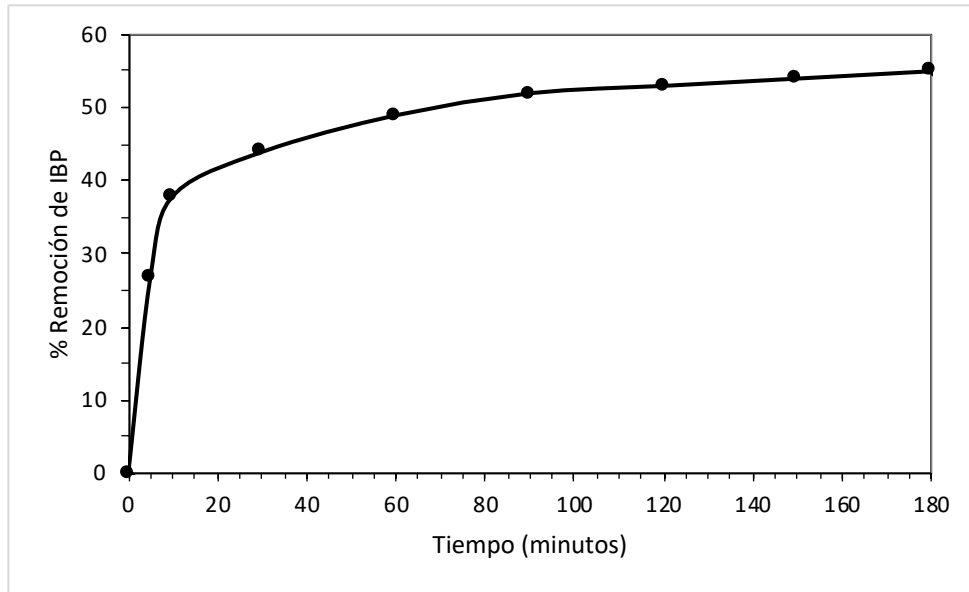


Figura 30. Porcentaje de remoción de Ibuprofeno.

9.3.3 Modelos de equilibrio de adsorción.

La isoterma de adsorción correspondiente nos muestra un comportamiento lineal con una correlación de 0.9967 (figura 32), sin embargo, la evaluación de los modelos de equilibrio de adsorción fueron empleados y presentados sus parámetros en la tabla 5.

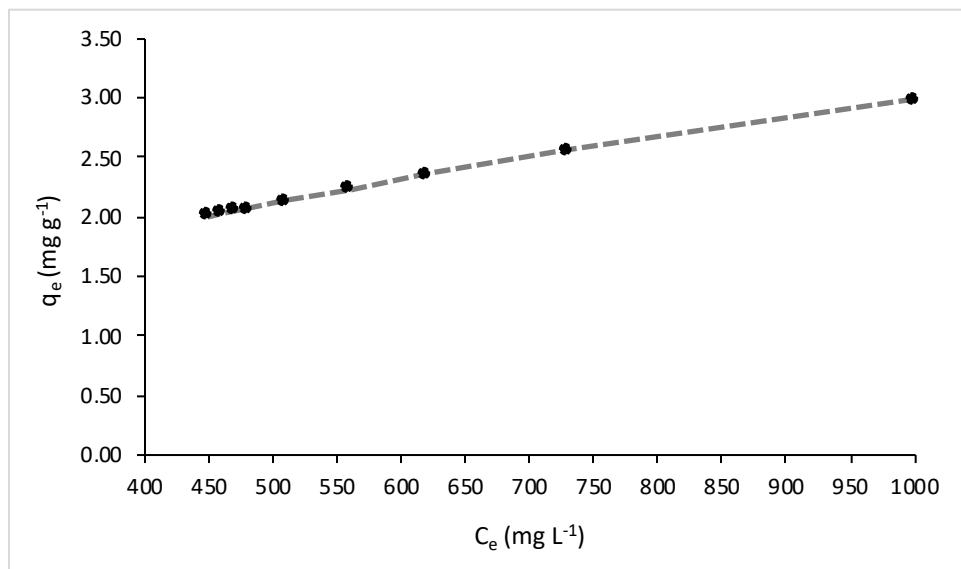


Figura 31. Isoterma de adsorción a 25° C.

Tabla 5. Parámetros de los modelos de equilibrio de adsorción.

