



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Química

“Captación de Contaminantes Emergentes con HDL (Zinc-Aluminio)”

Tesis que para obtener el título de Ingeniero Químico presenta:

Yael Alberto Lizárraga Morales

Director de Tesis:

Dr. Roberto Guerra González

Co-Asesor:

Dr. José Luis Rivera Rojas

Morelia, Michoacán, noviembre del 2022.

Dedicatoria:

A mis padres Gabriel y Elsa, quienes me han acompañado en todo momento a lo largo de mi vida, por todo su cariño y comprensión, así como ser mi inspiración cada día.

La vida no es fácil, para ninguno de nosotros. Pero... ¡qué importa! Hay que perseverar y, sobre todo, tener confianza en uno mismo. Hay que sentirse dotado para realizar alguna cosa y que esa cosa hay que alcanzarla, cueste lo que cueste.

-Marie Curie.

Agradecimientos:

Primeramente, quiero agradecer a dios por estar conmigo en cada momento de mi vida, por fortalecer mi corazón y mente, así como por haber puesto en mi camino a cada una de las personas que han estado a mi lado durante todo este camino.

A mis padres por haberme educado como la persona que soy hoy en día, por sus consejos y experiencias que me han ayudado a tomar las mejores decisiones, así como también agradecer a mi hermano por apoyarme.

A todos mis familiares que han estado presente y apoyado durante mi camino como estudiante, por decir algunos: mi madrina Gabriela, mi tía Lucia, mi tío Miguel, y especialmente a mi tía Gabriela por recibirme en su casa siempre que lo necesitara y tratarme como otro hijo más.

A mis primos: Rodolfo, Alberto, así como Andrea, Samanta y Fátima por estar siempre conmigo apoyándome y deseándome lo mejor.

Quiero agradecer a la universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo por recibirme y darme la oportunidad de estudiar y formarme como profesional, tanto a nivel bachillerato en el Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolas de Hidalgo, como a nivel universitario en la Facultad de Ingeniería Química, en donde me llevo grandes aprendizajes y momentos en mi camino como estudiante y profesional.

A mi maestro de Química en la secundaria, el profesor David Camargo por despertar mi interés y curiosidad por la química y la ingeniería.

A cada uno de mis profesores universitarios por enseñarme y prepararme para mi etapa como profesional.

A mis compañeros: Héctor, Oscar, Sergio, Alexis, Fátima y Arantxa, por su apoyo incondicional en todo momento y sobre todo por acompañarme durante mi camino universitario.

A mi Compañero Roberto Adán Chávez Alderete ya que estamos en esta aventura desde el bachillerato, gracias por ser un gran compañero y amigo, por apoyarme en todo momento, así como también por tus consejos.

A mi compañero Alfonso Lemus Solorio primeramente por recibirme con los brazos abiertos en la facultad y ser un guía durante mi carrera universitaria.

Al Dr. Roberto Guerra González primeramente por aceptarme como su tesista, así como también por brindarme su apoyo, su experiencia y la confianza depositada en mi durante la realización de esta tesis.

Tabla de contenido

1. Resumen	6
2. Abstract	7
3. Introducción	8
4. Antecedentes	9
4.1. Toxicología de los fármacos en el Medio Ambiente	9
4.1.1. Incidencia Global en el Medio Ambiente	11
4.1.2. Determinación del consumo y desecho de medicamentos	12
4.2. Contaminantes Emergentes	13
4.3. La Pandemia y el Consumo de Medicamentos	16
4.4. Paracetamol	18
4.5. Hidróxidos Dobles Laminares (HDL)	19
4.5.1. ¿Qué es un Hidróxido Doble Laminar?	19
4.5.2. Estructura de los Hidróxidos Dobles Laminares (HDL)	20
4.5.3. Propiedades de los Hidróxidos Dobles Laminares (HDL)	22
4.5.4. Aplicaciones de los Hidróxidos Dobles Laminares (HDL)	23
4.5.5. Síntesis de los Hidróxidos Dobles Laminares	24
4.5.5.1. Métodos de Coprecipitación	24
4.5.5.2. Hidrólisis de urea	25
5. Justificación	26
6. Planteamiento del Problema	27
7. Hipótesis	28
8. Objetivos Generales	28
8.1. Objetivos Específicos	28
9. Metodología	29
9.1. Procedimiento para la síntesis de los materiales tipo hidrotalcita	29
9.2. Pruebas in vitro	31
9.3. Caracterización	41
10. Análisis y Discusión de Resultados	42
11. Conclusiones	48
12. Referencias Bibliográficas	49

1. Resumen

A través de los años se han detectado en ríos y mares diversos contaminantes, los análisis de la calidad de agua muestran que, aunque las cantidades de estos contaminantes son pequeñas su presencia es peligrosa y, por si fuera poco, tomando en cuenta de que año tras año estas cantidades llegan a incrementarse. Actualmente se ha detectado el aumento de los contaminantes emergentes en el agua, esto provocado por el uso de fármacos, plásticos, aditivos industriales, fungicidas, sustancias químicas, etc. A pesar de que estos contaminantes están con nosotros desde hace tiempo, han sido detectados recientemente ya sea por su incremento en la actividad humana, los acontecimientos recientes ocasionado por la pandemia del covid-19, así como también, por los avances de tecnologías analíticas disponibles para detectar estos contaminantes, permitiendo ver las consecuencias en el medio ambiente y en el ser humano.

Este trabajo busca dar a entender que es un contaminante emergente, así como su efecto en el medio ambiente, también se busca determinar su captación en el agua por medio de hidróxidos dobles laminares (HDL) y de esta manera poder buscar la alternativa más viable para un tratamiento de agua residual óptimo.

Palabras Clave: Fármacos, Paracetamol, Adsorción, Pandemia, Medio Ambiente.

2. Abstract

Over the years, various contaminants have been detected in rivers and seas, water quality analyzes show that, although the amounts of these contaminants are small, their presence is dangerous and, as if that were not enough, taking into account the year after year these amounts increase. Currently, the increase in emerging contaminants in water has been detected, this caused by the use of drugs, plastics, industrial additives, fungicides, chemical substances, etc. Although these contaminants have been with us for a long time, they have been recently detected either due to their increase in human activity, recent events caused by the covid-19 pandemic, as well as advances in available analytical technologies. to detect these contaminants, allowing to see the consequences on the environment and on the human being.

This work seeks to imply that it is an emerging contaminant, as well as its effect on the environment, it is also sought to determine its uptake in the water by means of double laminar hydroxides (HDL) and in this way to be able to find the most viable alternative for optimal wastewater treatment.

3. Introducción

La industria farmacéutica es uno de los sectores de la economía general que se dedica de manera exclusiva a la fabricación, distribución, comercialización y también la preparación de productos químicos farmacéuticos (Jaimes Urbina & Vera Solano, 2020). Las aguas residuales provenientes de esta industria, presentan variabilidad en su cantidad y componentes. Se intuye entonces, que la cantidad de residuos farmacéuticos vertidos puede ser baja, pero su entrada continua al ecosistema, puede aumentar la concentración de contaminantes en los cuerpos de agua, lo que genera a largo plazo un riesgo para los organismos acuáticos y terrestres. El desconocimiento de los componentes que están presentes en el agua residual de la industria farmacéutica, dificulta la aplicación de un determinado tratamiento (Jaimes Urbina & Vera Solano, 2020). Para satisfacer la creciente demanda de la población mundial, miles de productos se elaboran diariamente, ocasionando un aumento descontrolado en las emisiones de contaminantes químicos al ambiente. Algunos de éstos son tóxicos, persistentes, bioacumulables y biomagnificables, como es el caso de los contaminantes orgánicos persistentes (COP). Algunos COP son considerados “contaminantes emergentes” y representan un riesgo a la salud y al ambiente (ROCHA GUTIÉRREZ, PERALTA-PÉREZ, & ZAVALA-DÍAZ DE LA SERNA, 2015). De la misma manera como se encuentran remanentes de distintos tipos de contaminantes en las aguas residuales urbanas, también se observa la presencia de restos de fármacos, plaguicidas y otras sustancias, las cuales son llamadas contaminantes emergentes (CE). Los contaminantes emergentes, también llamados micro contaminantes, son compuestos químicos producto de las actividades humanas que se realizan en el diario vivir, como la higiene personal o el cuidado de la salud, que pueden provocar efectos negativos en el ecosistema, generando alteraciones sobre el medio ambiente (Jaimes Urbina & Vera Solano, 2020). Corrientemente se liberan al ambiente en pequeñas cantidades, pero con el tiempo, su uso intensivo y generalizado, se van acumulando en el entorno. Actualmente también son llamados contaminantes de interés emergente, no son necesariamente nuevos productos químicos y generalmente incluyen contaminantes que a menudo han estado presentes en el medio ambiente, pero cuya presencia, importancia y efectos (toxicidad) están siendo evaluados (Jaimes Urbina & Vera Solano, 2020).

4. Antecedentes

4.1. Toxicología de los fármacos en el Medio Ambiente

Desde los años cuarenta del siglo XX, los medicamentos de receta de origen sintético han tenido un papel muy importante en la salud de las poblaciones humanas. Es ampliamente reconocido que han contribuido a aliviar el dolor, controlar y curar muchas enfermedades. En 1970, se reportó por primera vez la presencia de medicamentos de receta de origen sintético en el medio ambiente tanto terrestre como acuático, pero no recibió gran interés por parte de la comunidad científica. A partir de 1990, la presencia de medicamentos en el agua potable ha sido preocupación no sólo de los investigadores sino del público en general. Muchos fármacos son liberados continuamente al medio ambiente lo que los convierte en agentes contaminantes. Los medicamentos de receta llegan al medio ambiente a través de diferentes fuentes y mecanismos: desechos y subproductos industriales, excreciones humanas y animales, en la basura doméstica, entre otros. [\(Moreno Ortiz, y otros, 2013\)](#)

Desde hace más de una década se introdujo el concepto de ‘eco farmacovigilancia’. Hoy día se define como la ciencia y actividades relativas a la detección, evaluación, comprensión y prevención de los efectos adversos u otros problemas relacionados con la presencia de los productos farmacéuticos en el medio ambiente, que afectan a humanos y a otras especies animales. [\(Castro Pastrana, Baños Medina, López Luna, & Torres García, 2016\)](#)

Los efectos, tanto beneficiosos como adversos, de los medicamentos en los seres humanos y en veterinaria son ampliamente conocidos. Sin embargo, se desconocen los efectos de estos medicamentos cuando “entran” en el medio ambiente. Se han detectado residuos de varios tipos de medicamentos en diferentes compartimentos ambientales (principalmente en aguas residuales, superficiales y profundas, pero también en suelo, aire y biota). [\(FARMACONTAMINACIÓN. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS MEDICAMENTOS, 2016\)](#) Debido al amplio consumo de medicamentos por la población a nivel mundial, gran cantidad de residuos de medicamentos se liberan diariamente al medioambiente (Ilustración 1). En el medio ambiente los fármacos pueden fotodegradarse o biotransformarse por microorganismos, pudiendo formar metabolitos más tóxicos que el compuesto original. [\(Cuñat & Ruiz, 2016\)](#)

