



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“REMOCIÓN DE METRONIDAZOL UTILIZANDO LA CENIZA DE
CASCARILLA DE ARROZ COMO MATERIAL ADSORBENTE.”

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL

PRESENTA

ING. MARA PATRICIA MORTERA LUCIO

DIRECTOR DE TESIS

DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

CODIRECTOR DE TESIS

DR. ÁNGEL RUIZ SÁNCHEZ

ASESORES

DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO

DRA. ROSA ELENA ZAMUDIO ALEMÁN

ABRIL 2024

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.

Tel. (229) 690 5010 ext. 113 depi_bdelrio@tecnm.mx | tecnm.mx | bdelrio.tecnm.mx



2023
Francisco
VILA



ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro: **A-01509-080822**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 14:00 horas del día 19 de Marzo de 2024 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

Que presenta el (la) alumno(a):

MARA PATRICIA MORTERA LUCIO

Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:



DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ

Director



DR. ANGEL RUIZ SANCHEZ

Co-Director



DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO

Asesor



DRA ROSA ELENA ZAMUDIO ALEMAN

Asesor



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.
Tel. (229) 690 5010 ext. 113 depi_bdelrio@tecnm.mx | tecnm.mx | bdelrio.tecnm.mx



Boca del Río, Ver **19/MARZO/2024**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**MARA PATRICIA MORTERA LUCIO
PASANTE DEL PROGRAMA MAESTRÍA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE**

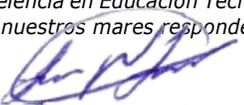
De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

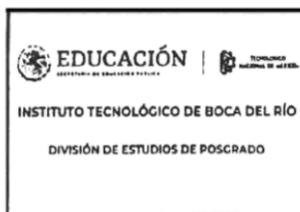
**"REMOCIÓN DE METRONIDAZOL UTILIZANDO LA CENIZA DE CASCARILLA DE
ARROZ COMO MATERIAL ADSORBENTE"**

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede AUTORIZACIÓN para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros mares responderemos*


**DR. JUAN DAVID GARAY MARIN
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p. Coordinación del Programa MCIAMB
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.
Tel. (229) 690 5010 ext. 113 depi_bdelrio@tecnm.mx | tecnm.mx | bdelrio.tecnm.mx





Boca del Río, Ver., **13/MARZO/2024**
Asunto: **CONSTANCIA DE NO INCONVENIENCIA**

ING. VICTOR HUGO MUÑOZ ROBLEDO
JEFE DEL DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
Presente.

AT'N.LIC. SONIA CONCEPCIÓN SOLÍS SOLÍS
GESTOR DE TITULACIÓN
Presente.

Por medio del presente, me permito hacer constar que el(a) candidato(a) a Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental C. **MARA PATRICIA MORTERA LUCIO**, de la generación agosto 2021 – diciembre 2023 con número de control **22990009**, cumplió con todos los requisitos para su liberación como tesista, mismos que incluyen la presentación del manuscrito final de tesis autorizado por su director de tesis **DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ** y el envío del artículo derivado de su tesis de grado a una revista indexada.

Por lo anterior no tengo inconveniente en que realice los trámites correspondientes para el acto recepcional para la obtención del grado de Maestro en Ciencias, en la fecha y hora que defina el candidato con su Director de tesis.

Sin otro particular y para los fines legales que corresponda, quedo de usted.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros mares responderemos

DR. JUAN DAVID GARAY MARIN
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIO DE POSGRADO E INVESTIGACION

Vo.Bo.

DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ
DIRECTOR DE TESIS

c.c.p. Coordinador de MCIAMB
c.c.p. Expediente



DEDICATORIA

A mi madre, por la confianza que ha puesto en mí y por apoyarme en cada una de mis decisiones, por su paciencia y comprensión, pues sin ella no lo hubiera logrado. Tu bendición a lo largo de mi vida me ha llevado por un camino de bien, por eso te entrego este trabajo como ofrenda de todo el amor que me has brindado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto Tecnológico de Boca del Río (ITBOCA) y al programa de maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental por abrirme las puertas para desarrollar mi trabajo de investigación y a CONAHCYT por haberme otorgado la beca 816087 para realizar mis estudios de Maestría.

A mi directora, la Dra. María del Refugio Castañeda Chávez por su guía y orientación durante mi estancia en el programa de Maestría, por ayudarme a participar en congresos científicos, por la revisión continua del trabajo de tesis.

A mi codirector, el Dr. Ángel Ruiz Sánchez todo el apoyo para que este trabajo se realizara con éxito, por estar pendiente de mi en cada paso del proceso.

A mis asesores, la Dra. Fabiola Rango Reynoso por compartir conmigo todos sus conocimientos, así como sus acertados comentarios que me hicieron replantearme varios puntos de este trabajo y a la Dra. Rosa Elena Zamudio Alemán por sus observaciones en el proceso de investigación.

RESUMEN

Los contaminantes emergentes se encuentran, por ejemplo, en las aguas residuales domésticas, industriales, residuos hospitalarios, efluentes de las actividades agrícolas y ganaderas. El estudio de los contaminantes emergentes y su proceso de tratamiento, son relevantes para investigar debido al déficit de agua dulce para la población. En ese sentido, se busca desarrollar estrategias y nuevos procesos para reutilizar el agua de los efluentes en plantas de aguas residuales y de esta manera, integrarle para el uso de la población humana. Uno de los principales contaminantes emergentes son los productos farmacéuticos, por ejemplo, el metronidazol. Por tal motivo, el objetivo de este proyecto fue evaluar la eficiencia de la ceniza de cascarilla de arroz en la adsorción de metronidazol. El desarrollo experimental de esta investigación se dividió en tres etapas: la primera etapa consistió en el acondicionamiento físico de la cascarilla de arroz y su síntesis correspondiente en carbón activado. En la segunda etapa se prepararon soluciones del contaminante emergente (metronidazol) y se realizó una curva de calibración para obtener una relación lineal entre la absorbancia y la concentración de metronidazol, así como experimentos de adsorción para determinar la capacidad de adsorción. En la tercera etapa, se llevó a cabo un análisis preliminar desde el punto de vista cinético, obteniendo de esta manera, la dosis óptima de adsorbente y el tiempo de contacto óptimo por tamaño de partícula. Los mejores resultados mostraron un valor de 93% de adsorción para el metronidazol. Los datos experimentales se ajustaron al modelo de adsorción de primer y segundo orden, lo cual indica que el proceso se lleva a cabo de través de fisisorción y quimisorción. Las variables significativas desde el punto de vista estadístico fueron las siguientes: pH, tiempo de contacto y dosis del adsorbente. Por último, los resultados de este trabajo confirman que la cascarilla de arroz es una materia prima potencial a partir de la cual es posible sintetizar carbón activado y con ello desarrollar procesos de adsorción para la remoción de metronidazol y probablemente de metales disueltos presentes en las aguas residuales.

Palabras clave: Contaminantes emergentes, carbón activado, adsorción.

ABSTRACT

Emerging contaminants are found, for example, in domestic and industrial wastewater, hospital waste, and effluents from agricultural and livestock activities. The study of emerging contaminants and their treatment process are relevant to investigate due to the deficit of fresh water for the population. In this sense, it seeks to develop strategies and new processes to reuse water from effluents in wastewater plants and in this way, integrate it for the use of the human population. One of the main emerging contaminants is pharmaceuticals, for example metronidazole. For this reason, the objective of this project was to evaluate the efficiency of rice husk ash in the adsorption of metronidazole. The experimental development of this research was divided into three stages: the first stage consisted of the physical conditioning of the rice husk and its corresponding synthesis into activated carbon. In the second stage, solutions of the emerging contaminant (metronidazole) were prepared and a calibration curve was carried out to obtain a linear relationship between the absorbance and the concentration of metronidazole, as well as adsorption experiments to determine the adsorption capacity. -In the third stage, a preliminary analysis was carried out from the kinetic point of view, thus obtaining the optimal dose of adsorbent and the optimal contact time per particle size. The best results showed a value of 93% adsorption for metronidazole. The experimental data fit the first and second order adsorption model, which indicates that the process is carried out through physisorption and chemisorption. The statistically significant variables were the following: pH, contact time and adsorbent dose. Finally, the results of this work confirm that rice husk is a potential raw material from which it is possible to synthesize activated carbon and thereby develop adsorption processes for the removal of metronidazole and probably dissolved metals present in water residuals.

Key words: Emerging contaminants, activated carbon, adsorption.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
NOMENCLATURA	vii
I.INTRODUCCIÓN	1
II.MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	4
2.1 Contaminantes emergentes	4
2.2 Comportamiento ambiental de los fármacos	7
2.3 Eficiencia de procesos de tratamiento en remoción de fármacos.....	11
2.4 Generalidades del arroz y su cascarilla.....	12
2.5 Síntesis de carbón a partir de la cascarilla de arroz.....	16
2.5.1 Preparación de carbón activado utilizando cascarilla de arroz	16
2.6 Adsorción química	19
2.6.1 Biosorción	19
2.6.2 Factores que afectan en el proceso de bioadsorción	20
2.6.3 Isotermas de adsorción.....	21
2.6.4 Isoterma de Langmuir	22
2.6.5 Isoterma de Freundlich	22
2.7 Metronidazol	23
2.7.1 Absorción, distribución, metabolismo y excreción del metronidazol en el cuerpo humano	24
2.8 Industria farmacéutica.....	26
2.8.1 Presencia de residuos farmacéuticos en agua.....	26
2.9 Factores que influyen en la adsorción fármacos en el organismo.	28
III. MARCO DE REFERENCIA	30
3.1 Area de estudio.....	30
3.2 Antecedentes.....	30
IV. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	34
4.1 Situación problemática.....	344
4.2 Delimitación del problema.....	35

4.3 Planteamiento del problema	37
4.4 Vacío del conocimiento	37
4.5 Justificación	37
4.6 Pregunta de investigación.....	39
V. HIPÓTESIS	40
VI. OBJETIVOS.....	41
6.1 General.....	41
6.2 Específicos	41
VII.MATERIALES Y MÉTODOS	42
7.1Diseño de experimentos	42
7.2 Pretratamiento de la cascarilla de arroz.....	44
7.2.1 Preparación del adsorbente	44
7.3 Evaluación de tamaño y velocidad de agitación óptimo	45
7.4 Preparación de agua residual sintética	45
7.5 Ensayos de adsorción.....	45
7.6 Efecto del pH en la solución.....	46
7.7 Efecto de la concentración inicial de adsorbato y tiempo de contacto	46
7.8 Cinética de adsorción	47
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
8.1 Influencia del pH.....	48
8.2 Tiempo de contacto óptimo.....	50
8.3 Determinación de la capacidad de adsorción del carbón adsorbente de la cascarilla de arroz.....	51
8.4 Analisis estadístico de varianza (ANOVA) para la ceniza de cascarilla de arroz	51
8.5 Modelo cinéticos	54
8.5.1 Modelo cinético de primer orden.....	54
8.5.2 Modelo cinético de segundo orden	56
IX.CONCLUSIONES	59
X.RECOMENDACIONES	¡Error! Marcador no definido.
XI.REFERENCIAS.....	61
ANEXO 1. PRUEBAS PARA LA DETERMINACION DE TAMAÑO DE PARTICULA DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ	65
ANEXO 2. DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE AGITACIÓN ÓPTIMA	67
ANEXO 3. CURVA DE CALIBRACION.....	69

ANEXO 4. PRUEBA DE ACTIVACIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ CON NAOH(0.1 M).....	70
---	-----------

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Factores que influyen en el organismo al ingerir fármacos	8
Cuadro 2. Propiedades típicas de la cáscara de arroz.....	114
Cuadro 2. Composición química de la cascarilla de arroz.....	115
Cuadro 4. Características fisicoquímicas de la cáscara de arroz	116
Cuadro 5. Modelos cinéticos de adsorción.	23
Cuadro 6. Propiedades fisicoquímicas del metronidazol.....	24
Cuadro 7. Variables del proceso.....	41
Cuadro 8. Variables independientes del proceso.....	41
Cuadro 9. Rango de parámetros a evaluar.	41
Cuadro 10. Resultados obtenidos del proceso de adsorción de metronidazol.	50
Cuadro 11. Analisis de varianza (ANOVA) para el proceso de adsorcion de metronidazol	51
Cuadro 12. Valores no significativos de P en el software estadistico Past	51
Cuadro 13. Regla de decisión para hipótesis nula y alterna.....	52
Cuadro 14. Cuadro de decision para cada variable con su valor de P para cada variable experimental.....	52
Cuadro 15. Parámetros característicos de los diferentes modelos cinéticos y los coeficientes de correlación para la cascarilla de arroz	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de contaminantes emergentes	5
Figura 2. Principales riesgos de los contaminantes emergentes.....	6
Figura 3. Esquema de la secuencia de los fármacos al ingresar al organismo.....	7
Figura 4. Fuentes y rutas de incorporación al medio ambiente.....	9
Figura 5. Ciclo de incorporación de CE a la cadena alimenticia tras el proceso de depuración.....	10
Figura 6. Cariósipide de arroz y sus estructuras.....	13
Figura 7. Planta de arroz (esquema gráfico).....	25
Figura 8. Comparación entre los métodos de carbon activado.....	17
Figura 9. Obtención de carbon activado utilizando la activación química.....	18
Figura 10. Diferentes procesos de sorción.....	20
Figura 11. Estructura química del metronidazol	23
Figura 12. Ruta y origen del metronidazol en agua.....	25
Figura 13. Ubicación del Instituto Tecnológico de Boca del Río.....	30
Figura 14. Esquema de la situación problemática de metronidazol en el medio ambiente.....	36
Figura 15. Diagrama de actividades realizadas en la fase experimental del proyecto.....	43
Figura 16. Proceso de pretratamiento de la cascarilla de arroz.	45
Figura 17. Influencia del pH en el proceso de adsorción del metronidazol.....	48
Figura 18. Diagrama de especiación para el metronidazol MTZ ⁺ Y MTZH.....	49
Figura 19. Representación de la especiación para el metronidazol	49
Figura 20. Gráfica de intervalos de q(mg metronidazol / g carbón) vs tiempo (min).....	50
Figura 21. Modelo cinético de primer orden para la cascarilla de arroz	55
Figura 21. Ajuste en forma lineal para el modelo cinético de primer orden	56
Figura 23. Modelo cinético de segundo orden para la cascarilla de arroz.....	57
Figura 24. Modelo cinético lineal de pseudo primer orden para la cascarilla de arroz.....	57
Figura 25. Tamaño de partícula seleccionado para la cascarilla de arroz.....	65
Figura 26. Tamaño de partícula seleccionado para la cascarilla de arroz.....	66
Figura 27. Ceniza de cascarilla de arroz tamizada.	66
Figura 28. Velocidad de agitación para el proceso de adsorción de ceniza.	67
Figura 29. Proceso de agitación para la obtención de velocidad de agitación óptima.....	68
Figura 30. Preparación de muestras.....	68
Figura 31. Curva de calibración de metronidazol a diferentes concentraciones.....	69
Figura 32. Comparación de tratamientos para la activación química	70

NOMENCLATURA

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales

MTHZ⁺ : Metronidazol en fase protonada

MTZ: Metronidazol en fase neutra

IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología Ambiental

µg: microgramos

HCl: Ácido clorhídrico

NaOH; Hidróxido de sodio

mg/L: miligramos sobre litro

pH: Potencial Hidrogeno

%: porcentaje

UV: Ultravioleta

PKa: medida de acidez

Ka: Constante de disociación ácida

q (mg/g): Capacidad de adsorción

E.U.A: Estados Unidos de América

ETAP: Estación de tratamiento de agua potable

m²/g : Área superficial

CE: Contaminante emergente

SEMARNAT: Secretaría de medio ambiente y recursos naturales

UNESCO: Organismo especializado de las Naciones Unidas para la educación, la ciencia y la cultura.

LIRA : Laboratorio de Investigaciones de Recursos Acuáticos

ppm: partes por millón

ANOVA: Análisis de Varianza

H₂PO₄ : Acido fosfórico

KOH: Hidróxido de Potasio

ZnCl₂ : Cloruro de Zinc

FDA :Administración de alimentos y medicamentos, siglas en Ingles

APIs: Ingredientes Farmacéuticos Activos

FAO: La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

SIAP: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera

SADER: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

I. INTRODUCCIÓN

El número de actividades realizadas por los seres humanos es tan grande que, cuando se analizan detenidamente, incluso las actividades más simples de la vida diaria implican cambios en el medio ambiente. Las actividades que pueden considerarse inofensivas por naturaleza también generan desechos que tienen impactos a largo plazo en el ecosistema global. Por tanto, actividades comunes como la higiene personal y el cuidado de la salud pueden causar graves problemas al ecosistema. Actualmente, para muchos investigadores, los contaminantes más problemáticos son los llamados contaminantes emergentes, que incluyen diversos compuestos químicos como medicamentos, productos de higiene personal y fragancias, mientras que los sintéticos se utilizan en productos de limpieza. Los nuevos contaminantes son compuestos de diferente origen y naturaleza química, de los cuales se sabe relativamente poco sobre su presencia e impacto en diversos elementos del medio ambiente y del ser humano, por eso es importante estudiarlos. Una amplia gama de sustancias se consideran contaminantes emergentes, incluidos, entre otros, productos farmacéuticos y sus derivados, esteroides y hormonas (píldoras anticonceptivas), productos de cuidado personal, aditivos y agentes industriales. (Barceló, 2008).

Debido a sus características internas, los productos farmacéuticos en agua son muy solubles y se liberan al medio ambiente al excretar, independientemente de si se metaboliza o no. A pesar del hecho de que no hablamos de compuestos permanentes, se usan y descargan constantemente, y los sistemas normales de agua potable y el tratamiento de aguas residuales a menudo no pueden eliminarlos. En el caso específico de los productos se puede afirmar claramente que se trata de contaminantes nuevos, aún no regulados por ninguna institución, con impacto limitado al medio ambiente en general (humanos, animales y plantas) por lo que, todavía no es muy conocido, su posible impacto es un tema que se viene desarrollando activamente desde los años noventa (Henriquez, 2012).

En las últimas décadas, el concepto de contaminantes emergentes involucra a los diferentes compuestos de tipo químico que, en su mayoría son detectados en cuerpos de agua y suelo con valores muy bajos de concentración, pero que a pesar de su baja concentración representan un riesgo para el medio ambiente. En ese sentido, los medicamentos en los cuerpos de agua son un ejemplo de contaminantes emergentes, afectando de esta manera negativamente los ecosistemas marinos y a los organismos que lo habitan (Fierro et al., 2010). Los contaminantes emergentes se encuentran en diversas áreas del medio ambiente como por ejemplo aguas residuales domésticas, industriales, de residuos hospitalarios, de las actividades agrícolas y de las plantas de tratamiento (Tejada et al., 2014).

Dentro de las amenazas en el medio ambiente como consecuencia del uso de contaminantes emergentes se describe lo siguiente:

- Persistencia: resistencia a la degradación química
- Bioconcentración: si el contaminante tiene más afinidad con el agua, puede alcanzar mayor concentración de este
- Bioacumulación: los organismos más antiguos presentan mayor concentración
- Toxicidad: debido a los efectos negativos en la salud humana y animal
- Movilidad ambiental: por la capacidad que tienen los contaminantes emergentes de desplazarse al medioambiente y transformarlo (Damia Barceló , 2008).

Según Vulliet (2011), las principales vías de los contaminantes emergentes hacia el medio ambiente son:

- Uso de los contaminantes emergentes por parte de humanos y animales en áreas urbanas y sistemas de alcantarillado.
- Liberación de residuos hospitalarios al sistema de alcantarillas
- Lixiviación de fosas sépticas.
- Riego con efluentes tratados de las plantas de tratamiento de agua residuales.
- Descarga de residuos industriales.
- Eliminación a vertederos a través de desechos domésticos, desechos médicos y otros desechos peligrosos.