Langmuir.		
$q_{m\acute{a}x}$ (mg g ⁻¹)	K_L (L mg ⁻¹)	R^2
4.9652	1.4843×10^{-3}	0.9967
Freundlich.		
$1/n$	K_F^a	R^2
0.5	0.0946	0.9999

Como se aprecia en la tabla anterior, ambos modelos de equilibrio presentan buena correlación a los datos obtenidos, sin embargo esto se atribuye a las altas concentraciones obtenidas durante cada etapa de equilibrio. Esta correlación nos indica una adsorción en monocapa que se realiza sobre centros activos.

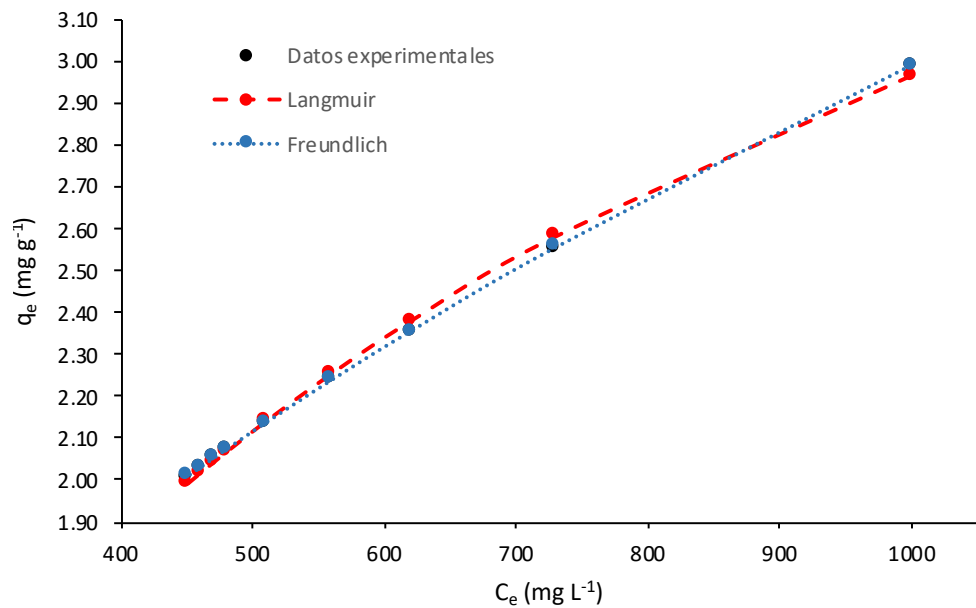


Figura 32. Ajuste a los modelos de equilibrio de adsorción.

9.3.4 Modelos de cinética de adsorción.

El estudio de los modelos de adsorción permite concluir que el proceso de adsorción se da en monocapa en la superficie del material híbrido por quimisorción sobre centros activos heterogéneos, siendo el modelo de pseudo segundo orden y el de Elovich (modelo característico de procesos de adsorción entre un soluto en fase líquida a partir de un adsorbente sólido), aquellos que presenta una mayor correlación a los datos obtenidos. La figura 34 muestra el comportamiento de dichos modelos de cinética de adsorción.