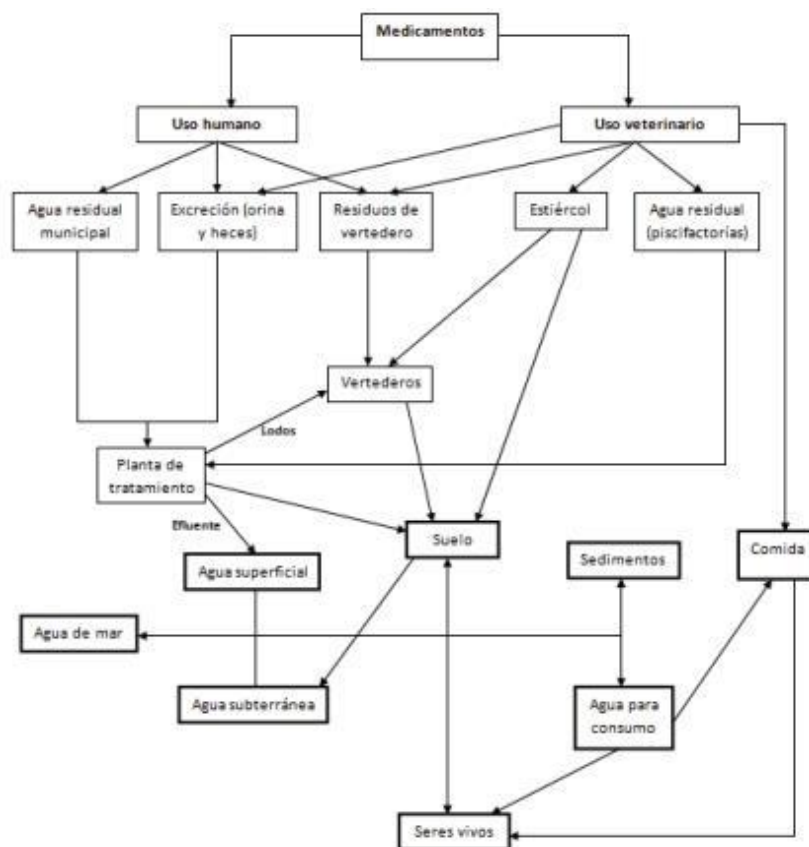


Ilustración 1.- Entradas y destino de los fármacos en el medio ambiente. (Cuñat & Ruiz, 2016)

Para determinar los efectos de los residuos de los medicamentos en el medio ambiente se realizan estudios de ecotoxicidad aguda, a medio y a largo plazo en diferentes especies representativas de los diferentes niveles tróficos de los ecosistemas acuáticos y terrestres. (Cuñat & Ruiz, 2016) Las principales vías de contaminación están relacionadas con el consumo y la excreción de fármacos y metabolitos en orina y heces, y también con la eliminación inadecuada o insuficiente de los medicamentos caducados o no consumidos. Las principales vías de entrada en el medio ambiente acuático son las aguas residuales, entre las que se incluyen las urbanas, hospitalarias, industriales y las de origen agrícola o ganadero. Además, los residuos de medicamentos se pueden depositar en el suelo mediante excreción directa (animales) o debido a la reutilización de residuos orgánicos, y posteriormente filtrarse a aguas superficiales y/o profundas. Se estima que una proporción considerable de los medicamentos vendidos no se llegan a consumir. La eliminación inadecuada de medicamentos caducados o no consumidos supone una importante vía de contaminación, en

gran medida evitable. Los medicamentos pueden ser incorrectamente depositados en la basura doméstica (incorporándose a residuos municipales) o alcanzar las aguas residuales a través de desagües de lavabos o inodoros. (FARMACONTAMINACIÓN. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS MEDICAMENTOS, 2016) Los fármacos veterinarios empleados en la cría de animales pasan al entorno del suelo, donde se utilizan abonos como fertilizantes. Con el tiempo, los residuos de estos medicamentos se acumulan en el suelo o penetran en las aguas freáticas o superficiales, si bien también pueden ser absorbidos por plantas. (Weber, y otros, 2014)

4.1.1. Incidencia Global en el Medio Ambiente

Un número creciente de estudios han demostrado que los fármacos están presentes en el medio ambiente a nivel mundial. Según una revisión efectuada en más de 1.000 publicaciones internacionales, se han detectado residuos farmacéuticos en 71 países de todo el mundo, en los cinco grupos regionales de Naciones Unidas (Número de fármacos detectados en aguas superficiales, aguas freáticas, agua corriente y/o agua potable.). Los fármacos se han detectado mayoritariamente en las aguas superficiales y efluentes sanitarios, pero también se han constatado en aguas subterráneas, abonos, el suelo y otras matrices medioambientales (Ilustración 2). Tanto en países en desarrollo como industrializados se han detectado productos farmacéuticos comercializados internacionalmente (Tabla 1). (Weber, y otros, 2014)

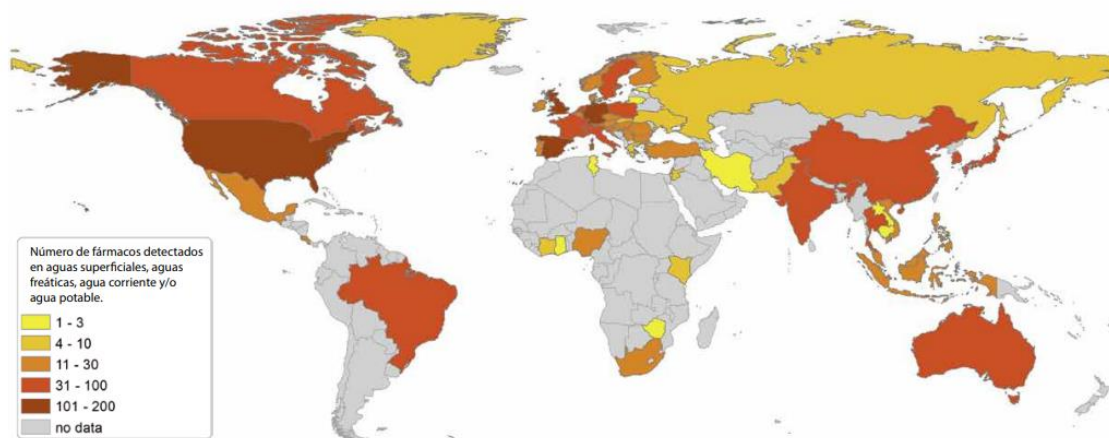


Ilustración 2.- Fármacos detectados en aguas superficiales, aguas freáticas y agua potable. (Weber, y otros, 2014)

Tabla 1.- Fármacos comercializados a nivel mundial en el medio acuático. (Weber, y otros, 2014)

Fármaco	Grupo terapéutico	Número de países en el mundo donde se han encontrado fármacos en el medio acuático
Diclofenaco	Analgésicos	50
Carbamazepina	Medicamentos antiepilépticos	48
Ibuprofeno	Analgésicos	47
Sulfametoxazol	Antibióticos	47
Naproxeno	Analgésicos	45
Estrona	Estrógenos	35
17-β-estradiol	Estrógenos	34
17-α-etinilestradiol	Estrógenos	31
Trimetoprima	Antibióticos	29
Paracetamol	Analgésicos	29
Ácido clofibríco	Medicamentos para la reducción de lípidos	23
Ciprofloxacino	Antibióticos	20
Ofloxacino	Antibióticos	16
Estriol	Estrógenos	15
Norfloxacino	Antibióticos	15
Ácido acetilsalicílico	Analgésicos	15

4.1.2. Determinación del consumo y desecho de medicamentos

En 2008 en México, se estimó un consumo de ibuprofeno de hasta 2,000 kg por año (0.02 per cápita por año) quedando dentro de los 6 fármacos más vendidos en ese año. Su amplio consumo junto con sus propiedades hidrofóbicas, bio persistentes y de baja adsorción a la materia orgánica, lo convierten en un compuesto peligroso desde el punto de vista eco tóxico. Por su parte el paracetamol, aún en las concentraciones bajas en las que se llega a encontrar en algunos compartimentos ambientales, podría representar un gran riesgo para la salud humana por su potencial actividad como disruptor endocrino. Este fármaco se ha detectado en acuíferos de 29 países. Gran parte de la preocupación respecto a la presencia de antibióticos en las aguas residuales y su persistencia a través de los procesos de tratamiento se relaciona con la latente posibilidad de que puedan contribuir a la prevalencia de la resistencia a los antibióticos en especies bacterianas presentes en los efluentes de aguas residuales y aguas superficiales. (Castro Pastrana, Baños Medina, López Luna, & Torres García, 2016) En México, se realizó una encuesta a público en general como parte de una campaña universitaria de recolección de medicamentos vencidos. Se encontró que el 61% de

las personas desecha sus medicamentos remanentes o caducados directo en la basura doméstica y un 5% los vierte en el lavabo, inodoro o fregadero; lo anterior a pesar de que el 67% de los encuestados reconoció que la disposición directa de los medicamentos en esta forma implica consecuencias negativas para el medio ambiente. (Castro Pastrana, Baños Medina, López Luna, & Torres García, 2016).

4.2. Contaminantes Emergentes

El agua es un recurso natural escaso, indispensable para la vida humana y el sostenimiento del medio ambiente, que, como consecuencia del rápido desarrollo humano y económico y del uso inadecuado que se ha hecho de ella como medio de eliminación, ha sufrido un alarmante deterioro. Durante décadas, toneladas de sustancias biológicamente activas, sintetizadas para su uso en la agricultura, la industria, la medicina, etc. Han sido vertidas al medio ambiente sin reparar en las posibles consecuencias, al problema de la contaminación, que comenzó a hacerse notable ya a principios del siglo XIX, cabe añadir el problema de la escasez, aspecto éste que está adquiriendo proporciones alarmantes a causa del cambio climático y la creciente desertización que está sufriendo el planeta. (Damià Barceló & López de Alda) Con el desarrollo de la tecnología se han producido muchos compuestos químicos sintéticos, lo que ha generado un incremento en el número de contaminantes que son considerados un potencial amenazador para el ambiente y todo organismo vivo. (García Gómez, Gortáres Moroyoqui, & Drogui, 2011) Las primeras evidencias de la presencia de fármacos en el medio acuático se produjeron en los años 70 con la identificación en aguas residuales en EEUU del ácido clofíbrico, que es el metabolito activo de varios reguladores de lípidos en sangre (clofibrato, etofili y etofibrato). Sin embargo, no fue sino hasta principios de la década de los 90 que el tema de los fármacos en el medio ambiente empezó a surgir con más fuerza, como lo demuestran los numerosos artículos publicados desde entonces. (Tejada, Quiñonez, & Peña, 2014)

Hoy en día se habla de contaminantes emergentes y se refiere a productos farmacéuticos, del cuidado personal, surfactantes, aditivos industriales, plastificantes, plaguicidas y una gran variedad de compuestos químicos que alteran las funciones endocrinas. (García Gómez, Gortáres Moroyoqui, & Drogui, 2011) La lista de nuevos contaminantes incluye sustancias

bioacumulables, persistentes y tóxicas. La incidencia y la contribución de riesgo no están aún disponibles para la mayoría de estos contaminantes debido, principalmente, al desafío analítico que impone el gran número de sustancias a monitorear. De ahí, la dificultad de predecir sus efectos sobre la salud del ser humano y del resto de seres vivos. (Rubio Clemente, Chica Arrieta, & Peñuela Mesa, 2013)

Tabla 2.- Efectos sobre los seres vivos de los principales grupos de COEs. (Rubio Clemente, Chica Arrieta, & Peñuela Mesa, 2013)

COEs	Aplicaciones	Efectos sobre la salud.
Fármacos y drogas de abuso	Esteroides y Anticonceptivos	Feminización en machos.
	Antibióticos (sulfonamidas, penicilinas, etc.)	Resistencia microbiana. Alteración de la cadena trófica.
Aditivos Industriales	Bisfenol A (Fabricación de Plásticos)	Actividad estrogénica en ratas y hormonal en seres humanos. Aumento de riesgo en cáncer de mama, etc.
	Ftalatos (Fabricación de plásticos, juguetes para bebés, y suelos)	Alteraciones en el embarazo y abortos involuntarios .
	Alquifenoles (Fabricación de detergentes)	Alteraciones en el desarrollo del proceso reproductivo.
Productos de higiene y cuidado personal	Fragancias con almizcle	Poder cancerígenos en roedores.
	Parabenos (agentes bactericidas y antifúngicos en comidas y cosméticos)	Actividad estrogénica .
	Desinfectantes y antisépticos (Fabricación de pasta de dientes, jabón y cremas)	Resistencia microbiana y biocida.
Surfactantes	Compuestos perfluorados (ej. Ácido perfluorooctanoico)	Cancerígeno.