Actualmente los medicamentos empleados tanto para el consumo humano y animal tienen como destino final las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) , pero a veces el consumo excesivo hace que estos contaminantes emergentes no lleguen a una PTAR, sino a otros cuerpos de agua como lo pueden ser ríos o humedales.(Martínez-Alcalá et al., 2020). En México no existe una regulación que indique los límites permisibles de contaminantes emergentes como lo es el metronidazol(Jacobo-Marín et al., 2021). Es por ello que, la presencia de este contaminante emergente en cuerpos de agua incentiva a optimizar los procesos de tratamiento de las aguas residuales y el desarrollo de métodos eficientes y más específicos para su remoción.

Martínez- Alcalá et al., (2020) señala que, de no mitigar los contaminantes emergentes (medicamentos) de cuerpos de agua, se pueden presentar las siguientes problemáticas:

- Aportes considerables de resistencia microbiana al ambiente costero marino.
- Alteraciones en los animales que consumen antibióticos por alguna enfermedad al crecer y reproducirse.
- Alteraciones en la fauna de los cuerpos de agua contaminadas por antibióticos
- Costo en la salud pública por enfermedades por resistencia microbiana

El tratamiento de los contaminantes emergentes y su remoción del agua residual conlleva un costo económico elevado ya que se requiere de tecnología avanzada. Por tal motivo la utilización de bioadsorbentes es un método alternativo que podría disminuir los costos para la remoción de contaminantes emergentes (Flores, 2020).

Por otro lado, los bioadsorbentes son residuos de la industria agrícola, como lo puede ser, la cascarilla de arroz (Flores, 2020), que es un material económico, de fácil acceso y de alta producción a nivel local. Por sus propiedades fisicoquímicas se postula como un buen adsorbente (Llanos et al., 2016). Dentro de sus principales características de la cascarilla de arroz destacan su área superficial de 270 m²/g aproximadamente (Malik, 2003); además, una vez calcinada presenta más del 90 % de óxido de silicio, el cual tiene un tamaño fino y alta reactividad, lo que conlleva a una alta capacidad de remoción de contaminantes (Kurtis y Rodríguez, 2003). Por ello, la cascarilla de arroz es una opción para la remoción de contaminantes emergentes.

La gestión de residuos que provienen de la industria agrícola como lo es la cascarilla arroz mejorará su disposición final, ya que es un desecho que se genera en grandes cantidades a partir de la producción de arroz, uno de los cereales más consumidos por el Estado de Veracruz (para el año comercial 2022/2023, se proyectó una producción de arroz de 157 mil toneladas).

II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes se definen como cualquier sustancia química sintética o natural o cualquier microorganismo que no se controla comúnmente en el medio ambiente, pero tiene el potencial de entrar en él y causar efectos ecológicos y/o de salud humana adversos (Smital, 2008). Es importante señalar que la mayoría de los contaminantes emergentes no son contaminantes totalmente nuevos o que acaban de entrar en el medio ambiente. Más bien, la mayoría de los contaminantes emergentes son contaminantes bien establecidos con un nuevo efecto tóxico o modo de acción. Por lo tanto, la palabra emergente se refiere no solo al contenido mismo sino también a una preocupación emergente sobre el contaminante (Rosenfeld y Feng, 2011). Por lo tanto, se entiende que los contaminantes emergentes son aquellos contaminantes previamente desconocidos o no reconocidos que no están lo suficientemente investigados ni regulados y aún hace falta desarrollar métodos de análisis más sensibles para su monitoreo, detección y cuantificación en todo tipo de agua (aguas superficiales y subterráneas, así como en agua para consumo humano y residual), además de conocer su comportamiento y su dispersión (Cunha et al., 2021).

Algunos de estos contaminantes, son utilizados en grandes cantidades diariamente e incluye una amplia variedad de compuestos (Figura 1) como: productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal, antisépticos, retardantes de flama, aditivos industriales y subproductos de la desinfección del agua que comúnmente están presentes en el medio acuático a concentraciones de trazas, que van desde $\mu\text{g/L}$ (Barceló, 2003).

Muchos de estos contaminantes son tóxicos y, por lo tanto, son clasificados como disruptores endocrinos, lo que implica que una exposición a los mismos puede dar lugar a alteraciones en el crecimiento, desarrollo, reproducción y comportamiento de los organismos vivos. Es conveniente recalcar que los sistemas convencionales de tratamiento no resultan eficientes para remover los CE (Kumar *et al.*, 2022). Esto implica que hay que acudir a tratamientos terciarios en estas plantas convencionales o acudir a los procesos avanzados de tratamiento que resultan costosos y demandantes de energía. Su presencia en el ambiente es el resultado del vertido de aguas residuales sin el debido tratamiento, de la urbanización descontrolada, del desarrollo de la industria, de las actividades de atención de la salud esenciales para sustentar el bienestar humano, la agricultura y el transporte. Incluyen una amplia gama de sustancias producidas por la humanidad, consideradas indispensables para la vida moderna (Flores, 2013).

Otra particularidad de estos contaminantes, es que debido a su elevada producción y consumo y a la continua introducción de los mismos en el medio ambiente, no necesitan ser persistentes para ocasionar efectos negativos. La variación en las concentraciones en el medio ambiente, dependen de sus propiedades físico-químicas, como; constantes de partición, solubilidades o constantes cinéticas que caracterizan los diferentes fenómenos dinámicos como las reacciones bióticas y abióticas como la biodegradación, hidrólisis, fotodegradación, volatilización, procesos

de adsorción, así como condiciones ambientales externas, como la composición de la matriz, procesos biológicos, condiciones hidrológicas y climatológicas (Agudelo, 2019).

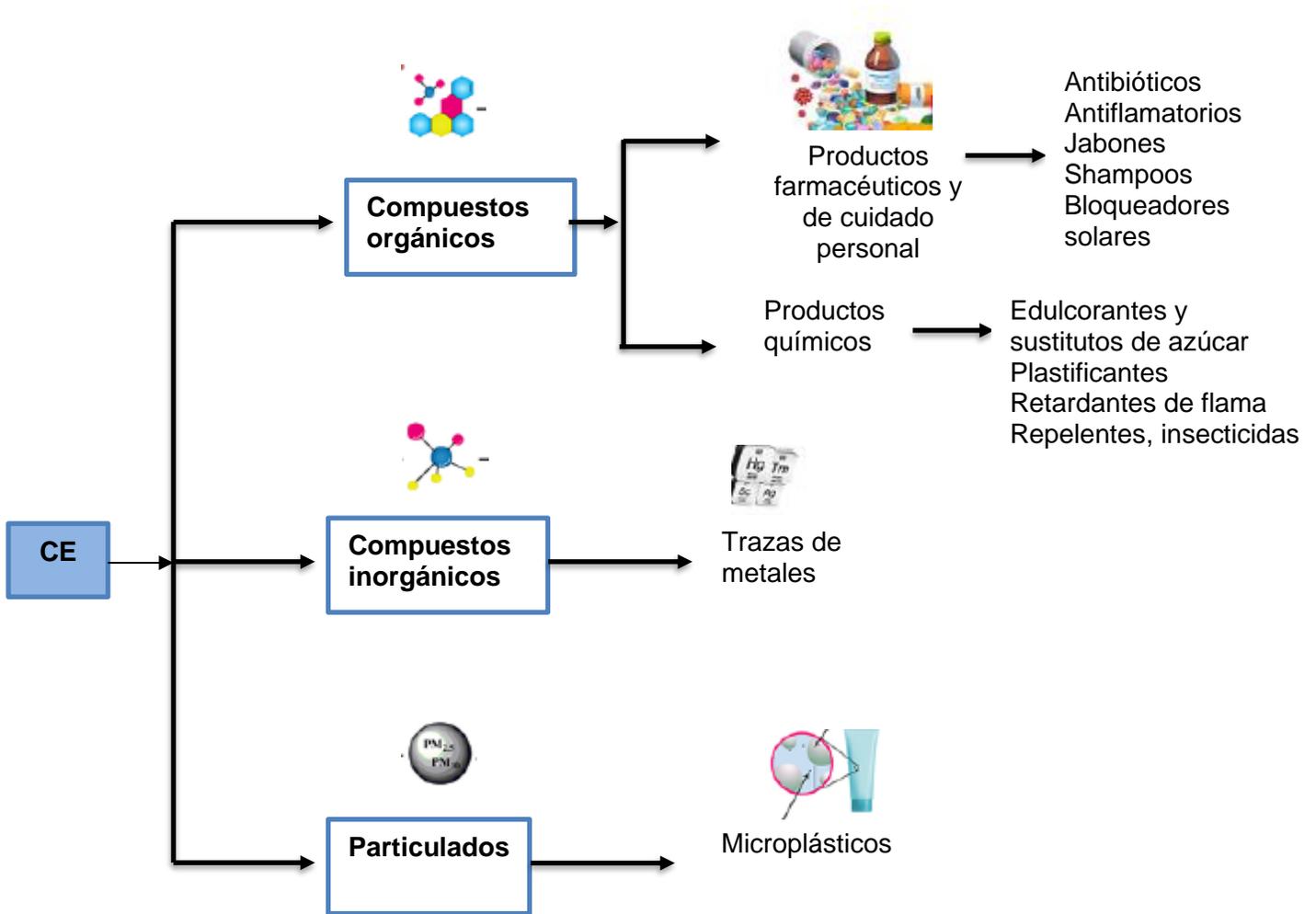


Figura 1. Ejemplos de contaminantes emergentes
Adaptado de Antúnez et al., (2021).

Actualmente, en México, no existen normativas en relación para los contaminantes emergentes (Jacobó-Marín et al., 2021), además de que los sistemas de tratamiento de aguas residuales que operan se diseñaron para depurar sólidos, materia orgánica disuelta y nutrientes, por lo que muchos contaminantes emergentes pasan el proceso de tratamiento con ninguna modificación en su concentración. Pese a que aún resultan insuficientes los estudios de los niveles de contaminantes emergentes en las aguas residuales, la evidencia científica muestra que su presencia está presente en los cuerpos de agua del país en niveles de partes por millón, capaces de producir efectos negativos en la salud humana y de los ecosistemas (Navarro-Frómata, 2019; Vázquez-Tapia et al., 2022).



Figura 2. Principales riesgos de los contaminantes emergentes
Adaptado de Crespo et al., (2023).

Los contaminantes emergentes se originan en fuentes animales o humanas, ya sea descargadas directamente en cuerpos de agua o lixiviadas lentamente a través de los suelos, por lo que la calidad del agua se deteriora y el agua potable se contamina. Las aguas residuales municipales, industriales y domésticas son una vía principal para su amplia difusión en el ambiente acuático y desafortunadamente las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) convencionales no cuentan con la capacidad para la remoción de los contaminantes emergentes. Sin embargo, muchos se pueden encontrar en diferentes áreas donde nunca han sido utilizados, debido a sus propiedades, tales como persistencia durante el transporte a larga distancia y la bioacumulación.

Por lo tanto, estos compuestos son capaces de llegar a cualquier medio natural y representar un grave riesgo por el consumo de agua potable, sin embargo, estos riesgos son difíciles de precisar, debido a que para la mayoría de estos contaminantes no se cuentan con datos de toxicidad, por lo que es difícil predecir los efectos sobre la salud en seres humanos y organismos acuáticos que resultan en efectos potencialmente dañinos (Martínez-Alcalá et al., 2020). Como consecuencia de este problema, se ha sugerido la aplicación de nuevas tecnologías de tratamientos avanzados con el fin de mejorar la calidad del agua (Tejada et al., 2014). Los contaminantes emergentes pueden llegar al medio ambiente al ser transportados y distribuidos a través de diferentes rutas (las principales rutas son los residuos generados por la industria farmacéutica donde se emiten las efluentes de las PTAR) debido a la incompleta absorción y metabolización de los fármacos por el cuerpo humano, dando como resultado, la porción no metabolizada es descargada al ambiente acuático a través de la orina y las heces (Boxall *et al.*, 2012).

2.2 Comportamiento ambiental de los fármacos

Los medicamentos generalmente ingresan al cuerpo por vía oral y los compuestos activos del medicamento se absorben en el intestino delgado a través de las vellosidades existentes después de que el jugo gástrico los libera. Una vez que el fármaco ingresa al torrente sanguíneo, se distribuye, metaboliza y elimina (Henriquez, 2012). A continuación, se muestra el siguiente proceso:

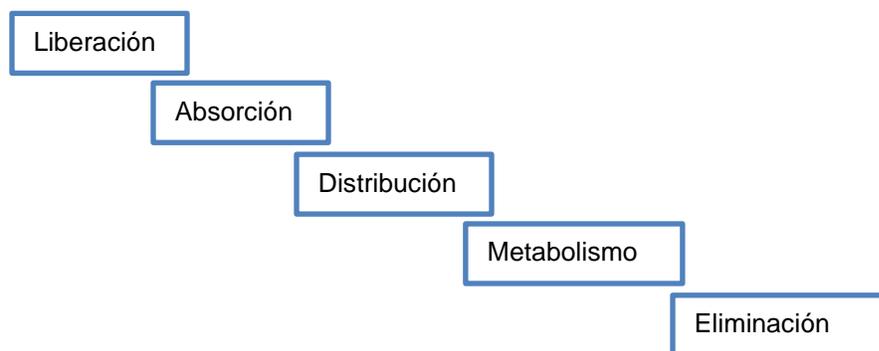


Figura 3 . Esquema de la secuencia de los fármacos al ingresar al organismos
Obtenido de (Henriquez, 2012).

La liberación del fármaco a la sangre, si se toma por vía oral, se produce después de la administración oral y de la acción del jugo gástrico, que asegura la absorción del fármaco en los intestinos. Por tanto, se puede observar que la cantidad de fármaco no metabolizado que ingresa a la sangre es biodisponible. Después de la absorción intestinal, el fármaco se transporta al hígado, donde normalmente sigue una o más vías metabólicas. La cantidad de fármaco metabolizada a medida que la sangre fluye a través del hígado se denomina "efecto de primer paso". La tasa de absorción del fármaco y su biodisponibilidad dependen directamente de las propiedades fisicoquímicas del fármaco, los procesos fisiológicos y los cambios patológicos que pueden ocurrir en los pacientes que toman este fármaco. También cabe señalar que la biodisponibilidad del fármaco puede verse afectada por factores como la edad del paciente, la presencia de alimentos en el estómago o el uso de medicamentos concomitantes (Henriquez, 2012).

La modificación que sufre un fármaco en el organismo humano se conoce como biotransformación (transformaciones enzimáticas), e implica una serie de reacciones que en general generan metabolitos inactivos, más polares e hidrosolubles que facilitan su eliminación. Sin embargo, en algunos casos estos procesos de biotransformación generan metabolitos con una mayor actividad biológica lo que implica con propiedades tóxicas, así como también menos tóxicas. Estas reacciones enzimáticas incluyen oxidación (el compuesto cede electrones aumentando su estado de oxidación), reducción (el compuesto gana electrones disminuyendo su estado de oxidación), hidrólisis (el compuesto reacciona con agua), conjugación ; se unen covalentemente al compuesto (Agudelo, 2019). A continuación, muestra algunos de los factores que afectan la adsorción de fármacos en el organismo

Cuadro 1 . Factores que influyen en el organismo al ingerir fármacos

Factores fisicoquímicos	Factores fisiológicos
Peso molecular	Superficie del área de adsorción
Tamaño de la molécula	Glicoproteínas P
pH, pKa	Volumen de líquido en el sitio de administración
Grado de ionización	Presencia de enzimas necesarias para la biotransformación

Fuente: Velásquez et ., (2005)

En el medio ambiente, las transformaciones biológicas que sufren los fármacos se denominan biodegradación. Los fármacos están formados por moléculas orgánicas, lo que significa que el mecanismo de degradación que sufren en el medio ambiente es similar al de cualquier compuesto orgánico, con la diferencia de que las reacciones se producen incluso en concentraciones muy diluidas de estos compuestos (Henriquez, 2012).

En general, las reacciones de descomposición en el medio ambiente se llevan a cabo por "factores ambientales neutros", es decir: agua, oxígeno o luz; que ocurren durante un período de meses o años. En este contexto, se puede señalar que los tipos de degradación más

importantes que sufren los medicamentos en el ambiente incluyen: hidrólisis, oxidación y fotólisis (la luz es considerada un iniciador de reacciones como la oxidación, aunque cabe señalar que no son limitados por la oxidación) (Hernandez,1995). Los fármacos encontrados en las muestras de agua para consumo humano usualmente también están presentes en corrientes de agua y han demostrado ser persistentes durante el proceso de tratamiento utilizado para generar el agua para consumo humano. Ellos, en general, tienen usualmente ciertas propiedades específicas:

- Alta estabilidad química
- Baja biodegradabilidad
- Alta solubilidad en agua
- Bajo coeficiente de sorción.

La aparición de elementos tóxicos tiene su origen en el ciclo del agua y en alguna parte de este ciclo es donde se produce la contaminación del agua, alterando su calidad. Las principales vías de entrada de los contaminantes en el medio ambiente son urbanas industriales, agrícola y ganadero (Figura 4).

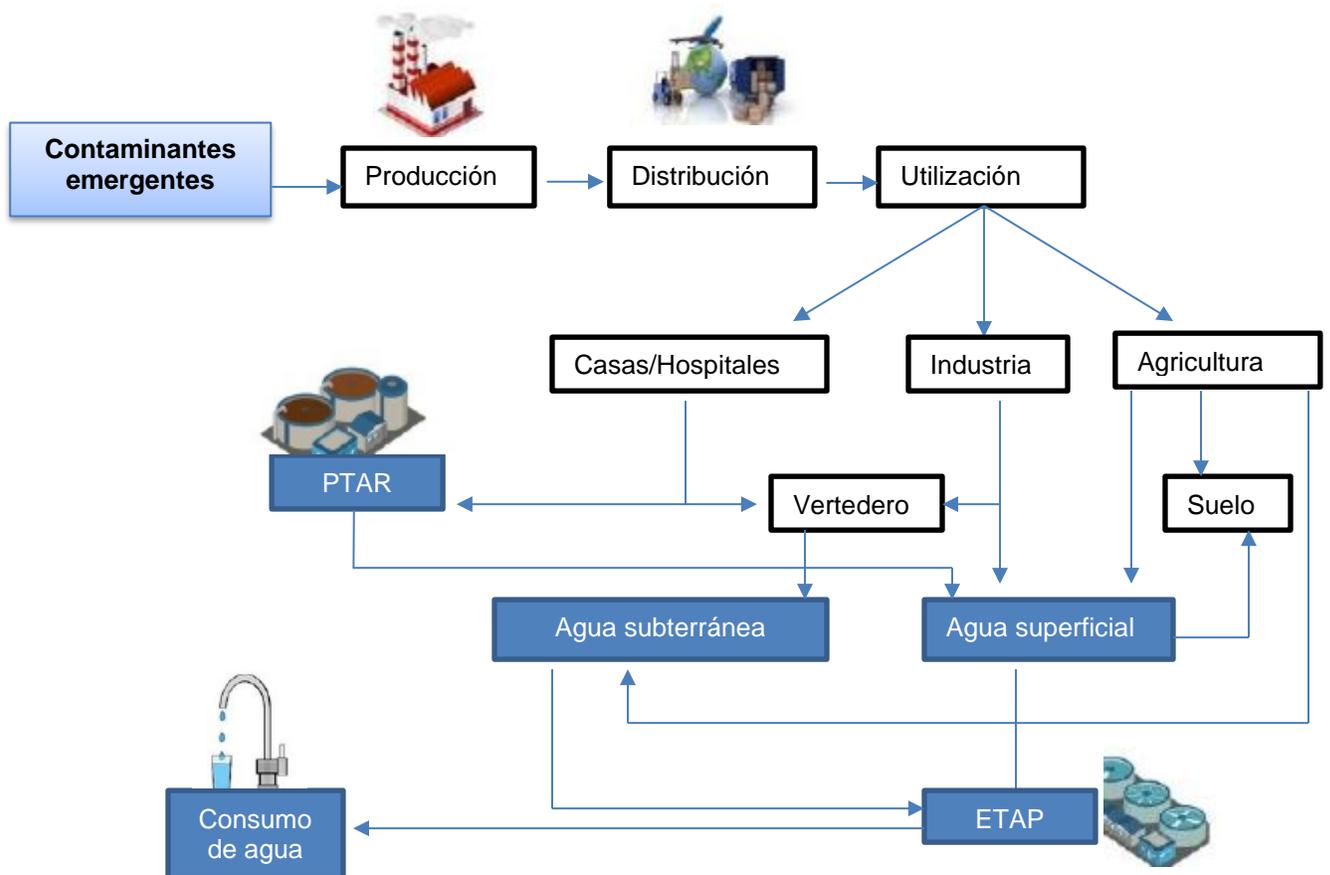


Figura 4. Fuentes y rutas de incorporación al medio ambiente.
Adaptado de Barbosa et al., (2016).