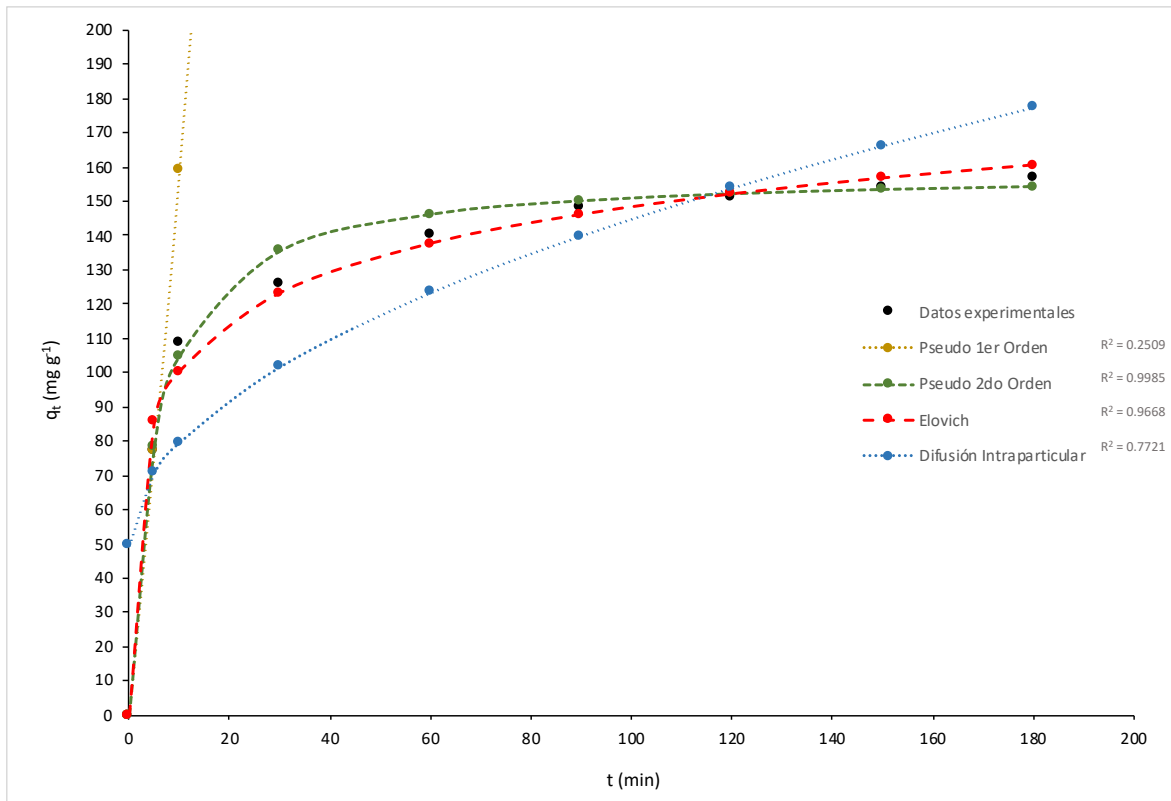


Figura 33. Cinética de adsorción de las hidrotalcitas híbridas.

X. CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de la presente investigación muestran un método de síntesis viable y económico, pues los reactivos empleados fueron de grado comercial y el producto mostró difractogramas típicos a los materiales tipo hidrotalcita. Por otra parte, la mezcla de Óxido de Magnesio y Óxido de Hierro (II) en una relación 1:3, respectivamente, nos permitió obtener un híbrido con la de estructura doble laminar con excelentes propiedades para adsorber la molécula del contaminante emergente Ibuprofeno.

El producto de síntesis mostró cristalinidad en su estructura, además de confirmar la presencia de óxidos divalentes y trivalentes que formaron la estructura laminar característica con su respectivo anión para compensar la carga en la región interlaminar, el nitrato.

De acuerdo con los espectros FTIR, podemos comprobar que el anión nitrato fue intercambiado por las moléculas del contaminante emergente, pues la banda vibracional en 3800 cm^{-1} de las figuras 26 (antes del proceso de adsorción) y figura 28 (después del proceso de adsorción) muestran una reducción en la presencia de la especie iónica.

La adsorción de ibuprofeno se llevo a cabo sobre centros activos por quimisorción, esto de acuerdo con los resultados de la evaluación de los modelos cinéticos de adsorción que nos muestran una correlación típica entre el adsorbato sólido en solución y la superficie del material híbrido. Además, la caracterización por FTIR después del proceso de adsorción nos demuestra un aumento significativo en la banda vibracional correspondiente al grupo hidroxilo, demostrando así la presencia de ibuprofeno en la región interlaminar, ya que a su vez, la banda vibracional correspondiente al anión nitrato, mostró una reducción significativa.

Por otra parte, este método de eliminación de contaminantes emergentes no presenta un impacto negativo, ya que el proceso de síntesis no requiere consumos energéticos altos y los reactivos a utilizar son de grado comercial, reduciendo de esta manera el costo de producción además de considerar que gracias a las propiedades de este tipo de materiales, como lo es el efecto memoria, la reutilización de estos sólido cristalinos incrementa la vida útil y favorece la remoción de agentes contaminantes.

XI. TRABAJO FUTURO.

La determinación de propiedades texturales, área específica y propiedades ácido-base de los materiales obtenidos son estudios y pruebas que permitirían enriquecer la información sobre el proceso de remoción del contaminante emergente de interés, además de los puntos citados a continuación:

1. Evaluar distintas proporciones de los metales empleados en la síntesis de las Hidrotalcitas híbridas.
2. Estudiar las propiedades adsorbentes de la hidrotalcita híbrida empleando diferentes aniones en la región interlaminar.
3. Verificar las propiedades adsorbentes con diferentes contaminantes de la rama emergente.
4. Realizar estudios de adsorción con diferentes variables para determinar el efecto de la temperatura, pH, tiempo de contacto, etc.
5. Emplear técnicas de caracterización como la termogravimetría con la finalidad de conocer a mayor profundidad las características que presentan los sólidos sintetizados.