De todos los contaminantes emergentes, los que probablemente suscitan mayor preocupación y estudio en los últimos años son los fármacos y, en particular, los antibióticos. El consumo de fármacos en los países de la UE se cifra en toneladas por año, y muchos de los más usados, entre ellos los antibióticos, se emplean en cantidades similares a las de los pesticidas. (Tejada, Quiñonez, & Peña, 2014)

Tabla 3.- Fármacos y metabolitos (Tejada, Quiñonez, & Peña, 2014)

Antibióticos	
Nombre	Presencia ambiental/ Nombre comercial
Fluoroquinolona	Su presencia en el medio ambiente se propone como una de las principales causas del aumento en la resistencia entre las bacterias patógenas. Fuertemente sorbido en el suelo. Altamente activo en aguas residuales provenientes de hospitales.
Ácido carboxílico	Inhibidor de la ADN-Girasa (enzima necesaria para la replicación del ADN en las bacterias). Excretado principalmente como compuesto original LEVOFLOXACINA
Sulfonamidas	Concentraciones encontradas en percolados del landfill de Grinsted (Dinamarca): 0,04-6,47 mg/L directamente abajo del relleno y disminuyendo, dependiendo de la profundidad y el largo de la pluma. ECTAPRIM
Antiflamatorios	
Acetaminofeno Paracetamol	Es eficientemente removido por las plantas de tratamiento de aguas servidas. PARACETAMOL
Ácido acetil-salicílico	Uno de los primeros fármacos identificados en los afluentes/efluentes de sistemas de tratamiento de aguas servidas. Es eficientemente removido por las plantas de tratamiento de aguas servidas. ASPIRINA.
Diclofenaco de sodio	Se han encontrado cargas de aproximadamente 100 g/día en Alemania. Datos de laboratorio muestran una rápida y extensa fotodegradación a múltiples productos (Buser et al., 1999). VOLTAREN
Ibuprofeno	Cargas sobre 200g/día en Alemania (Ternes, 1998) Excretado principalmente por los humanos en forma libre o conjugada (Buser et al., 1999). ADVIL

A diferencia de otros contaminantes en el agua, los fármacos son moléculas con actividad biológica sobre diferentes organismos, y sus propiedades fisicoquímicas determinan su persistencia en el ambiente y facilitan su bioacumulación. Estos compuestos se encuentran en bajas concentraciones (generalmente en partes por millón o partes por trillón) y la mayoría siguen sin estar regulados o reglamentados por la mayoría de los países. Dentro de las propiedades fisicoquímicas de los fármacos se encuentra la solubilidad en el agua, presión de vapor, detección del efluente, coeficiente octanol-agua, Log P, reacciones de biodegradación, adsorción, hidrólisis y foto oxidación. Estas propiedades determinan su persistencia en el ambiente y facilitan su bioacumulación. (Tejada, Quiñonez, & Peña, 2014)

4.3. La Pandemia y el Consumo de Medicamentos

La historia de los medicamentos sigue la evolución humana, en la antigüedad se buscaba la cura de sus enfermedades en la prevención de la vida, y este objetivo se persigue hasta nuestros días, la investigación y producción de manipulaciones de componentes capaces de controlar o curar enfermedades. A nivel mundial, la distribución de medicamentos y el acceso a los productos están directamente relacionados con la situación económica y financiera, con una distribución desigual donde el poder económico establece prioridades, dejando a los más pobres con un acceso limitado o interrumpido y favoreciendo el consumo sin prescripción de medicamentos en manera desordenada y facilitando otras complicaciones de salud. (dos Anjos Silva & Gerica de Oliveira Alvim, 2020) Consideramos al medicamento como toda sustancia y sus asociaciones o combinaciones, destinadas a prevenir, diagnosticar, aliviar o curar enfermedades en humanos y animales, con fines de controlar o modificar sus estados fisiológicos o fisiopatológicos. En este sentido todo medicamento, independientemente de su origen o naturaleza, debe garantizar tanto al individuo como a la sociedad su calidad, así como comprobar que su seguridad y eficacia contribuirá de manera importante a la solución de problemas que justifique su uso racional. (Zevallos Escobar, 2014) Hoy en día, el consumo de medicamentos es un fenómeno de creciente relevancia, que está siendo motivado por diversos factores que se asocian a valores que predominan en la sociedad actual. La Organización Mundial de la Salud (OMS) calcula que más del 50% de todos los medicamentos se recetan, se dispensan o se venden en forma inadecuada, al mismo tiempo, alrededor de un tercio de la población mundial carece de acceso a medicamentos esenciales, y el 50% de los pacientes los toman de forma incorrecta. (Zevallos Escobar, 2014) En 2017 la Organización Mundial de la Salud (OMS) lanzó un desafío mundial en la causa por el uso racional de los medicamentos, según la organización más del 50% de los medicamentos son utilizados incorrectamente desde su prescripción. Las principales causas del uso de medicamentos están en la prevención y tratamiento de enfermedades, además del control de síntomas, por ejemplo, los medicamentos se utilizan para controlar el dolor y la fiebre, también en el tratamiento para la cura de infecciones y control de enfermedades que aún no hay cura. (dos Anjos Silva & Gerica de Oliveira Alvim, 2020) El acceso a los medicamentos es uno de los seis elementos clave para el funcionamiento de los sistemas de salud. Como en otros países en América Latina, el sistema de salud en México está fragmentado. Por un lado,

las instituciones de seguridad social como el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) y el Instituto de Seguridad y Servicios Sociales para los Trabajadores del Estado (ISSSTE) ofrecen atención médica y un paquete prepago de medicamentos a sus beneficiarios. (Wirtz, Serván Mori, Heredia Pi, Dreser, & Ávila Burgos, 2013)

La campaña más vista en los últimos meses es la del nuevo virus Covid-19, que ha provocado una pandemia, provocando el colapso de los sistemas de salud en todo el mundo, en números globales. (dos Anjos Silva & Gerica de Oliveira Alvim, 2020) El uso de medicamentos ya existentes y la producción de nuevos remedios para Covid-19 también se han convertido en una coyuntura aprovechable por la industria farmacéutica. Tanto en los Estados Unidos como en México se ha dado autorización de emergencia o temporal para el uso de medicamentos ya existentes que tienen pruebas clínicas positivas con protocolos estrictos para su uso original. (Laurel, 2020) Varias clases de drogas mostraron un efecto terapéutico potencial contra el nuevo coronavirus, como agentes antitumorales, anticoagulantes, antiinflamatorios, antipalúdicos y antimicrobianos; ser que los antivirales, especialmente los antirretrovirales, son los agentes terapéuticos más estudiados contra el SARS-CoV-2 (30%). Tras la publicación de estos resultados y la presión de las autoridades gubernamentales de países como Brasil y Estados Unidos, hubo un aumento descontrolado de la demanda de estos medicamentos en las farmacias, llegando al punto de agotarse en algunas regiones brasileñas (Gráfico 1). (Lima, y otros, 2020)

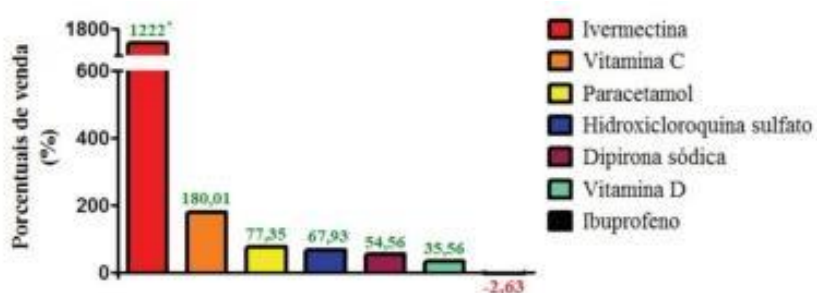


Gráfico 1.- Aumento porcentual de las ventas de medicamentos en Brasil entre enero y marzo del 2020, en comparación con el mismo periodo de 2019. Los datos de ivermectina se refieren solo a las ventas en junio de 2020 en comparación con junio de 2019. (Lima, y otros, 2020)

Además, hubo un aumento alarmante en la venta de medicamentos que estaban vinculados a noticias falsas relacionadas con la cura o prevención del COVID-19 (Gráfico 1). A modo de ejemplo, las ventas de vitamina C o ácido ascórbico, que ha propagado en las redes sociales su “efecto preventivo” contra el nuevo coronavirus, aumentaron casi un 180% de enero a marzo de 2020, en comparación con el mismo período del año pasado. En el mismo sentido, también hubo un crecimiento del 35,56% en el consumo de vitamina D o colecalciferol, fármaco al que se le ha atribuido la capacidad de curar el COVID-19. El consejo también analizó la evolución de las ventas de medicamentos de venta libre que pueden estar indicados para aliviar los síntomas leves de COVID-19. En este contexto, las ventas de paracetamol y dipirona aumentaron un 77,35% y un 54,56%, respectivamente. (Lima, y otros, 2020)

4.4. Paracetamol

El Paracetamol (Acetaminofén) es un analgésico para-aminofenólico. Este fármaco posee propiedades analgésicas y antipiréticas similares a las de la aspirina. Sin embargo, no tiene actividad antiinflamatoria periférica ni afecta la función plaquetaria. Se absorbe rápidamente, alcanzando su nivel plasmático máximo a las 2 horas, con una vida media de 2-4 horas. (Russo) Es empleado para aliviar los síntomas de resfríos y gripe; dolores leves a moderados, cólicos menstruales, migraña, malestar y fiebre. Su fácil disponibilidad hace que esté presente en muchas formas farmacéuticas, dando como resultado, que los consumidores no sean conscientes que están tomando el Paracetamol, ni la cantidad en que lo hacen y contribuye a una falsa seguridad percibida por la población de la inocuidad del medicamento. Además, es ampliamente usado por niños y mujeres embarazadas. (Maldonado Cuba, 2018)

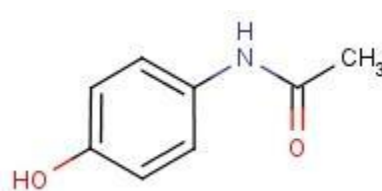


Ilustración 3.- Molécula Paracetamol. (Russo)

El paracetamol fue sintetizado por primera vez por Morse en 1878, y su primera utilización clínica la realizó Von Mering 15 años después. Éste desaconsejó su empleo tras observar

algunos casos de metahemoglobinemia, aunque en realidad la metahemoglobinemia seguramente fue debida a la presencia de trazas de 4-aminofenol, el precursor químico de la síntesis del paracetamol. A finales de los años 40 se confirmó que el paracetamol era el metabolito activo de la fenacetina, que tuvo que ser retirada por nefrotoxicidad. Se retomó entonces la investigación clínica y se demostró su eficacia y seguridad a mediados de los 50. En 1950 se comercializó por primera vez, y unos años después se aprobó su venta sin receta en algunos países. (FARRÉ, ABANADES, ÁLVAREZ, BARRAL, & ROSET, 2004)

4.5. Hidróxidos Dobles Laminares (HDL)

4.5.1. ¿Qué es un Hidróxido Doble Laminar?