Debido a que las plantas de tratamiento de aguas residuales no están diseñadas para eliminar contaminantes emergentes (Camacho-Muñoz et al., 2009), se han encontrado concentraciones significativas en los puntos de vertido de aguas residuales en las plantas de tratamiento de aguas. Esto se debe a su resistencia al tratamiento secundario, ya que estos productos químicos no se eliminan por completo. (Halling-Sørensen et al., 1998).

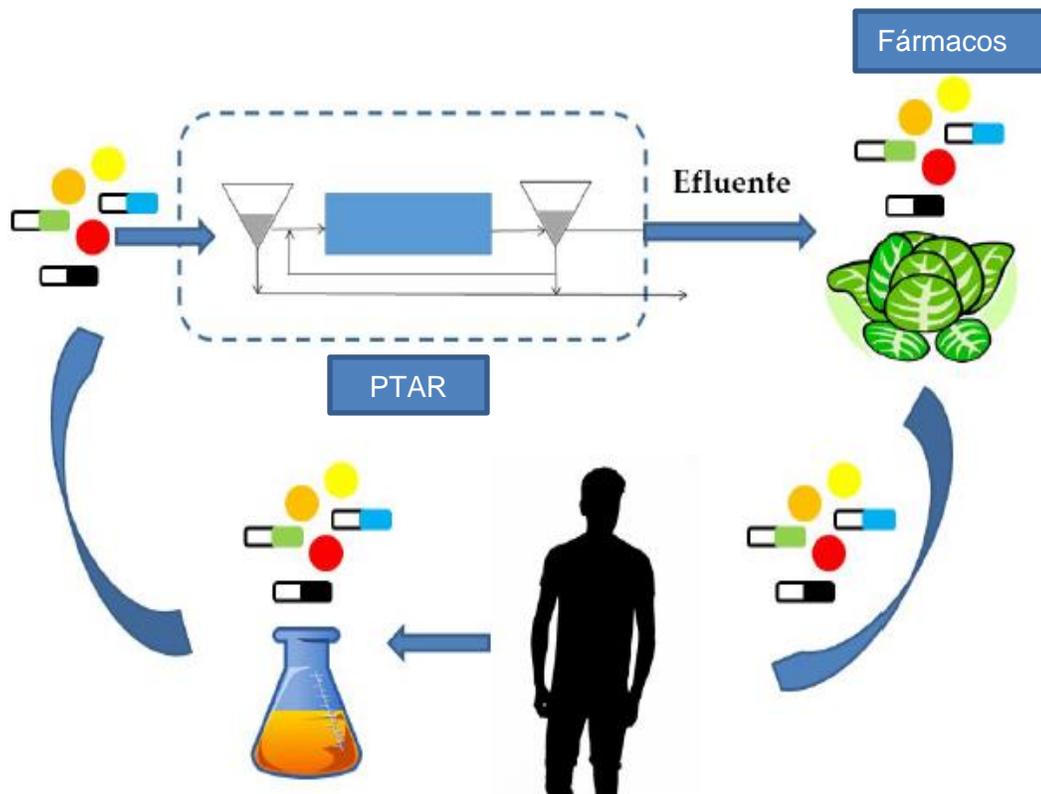


Figura 5. Ciclo de incorporación de contaminantes emergentes a la cadena alimentaria tras el proceso de depuración. Obtenido de (Gonzalez,2018).

Cuando se aprovechan los efluentes como agua de riego en cultivos, se incorporan los contaminantes emergentes en la cadena alimentaria cuando los vegetales que se consumen por el ser humano tienen una concentración de contaminantes emergentes en las partes comestibles de los mismos. Al ser consumidas por el ser humano, parte de estos contaminantes son expulsados por la orina (Figura 5).

2.3 Eficiencia de procesos de tratamiento en remoción de fármacos

El tratamiento de aguas residuales juega un papel importante en la eliminación de compuestos farmacéuticos de las aguas residuales porque las aguas residuales arrastrarán estos compuestos consigo. La eficiencia del sistema de tratamiento depende principalmente del tipo de tecnología de tratamiento y de sus parámetros operativos. En las etapas primaria y secundaria de los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales, los compuestos farmacéuticos pueden eliminarse mediante adsorción en el lodo resultante o mediante degradación microbiana. Sin embargo, dicha eliminación puede ser ineficaz porque los metabolitos biodegradables pueden ser muchas veces más polares que el fármaco original (Pérez et al., 2006).

Normalmente, el tratamiento de aguas residuales se realiza primero separando físicamente las partículas sólidas más grandes (tratamiento primario); luego convierte sustancias orgánicas solubles en agua en biomasa sólida con la ayuda de bacterias (tratamiento secundario). Una vez eliminada la materia orgánica, el agua depurada puede ser sometida a un nuevo proceso, en este caso desinfección adicional, mediante procesos físicos o químicos (tratamiento terciario). De esta manera, las aguas residuales finalmente pueden ser vertidas al medio ambiente en fuentes naturales de agua, en el suelo o en aguas subterráneas. En cuanto a los sólidos obtenidos del tratamiento biológico, son procesados en vertederos o subterráneos antes de su disposición final (Henriquez, 2012).

Para cada una de estas etapas se puede distinguir:

- **Tratamiento primario:** El objetivo principal de la etapa de pretratamiento suele ser producir un líquido homogéneo que pueda tratarse biológicamente y un lodo que pueda tratarse por separado. La limpieza primaria incluye principalmente tratamientos para eliminar aceites, grasas, arena y partículas sólidas gruesas. En este caso, el procesamiento es principalmente físico, por lo que a menudo se le llama procesamiento mecánico.
- **Tratamiento secundario:** El tratamiento secundario tiene como objetivo principal reducir el contenido orgánico de las aguas residuales. La mayoría de plantas de tratamiento de aguas residuales utilizan procesos biológicos aeróbicos que requieren sustrato, microorganismos y oxígeno.
- **Tratamiento terciario:** El tratamiento terciario es el paso final para mejorar la calidad de las aguas residuales para cumplir con los estándares requeridos antes de ser vertidas al medio receptor (mar, río, lagos y campos). En esta etapa se consideran, entre otros: el uso de ozono, ósmosis inversa, fotólisis, filtración con carbón activado y otros.

Los fármacos llegan al medio ambiente a través de su excreción y metabolización por el cuerpo humano, una vez ingeridos, o bien si son descargados directamente al medio ambiente. La excreción de éstos puede ser sin ningún tipo de cambio; es decir, como el compuesto original que fue ingerido, en forma de conjugados de glucorónidos o sulfatos, como un metabolito principal, o como una mezcla de muchos metabolitos. De ocurrir una metabolización, los mecanismos por los cuales ésta sucede pueden ser oxidación, reducción, hidrólisis, conjugaciones, etc., pudiendo ser excretados, por ejemplo, en forma de derivados más polares y solubles en agua, los que presentan una actividad farmacológica menor respecto al compuesto original (Agudelo, 2019).

2.4 Generalidades del arroz y su cascarilla.

La semilla del arroz es un grano seco que se encuentra rodeado por una capa o estructura llamada pericarpio, que a su vez se encuentra formada por la lemma y pálea las cuales dan forma a la cascarilla. Debajo de estas dos estructuras de la cascarilla se encuentran tres capas de células que también forman parte del pericarpio; aunado a esto, hay dos capas por debajo, el tegumento y la aleurona como se muestra en la Figura ,6 y el endosperma blanco, que es el principal compuesto que tiene la semilla y que, además, se encuentra conformado por almidón dentro de una matriz proteica (Rico et al., 2019).

De acuerdo con la FAO (La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) existe una producción anual a nivel mundial de arroz de aproximadamente 741,000,000 de toneladas, la cual genera, alrededor de 148,000,000 t de cascarilla de arroz que representan el 20% del peso del grano (Hossain et al., 2018). En cambio, el Estado de Veracruz durante el 2020 se produjeron más de 24,400 toneladas de arroz, consolidándolo en el segundo puesto a nivel nacional dentro de los principales productores de este producto agrícola de acuerdo con informes del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER).

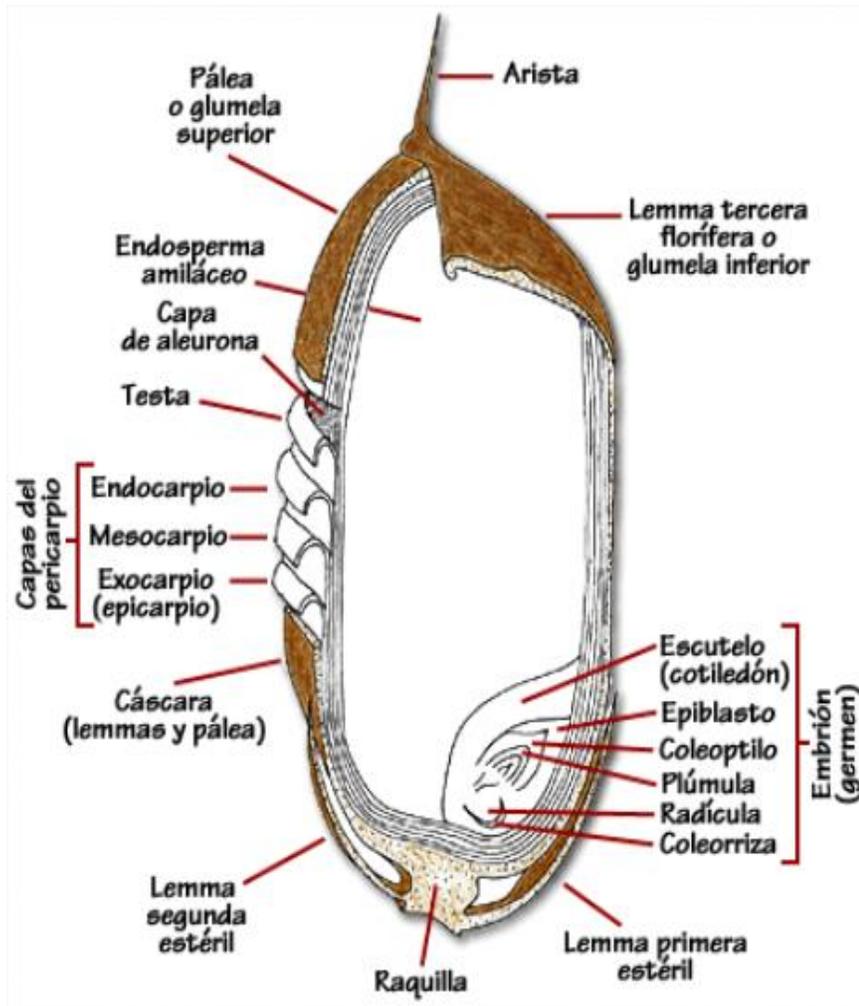


Figura 6. Cariósido de arroz y sus estructuras. Obtenido de Gnanamanickam, (20

Se entiende que la cascarilla de arroz es obtenida a partir del fruto (cuya estructura y rendimiento promedio en la molienda se observa en la (Figura 6) de la planta (Figura 7), por consiguiente, es un subproducto agrícola o desecho que a pesar del del contenido que posee no ha sido aprovechado de manera correcta, puesto que se quema de manera excesiva. No obstante, por la presencia de compuestos como la celulosa (35%), hemicelulosa (25%), lignina (20%), cenizas 17% (94% de peso en sílice) y cera en 3%, le confieren la capacidad para la detoxificación de ambientes que se encuentran contaminados por la presencia de Cromo (VI), de una manera sostenible y con costos efectivos (Eggs et al., 2012).

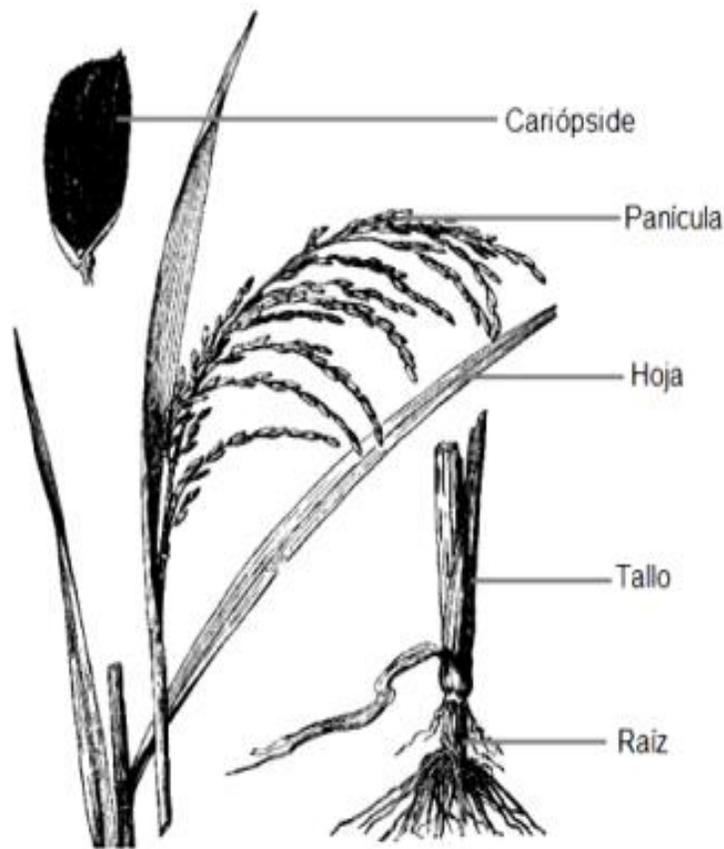


Figura 7. Planta de arroz (esquema gráfico). Elaborado por Gnanamanickam, (2009)

La cáscara de arroz es muy rica en sílice con una concentración entre 75 y 90% de contenido de materia orgánica, el cuadro 2 muestra el contenido químico de este subproducto.

Cuadro 2. Propiedades típicas de la cascarilla de arroz

Propiedad	Intervalo
Densidad a granel	96-160 kg/m ³
Dureza	5-6 escala de Mohr
Ceniza	22-29%
Carbón	≈35%
Hidrógeno	4-5%
Oxígeno	31-37%
Nitrógeno	0.23-0.32%
Azufre	0.04-0.08%
Humedad	8-9%

Adaptado de Okoro et al .,(2022).

Como ya se ha mencionado, se buscan adsorbentes alternativos para la eliminación de contaminantes emergentes mediante procesos económicos y con un impacto ambiental positivo. Dichas alternativas proponen sugieren los siguientes subproductos agrícolas:

- Bagazo de caña de azúcar
- Cáscara de coco
- Aserrín
- Carbón activado

Algunos adsorbentes han sido utilizados para inmovilizar y eliminar contaminantes de iones de metales pesados del suelo y medios acuosos, entre ellos destacan los desechos orgánicos pirolizados debido a su alta efectividad como adsorbente de inmovilización para metales como Cd, Pb, Cu, etc., en los suelos (Ogunkunle et al. (2018).

Otro desecho agrícola importante es la cascarilla de arroz, la cual se ha propuesto como adsorbente para la eliminación de metales, así como su aplicabilidad en otros aspectos. Dentro de la literatura se ha trabajado con la ceniza de la cáscara de arroz, debido a que durante su combustión se genera una variedad de óxidos, principalmente el óxido de silicio (98%), como se muestra en el cuadro 3. Además, por área superficial (Cuadro 2) se considera un adsorbente potencial a partir del cual se podrían lograr rendimientos altos en la remoción de contaminantes emergentes.

Cuadro 3. Composición química de la cascarilla de arroz

Compuesto	Peso Total (%)
SiO ₂	98.02
Al ₂ O ₃	0.52
Fe ₂ O ₃	0.11
MnO	0.01
MgO	0.11
CaO	0.23
Na ₂ O	0.10
K ₂ O	0.38
TiO ₂	0.02
P ₂ O ₅	0.08
Otros	0.42

Adaptado de Álvarez et al., (2014).

Cuadro 4. Características fisicoquímicas de la cáscara de arroz

Características	Unidades	Valor
Densidad aparente	g/mL	0.73
Contenido de humedad	%	6.62
Contenido de ceniza	%	45.97
Tamaño de partícula	µm	200.0
Área superficial	m ² /g	272.5
Acidez superficial	m _{eq} /gmol	0.1
Basicidad superficial	m _{eq} /gmol	0.45

Adaptado de Llanos-Páez et al. (2016)

2.5 Síntesis de carbón a partir de la cascarilla de arroz

La carbonización es un proceso de transformación, por medio de temperaturas elevadas, de cualquier materia orgánica en residuos de carbono (Quijano, 2012). El carbón activado ha sido ampliamente utilizado como adsorbente y soporte catalítico, gracias su alta porosidad y alta área superficial. También es utilizado para la eliminación de olor y sabor de aguas contaminadas, la remoción de una gran variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos disueltos en medio acuoso o gaseoso, como adsorbentes industriales para procesos de recuperación, purificación y separación y como soportes catalíticos (Quijano, 2013).

2.5.1 Preparación de carbón activado utilizando cascarilla de arroz

Tradicionalmente, se han desarrollado dos procesos mediante los cuales es posible obtener carbón activado. En el primero de ellos se realiza una activación física, ésta consiste en someter a fuerte calentamiento el material precursor, teniendo en cuenta no sobrepasar la temperatura de gasificación de éste. En el otro, se lleva a cabo una activación química, ésta consiste en calentar a temperaturas relativamente bajas adicionando agentes deshidratantes como H₃PO₄, ZnCl₂, KOH, NaOH etc, en ausencia de oxígeno lo anterior se puede mostrar en la Figura 8 (Lillo-Ródenas, 2005).