XII. REFERENCIAS.

1. Jaimés Urbina, J. A., & Vera Solano, J. A. (2020) Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización. Dialnet. [En línea] <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7590764>.
2. Damia Barceló L, López de Alda MJ. (2021) Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. Panel científico-técnico de seguimiento de la política de aguas. [En línea] 15 de Enero de 2021. https://fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf_contaminacion.pdf.
3. Dodds E., & Lawson W. (1998), Molecular structure in relation to estrogenic activity compounds without a phenanthrene nucleus. Proc., Royal Society London B., págs. 222-232.
4. Laurel, A. C. (2021) Las dimensiones de la pandemia de Covid-19. Scielo. [En línea]. <https://www.scielo.org.mx/pdf/ete/v87n348/2448-718X-ete-87-348-963.pdf>.
5. Araceli Peña- Álvarez, Alejandra Castillo-Alanís. (2015) Identificación y Cuantificación de Contaminantes Emergentes en Aguas Residuales por Microextracción en Fase Sólida-Cromatografía de Gases-Espectrometría de Masas., D. R. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico- Biológicas, págs. 18 (1): 29-42.
6. KITAMURA, S., et. al. (2005) Comparative Study of the Endocrine-Disrupting Activity of Bisphenol A and 19 Related Compounds. Toxicological Sciences, v. 84, n. 2, págs. 249-259. <http://dx.doi.org/10.1093/toxsci/kfi074>.
7. LAYTON, A., et. al. (2000) Mineralization of steroidal hormones by biosolids in wastewater treatment system in Tennessee USA. Environmental Science & Technology, v. 34., págs. 3925-3931. <http://dx.doi.org/10.1021/es9914487>.
8. ZAVISKA, F., et. al. (2013), Nanofiltration membrane bioreactor for removing pharmaceutical compounds. Journal of Membrane Science, v. 429, pág. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2012.11.022>.
9. AS Mestre, J. Pires, JMF Nogueira, AP Carvalho. (2007), Activated carbons for the adsorption of ibuprofen. ELSEVIER Carbon (45), págs. 1979-1988.
10. Ulfa M, Sari AY, Prasetyoko D. (2018), Synthesis of unique natural silica (UNS) material via dual co-templating method using starch of waste rice-gelatin composite and their performance in drug delivery system. AIP Conference Proceed 2049(1).
11. Sun W, Li H, Li H, Li S, Cao X. (2019) Adsorption mechanisms of ibuprofen and naproxen to UiO-66 and UiO-66-NH₂: batch experiment and DFT calculation. Chem Eng J 360, págs. 645-653. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.021>.

12. Xu T, Hou X, Liu S, Liu B. (2018), One-step synthesis of magnetic and porous Ni@MOF-74(Ni) composite. *Micropor Mesopor Mater* 259, págs. 178-183. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.10.014>.
13. Mondol MMH, Yoo DK, Jhung SH. (2022) Adsorptive removal of car- bamazepine and ibuprofen from aqueous solution using a defec- tive Zr-based metal-organic framework. *J Environ Chem Eng* 10(6):108560, pág. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108560>.
14. Klein, C., & Hurlbut, J. (1993) *Manual of Mineralogy*. USA, John Wiley & Sons.
15. K. Gho, T Lim, Z Dong. (2009) Enhanced arsenic removal by hydrothermally treated nanocrystalline Mg/Al layered double hydroxide with nitrate intercalation. *Environ. Sci. Technol.* 43, págs. 2537-2543.
16. L Hsu, S Wang, Y Tzou, C Lin, J Chen. (2007), The removal and recovery of Cr(VI) by Li/Al layered double hydroxide (LDH). *J. Hazard. Mater.*, 142, págs. 242-249.
17. L Perioli, V Ambrogi, L Di Nauta, M Nocchetti, C Rossi. (2011) Effects of hydrotalcite-like nanostructured compounds on biopharmaceutical properties and release of BCS class II drugs: The case of flurbiprofen. *Appl. Clay Sci.*, 51, págs. 401-413.
18. V Galvita, G Siddiqi, P Sun, A Bell. (2010) Ethane dehydrogenation on Pt/Mg(Al)O and PtSn/Mg(Al)O catalysts. *J. Catal.*, 271, págs. 209-219.
19. S Paredes, M Valenzuela, G Fetter, S Flores. (2010) TiO₂/MgAl layered double hydroxides mechanical mixtures as efficient photocatalysts in phenol degradation. *J. Phys. Chem. Sol.*, 72, págs. 914- 919.
20. David R. Martínez, Gregorio G. Carbajal. (2012) Hidróxidos dobles laminares: arcillas sintéticas con aplicaciones en nanotecnología. *Avances en Química*, págs. 7(1), 87-99.
21. L. Damia Barcelo, y M. J. López de Alda. Fundación Nueva Cultura del Agua. [En línea] 2016. https://fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf_contaminacion.pdf.
22. LIMA, W.G, et. al. (2020) Uso irracional de medicamentos e plantas medicinales contra a COVID-19 (sARs-Cov-2): Un problema emergente. *Brazilian Journal of Health and Pharmacy*. 37-53. DOI: <https://doi.org/10.29327/226760.2.3-5>.
23. Alina Torres, Hazel Alejandro Rodríguez, Marcela Ayala. (2023) Contaminantes emergentes en México: panorama actual, retos y una posible solución biotecnológica. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, págs. 26: 1-20 <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.590>.
24. Cardoso, L., y Valim, J. (2006) Study of acids herbicides removal by calcined Mg-ALCO₃LDH. *J. Phys. Chem. Sol.*, págs. 67, 987-993.