Un HDL, acrónimo derivado del inglés “Layer Double Hydroxide” ó LDH, es un hidróxido de estructura laminar, compuesto por dos, o más, cationes distintos, dispuestos en capas brucíticas; la sustitución isomórfica del catión divalente mayoritario por un catión trivalente genera un exceso de carga positiva que es compensado por la incorporación de aniones en el espacio interlaminar. Debido a que dichos aniones se encuentran unidos electrostáticamente a las láminas hidroxiladas, resultan ser fácilmente intercambiables por otros aniones presentes en solución. (Jobbágy, 2003) Los hidróxidos dobles laminares (HDLs) también son denominados compuestos tipo hidrotalcita (HT), debido a su estructura análoga con la hidrotalcita, la cual es el mineral más representativo del grupo de las arcillas aniónicas. La HT es un hidroxicarbonato de magnesio y aluminio y se encuentra en la naturaleza en forma de láminas o como masas fibrosas. (González Millán, 2016) Las arcillas aniónicas son materiales laminares formados por láminas cargadas positivamente y una zona interlaminar donde coexisten aniones intercambiables unidos a moléculas de agua (Ilustración 4). (Béjar, 2016) Las arcillas aniónicas poseen una estructura cristalina hexagonal u octaédrica. Constan de láminas de cationes metálicos cargadas positivamente, donde las superficies de las láminas están ocupadas por grupos hidroxilo, aniones y moléculas de agua. La hidrotalcita es el mineral más representativo entre ellas, donde el anión carbonato es el anión predominante. (Martínez & Carbaja, 2012)

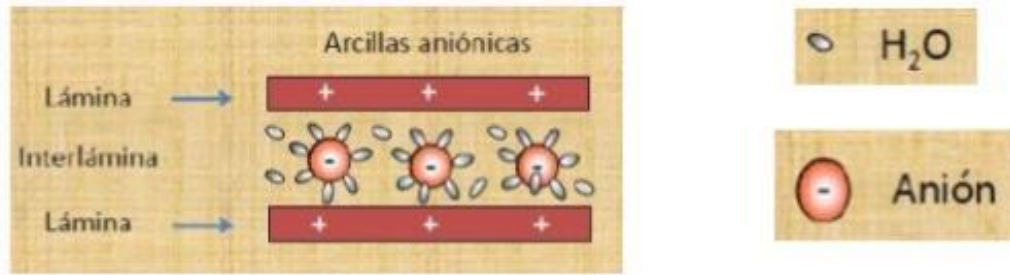


Ilustración 4.- Representación esquemática de la estructura de las arcillas aniónicas. (Béjar, 2016)

Este tipo de materiales son considerados actualmente como materiales nanoestructurados. Su fórmula general:



Ecuación 1.- Fórmula General HDL. (Martínez & Carbaja, 2012)

Donde: M^{2+} y M^{3+} son los cationes divalentes y trivalentes respectivamente M^{2+} (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+}), M^{3+} es un catión trivalente (Al^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} , Co^{3+} , Ni^{3+} , Mn^{3+}), A^{n-} es un anión (Cl^- , NO_3^- , ClO_4^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-}). (Martínez & Carbaja, 2012) Cada uno posee una estructura octaédrica rodeado por 6 iones OH, m representa el contenido de agua, $n-$ representa la carga del anión y x representa el grado sustitución del metal divalente. Los hidróxidos dobles laminares son materiales tipo hidrotalcita, que pertenecen a una gran clase de arcillas aniónicas, debido a sus interesantes características como lo son: 1) gran área superficial 2) la habilidad de formar mezclas homogéneas de óxidos con tamaño pequeño y estables a tratamientos térmicos y 3) efecto memoria del material, es decir que permite la reconstrucción bajo las mismas condiciones de síntesis de la estructura original, cuando es sometido a un tratamiento térmico y puesto en soluciones acuosas que contengan diferentes aniones. (Ruiz Hernández, 2021)

4.5.2. Estructura de los Hidróxidos Dobles Laminares (HDL)

Para comprender la estructura los materiales tipo hidrotalcita es preciso comenzar por la estructura de la brucita (Ilustración 5 a), $Mg(OH)_2$, en la cual el catión Mg^{2+} se encuentra coordinado formando un octaedro con seis grupos hidroxilo (OH-), los octaedros comparten

sus aristas de manera que forman láminas bidimensionales. Las capas se apilan unas sobre otras y se mantienen unidas por interacciones débiles entre los hidrógenos. Cuando algunos de los cationes divalentes Mg^{2+} son sustituidos por cationes trivalentes Al^{3+} se genera un exceso de carga positiva en la lámina. Esta carga positiva se compensa con la presencia de aniones negativos como por ejemplo carbonato (CO_3^{2-}) que se depositan en la zona interlaminar dónde también se encuentra el agua de cristalización. Se obtiene de esta forma la hidrotalcita. (Béjar, 2016)

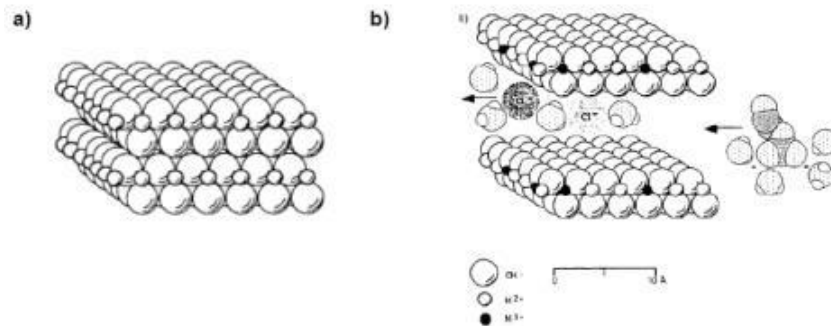


Ilustración 5.- a) Estructura de la brucita (una lámina). b) HDL. (Béjar, 2016)

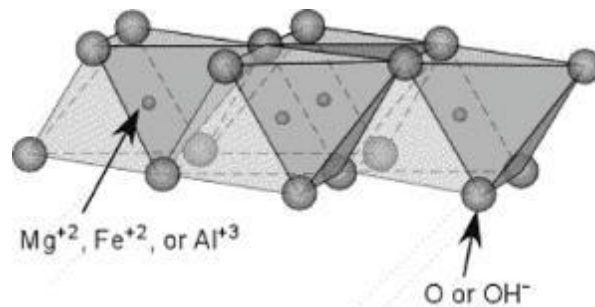


Ilustración 6.- Estructura tipo brucita. (González Millán, 2016)

En la hidrotalcita algunos de los cationes de Mg^{2+} , coordinados octaédricamente por grupos hidroxilos en la estructura laminar, son sustituidos isomórficamente por Al^{3+} lo que da lugar a un exceso de carga positiva laminar. Los aniones carbonatos son intercalados entre las láminas para así mantener la electroneutralidad. Las moléculas de agua unidas mediante enlaces de hidrógeno a las láminas pueden ocupar el espacio restante en la región interlaminar (Ilustración 7). (González Millán, 2016)

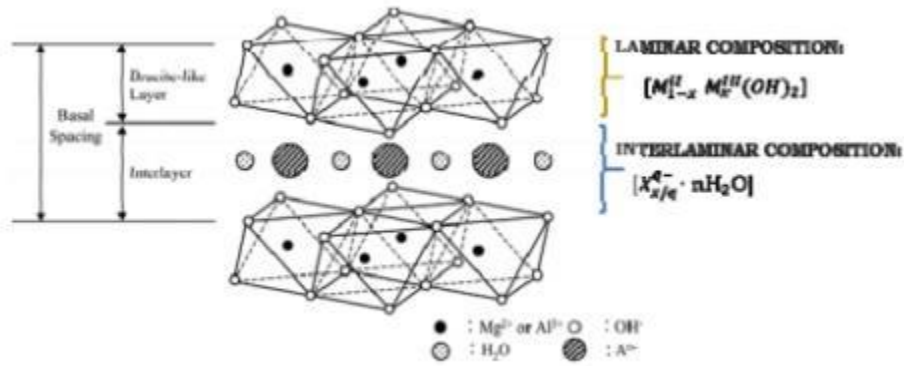


Ilustración 7.- Representación esquemática de la estructura HT. (González Millán, 2016)

4.5.3. Propiedades de los Hidróxidos Dobles Laminares (HDL)

A continuación, se enumeran algunas de las propiedades que caracterizan a los productos calcinados de los HDL las cuales resultan muy interesantes para la utilización de estos materiales en muchos ámbitos: (Béjar, 2016)

- a) Alta capacidad de intercambio aniónico.
- b) Efecto memoria.
- c) Propiedades ácido – base en función de los cationes que conforman la lámina.
- d) Alta área superficial específica (100 – 300 m² /g).

Una de las propiedades más importantes de los materiales tipo HT es su capacidad de intercambio aniónico, relacionada con su estructura laminar, lo que permite el intercambio de los aniones que forman la zona interlaminar por otros presentes en una disolución acuosa. Por otro lado, el efecto memoria es una de las propiedades que resulta más interesante una vez que el material tipo HT se ha sometido a calcinación. En este caso la adsorción de aniones de una disolución acuosa se lleva a cabo por la reconstrucción de la estructura laminar. En cuanto a la basicidad se puede modificar cambiando la naturaleza de los cationes que conforman la lámina o la región interlaminar. (Béjar, 2016)

4.5.4. Aplicaciones de los Hidróxidos Dobles Laminares (HDL)

Entre las múltiples aplicaciones de los hidróxidos dobles laminares cabe mencionar algunas de las más importantes ([González Millán, 2016](#)):

Ambientales: Los HDLs se han utilizado con éxito en experimentos de remediación ambiental. Aplicaciones concretas se dan en la remoción organismos, como bacterias (*E. coli*) y virus de cepas indicadoras en aguas sintéticas, así como de carga biológica de aguas eutróficas. ([Martínez & Carbaja, 2012](#)) Es usado como adsorbente para la eliminación tanto de contaminantes inorgánicos (aniones como fosfatos, arseniatos, seleniatos, antimoniato, haluros, etc. y metales pesados como orgánicos, entre ellos pesticidas polares y apolares, surfactantes, ácidos húmicos, colorantes. Finalmente, su uso como soportes en formulaciones para la liberación lenta de herbicidas ha sido ampliamente estudiado como objetivo de minimizar el impacto ambiental.

Medicina y biología: En un principio, los HDLs encontraron aplicaciones un tanto sencillas como medicamentos antiácidos. Sin embargo, al aumentar la compresión de su estructura y propiedades tuvieron aplicaciones más sofisticadas, utilizándose mayormente como matrices hospederas de moléculas con actividad biológica. En el área farmacéutica, los HDLs mejoran los procesos de disolución de fármacos hidrofóbicos, participan en procesos de liberación controlada e incrementan la estabilidad térmica y mecánica.

Catálisis: Se utilizan en reacciones catalíticas de síntesis orgánica, como por ejemplo polimerización de etileno, evolución de oxígeno, hidrogenación, epoxidación de estireno, condensación, hidroxilación de fenoles, etc.

Industria: Retardante de llama, estabilizadores de polímeros, etc.

Fotoquímica: Diferentes HTs y reacciones se han utilizado en esta área como, por ejemplo, la foto dimerización de especies carboxilato insaturadas intercaladas, foto isomerización de moléculas foto crómica, foto estabilidad y termo estabilidad de diversos pigmentos aniónicos tras su intercalación, etc.

4.5.5. Síntesis de los Hidróxidos Dobles Laminares

Se han reportado síntesis de HDL por métodos directos e indirectos, como la coprecipitación, síntesis sol-gel, síntesis electroquímica, intercambio aniónico, etc. En ese sentido, el reto es lograr procesos de síntesis rápidos y ecológicos, los cuales combinados con la alta capacidad desorción y combinación de los materiales tipo HDL, permitan lograr derivados útiles en diversas aplicaciones, como la adsorción de diversas moléculas, contaminantes orgánicos e inorgánicos, o procesos catalíticos gracias a la generación de sitios básicos activos en la superficie de estos materiales. (Rodríguez C., y otros, 2021)

Las estructuras tipo hidrotalcita son poco comunes en la naturaleza, mientras que a nivel laboratorio e industrial su síntesis es relativamente sencilla y de bajo costo. (Recio Arriola)

Algunos métodos para la síntesis de HDL son:

1. Método por coprecipitación
2. Método de la urea
3. Hidrólisis inducida,
4. Técnica sol-gel

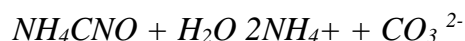
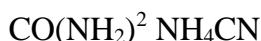
4.5.5.1. Métodos de Coprecipitación

Dos soluciones acuosas, una que contenía las sales precursoras metálicas (nitratos metálicos hidratados de Ni^{2+} , Mg^{2+} y Al^{3+} , en las proporciones adecuadas, y manteniendo la relación molar $\text{M}^{\text{II}}/\text{M}^{\text{III}} = 3$), y otra que contenía NaOH y Na_2CO_3 (1 y 0.7 M, respectivamente), fueron mezcladas gota a gota bajo agitación vigorosa a temperatura ambiente. Una vez terminada la adición, la solución resultante fue tratada hidro térmicamente a 100°C por 24 hr. El precipitado fue recuperado por filtración, lavado con agua desionizada y secado a 100°C . (González Zapién, Olivares Guadarrama, López Martínez, Ramírez Quirós, & Ortiz Romero Vargas, 2019) Las condiciones de coprecipitación a baja supersaturación generalmente dan como resultados precipitados más cristalinos que los métodos de coprecipitación a alta supersaturación, ya que en este último la velocidad de nucleación es mayor que la velocidad de cristalización. En cambio, por el método de coprecipitación a baja supersaturación, ambas velocidades son cercanas, y se obtiene un mayor número de partículas de menor tamaño, pero

mayor cristalinidad. Los métodos de coprecipitación tienen algunas desventajas, principalmente el uso de reactivos altamente corrosivos; además, el producto debe ser lavado exhaustivamente para eliminar el exceso de iones (Na^+ , K^+ , Cl^- , etc.), para lo que se requiere de una gran cantidad de agua de lavado. (Prince Flores, 2014)