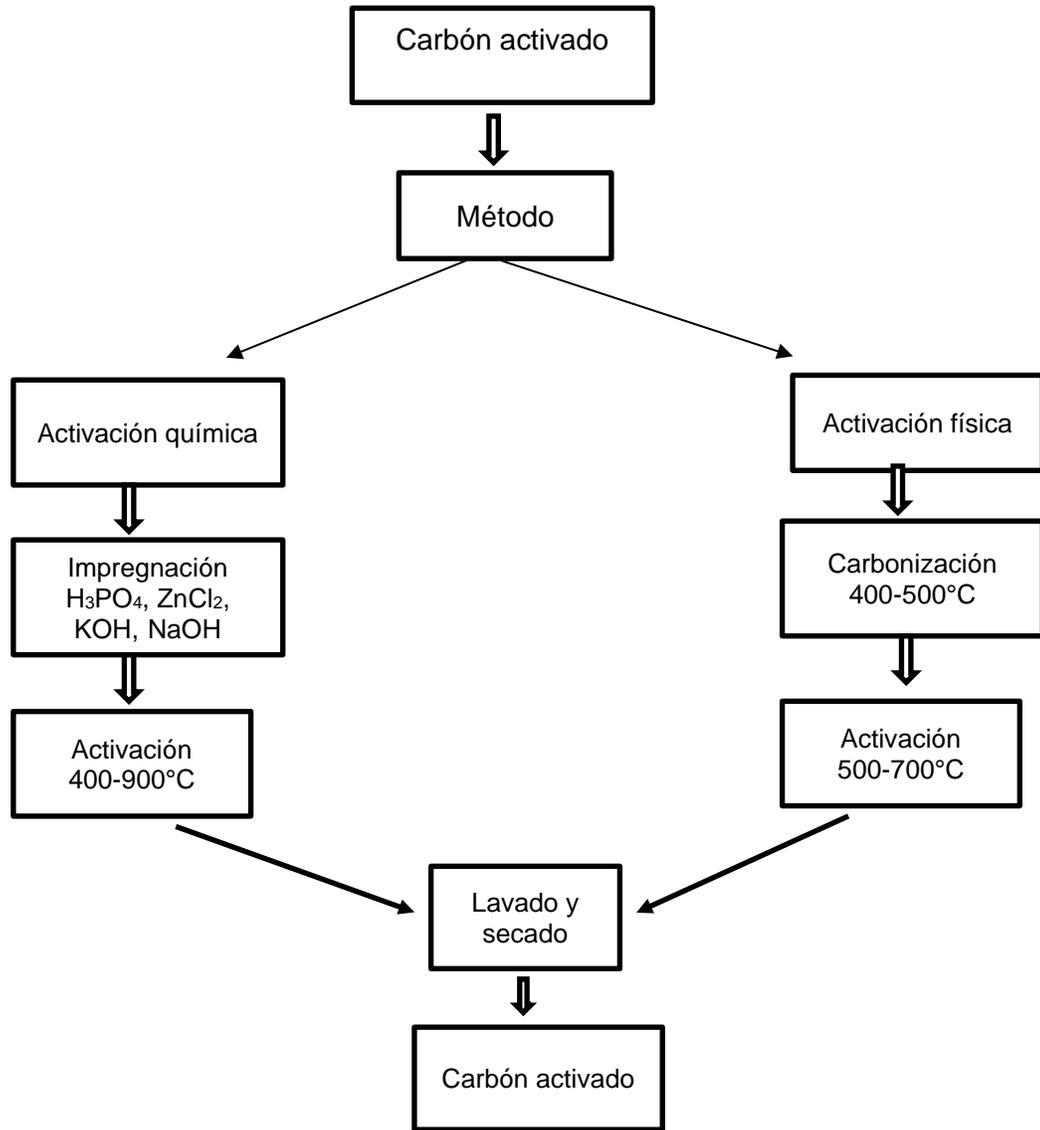


Figura 8. Comparación entre los métodos de carbón activado.

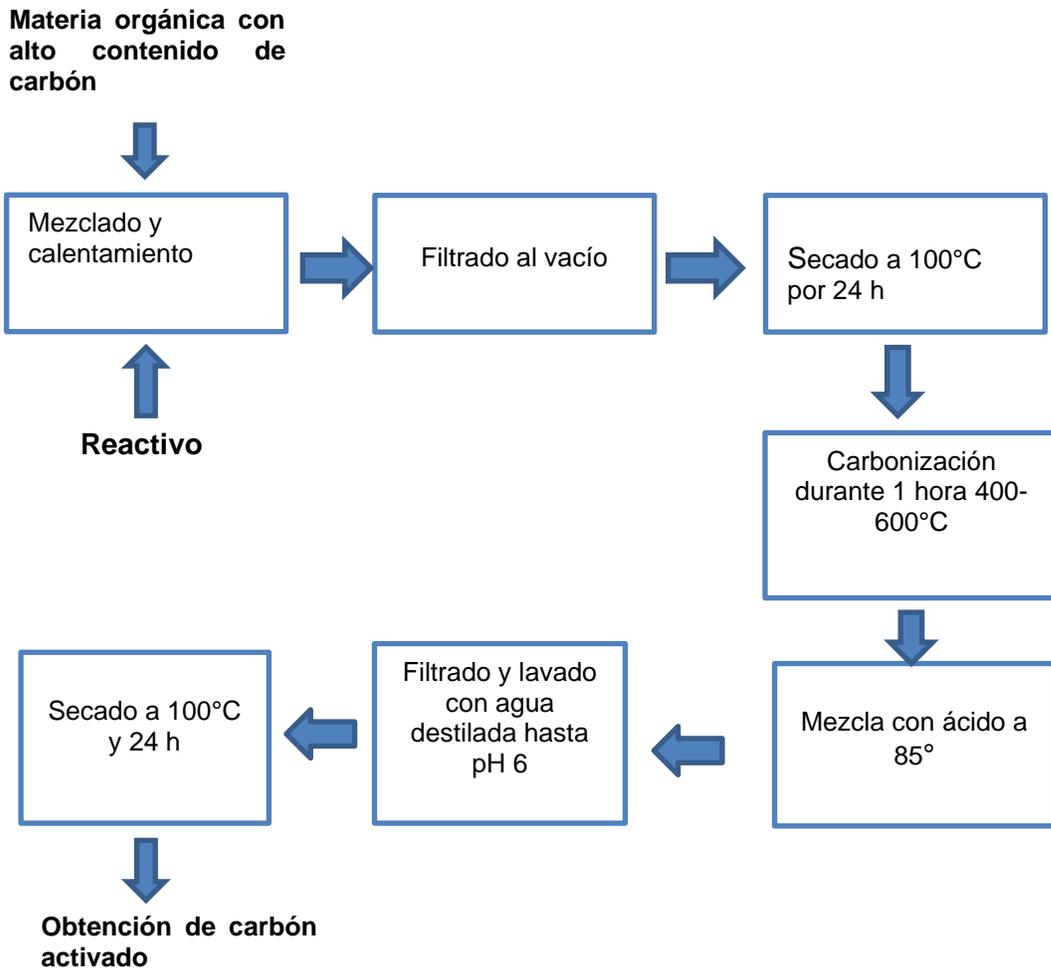


Figura 9. Obtención de carbón activado utilizando la activación química

Este método consiste en llevar a cabo la activación por medio de una reacción química con un reactivo que puede ser $ZnCl_2$, $NaOH$, KOH , H_2PO_4 , para posteriormente realizar la carbonización. La figura 8 muestra un esquema general de la obtención de carbón activado usando esta técnica(Lillo-Ródenas,2005).

El procedimiento de producción de carbón activado muestra una nueva oportunidad para integrar procesos y hacerlos más eficientes y amigables con el medio ambiente.

2.6 Adsorción

Se define la adsorción como la transferencia de especies moleculares de adsorbato a la superficie del adsorbente. Se produce debido a la creación de enlaces químicos o por la atracción de fuerzas físicas, puede ser irreversible o reversible según la interacción entre las moléculas del adsorbente y del adsorbato. A este proceso en forma reversible se le denomina desorción. Es un fenómeno superficial y es de dos tipos: fisisorción y quimisorción (Flores,2020).

El proceso físico de la fisisorción (adsorción física) es aquel por medio del cual, un elemento o compuesto químico, se adhiere a una superficie, que puede estar formada por el mismo tipo de compuesto o por alguno diferente, y en el que la especie adsorbida (fisisorbida) conserva su naturaleza química. Por otra parte, la quimisorción (adsorción química) es el intercambio de electrones entre adsorbatos y adsorbentes, dónde los adsorbatos se adhieren a los adsorbentes mediante enlaces químicos, estos enlaces pueden ser iónicos o covalentes y tienen las siguientes características:

- **Alta especificidad:** la quimisorción es altamente selectiva y ocurre solo cuando es posible una conexión química entre el adsorbente y el adsorbato.
- **Área de superficie:** La quimisorción mejora al aumentar el área de superficie del adsorbente, al igual que la adsorción física.
- **Entalpía de adsorción:** la entalpía de quimisorción es alta (alrededor de 80–240 kJ mol⁻¹) porque comprende la formación de enlaces químicos.
- **Irreversibilidad:** Como la quimisorción incluye la formación de un compuesto, es un proceso naturalmente irreversible.
- La quimisorción es una reacción exotérmica que tarda mucho en completarse a bajas temperaturas debido a la gran energía de activación. La adsorción, al igual que otros cambios químicos, a menudo aumenta a medida que aumenta la temperatura.
- La fisisorción de un gas adsorbido a bajas temperaturas puede pasar a quimisorción a altas temperaturas. La quimisorción suele verse favorecida por un entorno de alta presión.

2.6.1 Biosorción

El fenómeno llamado biosorción se debe a las propiedades del adsorbente. La biodegradación se basa en aprovechar las propiedades de ciertos organismos inorgánicos para unirse y acumular contaminantes mediante diferentes mecanismos como la adsorción física (fuerzas de Van Der Waals), la absorción, el intercambio iónico, etc. (Romero,2013).

Las diferencias entre estos métodos se pueden ver en la Figura 10. La adsorción es el proceso mediante el cual una sustancia se elimina de una parte y se adsorbe en la superficie de otra parte. La sustancia que se concentra o adsorbe en la superficie se llama adsorbente y la parte adsorbente se llama bioadsorbente. Puede ingresar a varios sistemas, siendo los más comunes los sistemas líquido-sólido. La adsorción es el proceso por el cual las moléculas o átomos de un componente se mezclan con moléculas o átomos de otro componente para formar una solución

de este segundo componente. El intercambio iónico, por otro lado, es el intercambio de una sustancia o ion por otra sustancia o ion sobre una superficie sólida (Appelo, 2010).

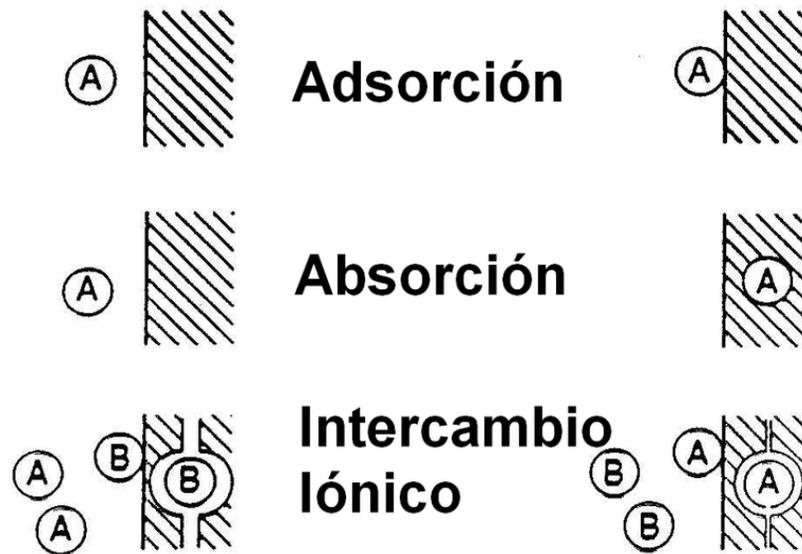


Figura 10. Diferentes procesos de sorción. Obtenido de Appelo (2010).

2.6.2 Factores que afectan en el proceso de bioadsorción

El proceso de biosorción ocurre en la fase acuosa, como resultado de la interacción entre el soluto en la solución y los grupos funcionales en la superficie del adsorbente sólido. En todos los casos, el proceso de adsorción depende de la naturaleza del material a eliminar, la estructura y propiedades del adsorbente y las condiciones experimentales (Romero,2013).

Los principales factores que afectan este proceso son:

- **Área superficial:** Dado que la adsorción es un fenómeno superficial, el proceso es similar al área de superficie específica, que se define como la fracción del área de superficie total disponible para la adsorción (Gwenzi y Chaukura, 2018). Los adsorbentes tienen una alta tasa de adsorción por unidad de peso porque la principal contribución al área de superficie proviene de los poros a nivel molecular (Flores,2020).
- **Efecto de la temperatura:** En general, el efecto de la temperatura sobre la sensibilidad biológica depende de la definición del proceso. En general, si el aporte de calor es negativo, la reacción es exotérmica y funciona mejor a bajas temperaturas.
- **Efecto del pH de la solución:** Es uno de los factores más importantes que afectan la capacidad de adsorción de las soluciones acuosas. Dado que la carga sobre la superficie biológica es función del pH de la solución, la acidez tiene un efecto significativo. El pH de

la fase acuosa es muy importante para la retención de cationes y aniones, y tiene efectos diferentes en ambos casos.

- **Tamaño de partícula:** El tamaño de partícula del adsorbente generalmente no afecta la capacidad de sorción, pero en algunos casos se ha encontrado que la reducción del tamaño de partícula aumenta esta capacidad. Esto se debe a que cuanto más pequeñas son las partículas, mayor es el espacio poroso. Más espacio y más zona de contacto. (Leyva y Moreno-Piraján, 2007).
- **Tiempo de equilibrio:** El tiempo de equilibrio es el tiempo posterior a la exposición del bioadsorbente, como paso preparatorio para el estudio de la cinética de biosorción, es importante evaluar el efecto del tiempo de contacto para alcanzar el equilibrio porque implica la determinación de las condiciones de inversión. proceso (Jansson-Charrier et al., 1996).
- **Dosis de adsorbente:** La cantidad de adsorbente es el factor que va a limitar hasta cierto punto la concentración de metal que se adsorbe, es decir a mayor cantidad de adsorbente, obtendremos una mayor adsorción, pero lo ideal es lograr un equilibrio entre la concentración de adsorbente y adsorbato para lograr el resultado óptimo de adsorción (García-Arrazola, s. f.).

2.6.3 Isotermas de adsorción

En un sistema sólido-líquido, los adsorbatos se eliminan de la solución y se depositan sobre una superficie sólida. Cuando el adsorbato permanece en solución y alcanza el equilibrio dinámico con el adsorbido en la superficie del material. La capacidad de adsorción en función de la temperatura y su concentración, puede describirse mediante la isoterma de adsorción (Flores, 2020) según la siguiente expresión:

$$q_t = \frac{(C_o - C_t)V}{m}$$

Ec.1

Donde:

q_t $\left(\frac{\text{mg metronidazol}}{\text{mg carbón}}\right)$: Cantidad de soluto adsorbido en un tiempo t.

C_o $\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)$: Concentración inicial del adsorbato.

C_t $\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)$: Concentración del adsorbato en un tiempo t.

V (L): Volumen de solución.
m (g): Masa de adsorbente.

2.6.4 *Isoterma de Langmuir*

La isoterma de adsorción de Langmuir describe la densa capa molecular sobre la superficie del adsorbente es función de: La concentración de sustancias disueltas en el fluido de contacto.

$$q_e = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e}$$

Ec.2

Donde q_{max} es la cantidad máxima del ion metálico por unidad de peso de biomasa para formar una monocapa completa en la superficie (mg/g) y b es una constante relacionada con la afinidad de los sitios de unión con los iones metálicos, y C_e la concentración remanente en la solución.

2.6.5 *Isoterma de Freundlich*

Una de las ecuaciones más utilizadas es la isoterma de Freundlich, la cual es empírica, como se muestra en la ecuación(3).

$$q_e = k_f \cdot C_e^{1/n}$$

Ec.3

La isoterma de adsorción de Freundlich, es una isoterma de adsorción, que consiste en una curva que relaciona la concentración de un soluto en la superficie de un adsorbente, con la concentración del soluto en el líquido con el que está en contacto. En la ecuación (3), k_f es un indicador de la capacidad de absorción y n indica el efecto de la concentración en la capacidad de adsorción y representa la intensidad de absorción, mientras C_e es la concentración del metal remanente en la solución. Los diferentes modelos cinéticos de adsorción que son comúnmente usadas son el modelo de pseudo primer orden y pseudo segundo orden (Garces,2013).

Cuadro 5. Modelos cinéticos de adsorción.

Modelo cinético	Ecuación	Parámetros	Fuente
Primer orden	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	q_e : Capacidad de adsorción en equilibrio (mmol/g) k_1 : constante de pseudo primer orden (min ⁻¹)	(Perez,2009) .
Segundo orden	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + (q_e k_2 t)}$	k_2 : constante de pseudo segundo orden (g/mmol.min)	(Perez,2009) .

Fuente: Obtenido de Pérez (2010).

2.7 Metronidazol (MTZ)

Es uno de los fármacos primordiales (Figura 11) que se utilizan para tratar las infecciones bacterianas anaeróbicas, infecciones por protozoos e infecciones causadas por bacterias microaerófilas. Además, es citotóxico para los microorganismos facultativo (Pérez-Trallero y Iglesias, 2010).

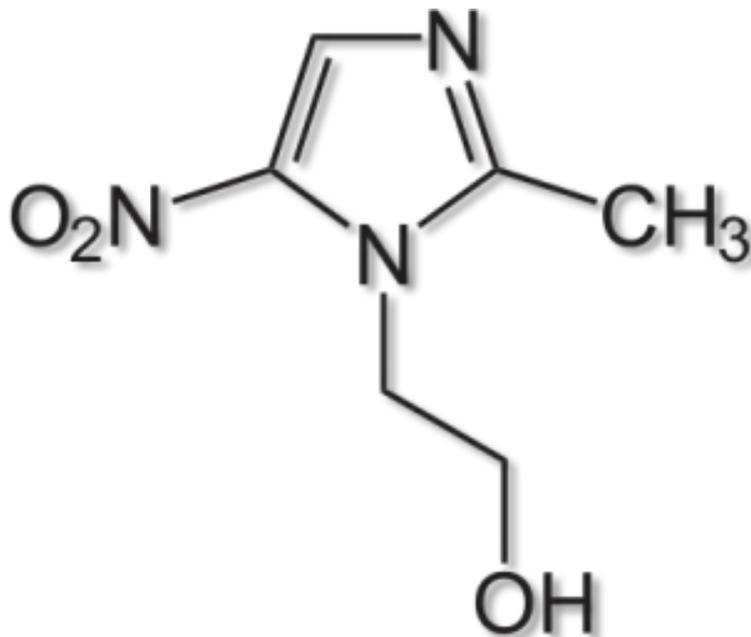


Figura 11. Estructura química del metronidazol . Obtenido de Pérez-Trallero y Iglesias (2010).

Se encuentra aprobado por la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos, en inglés), para tratar infecciones causadas por *Trichomonas vaginalis*, *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia*, *Balantidium coli*, blastocitos, algunas infecciones anaeróbicas causadas por especies de Bacteroides, especies de Fusobacterium, especies de Clostridium, *Gardnerella vaginalis*.

2.7.1 Absorción, distribución, metabolismo y excreción del metronidazol en el cuerpo humano

Absorción: Casi el 80 % de una dosis oral se absorbe, y las concentraciones máximas en el suero aparecen en una hora. Dichas concentraciones son retardadas a unas dos horas por las comidas.

Distribución: Se distribuye en la mayor parte en los tejidos y líquidos del cuerpo, incluyendo líquido cefaloraquídeo, huesos, bilis, saliva, líquidos pleural y peritoneal, secreciones vaginales, líquido seminal, líquido del oído medio, y abscesos hepáticos y cerebrales.

- **Metabolismo:** El metronidazol se oxida a nivel del grupo metilo a un metabolito mayor que es el 2-hidroximetronidazol, parte de éste se oxida dando el derivado 2-carboxílico, mientras que el metronidazol sufre parcialmente otra oxidación en su cadena lateral hidroxietilo dando un segundo derivado carboxílico.
- **Excreción:** Del 60 al 80 % de la dosis se excretan como el compuesto de origen o sus metabolitos. Por la orina, se excreta un 20 % del Metronidazol sin cambios. Por las heces se excreta de un 6 a 15 %. La vida media del metronidazol es de 6 a 8 horas en adultos con función renal normal. En pacientes con deterioro de la función hepática, la vida media de este fármaco puede prolongarse. Además, puede ser secretado hacia la leche materna (Villanueva-Reynoso et al., 2023)

Cuadro 6. Propiedades fisicoquímicas del metronidazol.