25. Jin, S. Fallgren, P. Chen, Q. (2007) Removal of bacteria and viruses from waters using layered double hydroxide nanocomposites. *Sci. Tech. Adv. Mat.* 8, págs. 67-70.
26. Lv, L. He, J. Wei, M. Duan, X. (2006) Kinetic studies on fluoride removal by calcined layered double hydroxides. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, págs. 8625-8628.
27. Park, M. (2007) Reactions of Cu²⁺ and Pb²⁺ with Mg/Al layered double hidroxide. *Appl. Clay Sci.*, 37, págs. 143-148.
28. D Chaara, I Pavlovic, F Bruna, M Ulibarri, C Barriga. (2010) Removal of nitrophenol pesticides from aqueous solutions by layered double hydroxides and their calcined products. *Appl. Clay Sci.*, págs. 50, 292-298.
29. Troconis, Alejandra (2010). *Tratamiento de Aguas Residuales*. s.l. : Belzona Inc.
30. SEPTAR. (2020) *Suministros Especializados para Potabilización y Tratamiento de Agua Residual*. [En línea] 2020. <https://septar.com.mx/index.php/tratamiento-primario-y-secundario-de-aguas-residuales/>
31. Ainhoa Rubio Clemente, Edwin Lenin Chica Arrieta, Gustavo Antonio Peñuela Mesa. (2013) Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes. *Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. ISSN 1980-993X – <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1176>
32. Instituto Mexicano de Tecnología del Gobierno de México. Agua. [En línea] 16 de noviembre de 2018. <https://www.gob.mx/imta/articulos/el-desafio-de-los-contaminantes-emergentes>.
33. Rodriguez, Miguel Oliver. (2021) Así seguimos la pista a los contaminantes emergentes. *The Conversation*.
34. Prangya R. Rout, Tian C. Zhang, Puspendu Bhunia, Rao Y. Surampalli. (2021) Treatment technologies for emerging contaminants in wastewater treatment plants: A review. *ScienceDirect*. [En línea] 20 de Enero de 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141990>.
35. Delgado, S. (2011) *Evaluación de tecnologías potenciales de reducción de la contaminación de las aguas de canarias (tecnoagua)*. s.l. Proyecto Universidad de la Laguna.
36. Hoyos, Sebastián Adolfo Cuesta (2014). *Estudio química, computacional y farmacológico de Ibuprofeno*. Quito : Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Escuela de Ciencias Químicas.
37. McCullagh, James V. (2008) Enantiomeric Separation/ Resolution: Isolating the S- and R-stereoisomers of (+/-) ibuprofen, (2-(4'-isobutylphenyl)-propionic acid). *J. Chem. Educ.*, págs. 85, 941.
38. McMurry, J. (2004) *Organici Chemistry*. USA : Thomson 6a edición.