4.5.5.2. Hidrólisis de urea

Se preparan diferentes soluciones acuosas con nitratos de Ni^{2+} , Mg^{2+} y Al^{3+} a distintas proporciones (pero a una concentración total de $0.5 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ en solución acuosa), conservando una relación molar $\text{M}^{\text{II}}/\text{M}^{\text{III}} = 2$. Se agregó urea ($1.65 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3}$) a la solución, junto con los precursores de los metales, y se mantuvo en agitación constante a 90°C durante un periodo de 48 horas bajo agitación y reflujo. (González Zapién, Olivares Guadarrama, López Martínez, Ramírez Quirós, & Ortiz Romero Vargas, 2019) La urea presenta una serie de propiedades que la hacen atractiva como agente precipitante. Es una base de Brønsted muy débil ($\text{pK}_b = 13.8$), altamente soluble en agua, y su velocidad de hidrólisis puede ser controlada al controlar la temperatura de la mezcla de reacción. La hidrólisis de urea procede en dos pasos, siendo el primero el determinante de la velocidad: (Prince Flores, 2014)



Ecuación 2.- Reacción hidrólisis urea (Prince Flores, 2014)

Las reacciones de hidrólisis de los iones amonio para dar amoníaco, y del carbonato para producir bicarbonato, resultan en un pH aproximado de 9, dependiendo de la temperatura. Este pH es adecuado para la precipitación de un gran número de hidróxidos metálicos. La principal ventaja de este método es la precipitación homogénea a partir de una solución. (Prince Flores, 2014)

5. Justificación

Tras los acontecimientos mundiales recientes se ha visto una gran cantidad en el uso de productos farmacéuticos, así como plásticos, etc. los cuales la gran mayoría llegan a ser desechados al medio ambiente y estancados en ríos, lagos y mares. Esto provoca que haya mucha contaminación emergente en el agua llegando a tales puntos en los que al tratarla no haya mucha efectividad al retirarlos del agua provocando que esta agua llegue a nuestras casas para el uso cotidiano, así como para zonas industriales, agrícolas y ganaderas, esto con sus respectivos peligros y consecuencias para la salud.

Es por eso que la presente investigación se enfocará en estudiar y analizar la situación actual del agua en nuestro municipio morelia, así como ver la forma de capturarlo mediante la síntesis de hidróxidos dobles laminares (HDL), como una opción viable y efectiva.

6. Planteamiento del Problema

Actualmente se usan diferentes métodos para remover sustancias que son tóxicas para cualquier sistema biológico. Dichos métodos pueden ser químicos, físicos y biológicos. Es común la adsorción como técnica simple usando sólidos adsorbentes como los hidróxidos dobles laminares o más comúnmente llamados compuestos tipo hidrotalcita. Estos han sido empleados como adsorbentes o intercambiadores de iones para remover varias especies iónicas en solución acuosa.

Los Hidróxidos Dobles Laminares son estructuras sintéticas formadas por láminas de hidróxidos metálicos cargadas positivamente que son estabilizadas con aniones interlaminares. La presencia de grupos hidroxilo en las superficies de sus láminas y los aniones intercambiables los hace compuestos ideales para preparar productos funcionalizados con moléculas orgánicas como los fármacos, permitiendo la obtención de nuevos materiales en escala nanométrica que cubren una gama amplia de aplicaciones, desde materiales biológicamente compatibles hasta catalizadores o materiales para remediación ambiental, para nuestro propósito los contaminantes emergentes.

7. Hipótesis

La síntesis y uso del material híbrido definido como Hidróxido Doble Laminar (MgAl y ZnAl), podrá capturar contaminantes emergentes (Paracetamol) en el agua, permitiendo así combatir una problemática específica de la contaminación del medio ambiente.

8. Objetivos Generales

Sintetizar de manera eficiente un Hidróxido Doble Laminar (HDL), aplicarlo en el agua con el propósito de capturar contaminantes emergentes. Determinado su eficiencia en la aplicación en diferentes ramas de la investigación.

8.1. Objetivos Específicos

- Sintetizar Hidróxido Doble Laminar (MgAl y ZnAl), a partir de óxidos de Aluminio, Zinc y Magnesio.
- Protonar los Hidróxidos Dobles Laminar para la captación de moléculas orgánicas y organometálicas situadas en un medio acuoso.
- Determinar la cinética de captación del paracetamol por los Hidróxidos Dobles Laminar.

9. Metodología

9.1. Procedimiento para la síntesis de los materiales tipo hidrotalcita

A grandes rasgos, el desarrollo experimental consta de dos partes, la primera parte consiste en la síntesis de materiales tipo hidrotalcita, mientras que, en la segunda parte, los hidróxidos dobles laminares son evaluados como adsorbentes del “Paracetamol”.

Para la síntesis de los materiales se utilizó el método de coprecipitación a pH constante, el material tipo hidrotalcita ZnAl consideró una relación molar de 2 entre cationes MgAl y se mantuvo constante la relación de 3 entre los cationes divalentes y trivalentes, la síntesis se mantuvo un pH constante a temperatura ambiente.

Para el proceso de coprecipitación, las sales inorgánicas se disolvieron con agua desmineralizada, la solución contiene los cationes del material HDL con la relación molar correspondiente. Esta solución se adiciona por goteo lento a un vaso de precipitados, para el caso exclusivo del material MgAl se utilizó una solución con carbonato de sodio (Na_2CO_3) 0.1M para recibir el goteo de las sales inorgánicas.

El pH de la suspensión debe mantenerse constante, para conseguir esto se empleó una solución de NaOH 2M como agente precipitante de los cationes presentes.

Para conseguir la precipitación de los cationes presentes en los materiales ZnAl y MgAl es necesario un pH de 10, con un pH menor o mayor es posible que no se obtenga un material tipo hidrotalcita, la síntesis se realizó a temperatura ambiente con agitación constante, el pH se mantiene constante a una velocidad de goteo determinada.

Cuando se adicionan las sales inorgánicas, se presenta un precipitado el cual es sometido a un proceso de añejamiento, este proceso consiste en calentar a una temperatura de 80°C durante 15 horas con agitación constante. Una vez terminado el añejamiento se deben eliminar los subproductos que se forman durante la síntesis, estos subproductos se conforman principalmente por nitrato de sodio (NaNO_3), remover este compuesto es sencillo debido a su alta solubilidad en agua y basta con realizar lavados con agua desmineralizada para eliminarlo.

Para finalizar la síntesis, a el sólido obtenido se eliminará el exceso de humedad, con ayuda de una estufa a una temperatura de 80°C, obteniendo finalmente el material tipo hidrotalcita.

La ilustración 8 especifica la síntesis de los materiales tipo hidrotalcita.

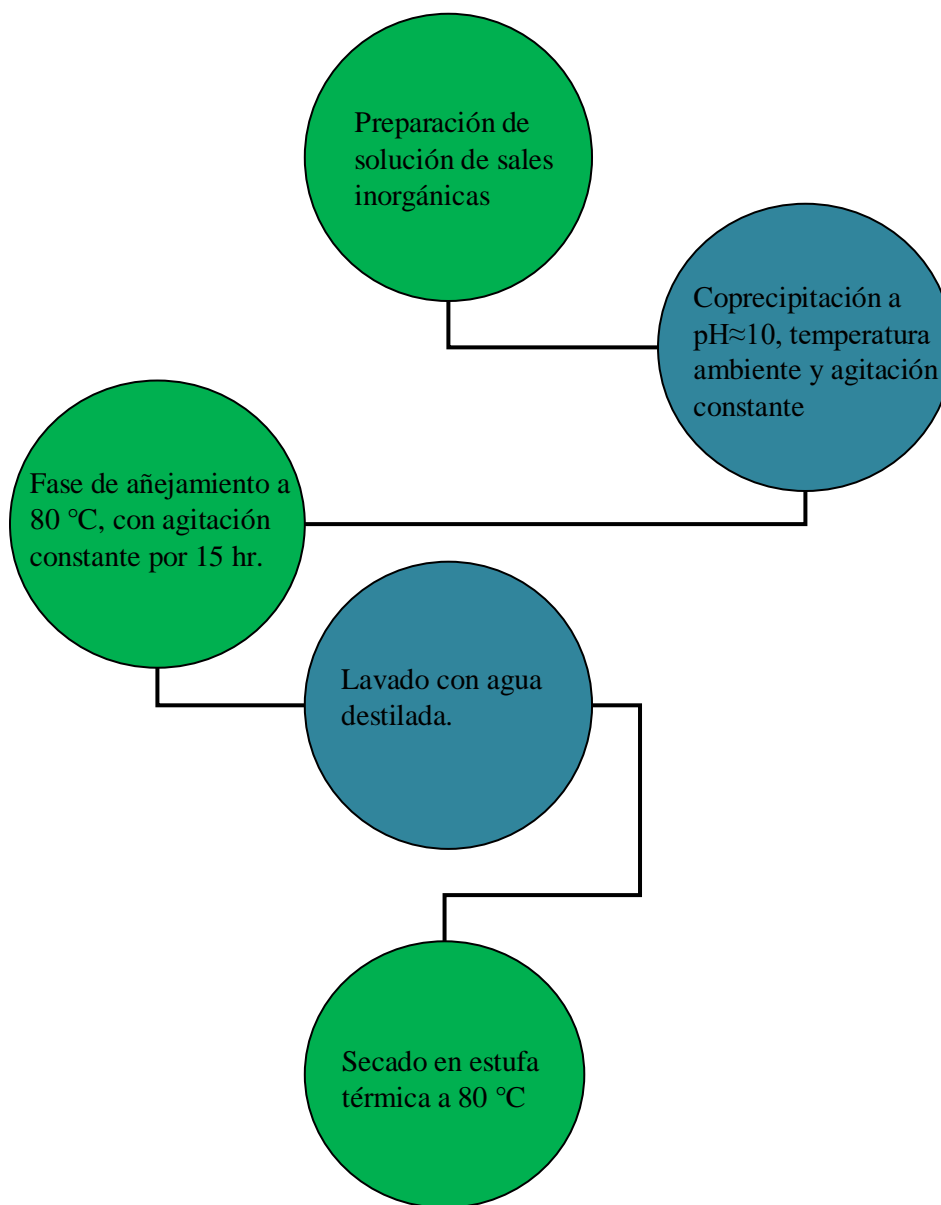


Ilustración 8.- Síntesis de los materiales HDL

9.2. Pruebas in vitro

Terminada la síntesis y haber obtenido los hidróxidos dobles laminares en forma de arcillas se procederá a guardarlos en frascos, etiquetarlos y dejarlos reposar de 1 a 2 días respectivamente.

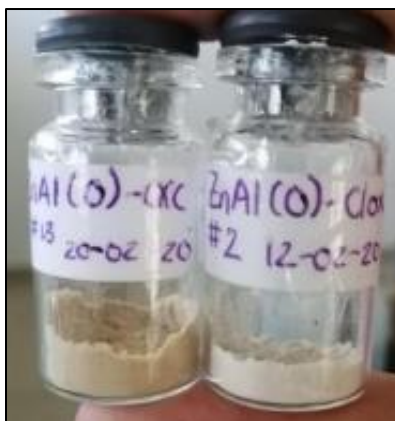


Ilustración 9.- HDL en frascos.

Dejando pasar los días de reposo se procedió a colocar cada HDL en un vaso de porcelana y colocarlos dentro de una mufla, con el objetivo de poder llegar a eliminar cualquier rastro de humedad y materia orgánica restante dentro de la arcilla del HDL. Para lograr lo mencionado anteriormente, lo primero que se hizo fue calibrar la mufla mediante una serie de pasos:



Ilustración 10.- Mufla.