Formula molecular	C ₆ H ₉ N ₃ O ₃
Peso molecular	171.16 g
Solubilidad en agua (25°C)	10.5 mg/ml
Punto de fusión	159° a 163° C
pKa	2.5
Aspecto físico	polvo cristalino blanco o amarillo pálido, inodoro.

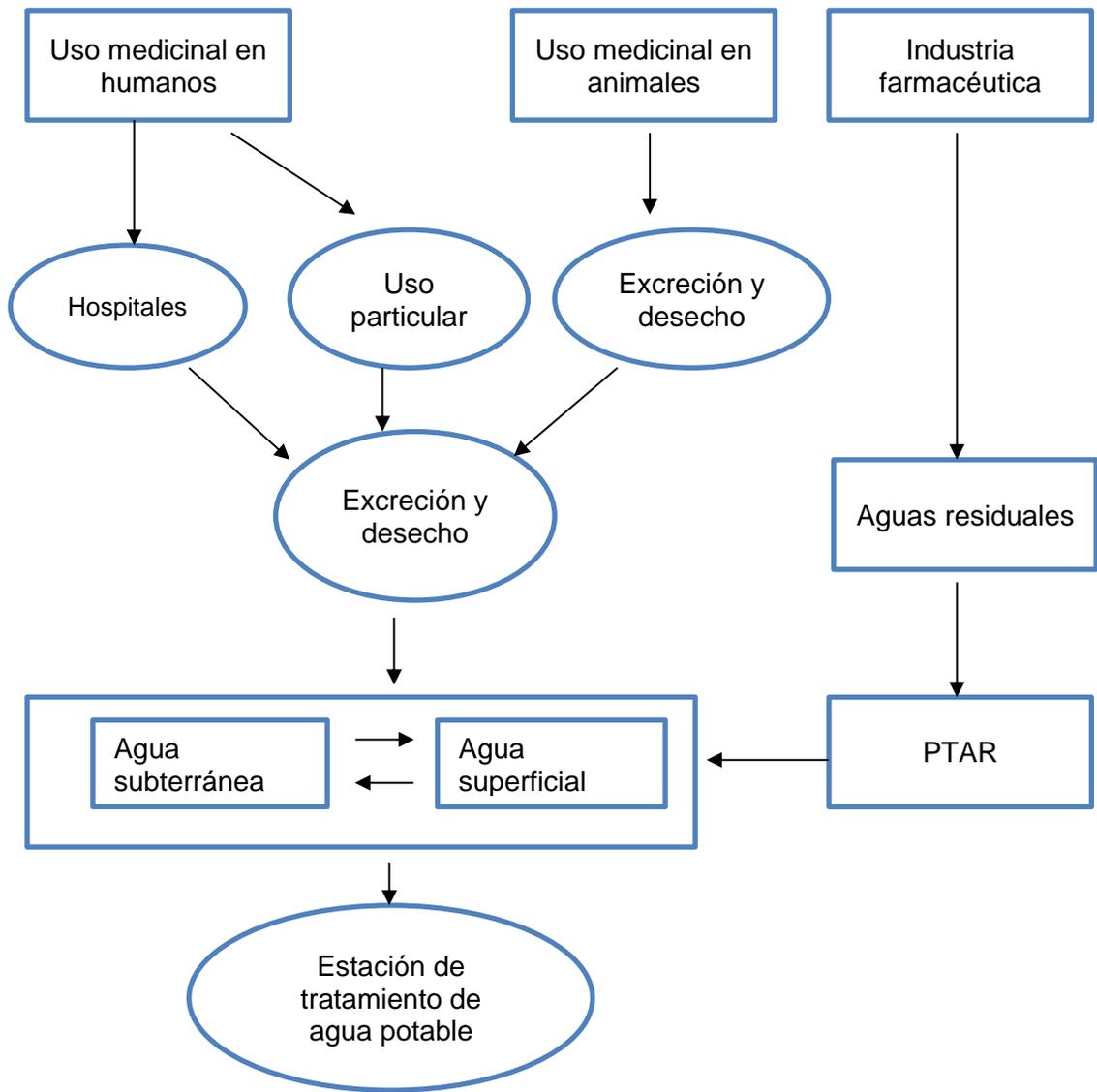


Figura 12. Ruta y origen del metronidazol en agua. Obtenido de (Prado,2010).

2.8 Industria farmacéutica

La producción de productos farmacéuticos a nivel mundial se ha mantenido en un crecimiento de aproximadamente 8.3% anual, en donde la producción mayoritaria se centra en tratamientos para el cáncer, vacunas, antidiabéticos, inmunodepresores, antibióticos, broncodilatadores, anticonceptivos y antianémicos (Evalúate Pharma, 2018). Si la producción en masa de la industria farmacéutica aumenta, significa que los desechos químicos en el medio ambiente también lo hacen, esto se debe a que una vez que caducan los medicamentos que no se usan en hogares, en el sistema de salud o en la industria, estos se desechan directamente en los residuos municipales o al drenaje (Mansour et al. 2016, Verlicchi y Zambello 2016). En general, cierto porcentaje de los fármacos no logran ser metabolizados por los animales y en humanos, por lo que son eliminados por medio de la orina y las heces, lo que se traduce en contaminación de las aguas por medio del sistema de drenaje.

Una vez que los metabolitos entran en contacto con el agua, estos pueden reaccionar con otros residuos, derivándose en otras sustancias químicas (Zemann et al., 2016). Muchas de las moléculas son estables, por lo que su remoción se dificulta, además, estas son transportadas por medio de las aguas que fueron tratadas y su destino final puede ser el riego en jardines públicos o cultivos agrícolas; incluso llegan de nuevo a las aguas receptoras de los mantos acuíferos profundos que luego son utilizados como agua potable. Hay evidencia de la presencia en 0.01 ppm, que si bien es una baja concentración demostraron ser tóxicos a los seres vivos.

En el estudio presentados por Saravanan et al., (2014), reportaron presencia de desechos de hormonas esteroides, analgésicos y antiinflamatorios, antihipertensivos y antidepresivos en dos diferentes especies de carpa: *Cyprinus carpio* y *Cirrhinus mrigala*. Las cuales presentaron anemia, estrés oxidativos, tiroides alterada, enzimas hepáticas descontroladas, mutaciones en la expresión genética y desarrollo de embriones. Antibióticos como metronidazol, sulfadiazina y estreptomina provocaron la muerte de especies marinas como *Daphnia magna* (Wollenberger et al., 2000). Entonces, esto da una referencia que las especies marinas pueden estar contaminadas y ser ingeridas por las personas, generados complicaciones en la salud humana.

2.8.1 Presencia de residuos farmacéuticos en agua

Como se ha mencionado a inicio de los noventa, no se tenía interés a la manera de desechar los medicamentos caducados o desuso a nivel mundial, debido a que era más urgente evitar el contagio por VIH a partir de los desechos del sistema de salud. Se estimó en por lo menos en Estados Unidos, aproximadamente el 0.3% de los residuos sólidos urbanos pertenecían a los desechos hospitalarios, posteriormente se registró que los medicamentos de todo tipo se consumían no importando el destino final como desechos en el ambiente.

Para esto de 1999-2000 se llevó a cabo la detección de diferentes residuos químico-farmacéuticos en ríos y arroyos del país, por lo cual, hizo notar la ausencia de especificaciones sobre la cantidades permisibles para la incorporación de este tipo de residuos, por consiguiente, se concluyó que había por lo menos 15% de 24 tipos diferentes de medicamentos dentro de la basura doméstica que, por consiguiente, terminaban en los vertederos municipales, que por sus

propiedades no volátiles y polares, se disuelven y pasan a integrarse a los lixiviados que se van filtrando lentamente hasta depositarse en aguas no contaminadas subterráneas (Tischler et al., 2013). En el año 2013 se tiene reportado que dentro de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México tenían presencia de microcontaminantes de origen farmacéutico en concentraciones bajas, como lo son los estrógenos, ibuprofeno, gemfibrozil, ketoprofeno, ácido salicílico, diclofenaco, di-2-etilhexilftalato (DEHP), butilbencilftalato (BBP). Por lo que fue sugerido una normatividad sobre parámetros de máxima concentración de este tipo de residuos en aguas para uso y consumo humano (Gibson et al. 2010, Estrada-Arriaga et al. 2013, Félix-Cañedo et al. 2013).

En el año 2017, de la demanda nacional total de agua, el sector agropecuario ocupó el 76%, de este total, el 43% era el agua superficial que, en caso de ríos, estaba contaminada por los drenajes de las ciudades y las zonas industriales. Las investigaciones sobre el efecto toxicológico de estos residuos en agua han mostrado que estas llegan al humano por medio de la piscicultura de algunas especies. De acuerdo con Morachis Valdez et al., (2015), y Galar Martínez et al., (2016), evidenciaron que los músculos de *C. carpio* tenían concentraciones de diclofenaco, ibuprofeno y naproxeno en concentraciones de 0.08 a 0.21 ppm, ocasionándoles estrés oxidativo y alteraciones genéticas; de igual manera, encontraron presencia de ketorolaco en concentraciones de 1 a 60 ppm, produciendo genotoxicidad.

La industria farmacéutica a este tipo de activos que se han encontrado en cuerpos de agua o suelo, les suelen llamar “Ingredientes Farmacéuticos Activos” (APIs). Los fármacos en su mayoría son compuestos orgánicos con masa moléculas que se encuentre por encima de los 500 daltons (Heberer, 2002), dentro de las principales características se tienen:

1. Los APIs incluyen compuestos que se formaron por moléculas grandes y son complejas, con distinto peso moléculas, estructura, funcionalidad y forma.
2. Son polares, tiene un grupo ionizable.
3. Algunos fármacos tienen una persistencia en el ambiente de 1 año, mientras que otros pueden estar por más años.
4. Una vez administrados, la estructura química puede ser modificada durante su absorción, distribución y reacciones metabólicas.

2.9 Factores que influyen en la adsorción fármacos en el organismo.

Ahora bien, en lo que respecta al fenómeno de absorción de los fármacos en el organismo propiamente tal, son variados y diversos los factores que intervienen en éste, entre los que se cuentan los que se detallan a continuación:

- **Peso molecular:** en lo que respecta al peso molecular, las moléculas que poseen un peso relativamente elevado y de gran tamaño atraviesan las membranas celulares con dificultad; mientras que las moléculas no ionizadas cruzan con mayor facilidad las barreras celulares.
- **Ionización:** en lo que respecta a este factor, aun las moléculas ionizadas de tamaño molecular pequeño, no atraviesan las barreras lipídicas. La forma no ionizada de un fármaco difundirá libremente hasta que se equilibre a ambos lados de la membrana la concentración de éste, mientras que la forma ionizada, por su riqueza en grupos hidrofílicos, no pasará.
- **Coeficiente de partición lípido agua:** a este respecto se tiene que el carácter lipofílico de las moléculas representado por el coeficiente de partición octano-agua (Log P_{oct}) afecta el paso de los fármacos por las membranas celulares, y los que son poco solubles en agua tienen una baja biodisponibilidad.
- **La liposolubilidad depende del grado de ionización que presente el fármaco,** teniéndose que la forma ionizada no difunde a través de las membranas celulares, mientras que la forma no ionizada va a difundir hasta que se logre el equilibrio de concentraciones.
- **pH y pKa:** la relación entre el carácter ácido o básico de una molécula y el pH del medio, facilitan o dificultan la absorción de los fármacos.

En general, la mayoría de los fármacos corresponden a electrolitos débiles, sustancias que al disolverse en el agua producen iones parcialmente, con reacciones que son de tipo reversible, que se encuentran en mayor o menor medida ionizados dependiendo ello de su pKa, es decir, del logaritmo negativo de la constante de ionización de un ácido y del pH del medio en el que se encuentra, conforme la fórmula de Henderson-Hasselbach

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log \left(\frac{[\text{base}]}{[\text{ácido}]} \right)$$

esta ecuación que se transforma en las siguientes expresiones, dependiendo si se trata de un ácido o de una base:

Para ácidos

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log \left(\frac{[\text{ionizado}]}{[\text{no ionizado}]} \right)$$

Para bases

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log \left(\frac{[\text{no ionizado}]}{[\text{ionizado}]} \right)$$

La constante de absorción (K_a) puede expresarse como la probabilidad que tiene una molécula de absorberse en una unidad de tiempo (Armijo, 1997).

III. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Área de estudio

El estudio se realizó experimentalmente en el laboratorio de recursos acuáticos (LIRA) que se encuentra en el Instituto Tecnológico de Boca del Río (ITBOCA), ubicado en el km 12 carretera Veracruz-Córdoba en la ciudad de Boca del Río, Veracruz, que colinda al norte con el Río Jamapa con desembocadura al Golfo de México

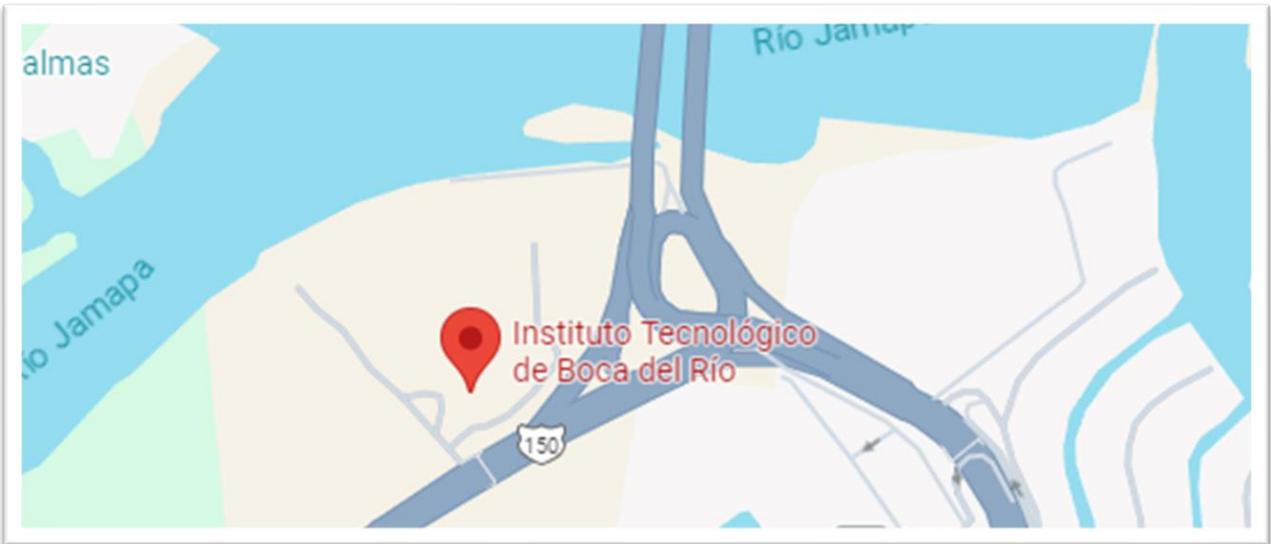


Figura 13. Ubicación del Instituto Tecnológico de Boca del Río.
Obtenido de Google Maps.

3.2 Antecedentes

La conciencia mundial sobre la importancia del cuidado del medio ambiente y el cuidado con el que debemos proteger los recursos naturales, entre ellos el agua, que poco a poco se está convirtiendo en un recurso escaso, se han realizado medidas necesarias a su cuidado y protección. En este contexto, en las últimas décadas se han desarrollado una serie de tecnologías tradicionales de reducción de la contaminación del agua. Sin embargo, a pesar de todos estos avances, tanto el agua para consumo humano como el agua procedente de plantas de aguas residuales han mejorado su calidad en cuanto a la presencia de estas sustancias contaminantes "convencionales" (metales pesados, contaminantes orgánicos, microorganismos), pero se sabe poco sobre la presencia de contaminantes "emergentes". Desde la década de 1990 se han realizado innumerables estudios sobre la presencia de nuevos contaminantes (fármacos, disruptores endocrinos y otros) en los suministros de agua para consumo humano, así como en los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Diversos estudios han reportado la presencia de fármacos en diferentes medios acuáticos, así como en aguas superficiales, subterráneas, agua para consumo humano y en los influentes y efluentes de diversas PTAR. Los primeros registros de la presencia de fármacos, fue a mediados de la década de los 90, cuando investigadores de Europa, Estados Unidos y Canadá, comenzaron a identificar y cuantificarlos en efluentes de PTAR, agua superficial y agua potable (Kleywegt et al., 2011).

Por otra parte, Bandesky et al., (2001), mencionan que el metronidazol (MTZ) se desarrolló con el propósito de combatir infecciones por *Trichomonas vaginalis*. Poco después su uso se amplió para combatir las infecciones provocadas por otros protozoarios como *Entamoeba histolytica* y *Giardia lamblia*. Hoy en día el metronidazol también es considerado uno de los medicamentos más eficaces para combatir las infecciones por bacterias anaerobias tanto gram-negativas como positivas, destacando la infección por *Helicobacter pylori*.

A su vez Pérez (2009) en Madrid, España realizó un estudio donde evaluó la influencia de parámetros como: la dosificación del adsorbente, el tamaño de partícula y el pH en la capacidad de adsorción de la cáscara de naranja para eliminar Cr (VI) de soluciones acuosas. Los resultados de este estudio mostraron que antes y después de la adsorción de cromo, los grupos carboxílicos e hidroxilo podrían ser los mayores grupos funcionales implicados en metal vinculante para los residuos de naranja.

Por lado, se tiene el estudio realizado por Bansal et al., (2009), en el cual, se realizó otro estudio para remover Cr (VI) mediante la cáscara de arroz previamente hervida y tratada con formaldehído al 1%, trabajaron con un tamaño de partícula de 0.3 mm, mencionan que la adsorción dependía fuertemente del pH, la dosis de adsorbente, tiempo de contacto y la concentración del contaminante, por consiguiente, la adsorción máxima la obtuvieron con un pH de 2.0, teniendo una eficiencia de remoción con la cáscara hervida y trata de 71% y 76.5% respectivamente para dosis diluidas de adsorbente de 20 g/L.

En otro estudio llevado a cabo por Herrera et al., (2011), aplicaron un tratamiento a la cáscara, usando un tamaño de partícula de 0.5 mm, un intervalo de pH entre 1-12 y una concentración del metal de 3 mg/L, encontrando un rendimiento del 100% a una tasa de dosificación de 0.8 g/L de la cáscara tratada, esto se debe a que, al aumento de área superficial, aumenta los sitios de retención disponibles

Por otro lado, Garcés (2012) en Ecuador, estudió la adsorción de cromo hexavalente con cáscara de naranja y cáscara de naranja modificada con quitosano. La cáscara de naranja presentó un máximo porcentaje de remoción de 66.8%, mientras que la cáscara de naranja modificada con quitosano obtuvo un porcentaje de remoción de 61.24%.

Como se ha mencionado, la cascarilla de arroz de arroz ha demostrado tener potencial en la remoción de metales pesados, por tal motivo a continuación se mencionan algunos hallazgos al respecto. De acuerdo con Madrigal Zúñiga et al., (2015), en su trabajo de investigación estudió la remoción del pesticida Carbofurán en el sistema de agua debido a los casos de intoxicación y

de muerte en personas por este contaminante. Realizaron una mezcla de carbón activado de la cascarilla de arroz y hongos en donde obtuvieron una efectividad de remoción del 100%.