39. Ordoñez, Diana Laura Lagunes. (2023). OBTENCIÓN DE MOLÉCULAS QUIRALES DERIVADAS DE 4-ACETILPIRIDINA Y SU ESTUDIO COMO POSIBLES COFORMADORES EN LA PREPARACIÓN DE COCRISTALES DE KETOPROFENO, KETEROLACO E IBUPROFENO. Tesis de doctorado. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
40. Marcela Papamija, Víctor Sarriab. (2010) Degradación fotocatalítica del ibuprofeno empleando dióxido de titanio. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes (Bogotá Colombia), págs. 47-53.
41. Ríos, Sara Elisa Gallego (2022). Determinación del efecto de la disrupción endocrina causada por la exposición a diferentes concentraciones de ibuprofeno y diclofenaco suministrados a Bagre rayado *Pseudoplatystoma magdaleniatum* del Magdalena. s.l. : Universidad de Antioquia Facultad de Ingeniería Doctorado en Ingeniería Ambiental Medellín, Antioquia, Colombia.
42. Miyata, S. (1983) Anion exchange properties of hydrotalcite-like compounds. Clays Clay Miner, págs. 31, 305-311.
43. Sistema de síntesis de hidróxidos dobles laminares con nitrato para reducir contaminación con carbonato y monitoreo de intercambio de nitrato interlaminares. Sánchez Jiménez, Cecilia. Carbajal Arízaga, Gregorio Guadalupe. 2016, Avances en Química, págs. 11 (1), 11-16.
44. W Zhang, X Guo, Z Qian. (2007) Preparation of Ni (II)/Ti(IV) layered double hydroxide at high supersaturation. J. Eur. Ceram. Soc., págs. 28,1623-1629.
45. S Bravo, M Páez, S Oyama. (2004) Review of the synthesis of layered double hydroxides: A thermodynamic approach. Quim. Nova, 27, págs. 601-614.
46. X Duan, D Evans. (2006) Layered double hydroxides: Structure and Bonding. Berlín: Springer, págs. 1-87.
47. C Forano, T Hibino, F Leroux, C Taviot-Guuého. (2006) Layered double hydroxides. En: Handbook of clay science, Developments in Clay Science. F Bergaya, Elsevier, Netherlands., págs. 1021-1096.
48. S Newman, W Jones. (1998). Synthesis, characterization and applications of layered double hydroxides containing organic guests. NewJ. Chem. 22, págs. 105-115.
49. Carlino., S. (1997). The intercalation of carboxylic acids into layered double hydroxides: A critical evaluation and review of different methods. Solid State Ionics 98, págs. 73-84.
50. B Choudary, B Kavita, N Chowdari, B Sreedhar, M Kantam. (2002). Layered double hydroxides containing chiral organic guests: Synthesis, characterization and application for asymmetric C-C bond-forming reactions. Catal. Lett., 78, págs. 373-377.

51. R Rojas, YG Linck, SL Cuffini, G Monti, CE Giacomelli. (2015). Structural and physicochemical aspects of drug release from layered double hydroxides and layered hydroxide salts. *Appl. Clay Sci.*, págs. 109-110, 119-126.
52. S Jin, P Fallgren, J Morris, Q Chen. (2007). Removal of bacteria and viruses from waters using layered double hydroxide nanocomposites., *Sci. Tech. Adv. Mat.*, 8, págs. 67-70.
53. K Muramatsu, O Saber, H Tagaya. (2007). Preparation of new layered double hydroxide, Zn-Mo-LDH. *J. Porous Mater.* 14, págs. 481-484.
54. S Kannan, A Dubey, H Knozinger. (2005). Synthesis and characterization of CuMgAl ternary hydrotalcites as catalysts for the hydroxylation of phenol. *J Catal.*, 231, págs. 381-392.
55. B Choudary, M Kantam, A Rahman, C Reddy. (2003). Selective reduction of aldehydes to alcohols by calcined Ni-Al hydrotalcite. *J. Mol. Catal. A Chem.*, 206, págs. 145-151.
56. R Prihod'ko, M Sychev, I Kolomitsyn, P Stobbelaar, E Hensen, R Santen van. (2002). Layered double hydroxides as catalysts for aromatic nitrile hydrolysis. *Micropor. Mesopor. Mater.*, 56, págs. 241-255.
57. Ch Manzi-Nshutia, P Songtipya, E Manias, M JimenezGasco, J Hossenlopp, Ch Wilkie. (2009). Polymer nanocomposites using zinc aluminum and magnesium aluminum oleate layered double hydroxides: Effects of LDH divalent metals on dispersion, thermal, mechanical and fire performance in various polymers. *Polymer*, 50, págs. 3564-3574.
58. P Mangiacapra, M Raimondo, L Tamaro, V Vittoria. (2007). Nanometric dispersion of a Mg/Al layered double hydroxide into a chemically modified polycaprolactone. *Biomacromol.*, 8, págs. 773-779.
59. C Ribeiro, G Arizaga, F Wypych, M Sierakowski. (2009). Nanocomposites coated with xyloglucan for drug delivery: In vitro studies. *Int. J. Pharmaceutics*, 367, págs. 204-210.
60. I Khalil, K Kogure, H Akita, H Harashima. (2006). Uptake pathways and subsequent intracellular trafficking in nonviral gene delivery. *Pharmacol. Review*, 58, págs. 32-45.
61. K Tyner, M Roberson, K Berghorn, L Li, R Gilmour, C Barr, E Giannelis. (2004). Intercalation, delivery and expression of the gene encoding green fluorescence protein utilizing nanohybrids. *J. Controlled Release*, 100, págs. 399-409.
62. B Shaw, Y Deng, F Strillacci, K Carrado, M Fessehaie. (1990). Electrochemical surface analysis of nonconducting solids: ferricyanide and phenol as electrochemical probes on the surfaces of layered double hydroxide anion-exchanging clays. *J. Electrochem. Soc.*, págs. 137, 3136- 3143.