1. Seleccionamos el proceso a 3 pasos escalonados.
2. Configuraremos la temperatura a 82°C, 120°C y 400°C respectivamente para cada paso escalonado siendo los 82°C para eliminar la humedad, los 120°C para eliminar la materia orgánica y por último los 400°C para realizar la esterificación.
3. Una vez configurada la temperatura cada una de ellas tendrá un tiempo establecido por lo que se procederá a configurar los tiempos adecuados para cada temperatura siendo que la temperatura de 82°C tendrá un lapso de 30 minutos, para la temperatura de 120°C estará durante 30 minutos, por último, la temperatura de 400°C estará durante 1 hora.
4. Una vez concluido todo el proceso en la mufla dejaremos reposar los vasos de porcelana 1 hora aproximadamente, después podemos abrir la mufla.



Ilustración 11.- Configuración de la mufla.

Concluido todo el proceso se volverá a colocar las arcillas de HDL en los frascos y guardarlos en un lugar seguro.



Ilustración 12.- HDL después del proceso en la mufla

Terminado el proceso con la mufla pasaremos a preparar una solución de 1 g de paracetamol por 100 mL de agua, efectuando los siguientes pasos:

1. Obtener de 3 a 5 tabletas de paracetamol de 650 mg, colocarlas en un mortero y triturarlas hasta lograr 1 g de paracetamol en polvo.
2. Teniendo el gramo solicitado de paracetamol se procede a colocarlo en un matraz Erlenmeyer y después llenarlo con agua destilada hasta completar los 100mL solicitados para la solución.
3. Una vez ya preparada la solución se tomaron muestras de 10mL, 5mL, 2.5mL y 1.25mL respectivamente en tubos de ensayo. Para las muestras de 5mL, 2.5mL y 1.25mL se llenaron respectivamente con agua destilada hasta completar 10mL en los tubos de ensayo.



Ilustración 12.- Paracetamol pulverizado.



Ilustración 13.- Agua destilada y Paracetamol



Ilustración 14.- Solución de paracetamol con agua destilada



Ilustración 16.- Solución muestra de 10mL, 5mL 2.5mL, y 1.25mL de solución Respectivamente.

Teniendo la solución de paracetamol lista y sus respectivas muestras en tubos de ensayo, en una balanza analítica se pesó el 1er HDL, una vez teniendo su peso total de divide en 7, ya que serán las muestras a tomar y utilizar respectivamente en los tubos de ensayo, ya divididas se colocaran en un vaso de precipitados cada una de las muestras, después de colocar el HDL en los vasos de precipitados, de los tubos de ensayo se tomarán alrededor de 5mL de cada uno de ellos y se depositaran en los vasos de precipitados junto con el HDL, se dejará reposar o almacenar de 3 a 4 días respectivamente.

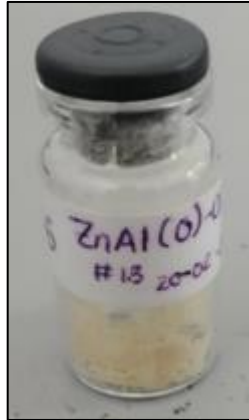


Ilustración 17.- HDL usado para la muestra correspondiente de la solución de paracetamol



Ilustración 18.- Peso total del 1er HDL.

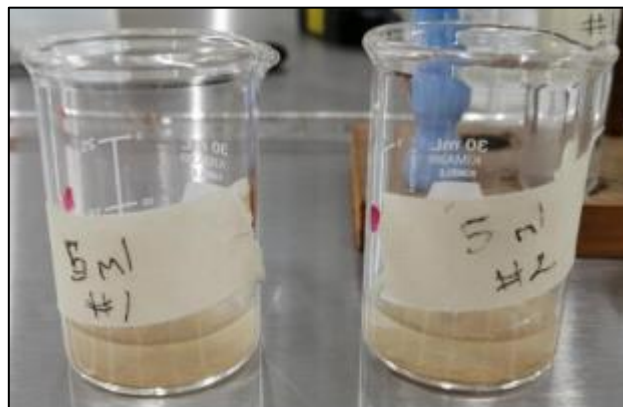


Ilustración 19.- Muestra HDL y solución paracetamol 5 mL



Ilustración 20.- Muestra HDL y solución paracetamol 2.5 mL



Ilustración 21.- Muestra HDL y solución paracetamol 1.25 mL

Pasando los días de reposo, colocaremos cada muestra en dos tubos capilares, uno será para la recolección de la muestra líquida mientras que la otra será para la muestra sólida, es muy importante recordar el etiquetado de cada vaso capilar.



Ilustración 22.- Muestra de HDL después de los días establecidos.



Ilustración 23.- Muestras líquidas y Sólidas del 1er HDL.

Se realizará el mismo procedimiento anterior de una manera análoga, pero ahora con la 2da muestra de HDL respetando todos los pasos y días establecidos de reposo.



Ilustración 24.- Muestra del 2do HDL

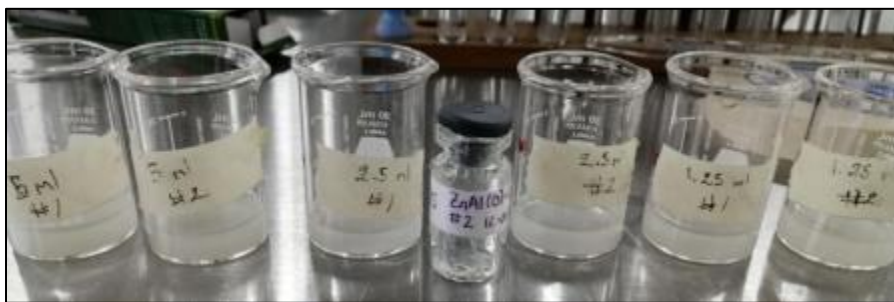


Ilustración 25.- Muestra del 2do HDL con su respectiva solución de paracetamol.

Una vez obtenida la muestra sólida del 1er HDL, se pasará a quitar la humedad restante proveniente de esa muestra, para eso se hará los siguientes pasos:

1. La primera opción es optar por un desecador, colocar las muestras y esperar a que se quite la humedad.
2. La segunda opción y que se utilizó fue a base de sales (silicatos), primero colocamos las sales en un cazuela de porcelana, lo colocamos dentro de una mufla a 100 °C por un tiempo de entre 10-12 minutos aproximadamente, dejamos que se enfríe lo suficiente para poderlo colocar dentro de un vaso de precipitado (antes de colocarlo en el vaso de precipitado podemos optar por colocar la porcelana previamente calentada en el desecador con el propósito de hacer que se enfríe más rápido la porcelana y no se tenga que esperar mucho tiempo), una vez colocada la porcelana en el vaso de precipitado abriremos los tubos capilares de la muestra sólida y los colocaremos en las sales, taparemos el vaso con una bolsa asegurándonos de tajarla bien ya sea con una liga o cinta, dejaremos reposar las muestras en las sales de 2 a 3 días.



Ilustración 26.- Sales (Silicatos) para quitar la humedad de la muestra sólida.



Ilustración 27.- Sales colocada en el vaso de precipitado



Ilustración 28.- Muestras sólidas colocadas en las sales.

Posteriormente se realizó la obtención de la muestra sólida del 2do HDL, como en el proceso anterior dividimos tanto la muestra líquida como seca y la dejaremos asentar durante 2-3 días, ya que dejamos pasar los días realizamos analógicamente el proceso anterior como la muestra 1 del HDL, que fue el siguiente:



Ilustración 29.- Muestras sólidas del 2do HDL con las sales.

Calentamos las sales en una cazuela de porcelana, en la mufla a 100°C por 10 minutos, después lo dejamos reposar por 15 minutos, una vez en reposo la colocamos en el vaso de precipitados, abrimos los tubos capilares de la muestra sólida del 2do HDL y depositamos en las sales, ya colocadas taparemos el vaso con una bolsa asegurándonos de tajarla bien ya sea con una liga o cinta, dejaremos reposar las muestras en las sales hasta que consideremos que la humedad ya no está en las muestras.

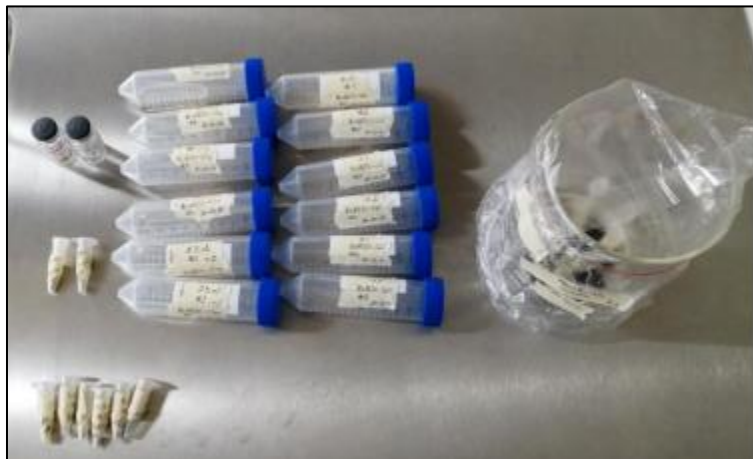


Ilustración 30.- Foto panorámica de todas las muestras líquidas y sólidas de ambos HDL.

9.3. Caracterización

La caracterización permite conocer distintas propiedades que poseen los materiales, así como información de la estructura y composición de los materiales, aunque de manera general, se pueden determinar las propiedades fisicoquímicas.

Las técnicas de análisis se basan en la medida de alguna propiedad física o química de un analito, como por ejemplo la adsorción o emisión de luz, conductividad, entre otras. Por lo tanto, son las propiedades físicas y químicas del analito las que indican el tipo de técnica analítica que se emplea. Para analizar el funcionamiento de los materiales tipo hidrotalcita como adsorbentes se debe monitorear el comportamiento de los materiales. En este trabajo se utilizará el “Paracetamol” para realizar la evaluación del material.

Los materiales HDL son empleados en los procesos de tratamiento de aguas residuales debido a su eficiencia para absorber varios contaminantes, así como bacterias, y ciertos metales, sin embargo, la capacidad de adsorción que presentan los materiales HDL se ve modificada por las combinaciones de los cationes presentes en la estructura del material, la relación atómica de los cationes y la distancia que está entre ellos pueden inferir en la capacidad de adsorción. Considerando lo anterior se evaluará la capacidad de adsorción de dos materiales HDL. Las muestras sintetizadas ZnAl y MgAl presentan una relación estequiométrica entre los cationes divalentes y trivalentes. Una vez confirmada la estructura característica de los materiales HDL en ambas muestras se realizará el proceso de adsorción colocando cada muestra en contacto con diferentes concentraciones de solución de “Paracetamol” por 24 horas, observando así que tanto el material ZnAl como el material MgAl adsorben la especie del contaminante emergente (Paracetamol).

Una vez que se determine qué material presentará mayor eficiencia para adsorber “Paracetamol”, se evaluará la influencia de la temperatura y el pH en el proceso de adsorción. Para la evaluación del efecto que presenta el pH durante el proceso de adsorción se utilizará una temperatura de 25°C. Estas pruebas se realizaron utilizando una solución de “Paracetamol” a una concentración de 10, 5, 2.5 y 1.25 mg/L, agregando 0.2059 g de ZnAl, con agitación constante y muestreando a las 24 horas.

10. Análisis y Discusión de Resultados

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos de la caracterización con Espectroscopia de Infrarrojo, así como los parámetros de isothermas de adsorción mediante dos ecuaciones utilizadas para la cinética química y por último un estudio de pH comprobando la eficiencia del HDL.

Caracterización de los HDL ZnAl y MgAl.

La gráfica 2 muestra los patrones XRD de los dos HDL. Además, el pico de difracción más alto del HDL ZnAl sugiere que la cristalinidad fue relativamente mayor.