De igual manera, Andrade Díaz (2018) en Ecuador, estudió la cáscara de arroz como medio de remoción de oxitetraciclina, el cual es un antibiótico que tiene efectos ecotoxicológicos reportados por Mihciokur y Oguz, (2016). Sus resultados mostraron una mayor remoción a pH de 4 y 6 en concentraciones de la biomasa de 100 mg/L. Realizaron estudios de adsorción en sistema estático para evaluar la influencia de varios parámetros como dosis de adsorbente, pH inicial, concentración inicial, tiempo de contacto y temperatura, sobre el proceso de adsorción. Se determinó que la adsorción se encuentra influenciada por el pH, siendo favorecida a valores de pH ácidos. La capacidad de adsorción aumenta con el incremento de la concentración inicial, encontrándose el equilibrio del proceso en menores tiempos para las concentraciones más altas (360 minutos).

Además, Rodríguez et al. (2019) en Colombia, presentaron la obtención y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cascarilla de arroz, producidos mediante activación química con ácido fosfórico. Los resultados indican que las cenizas producidas tienen un área superficial aproximada de 320 m²/g, la cual disminuye directamente dependiendo de la cantidad de ácido usado en la activación. Respecto a la capacidad de adsorción, los resultados muestran que el proceso de producción de las cenizas activadas a partir de cascarilla de arroz como materiales adsorbentes es viable, mostrando así una nueva oportunidad de aprovechamiento para los materiales considerados como desechos agrícolas.

De igual modo, Flores (2020) en Ecuador evaluó de la eficiencia de la cascarilla de arroz para eliminar cafeína y triclosán de agua residual sintética mediante adsorción. El porcentaje máximo de remoción de cafeína fue de 96.5% y de triclosán fue del 100.0%. El modelo de cinética de adsorción al cual se ajustó el proceso de remoción de cafeína y triclosán corresponde a una cinética de pseudo-segundo orden. De igual manera, la adsorción de contaminantes se ajustó a la isoterma de Freundlich con coeficientes de correlación mayores a 0.95, presentando capacidades de adsorción máxima para cafeína de 8.77 mg/g y de triclosán de 53.76 mg/g.

Ahora bien, Villanueva-Reynoso et al., (2023) determinaron una constante de acidez (pKa) para la molécula de metronidazol protonado (MTZH⁺) por espectroscopía de ultravioleta (UV) en medio acuoso. Los valores experimentales obtenidos se trataron con el programa computacional (SQUAD) obteniendo un valor de pKa = (2.522 ± 0.001). Así mismo se obtuvieron por primera vez los coeficientes de absorptividad molar para cada especie del metronidazol, encontrando que para pH < 2.522 predomina la especie catiónica (MTZH⁺) y a pH > 2.522 la especie neutra (MTZ).

Durante 2014, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realizó estudios preliminares sobre la capacidad de remoción de compuestos emergentes y nutrientes en biofiltros no convencionales con materiales naturales y sintéticos, biorreactores con membrana, oxidación avanzada y combinaciones de éstos, así como sobre la generación de energía eléctrica a partir de agua residual con alto contenido de materia orgánica.

En México, la información sobre la presencia de los contaminantes emergentes es escasa. El IMTA, en hoja informativa TC1003.1 “Eliminación de nuevos contaminantes de preocupación ambiental y de salud” , propuso una estrategia metodológica para obtener una lista de nuevos contaminantes en México, de una lista inicial de más de 3,000 compuestos orgánicos, aproximadamente 1,400 nuevos contaminantes no controlados reconocidas por organizaciones fueron seleccionadas a nivel internacional y en varios países. Tomando en cuenta los costos analíticos y la factibilidad técnica (determinada en laboratorio), la lista se reduce a 50 medicamentos y productos de cuidado personal de alto consumo en México que pueden usarse como indicador de contaminación con nuevos compuestos químicos (Cortés et al., 2010).

A partir de estos resultados encontrados en la literatura se concluye que la cáscara de arroz tiene una capacidad adsorbente significativa por lo cual, puede aprovecharse para remover contaminantes de los cuerpos de agua.

IV. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

4.1 Situación problemática

El principal problema está relacionado en la aparición de contaminantes emergentes que radica en su liberación continua y creciente en los cuerpos de agua, a medida que la población aumenta, aumenta la utilización de productos que pueden ser perjudiciales al ambiente. Las principales características de preocupación son las siguientes:

- Aunque estos contaminantes se encuentren en concentraciones bajas, por el principio de precaución se hace necesaria su vigilancia, ya que la mayor parte de ellos son productos biológicamente activos.
- No están regulados y hay un desconocimiento parcial o total de su toxicidad y comportamiento ambiental.
- Las aguas residuales domésticas y municipales se han convertido prácticamente en aguas con alto contenido de químicos

En México se considera que el 80% de los acuíferos contienen agua de buena calidad, pero el 40% de ellos se encuentran degradados por causas naturales y actividades humanas (SEMARNAT, 2014). El uso cada vez mayor de productos farmacéuticos combinado con la ineficacia de los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales para eliminar estos productos ha llevado a su degradación generalizada en los ambientes acuáticos (Giri et al., 2011). Como se mencionó, los productos farmacéuticos son un grupo de contaminantes que, aunque están presentes en pequeñas cantidades en el medio ambiente, aún requieren preocupación porque están diseñados para ser intrínsecos y biológicamente activos, además de ser metabólicamente estables. La comunidad científica ahora reconoce que la exposición prolongada a bajas dosis de productos farmacéuticos puede tener efectos a largo plazo en el medio ambiente al causar potencialmente daños irreparables a los ecosistemas y a la salud humana (Caviedes et al., 2017).

Para afrontar el problema de los contaminantes emergentes y prevenir sus efectos adversos tanto evidentes como imprevistos en los próximos años, se requiere desarrollar alternativas de bajo costo y viables para su remoción en cuerpos de agua. La tecnología de adsorción se ha hecho conocida recientemente por su eficacia para eliminar contaminantes en procesos convencionales. Entre todos los materiales utilizados como adsorbentes, el carbón activado es el más popular debido a su excelente capacidad para eliminar diversas impurezas. Esta preferencia se debe principalmente a su estructura y textura porosa, que proporciona una gran superficie. Sin embargo, existen muchas desventajas, la principal es que los adsorbentes, al igual que la recuperación, son muy caros. Esto llevó a la búsqueda de otros métodos económicos, lo que dio origen al estudio de las características de producción, que estudia el comportamiento de determinadas especies biológicas como adsorbentes (Jaraba y Romero, 2012).

El desarrollo de la sociedad ha dejado su huella en el medio ambiente. La forma en que vivimos hoy requiere el uso de productos químicos peligrosos. Sin embargo, a medida que viajan por la cadena alimentaria, se producen cambios en la composición de compuestos tóxicos. Los contaminantes son ejemplos de estas sustancias. Estos tipos de contaminantes se encuentran en bajas concentraciones ($\mu\text{g/L}$) y pueden causar daños al medio ambiente. Los contaminantes emergentes no pueden eliminarse mediante métodos de tratamiento convencionales, lo que se puede observar en la descarga de plantas de tratamiento de aguas residuales, que posteriormente se liberan en diversas fuentes de agua (Flores, 2020).

Por otra parte, el metronidazol, debido a sus propiedades farmacológicas, es ampliamente recetado, siendo el 60-80 % desechado por la orina y del 6-15 % por las heces. Una vez administrado puede ser excretado sin sufrir transformación, dicha excreción en forma de orina o heces ha provocado la presencia y acumulación de este fármaco dentro de aguas residuales, causando efectos adversos para los seres humanos (resistencia bacteriana) y el entorno ecológico (Villanueva-Reynoso et al., 2023).

4.2 Delimitación del problema

Debido a su composición química, nivel de consumo, solubilidad, características farmacológicas y toxicidad ambiental, el metronidazol es conocido como uno de los contaminantes persistentes en el medio ambiente acuático. En comparación con otros productos farmacéuticos, como la amoxicilina; el metronidazol, tiene una tasa metabólica muy baja en los seres humanos, ya que el 80–90% del metronidazol se libera en el medio ambiente sin modificación en su estructura química (Duque y León, 2020). Es por esto, que se muestra (figura 14-) cómo los problemas políticos, económicos y sociales impactan a los ecosistemas acuáticos.

Con el crecimiento y variación de las actividades antropogénicas, como la industria, la agricultura, el transporte, entre otros; han aumentado los contaminantes presentes en distintas matrices de agua, aire y suelo. Se espera que la contaminación por contaminantes emergentes se intensifique debido al aumento de la población mundial principalmente en áreas de alta densidad, lo que resultará no solo en un aumento en los niveles de contaminantes emergentes sino también en el número de ecosistemas contaminados. En los últimos años la aparición de la resistencia bacteriana es la principal preocupación con respecto a los productos farmacéuticos y en particular a los antibióticos, considerando como principal factor de riesgo el uso generalizado tanto en humanos como en animales ya que son excretados inalteradamente hasta en un 95% en las aguas (Villanueva-Reynoso et al., 2023).

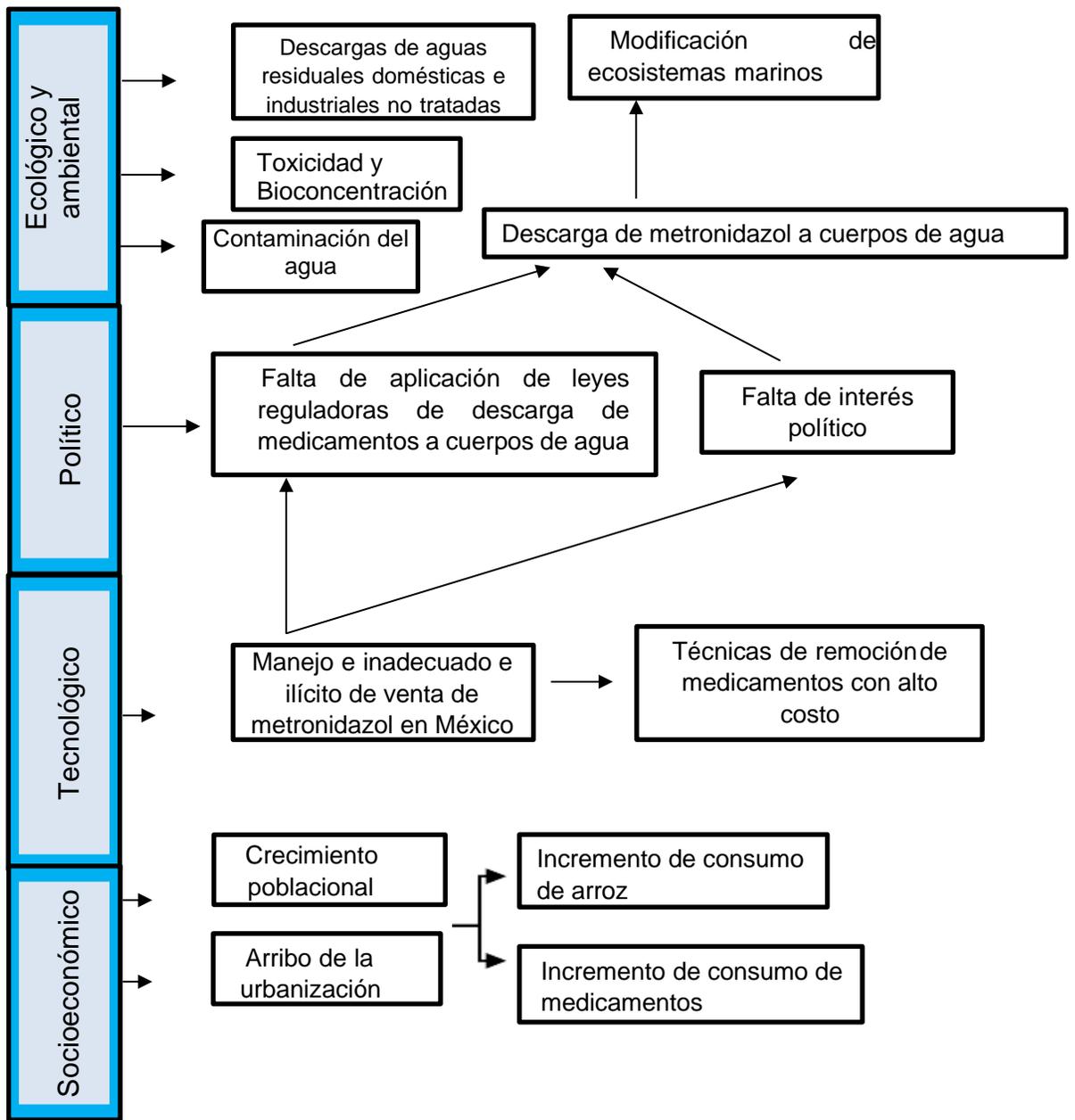


Figura 14. Esquema de la situación problemática de metronidazol en el medio ambiente.

4.3 Planteamiento del problema

En la figura anterior (Figura 14), se observan los factores que influyen en el desarrollo de esta investigación, los cuales se ubican dentro de los planos ambiental, tecnológico y socioeconómico. A lo largo del proyecto, se aborda el estudio de la cascarilla de arroz como agente adsorbente, específicamente, se explora la capacidad de remoción de metronidazol.

4.4 Vacío del conocimiento

En las investigaciones realizadas acerca los contaminantes emergentes utilizando la cascarilla de arroz como material adsorbente, se observó que no existe algún trabajo en específico sobre metronidazol utilizando la cascarilla de arroz como agente de remoción. Los últimos estudios, abarcan problemáticas puntuales como la contaminación de metales pesados, microplásticos y antibióticos.

4.5 Justificación

Las actividades humanas provocan cambios diarios en el medio ambiente, cambios que van desde cambios casi imperceptibles hasta situaciones que tienen un gran impacto en el medio ambiente . El número de actividades realizadas por los seres humanos es tan grande que, cuando se analizan detenidamente, incluso las actividades más simples de la vida diaria implican cambios. Las actividades que pueden considerarse inofensivas por naturaleza también generan desechos que tienen impactos a largo plazo en el ecosistema global. Por tanto, actividades comunes como la higiene personal y el cuidado de la salud pueden causar graves problemas al ecosistema. Actualmente, para muchos investigadores, los contaminantes más problemáticos son los llamados contaminantes emergentes, que incluyen diversos compuestos químicos como medicamentos, productos de higiene personal y fragancias, mientras que los sintéticos se utilizan en productos de limpieza. Los nuevos contaminantes son compuestos de diferente origen y naturaleza química, de los cuales se sabe relativamente poco sobre su presencia e impacto sobre diversos elementos del medio ambiente y el ser humano, por lo que es necesario estudiar su relación. Una amplia gama de sustancias se consideran contaminantes emergentes, incluidos, entre otros, los productos farmacéuticos (píldoras anticonceptivas), productos de cuidado personal, aditivos y agentes industriales(Flores,2020).

Por otra parte, el arroz es altamente consumido por todos los mexicanos y su cascarilla es un subproducto proveniente de la industria arrocera . Es una alternativa de descontaminación en cuerpos de agua gracias a características fisicoquímicas (Llanos et al.,2016). De acuerdo a Herrera et al., (2010), en su estudio sobre la remoción, sugieren que la celulosa y lignina intervienen en este proceso. Al utilizar residuos de la industria agrícola, como la cascarilla de arroz, se puede gestionar mejor este material, ya que es un residuo de gran tamaño, y la mayor parte se almacena y luego se elimina como residuo general. Los datos generados a partir de esta investigación se utilizarán para desarrollar una tecnología de bajo costo. Esto puede complementar el tratamiento de aguas residuales s para reducir el impacto de

metronidazol en los ecosistemas acuáticos. La mayor preocupación es la descarga a agua asociada a fármacos y productos químicos que afectan a la calidad del agua. (UNESCO,2018). Por su consumo y producción se introducen en el ambiente por lo que pueden ocasionar efectos negativos a nuestros ecosistemas marinos (Morales,2015). Por lo que, ante la situación de contaminantes emergentes a nivel local no hay estudios que reflejen que se usan de manera indiscriminada, lo que ha permitido inclusive con la pandemia a utilizarlos a diferentes concentraciones y descontrol, lo que conlleva a la contaminación de aguas superficiales (Llanos et al.,2016).

4.6 Pregunta de investigación

¿Cuáles son las variables que afectan de manera positiva la adsorción de metronidazol en la ceniza de cascarilla de arroz ?

V. HIPÓTESIS

La ceniza de cascarilla de arroz es un buen adsorbente del metronidazol desde una solución acuosa sintética, ayudando de esta manera a remover alrededor del 95% de las altas concentraciones de este compuesto.

VI. OBJETIVOS

6.1 General

Establecer un proceso de adsorción para la remoción de metronidazol usando la ceniza cascarilla arroz como material para preparar un carbón adsorbente.

6.2 Específicos

- Evaluar la capacidad adsorbente de la ceniza de cascarilla de arroz en la remoción de metronidazol
- Determinar las condiciones de adsorción que favorezcan la mayor remoción de metronidazol

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Investigación de Recursos Acuáticos (LIRA) ubicado en el Instituto Tecnológico de Boca del Río, Veracruz.

Cuadro 7. Variables del proceso.

Variable	Definición	Unidades
Adsorción de metronidazol	Capacidad de adsorción por gramo de adsorbente	mg de metronidazol/g de carbón activado

Cuadro 8. Variables independientes del proceso.

Variable	Definición	Unidades
pH	Nivel de acidez y alcalinidad	pH
Tiempo	Tiempo para alcanzar la máxima adsorción	min
Concentración del adsorbente	Cantidad de adsorbente presente en un litro de solución	mg/L

Para evaluar estadísticamente los efectos de las variables, se trabajó con dos valores de referencia uno alto y bajo.

Cuadro 9. Rango de parámetros a evaluar.

Factor	Alto	Medio	Bajo
pH	11	6	2
Tiempo (minutos)	15	30	45
Concentración del adsorbente (mg/L)	10	25	50

7.1 Diseño de experimentos

Se realizó un diseño factorial de 3 niveles de pH, 3 niveles de tiempo y 3 niveles de concentración (3x3x3). Donde se seleccionaron las mejores condiciones para la cascarilla de arroz teniendo en cuenta los resultados más favorables para la capacidad de adsorción, todos los experimentos fueron realizados con su respectiva replica.

La metodología empleada se resume en la figura 15 se observa los procedimientos empleados y los factores que influyen en el proceso de adsorción de metronidazol (Martínez et al .,2018).