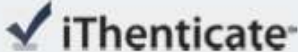
63. Martínez, Samuel. (2023) Caracterización textual. Genially. [En línea] 26 de Noviembre de 2023. <https://view.genially.com/6562ac4aefcef600104a78a7/interactive-image-caracterizacion-textural>.
64. T Stanimirova, T Hibino, V Balek. (2006). Thermal Behaviour of Mg-Al-CO₃ layered double hydroxide characterized by emanation thermal analysis. *J. Therm. Anal. Calor.*, págs. 84, 473-478.
65. Miro, Olga Bergada. (2007). Diseño de Catalizadores para una Obtención Limpia de 2-feniletanol. Universidad Rovira I Virgili, págs. ISBN: 978-84-691-0355-5.
66. Francisco Castellanos Páez, Jorge Arévalo Villagrán, Néstor Martínez Romero y Abimael Avila Torres (2020). *Energy and Commerce*. [En línea] 8 de octubre de 2020. <https://energyandcommerce.com.mx/adsorcion-y-desorcion-tecnico/>.
67. Micromeritics (2024), Instrument Corporation. Micromeritics. [En línea] 2024. <https://www.micromeritics.com/quimisorcion/?lang=es>.
68. F Kovanda, E Jindova, B Dousova, D Kolousek, J Plestil, Z Sedláková. (2009) Layered double hydroxides intercalated with organic anions and their application in preparation of LDH (polymer nanocomposites). *Acta Geodyn. Geomater* , págs. 6, 11119.
69. URASE, T. y KIKUTA, T. (2005). Separate estimation of adsorption and degradation of pharmaceutical substances and estrogens in the environment in the activated sludge process. *Water Research*, v. 39, págs. 1289-1300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.waters.2005.01.015>.
70. BOLONG, N., et.al. (2009). A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *Desalination*, v. 239, págs. 229-246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.020>.
71. Giselle Mariza Duré, Leónida Medina García, Sergio Rodríguez Bonet, Francisco Ferreira, Pablo Heleno Sezerino, & Tomás López Arias. (2022). Phytoremediation of pharmaceutical emerging contaminants in floating wetlands. *Reportes científicos de la FACEN*, 13(2), págs. 153-159. <http://doi.org/10.18004/rcfacen.2022.13.2.153>.
72. Mestre AS, Pires J, Nogueira JMF, Parra JB, Carvalho AP, Ania CO. (2009). Waste-derived activated carbons for removal of ibuprofen from solution: role of surface chemistry and pore structure. *Bioresour Technol* 100(5), págs. 1720-1726.
73. Ciesielczyk F, Żółtowska-Aksamitowska S, Jankowska K, Zem-brzuska J, Zdarta J, Jesionowski T. (2019). The role of novel lignosulfonate-based sorbent in a sorption mechanism of active pharmaceutical ingredient: batch adsorption tests and interaction study. *Adsorption* 25(4), págs. 865-880. <https://doi.org/10.1007/s10450-019-00099-1>.