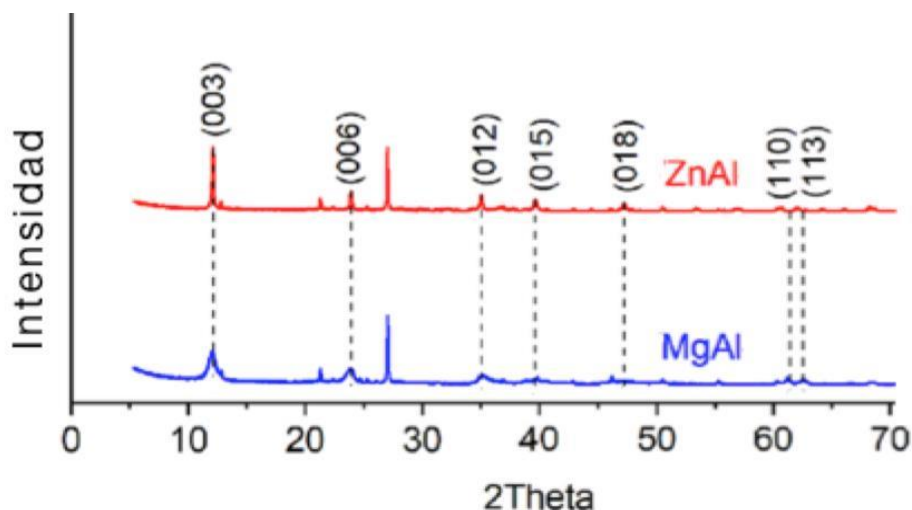


Gráfico 2.- Patrones XRD de los HDL antes del proceso de adsorción.

Los grupos funcionales ácidos y básicos presentes en la superficie de los HDL activados desempeñan un rol importante en la adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Ellos le confieren a los HDL propiedades hidrofílicas porque incrementan la interacción específica ion - dipolo y dipolo – dipolo. En los gráficos 3 y 4 se muestran los espectros FTIR de los HDL.

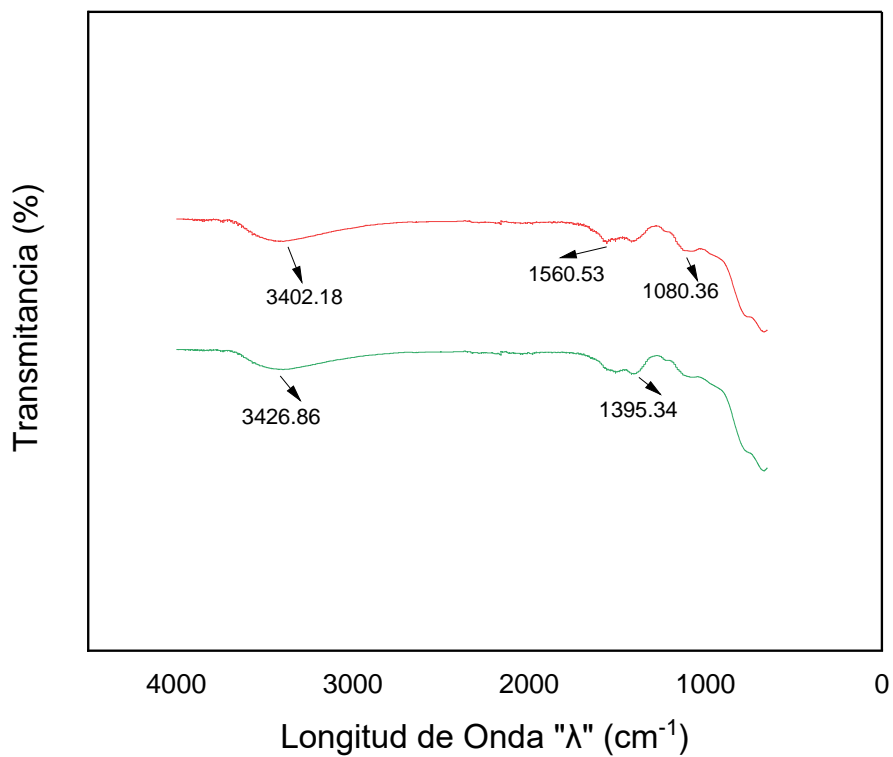


Gráfico 3.- Análisis FTIR de los HDL antes del proceso de adsorción.

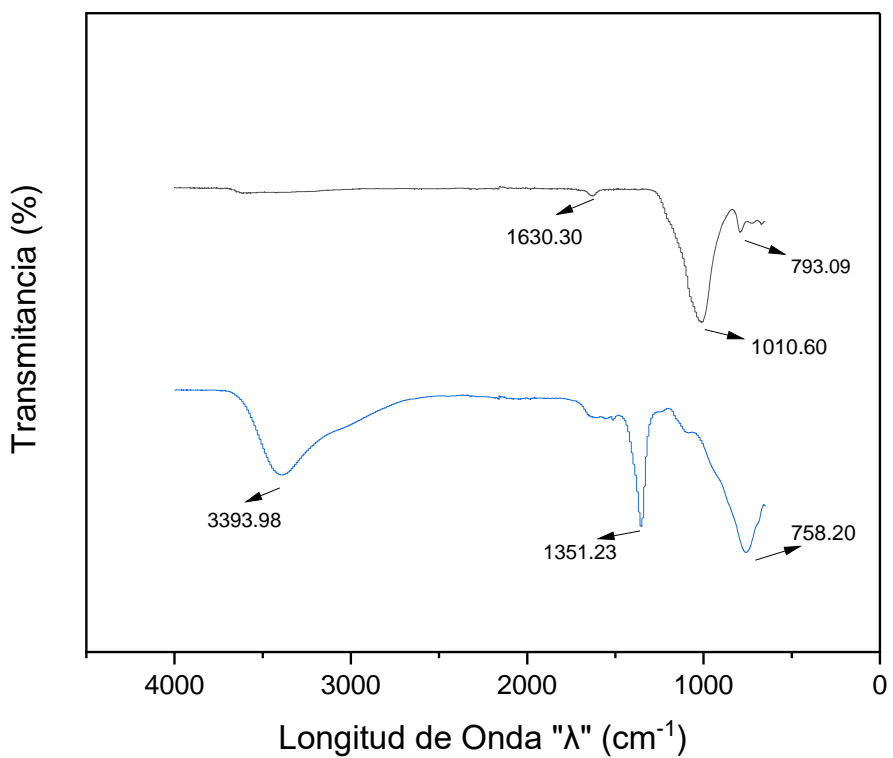


Gráfico 4.- Análisis FTIR de los HDL antes del proceso de adsorción con los aniones interlaminares

Después de la adsorción de contaminantes emergentes (paracetamol), se puede observar en el gráfico 5 el resultado a comparación del grafico 4, podemos observar más bandas vibracionales en las gráficas por el material orgánico que se presenta en la molécula del contaminante emergente (paracetamol).

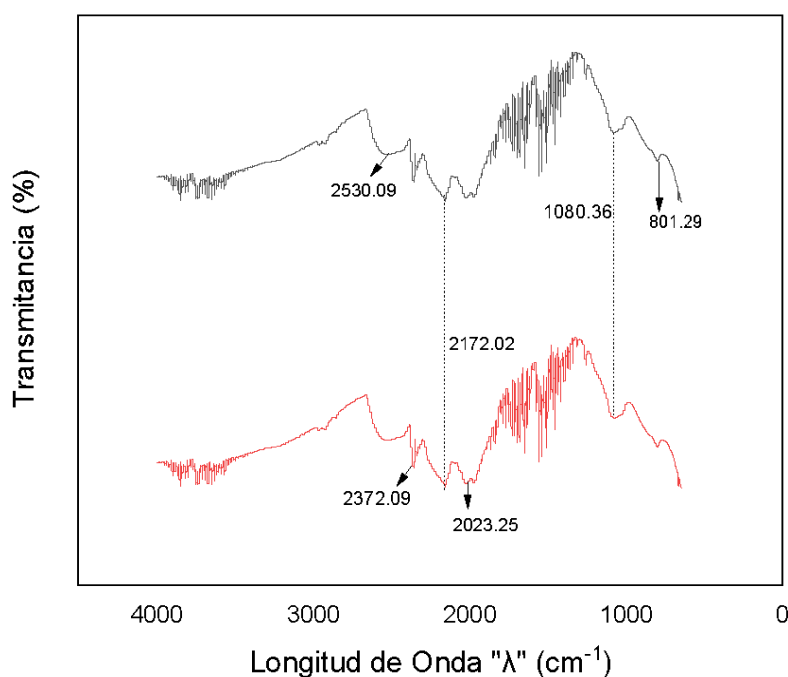


Gráfico 5.- Análisis FTIR después del proceso de adsorción.

Pruebas de adsorción isotérmica.

Las pruebas realizadas en modo discontinuo con ambos HDL para el contaminante emergente (Paracetamol), se llevaron a cabo con concentraciones iniciales de 10, 5, 2.5 y 1.25 mg/L que se mezclaron individualmente con 0.2059g de ZnAl o MgAl como adsorbentes en matraces cónicos durante 8 horas a 25°C y con agitación de 150 rpm. Las concentraciones del contaminante emergente (Paracetamol) en las soluciones se determinaron mediante espectrofotometría ultravioleta basadas en el cambio de concentración y la capacidad de adsorción (mg kg⁻¹), de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m}$$

Donde:

C_o y C_e : son las concentraciones iniciales y de equilibrio (mg L^{-1}), respectivamente,

V es el volumen de la solución (L),

m es la masa de adsorbente seco (kg).

La interacción entre adsorbentes y adsorbatos en equilibrio y la máxima capacidad de adsorción de los HDL, se estudiaron ajustando los datos a los modelos de Langmuir, ecuación y Freundlich.

$$q_e = \frac{q_m * k_L * C_e}{1 + k_L * C_e} \dots \dots (\text{Langmuir})$$

$$q_e = k_L * C_e^n \dots \dots (\text{Freundlich})$$

Donde:

q_e : es la capacidad de adsorción en equilibrio (mg kg^{-1}),

q_m : es la capacidad de adsorción máxima teórica (mg kg^{-1}),

C_e : es la concentración en el equilibrio (mg L^{-1}),

K_L : es la constante de adsorción de equilibrio (L mg^{-1}),

n : es el factor heterogéneo.

Los parámetros para los dos modelos de isotermas de adsorción se muestran en la tabla 4 y la gráfica 6. El resultado referente a las isotermas de Langmuir y Freundlich mostró que la adsorción en los HDL se dio en monocapa a través de la superficie homogénea.

Tabla 4.- Parámetros de las isotermas de equilibrio para la adsorción del contaminante emergente (Paracetamol) en los HDL ZnAl y MgAl.

Adsorbente.	Langmuir		
	Q_m (mg kg ⁻¹)	K_L	R^2
ZnAl	272.17	0.0844	0.9985
MgAl	121.85	0.0763	0.9990
Adsorbente	Freundlich		
	K_F	$1/n$	R^2
ZnAl	14.32	0.5559	0.9868
MgAl	6.43	0.3982	0.9863

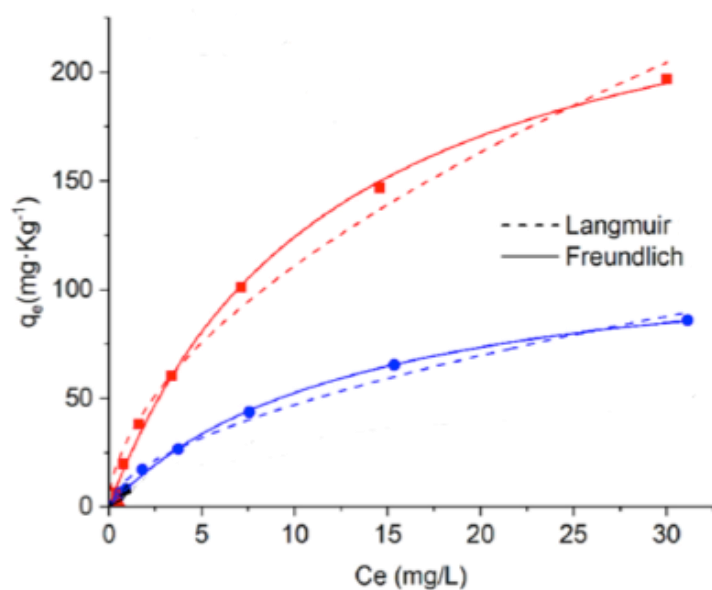


Gráfico 6.- Isotermas de Langmuir y Freundlich para los HDL ZnAl (rojo) y MnAl (azul).

Efectos del pH.

El pH se puede considerar el parámetro más importante que influye en la capacidad de adsorción de un adsorbato sobre la superficie de los HDL, ya que influye grandemente en las interacciones electrostáticas superficiales entre los HDLs y las diferentes especies químicas puestas en contacto.