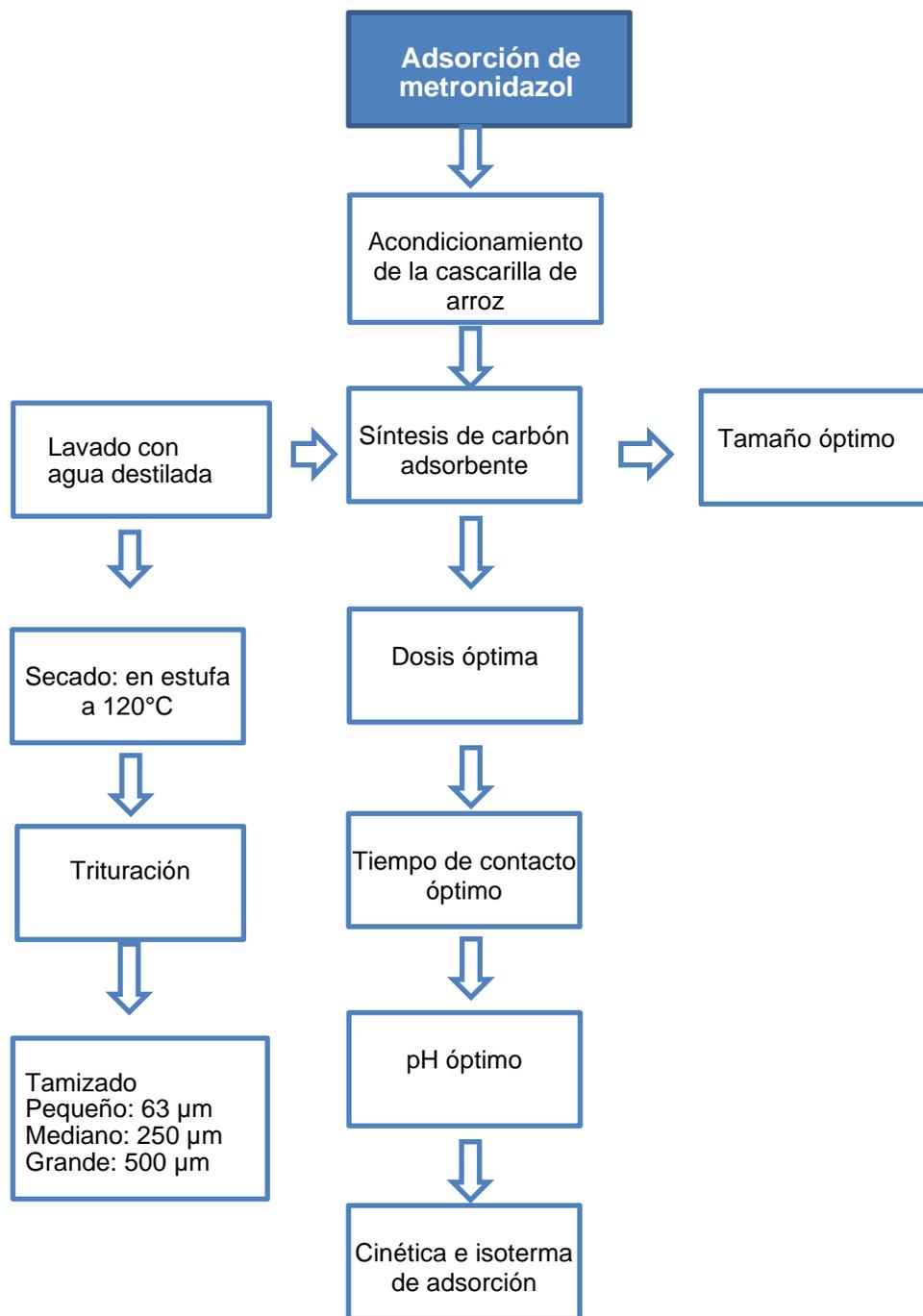


Figura 15. Diagrama de actividades realizadas en la fase experimental del proyecto.

7.2 Pretratamiento de la cascarilla de arroz

Se realizó una preparación previa de la cascarilla de arroz con el objetivo de eliminar residuos sucios que pudiera afectar el proceso de adsorción.

7.2.1 Preparación del adsorbente

Se adquirió 2 kg de cascarilla de arroz de la marca Humus, lo cual se le dio el siguiente pretratamiento:

1. **Limpieza:** El material se lavó con abundante agua destilada a temperatura ambiente (25°C) durante 30 minutos, con el fin de remover impurezas en la cascarilla de arroz.
2. **Secado:** Una vez limpia la cascarilla de arroz, se realizó un proceso de secado, donde en charolas se depositó 50 g de cascarilla de arroz limpia, posteriormente utilizando una estufa a una temperatura de 120°C durante 24 h, hasta obtener un peso constante de 200 g.
3. **Carbonización:** La carbonización implica una descomposición térmica del, eliminando todo tipo de impurezas y produciendo una masa fija de carbón con una estructura rudimentaria de poros, este proceso se lleva a cabo en una mufla a 500°C, en ausencia de oxígeno(Ramírez et al., 2018)
4. **Tamizado:** Se realizó un análisis del tamaño de partículas para determinar la distribución del tamaño de las partículas en la ceniza de cáscara de arroz. El tamaño de las partículas es una propiedad importante del material ya que se relaciona con el área de superficie disponible para la adsorción. Es importante que el tamaño del material adsorbente sea suficiente, de lo contrario puede ocurrir suspensión o aglomeración de partículas en contacto con soluciones acuosas, obstruyendo la columna de adsorción o creando caminos preferenciales en la columna. El tamizado implica pasar las partículas a través de varios tamices de diferentes tamaños de malla (Díaz, 2018), por lo que se llevó a cabo primero un proceso de trituración y molienda hasta obtener partículas pequeñas de la ceniza de cascarilla de arroz seca. Posteriormente se llevó a cabo el proceso de trituración en una serie de tamices, los cuales presentaban los siguientes tamaños: 63 μm , 250 μm y 500 μm .

Cascarilla
de arroz



Lavado



Secado a
120°C



Almacenaje



7.3 Evaluación de tamaño y velocidad de agitación óptimo

Para la evaluación de tamaño y velocidad de óptimo se preparó agua residual sintética estableciendo 50 mg/L de metronidazol como concentración estándar a diferentes velocidades de agitación (500 rpm, 700 rpm y 1000 rpm) y diferente tamaño de tamiz (63 μm , 250 μm y 500 μm).

7.4 Preparación de agua residual sintética

Las soluciones de agua residual sintética fueron preparadas a diferentes concentraciones (10,25 y 50 mg/L). Para esto se pesó 5,12.5 y 25 mg de metronidazol respectivamente en 500 ml de agua destilada.

7.5 Ensayos de adsorción

Los ensayos de adsorción se realizaron para determinar la influencia de diferentes factores sobre el proceso de adsorción de oxitetraciclina en cenizas de cáscara de arroz y establecer las condiciones óptimas del proceso. Los estudios se realizaron en proceso discontinuo (batch), poniendo en contacto soluciones de metronidazol con el adsorbente. Las soluciones de metronidazol se prepararon pesando la masa requerida de la ceniza de cascarilla de arroz en una balanza analítica y disolviendo en agua destilada para alcanzar la concentración requerida.

Las soluciones de metronidazol se mantuvieron en contacto con la ceniza de cascarilla de arroz para alcanzar el equilibrio, esto se logra cuando el soluto se encuentra distribuido en proporciones definidas entre la fase sólida y líquida. Esta distribución se describe mediante la capacidad de adsorción definida en la esc. 4, lo cual se muestra a continuación:

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

Por otra parte, el porcentaje de remoción (%R) expresa la cantidad de adsorbato removido durante el proceso.

$$\% \text{ remoción} = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \times 100$$

Ec. 4

Los experimentos de adsorción se realizaron a temperatura ambiente (25°C). Todos los ensayos fueron realizados por duplicado para confirmar los resultados obtenidos. El sólido adsorbente se pesó y se introdujo en un matraz de 100 ml, en donde previamente se agregaron 50 ml de la solución de metronidazol a evaluar (10,25 y 50 mg/L). La mezcla se puso en contacto a la velocidad de agitación óptima (700 rpm) obtenida a partir de estudios preliminares (Apéndice 2). El pH inicial de las soluciones se ajustó mediante la adición de HCl 0.1 N y NaOH 0.1 N según los valores de estudio 2, 6 y 11 (Anexo 1).

Transcurrido el tiempo de estudio, se filtró cuidadosamente para realizar las lecturas de la absorbancia en el espectrofotómetro de UV-VIS Marca Thermo Scientific con una corrección de línea base 100 %T y un barrido de 250 a 380 nm. Posteriormente, mediante la curva de calibración se determinó la concentración de metronidazol remanente para con ello calcular la capacidad de adsorción mediante la ecuación 4.

7.6 Efecto del pH en la solución

El efecto del pH sobre la remoción de metronidazol mediante la ceniza de cascarilla de arroz se estudió variando el pH original de la solución de metronidazol a pH 2,6 y 11, para lo cual se emplearon soluciones de HCl (0.1 M) y NaOH (0.1 M) para disminuir o incrementar el pH respectivamente. El pH de las soluciones se midió utilizando un pHmetro Fisher Scientific. Para verificar la influencia de la concentración de la solución en el efecto del pH, el estudio se realizó a tres concentraciones diferentes (10, 25 y 50 mg/L).

7.7 Efecto de la concentración inicial de adsorbato y tiempo de contacto

Este estudio se realizó para determinar la influencia de la concentración inicial de metronidazol en función del tiempo de contacto entre la solución de metronidazol y la ceniza de cascarilla de arroz pues ambos factores pueden influenciar en el proceso de adsorción de manera drástica. Además, este estudio, permitió determinar el tiempo de equilibrio del proceso. El efecto de la concentración inicial de metronidazol y el tiempo de contacto se estudió poniendo en contacto 6.5, 12.5 y 25 mg de ceniza de cascarilla de arroz con 50 ml de solución de metronidazol a tres diferentes concentraciones (10, 25 y 50 mg/L) sin corrección de pH inicial. Los ensayos se realizaron en matraces Erlenmeyer cubiertos con papel de aluminio para evitar la fotodegradación del metronidazol. Los matraces fueron sometidos en un agitador magnético (Thomas Scientific) a una velocidad establecida (Anexo 2) de 700 rpm, a 25°C durante diferentes intervalos de tiempo: 15, 30 y 45 minutos.

7.8 Cinética de adsorción

Los resultados experimentales obtenidos fueron analizados aplicando los modelos cinéticos de adsorción de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden, para comprender el comportamiento cinético de la remoción de metronidazol mediante adsorción en la ceniza de cascarilla de arroz . El ajuste no lineal de los modelos teóricos analizados a los datos experimentales se realizó con el software Excel.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Influencia del pH

En la figura 17, se observa el valor medio de q (mg/g) de la capacidad de metronidazol adsorbido por la cascarilla de arroz a diferentes valores de pH (2,6,11). En ella se aprecia que la capacidad de adsorción de metronidazol está fuertemente influenciada por el pH, es decir; en pH fuertemente ácido el porcentaje de remoción es mayor independiente del tiempo. Este comportamiento en la remoción sugiere que el pH modifica superficie del adsorbente y por supuesto la especiación del adsorbato (Figura 17). En ese sentido, se puede decir que en pH altamente ácidos la superficie del carbón toma una carga superficial parcialmente positiva e interactúa de mejor manera con la especie en forma catiónica $MTZH^+$ (Villanueva-Reynoso et al., 2023).

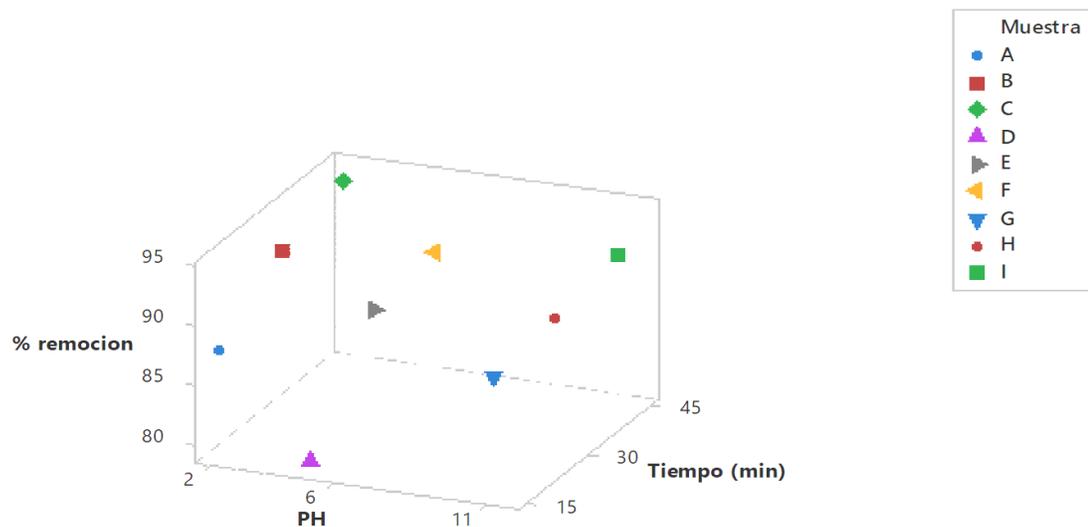


Figura 17. Influencia del pH en el proceso de adsorción del metronidazol. Obtenido de Minitab 18.

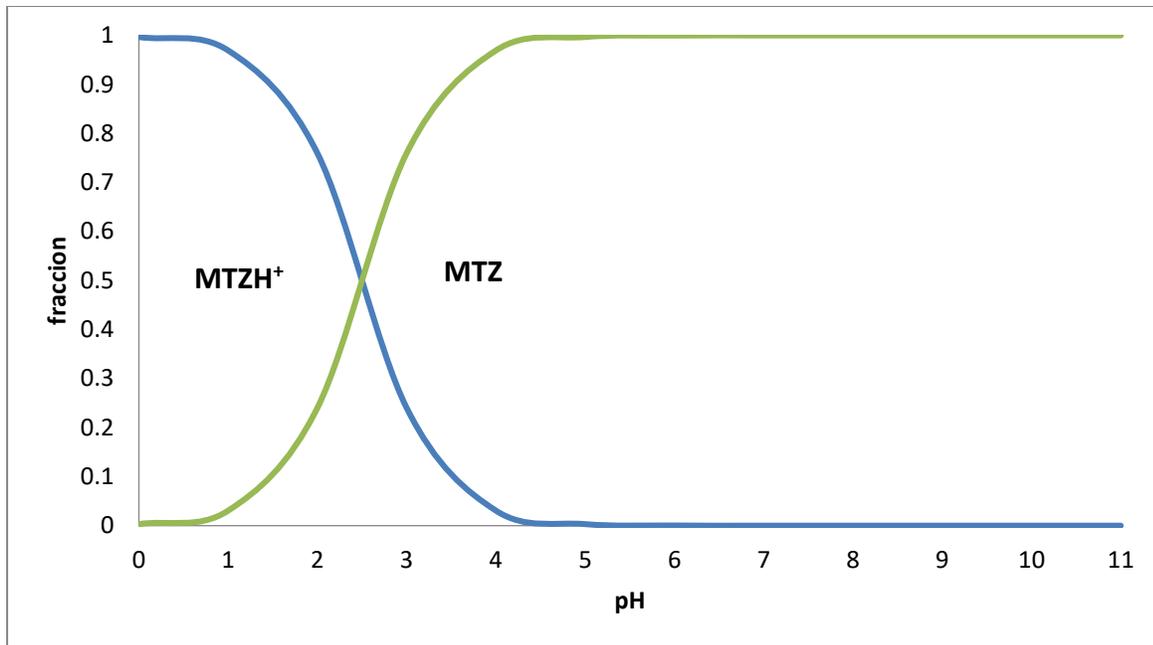


Figura 18. Diagrama de especiación para el metronidazol MTZH⁺ Y MTZ

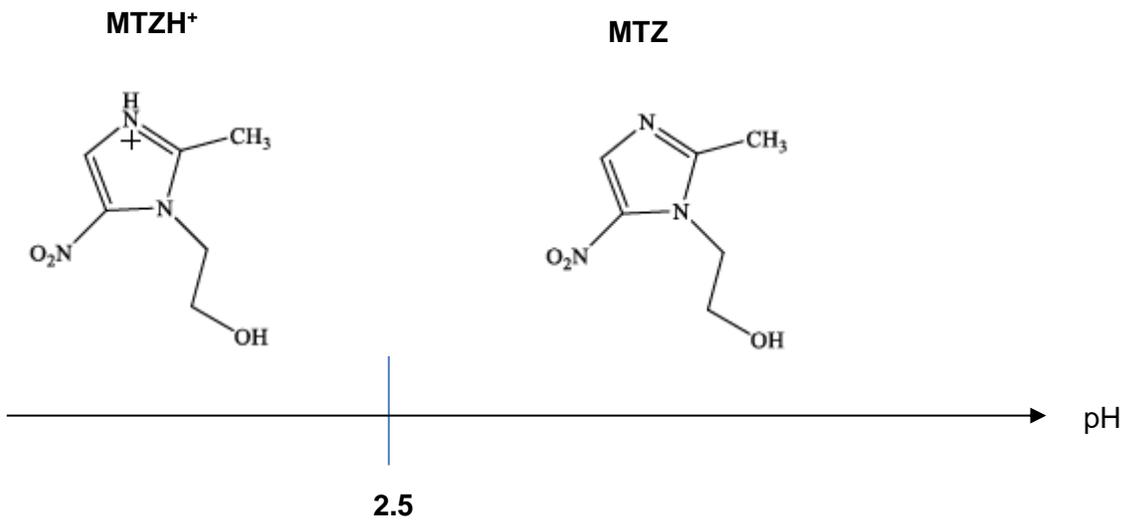


Figura 19. Representación de la especiación para el metronidazol

8.2 Tiempo de contacto óptimo

Para la optimización del tiempo se llevaron a cabo experimentos a diferentes intervalos de tiempo, los resultados obtenidos se esquematizan en la figura 20 donde se observa que el tiempo de contacto para lograr que el equilibrio de adsorción es de 45 min.

La cantidad de metronidazol adsorbido, por parte del material adsorbente, posee un valor máximo de adsorción de 93%.

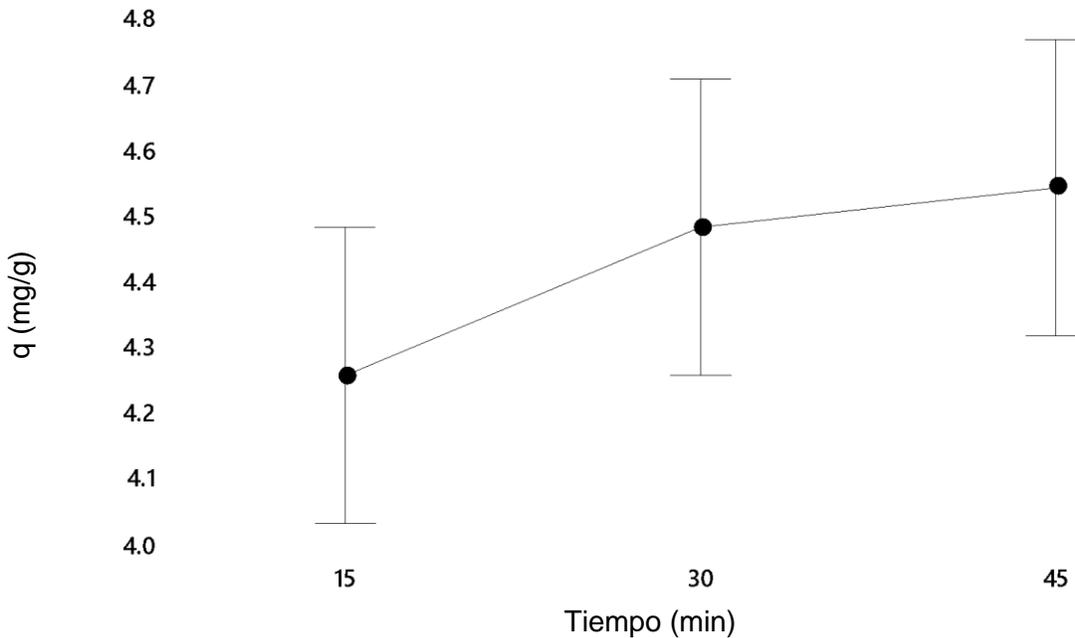


Figura 20. Grafica de intervalos de q (mg metronidazol / g carbón) vs tiempo (min). Obtenido de Minitab 18.

Al observar los resultados presentados en la Figura 20, se encuentra que durante los primeros minutos el proceso presenta un comportamiento errático, ocurriendo una disminución en la capacidad de adsorción, seguido de un incremento a partir de los 30 minutos para todas las concentraciones estudiadas. Esto puede deberse a la competencia de las moléculas del sistema. El metronidazol es muy soluble en agua, por lo tanto, es posible que en los primeros momentos del proceso se establezca una competencia entre el adsorbato y el solvente, hasta alcanzar un punto en que las moléculas logran separarse del solvente y empiezan a establecer interacciones más fuertes con el adsorbato.