74. Behera SK, Oh SY, Park HS. (2012). Sorptive removal of ibuprofen from water using selected soil minerals and activated carbon. *Int J Environ Sci Technol* 9(1), págs. 85-94. <https://doi.org/10.1007/s13762-011-0020-8>.
75. Bany- Aiesh H, Banat R, Al-Sou'od K. (2015). Kinetics and Adsorption Isotherm of Ibuprofen onto Grafted β -CD/Chitosan Polymer. *Am J Appl Sci* 12(12), págs. 917-930. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2015.917.930>.
76. Ismadji, S. Soetaredjo, F. and Ayucitra, A. (2015). Clay Materials for Enviromental Remediation. Londres: Springer Cham, págs. 253-267 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16712-1>.
77. Chien, S.H. and Clayton W.R. (1980). Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 4, no. 2, págs. 265-268 <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400020013x>.
78. Weber, W. J. and Morris, J. C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, vol. 89, no. 2, págs. 31-60.
79. Rives V, del Arco M, Martín C. (2014). Intercalation of drugs in layered double hydroxides and their controlled release: A review. *Appl. Clay Sci.*, págs. 88–89, 239–269.
80. M. Klavarioti, D. Mantzavinos, D. Kassinos. (2009). Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. *Environment International*, págs. Vol 35, No 2, 402-417.
81. Malamis, S. and Katsou, E. (2013). A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: Exaination of process parameters, kinetics and isotherms. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 252-253, págs. 428-461 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.03.024>.
82. Varó, Cinta Zapater e Inmaculada (2021). AQUAE FUNDACIÓN. CAMPUS LA REVOLUCIÓN DE LAS IDEAS. [En línea] 26 de Julio de 2021. <https://www.fundacionaquae.org/contaminantes-emergentes/>.
83. Wang, J. and Chen, C. (2009). Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology Advances*, vol. 27, págs. 195-226 <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.11.002>.
84. C Klein, J Hurlbut (1993). *Manual of mineralogy*. USA : John Wiley & Sons.
85. Pauling, L. (1929). The principles determining the structure of complex ionic crystals. *J. Am. Chem. Soc.* págs. 51, 1010-1026.
86. Ruiz, M. (2001). *Mineralogía y aplicaciones de las arcillas*. Málaga (AN) Servicio de Publicaciones e intercambio Científico de la Universidad de Málaga, págs. 87-93.

87. G Carbajal, K Satyanarayana, F Wypych. (2007). Layered Hydroxide Salts: Synthesis, Properties and Potential Applications. *Solid State Ionics*, págs. 178, 1143-1162.
88. Belzona Inc. (2010) Tratamiento de Aguas Residuales. 2010. 89. —. Tratamientos de Aguas Residuales.
89. Malvern Panalytical (2023). Malvern Panalytical a Spectris Company. [En línea] 2023. <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis/x-ray-diffraction>.
90. SAS (2021), Andina de Tecnologías. ANDITECNICA. [En línea] <https://anditecnica.com/equipos-robustos-y-analiticos/difraccion-de-rayos-x/>.
91. Scientific ThermoFisher (2018). ThermoFisher Scientific. [En línea] <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/molecular-spectroscopy/fourier-transform-infrared-spectroscopy/resources/ftir-spectroscopy-academy.html#:~:text=En%20qu%C3%A9%20consiste%20la%20t%C3%A9cnica%20FTIR%20&>.

ANEXOS.

Reporte anti plagio.

Identificación de reporte de similitud: oid:3117:373352420

NOMBRE DEL TRABAJO	AUTOR
Adsorción de Contaminantes Emergentes (Ibuprofeno) en Medio Líquido Empleo Hidrotalcitas Híbridas	Roberto Adán Chávez Alderete

RECuento DE PALABRAS	RECuento DE CARACTERES
12782 Words	78638 Characters
RECuento DE PÁGINAS	TAMAÑO DEL ARCHIVO
61 Pages	5.6MB
FECHA DE ENTREGA	FECHA DEL INFORME
Aug 16, 2024 7:54 AM GMT-6	Aug 16, 2024 7:55 AM GMT-6

● **37% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 37% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 19% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

Resumen

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL	
Título del trabajo	ADSORCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES (IBUPROFENO) EN MEDIO LÍQUIDO EMPLEGANDO HIDROGELAS HÍBRIDAS	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	ROBERTO ADÁN CHÁVES ALBERETE	1415787j@umich.mx
Director	ROBERTO GUERRA GONZÁLEZ	roberto.guerra@umich.mx
Codirector	JOSÉ LUIS RIVERA ROJAS	jlrivera@umich.mx
Coordinador del programa	HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA	luis.chavez@umich.mx


Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	ROBERTO ADÁN CHÁVEZ ALDERETE 
Lugar y fecha	MORELIA, MICH. A 15 DE AGOSTO DE 2024