Los valores de pH de las soluciones del contaminante emergente (Paracetamol) se variaron en el rango de 3 a 10, mientras que las concentraciones iniciales se fijaron en 10, 5, 2.5 y 1.25 mg/L; las ocho soluciones con diferente pH se mezclaron cada una con 0.2059 g del HDL ZnAl en agitación de 150 rpm en agitadores termostáticos a 25 °C durante 8 horas.

Los estudios de pH probaron que la eficiencia de eliminación del contaminante emergente (Paracetamol) es cuando el pH está a 5. Este comportamiento puede comprobarse en la Gráfica 7.

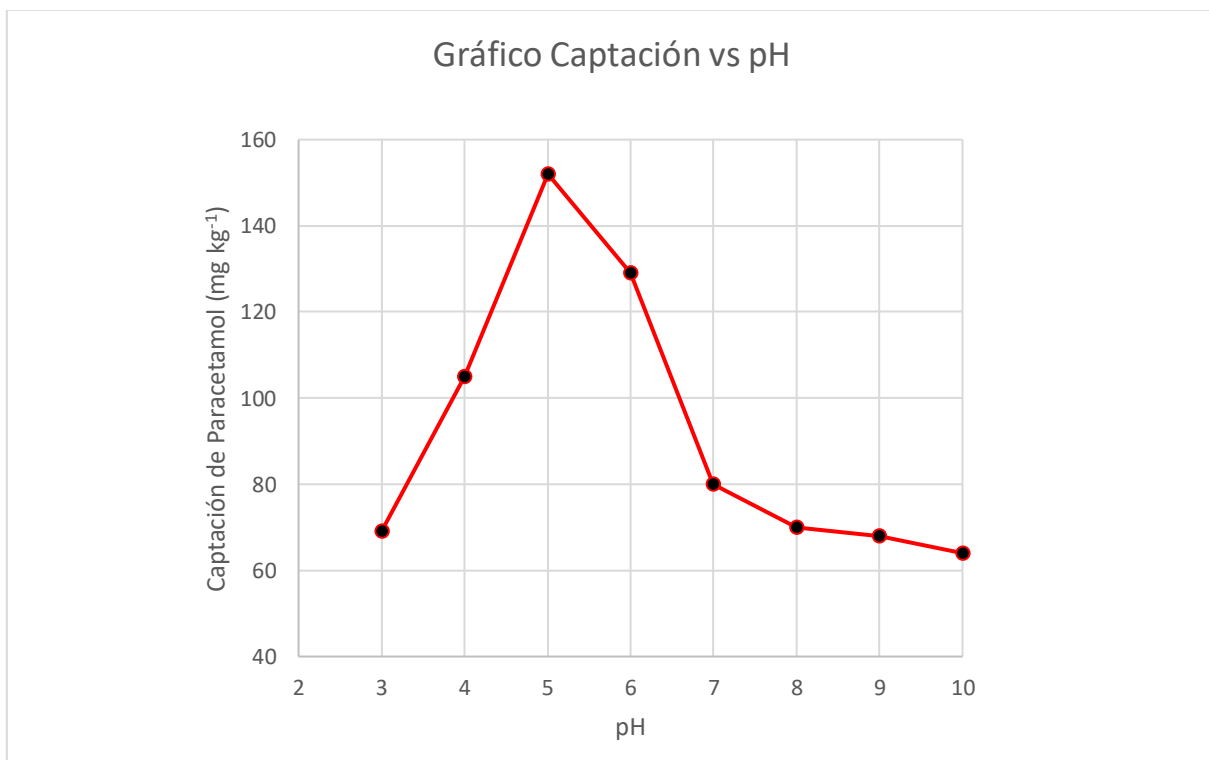


Gráfico 7.- Capacidad de adsorción del HDL ZnAl en función del pH.

11. Conclusiones

- Tras la investigación y la practica realizada en este trabajo podemos decir que nuestra hipótesis se cumplió ya que el material hibrido conocido como “HDL”, logro capturar la molécula del paracetamol contenida en el agua, esto abriendo una posibilidad más a la solución de contaminación en el medio ambiente, así mismo haciendo más trabajo de investigación llegar a plantear múltiples soluciones y usos de este material hibrido.
- Se logró sintetizar un material HDL a partir de ZnAl y MgAl, mediante el método de coprecipitación a pH constante con buenas capacidades adsorbentes.
- Como podemos observar en los resultados de las caracterizaciones el espectro de infrarrojo logro identificar satisfactoriamente el contaminante emergente “Paracetamol”.
- El resultado mediante la experimentación para los isotermas de adsorción como podemos ver mediante la tabla 4 y el gráfico 6, nos dice que el material ZnAl tiene una mejor adsorción a comparación que el material MnAl, así como también el modelo de Langmuir da una mejor correlación a comparación del de Freundlich.

12. Referencias Bibliográficas

- Béjar, M. F. (2016). *SÍNTESIS DE HIDRÓXIDOS DOBLES LAMINARES (HDL) Y SU APLICACIÓN A LA ELIMINACIÓN DE COLORANTES ANIÓNICOS EN DISOLUCIÓN ACUOSA*. Obtenido de https://oa.upm.es/43753/1/TfG_MARIA_FERNANDEZ_BEJAR.pdf
- Castro Pastrana, L. I., Baños Medina, M. I., López Luna, M. A., & Torres García, B. L. (2016). *Ecofarmacovigilancia en México: perspectivas para su implementación*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/579/57945705003.pdf>
- Cuñat, Z. A., & Ruiz, M. (2016). *Ensayos de ecotoxicidad de los fármacos y efectos tóxicos en el medio ambiente: Revisión*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/919/91949104007.pdf>
- Damià Barceló, L., & López de Alda, M. J. (s.f.). *Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes*. Obtenido de https://fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf_contaminacion.pdf
- dos Anjos Silva, I., & Geric de Oliveira Alvim, H. (2020). *THE HISTORY OF MEDICINES AND THE USE OF FORMULAS: AWARENESS OF THE APPROPRIATE USE*. Obtenido de <http://revistajrg.com/index.php/jrg/article/view/77/117>
- *FARMACONTAMINACIÓN. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS MEDICAMENTOS*. (2016). Obtenido de https://files.sld.cu/medicamentos/files/2017/01/INFAC_Vol_24_n_10_farmacontaminacion.pdf
- FARRÉ, M., ABANADES, S., ÁLVAREZ, Y., BARRAL, D., & ROSET, P. N. (2004). *Paracetamol*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Magi_Farre/publication/287337779_Paracetamol/links/5679d32e08aeaa48fa4ad9dc/Paracetamol.pdf
- García Gómez, C., Gortáres Moroyoqui, P., & Droguí, P. (agosto de 2011). *Contaminantes emergentes: efectos y tratamientos de remoción*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/863/86319141004.pdf>
- González Millán, M. d. (2016). *Eliminación de herbicidas y metales pesados en aguas mediante el uso de hidróxidos dobles laminares*. Obtenido de <https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/13489>

- González Zapién, K. S., Olivares Guadarrama, G. I., López Martínez, M. A., Ramírez Quirós, Y., & Ortiz Romero Vargas, M. E. (2019). *Efecto del método de síntesis de hidrotalcitas con Ni²⁺ como catalizadores Fenton heterogéneos en la oxidación de fenol*. Obtenido de <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/7837>
- Hidalgo, D. C. (2019). *HIDRÓXIDOS LAMINARES ORGÁNICO-INORGÁNICOS PARA APLICACIONES EN CATÁLISIS Y ADSORCIÓN*. Obtenido de <https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/18883>
- Jaimes 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*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7590764>
- Jobbágy, M. (2003). *Síntesis, Caracterización y Propiedades de Hidróxidos Dobles Laminares*. Obtenido de https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n3553_Jobbagy.pdf
- Laurel, A. C. (2020). *Las dimensiones de la pandemia de Covid-19*. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/ete/v87n348/2448-718X-ete-87-348-963.pdf>
- Lima, W. G., Cardoso, B. G., Simião, D. C., Amorim, J. M., de Araújo Silva, C., & Moreira Brito, J. C. (2020). *Irrational use of medicines and medicinal plants against COVID-19 (SARS-CoV-2): An emerging problem*. Obtenido de <https://www.bjhp.crfmg.org.br/crfmg/article/view/102/66>
- Maldonado Cuba, M. K. (2018). *DESARROLLO DE DOS NUEVAS METODOLOGÍAS VALIDADAS PARA LA DETERMINACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL PARACETAMOL, COMO CONTAMINANTE EMERGENTE, EN MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA. MÉXICO 2018*. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6334/QUDmacuke.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martínez, D. R., & Carbaja, G. G. (2012). *Hidróxidos dobles laminares: arcillas sintéticas con aplicaciones en nanotecnología*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/933/93322655011.pdf>
- Moreno Ortiz, V. C., Martínez Núñez, J. M., Kravzov Jinich, J., Pérez Hernández, L. A., Moreno Bonett, C., & Altagracia Martínez, M. (02 de diciembre de 2013). *Los*

medicamentos de receta de origen sintético y su impacto en el medio ambiente. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmcf/v44n4/v44n4a3.pdf>

- Prince Flores, J. E. (2014). *Estudio de la influencia de la composición química y el proceso de síntesis en las propiedades fisicoquímicas de hidróxidos dobles laminares y sus derivados.* Obtenido de <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/7475>
- Recio Arriola, A. (s.f.). *Hidróxidos dobles laminares: Alternativas de síntesis y estudio cinético del proceso de adsorción de colorantes aniónicos.* Obtenido de https://oa.upm.es/48831/1/TFG_ALBA_RECIO_ARRIOLA.pdf
- ROCHA GUTIÉRREZ, B. A., PERALTA-PÉREZ, M. d., & ZAVALA-DÍAZ DE LA SERNA, F. J. (2015). *REVISIÓN GLOBAL DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES PBDE Y EL CASO.* Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v31n3/v31n3a10.pdf>
- Rodríguez C., A., Fernández M., L., Domínguez V., J., González V., G., Martínez M., O., & Espinoza Montero, P. (2021). *Elucidación de la fórmula estequiométrica de nanohidrotalcitas de mg y ni sintetizadas por el método de coprecipitación.* Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8270040>
- Rubio Clemente, A., Chica Arrieta, E. L., & Peñuela Mesa, G. A. (2013). *Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes.* Obtenido de <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/487FPTLyXrSG7MHJfDYN6pj/?format=pdf&lang=es>
- Ruiz Hernandez, I. H. (2021). *Eliminación de Bacterias en Superficies de Alimentos a Partir de Materiales Híbridos a Base de Hidróxidos Dobles Laminares ZnAl y MgAl, con Fármacos de Estreptomicina y Amoxicilina.* Obtenido de http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/6354/FIQ-M-2021-1241.PDF?sequence=1&isAllowed=y
- Russo, D. K. (s.f.). *Paracetamol.* Obtenido de <http://repositorio.ub.edu.ar/bitstream/handle/123456789/843/Articulo%208%20-%205.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tejada, C., Quiñonez, E., & Peña, M. (2014). *CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS: METABOLITOS DE FÁRMACOS. UNA REVISIÓN.* Obtenido de <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/341/137>

- Weber, F. A., aus der Beek, T., Bergmann, A., Carius, A., Grüttner, G., Hickmann, S., . . . Stolzenberg, H.-C. (2014). *Fármacos en el medio ambiente la perspectiva global. Incidencia, efectos y acción cooperativa potencial bajo el SAICM*. Obtenido de https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/farmacos_en_el_medio_ambiente.pdf
- Wirtz, V., Serván Mori, E., Heredia Pi, I., Dreser, A., & Ávila Burgos, L. (2013). *Factores asociados con la utilización y el gasto en medicamentos en México*. Obtenido de https://www.scielosp.org/article/ssm/content/raw/?resource_ssm_path=/media/assets/spm/v55s2/v55s2a7.pdf
- Zevallos Escobar, L. E. (2014). *Metaanálisis de una intervención educativa para el uso adecuado de medicamentos*. Obtenido de <http://revistas.uladech.edu.pe/index.php/increscendo/article/view/1501>