8.3 Determinación de la capacidad de adsorción del carbón adsorbente de la cascarilla de arroz

Los resultados obtenidos se esquematización en el cuadro 10 donde se observa que el tiempo de contacto para lograr que el material adsorbente alcance el equilibrio de adsorción es de 45 min siguientes al inicio del proceso, luego de esto el proceso empieza a estabilizarse. La cantidad de metronidazol adsorbido, por parte de la cascarilla de arroz que tuvo los mejores resultados de los experimentos, posee un valor de adsorción de 93.54%, las condiciones que con las que se obtuvo este porcentaje fueron las siguientes: pH 2 y concentración de metronidazol de 50 mg/L.

Cuadro10. Resultados obtenidos del proceso de adsorción de metronidazol.

pH	Tiempo (min)	Concentración (mg/L)	q (mg metronidazol/ mg carbón)	% remoción
2	15	10	4.38071	87.61
2	30	25	4.58843	91.76
2	45	50	4.67745	93.54
5	15	10	3.9967	79.33
5	30	25	4.3928	87.85
5	45	50	4.4323	88.64
11	15	10	4.4005	88.8
11	30	25	4.475	89.5
11	45	50	4.529	90.58

8.4 Analisis estadístico de varianza (ANOVA) para la ceniza de cascarilla de arroz

Previo a la realización de los cálculos, se realiza la propuesta de las siguientes hipótesis sobre el estudio:

Planteamiento de regla de decisión para ANOVA (DBCA)
Si: ---- $P > 0.05$ ---- Se acepta H_0 ---- $\mu_1 = \mu_2$
Si: ---- $p < 0.05$ ---- Se acepta H_a ---- $\mu_1 \neq \mu_2$

Se realizaron los siguientes cálculos para la obtención de los siguientes resultados, con apoyo del software de Microsoft Excel. Los cuales se comprobaron mediante el software PAST.

Cuadro 11. Analisis de varianza (ANOVA) para el proceso de adsorción de metronidazol en el software Excel

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>DF</i>		<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>
<i>Entre grupos</i>	41925.3	4	10481.3		103.4	1.54x10⁻²⁰
<i>Dentro de los grupos</i>	4052.92	40	101.323			
<i>Total</i>	45978.2	44				

Cuadro 12. Valores no significativos de P en el software estadístico Past

	<i>pH</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Concentracion (mg/L)</i>	<i>%Remocion</i>	<i>q (mg metronidazol/ g carbón)</i>
<i>pH</i>		0.0096	0.0235	2.739X10-6	0.5177
<i>Tiempo (min)</i>	0.0096		0.7464	0.0355	0.0001
<i>Concentracion (mg/L)</i>	0.0235	0.7464		0.0152	0.0036
<i>%remocion</i>	2.73x10 ⁻⁶	0.03554	0.0152		9.45x10 ⁻⁸
<i>Q(mg metronidazol/ g carbón)</i>	0.5177	0.00122	0.0003	9.48x10 ⁻⁸	

De acuerdo con los resultados obtenidos en la hoja de cálculo de Excel y con las hipótesis previamente planteadas, podemos concluir lo siguiente de acuerdo con la regla de decisión.

Cuadro 13. Regla de decisión para hipótesis

Regla de decisión
H ₀ : p > 0.05 ---- No hay diferencias significativas
H _a : p < 0.05 ---- Si hay diferencias significativas

Cuadro 14. Cuadro de decision para cada variable con su valor de P para cada variable experimental

Parámetro	Valor P	Decisión
pH-Tiempo	0.0096	No significativa
pH-Concentración	0.0235	No significativa
pH-Remoción	2.73x10-6	No significativa
pH-Q	0.5177	Significativa
Tiempo-pH	0.0096	No significativa
Tiempo-concentración	0.7464	Significativa
Tiempo-Q	0.0012	No significativa
Tiempo-remoción	0.0355	No significativa
Concentración-pH	0.0235	No significativa
Concentración-tiempo	0.7464	Significativa
Concentración-remoción	0.0152	No significativa
Concentración-Q	0.00036	No significativa
Remoción-pH	2.73x10-3	No significativa
Remoción-tiempo	0.0355	No significativa
Remoción-concentración	0.0152	No significativa
Remoción-q	9.486x10-8	No significativa
q-pH	0.5177	Significativa
q-tiempo	0.0012	No significativa
q-concentración	0.0003	No significativa
q-remoción	9.486x10-8	No significativa

En el cuadro 14 se observa el valor estadístico de P para cada variable, de acuerdo a la regla de decision descrita en el cuadro 12, las variables en las cuales se acepta la hipotesis alterna que nos indica que si hay diferencias estadísticas significativas son las siguientes:

- pH-q
- tiempo-concentracion

Esto nos demuestra que las variables pH-q influyen directamente en el resultado final, es decir en la capacidad de adsorción del proceso, el pH puede afectar la carga superficial y los grupos funcionales en los sitios activos del adsorbente y alterar el grado de ionización de adsorbente, por lo que puede aumentar la solubilidad en fase líquida (forma iónica) o la retención en fase sólida (forma neutra). La hidrólisis, las reacciones redox y los procesos de precipitación están fuertemente influenciados por el pH.

Por otra parte en cuanto a las variables tiempo- concentración son significativas debido a que un tiempo de contacto prolongado entre el adsorbente y el adsorbato permite conseguir mayores niveles de remoción y mejorar la capacidad de adsorción, hasta alcanzar el estado de equilibrio, en el cual se observa una concentración constante del adsorbato. Por lo que la cantidad de adsorbente está directamente relacionada con la capacidad de adsorción porque el área de superficial del adsorbente aumenta y mejora el contacto adsorbente-adsorbato, lo que aumenta la velocidad de adsorción (Díaz, 2018).

8.5 Modelo cinéticos

8.5.1 Modelo cinético de primer orden

Los datos experimentales de capacidad de adsorción se analizaron mediante la expresión matemática correspondiente a la cinética de pseudo primer orden, la cual se basa en que el proceso de adsorción es a través del comportamiento de fisorción, donde la velocidad de adsorción es proporcional a la cantidad de soluto en la solución. Para ello se evaluaron las ecuaciones y su linealización correspondientes :

$$qt = q_e(1 - e^{-kt})$$

$$\log q_t = \log q_e - tk_1$$

Ec.5

Donde k_1 es la constante de pseudo primer orden (min^{-1}) y q_e es la capacidad de adsorción en el equilibrio (mg metronidazol/g de carbón).

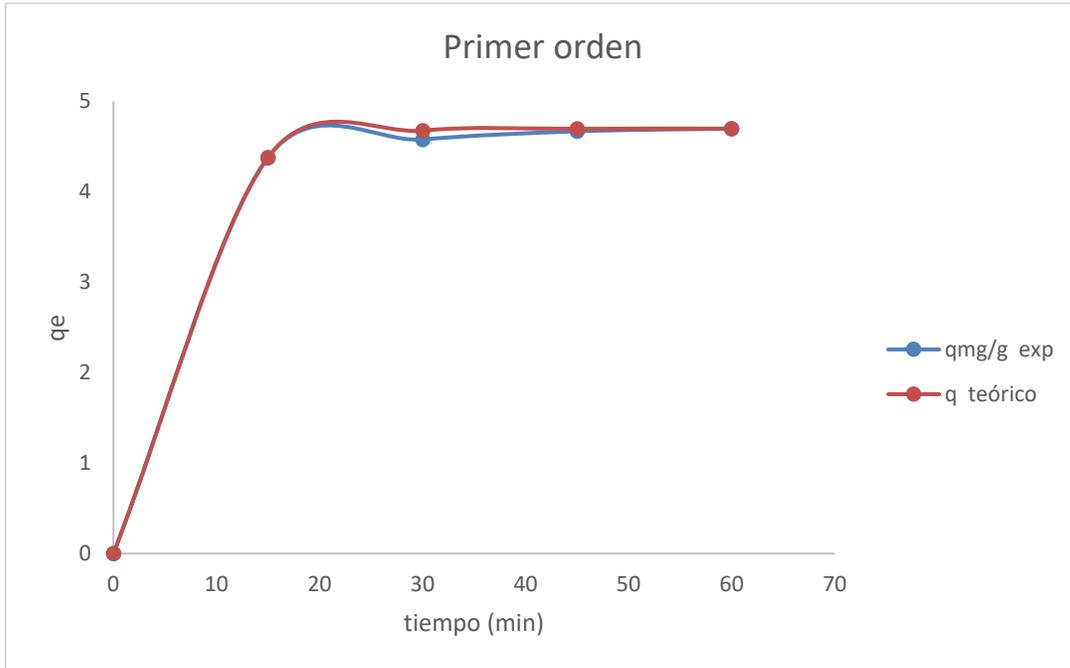


Figura 21. Modelo cinético de primer orden para la cascarilla de arroz

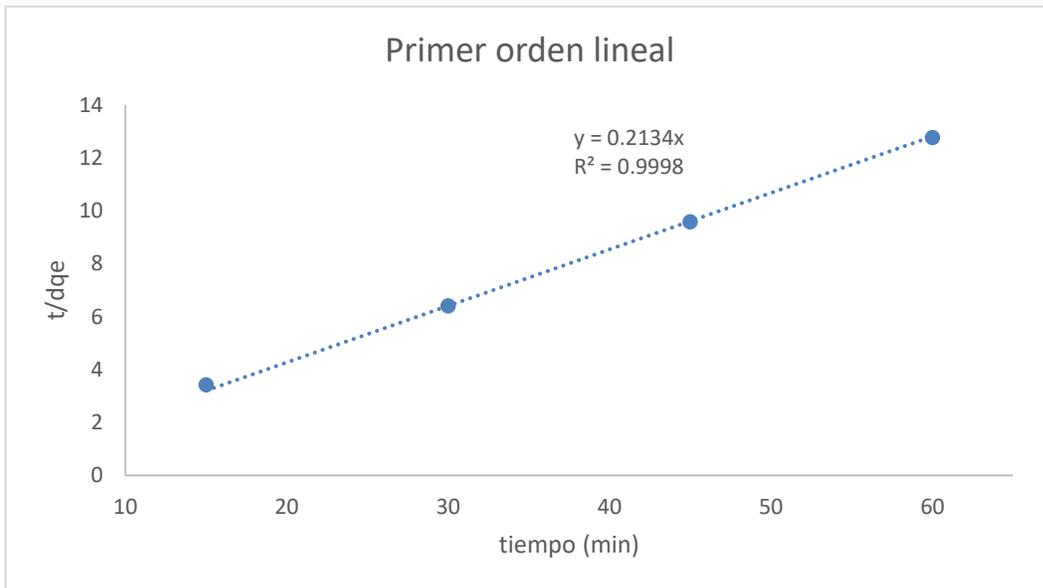


Figura 22. Ajuste en forma lineal para el modelo cinético de primer orden

De las figuras 21 y 22, se puede observar que los datos obtenidos se ajustan ligeramente al modelo de primer orden, el adsorbente obtuvo un coeficiente de correlación de R^2 con un valor 0.99, el coeficiente de correlación de Pearson es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas, si la correlación es igual a +1 significa que correlación es positiva, es decir, que las variables se correlacionan directamente. Los valores de los parámetros obtenidos para este modelo por medio de la linealización, junto con el coeficiente de correlación se encuentran resumidos en el cuadro 15.

8.5.2 Modelo cinético de segundo orden

Los datos experimentales también se ajustaron al modelo cinético de segundo orden, el cual describe la adsorción se lleva a cabo mediante reacción química que involucra fuerzas de valencia través de intercambio iónico entre la cascarilla de arroz y el metronidazol. Por lo que se realizó un ajuste lineal graficado en la figura 24.

A continuación, se muestran la ecuación de segundo orden y su linealización:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

Ec. 6

Siendo la forma integrada:

$$q_t = \frac{(q_e^2 \cdot k_2 \cdot t)}{(1 + [q_e \cdot k_2 \cdot t])}$$

Ec.7

Donde k_2 es la constante de pseudo primer orden (min^{-1}), q_e es la capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g).

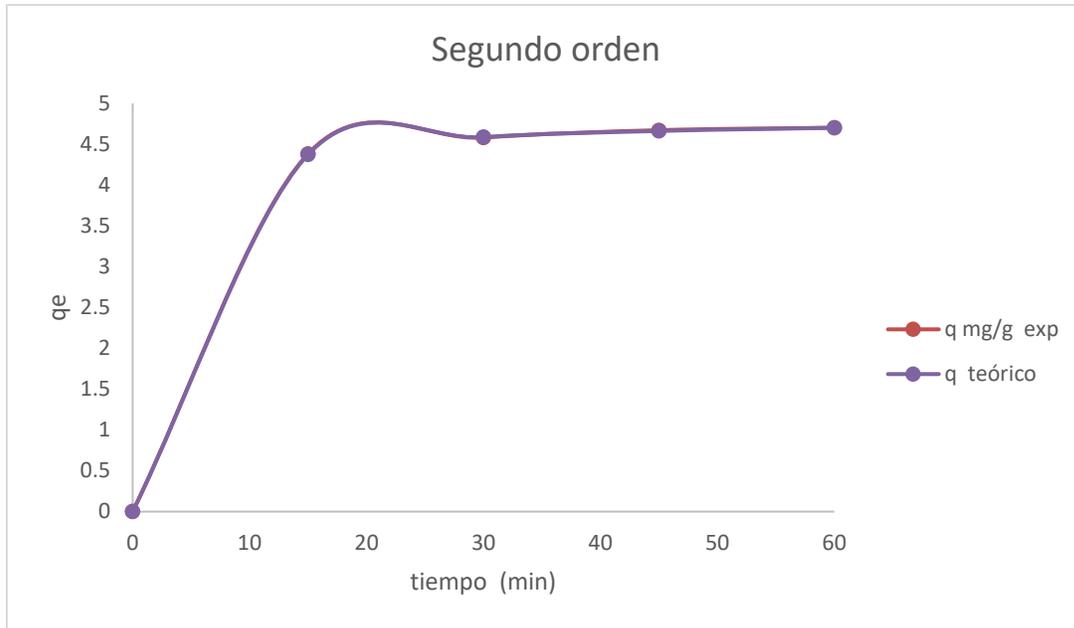


Figura 23. Modelo cinético de segundo orden para la cascarilla de arroz

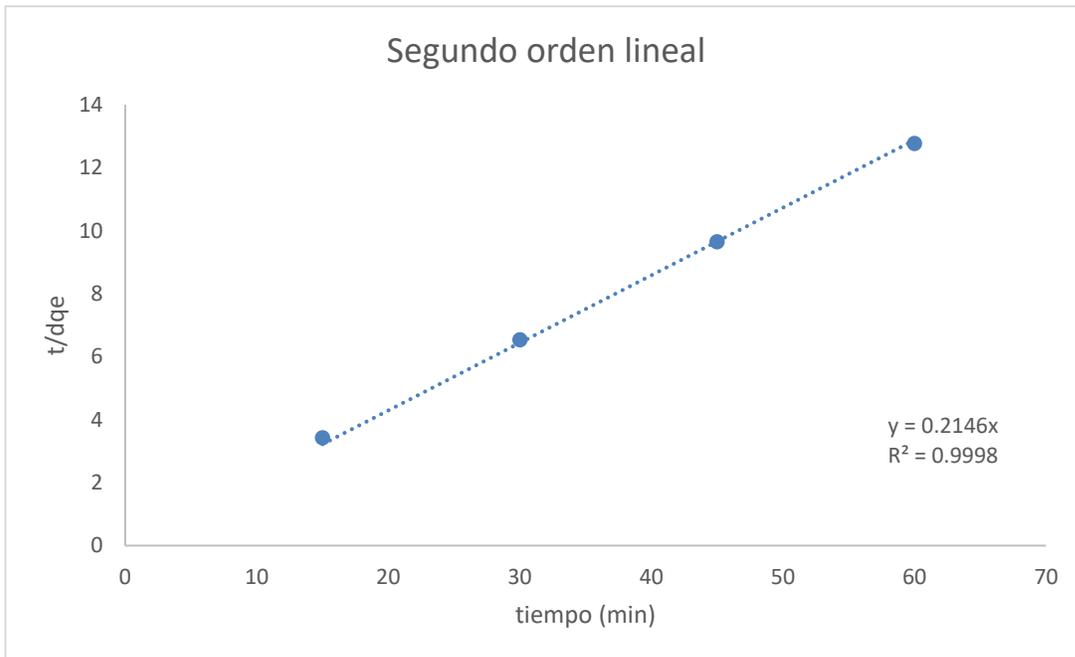


Figura 24. Modelo cinético lineal de pseudo primer orden para la cascarilla de arroz

En la Figura 23 y 24 se puede observar que los datos experimentales, se ajustan de forma adecuada al modelo cinético por lo que cual, el coeficiente obtenido en relación al anterior modelo fue R^2 con un valor de 0.99, lo cual nos indica que en este caso de estudio el proceso de adsorción se lleva a cabo a través de reacción química.

Cuadro 15. Parámetros característicos de los diferentes modelos cinéticos y los coeficientes de correlación para la cascarilla de arroz

Modelo	q_e (mg/g)	k	R^2
Primer orden	4.7	0.18	0.9998
Segundo orden	4.82	0.13	0.9998

IX. CONCLUSIONES

Según los modelos cinéticos puede haber fisiorción y quimisorción y es algo razonable porque cuando se modifica el pH hay un comportamiento en la carga superficial, por ejemplo, cuando se modificó el pH a 11 no hay un cambio muy brusco en relación al pH 2 en cuanto al % de remoción del contaminante, esto quiere decir que probablemente también haya una quimisorción, desde ese punto de vista, el proceso puede ser descrito por ambas: quimisorción y fisiorción.

La cascarilla de arroz como material adsorbente para la remoción de metronidazol, obtuvo un máximo de remoción de 93% con los siguientes parámetros: pH 2, tamaño de partícula 0.63 μm , concentración de 50 mg/L, velocidad de agitación de 700 rpm y tiempo de contacto de 45 min, siendo estas las mejores condiciones que el proceso presentó con el mayor porcentaje de remoción.

De acuerdo con el análisis de varianza realizado, para determinar la significancia estadística del efecto de los parámetros de estudio, se puede concluir que: el tiempo óptimo de contacto para los tres rangos de tamaño de partícula estudiado fue de 45 min y la dosis óptima para la remoción de metronidazol fue de 50 mg/L, esto ocurre por las características físicas de la cascarilla de arroz que le permite adherirse con mayor facilidad al metronidazol debido a su afinidad electrónica. La cascarilla de arroz es un tejido vegetal lignocelulósico constituido por un 85 % de material orgánico, representado por celulosa, lignina, D-xilosa y pequeñas cantidades de D- galactosa (Krishnarao, Subrahmanyam y Kumar, 2001), además en promedio la cascarilla de arroz cuenta con un 64.30 % de material volátil, un 16.10 % de carbono fijo y un 19.54 % de ceniza; es en esta última donde se concentra el contenido de dióxido de sílice que supera el 90 %, y gracias a su fino tamaño y su alta reactividad ha sido utilizado en procesos de remoción de contaminantes (Llanos Páez et al., 2016).

Las variables significativas desde el punto de vista estadístico fueron las siguientes: pH-q y tiempo- concentración. El pH de la solución indica la concentración de iones hidronio (H_3O^+) presentes en la solución y es capaz de afectar las cargas superficiales del adsorbente, el pH es un factor determinante en el proceso, pues determina el estado iónico de la molécula y afecta la eficiencia del mismo (Díaz, 2018). Por otra parte, en cuanto mayor sea la concentración de adsorbato en la fase líquida, y el tiempo de contacto entre el adsorbato y el adsorbente, mayor será el gradiente de concentración entre la fase líquida y la fase sólida, por lo tanto, la capacidad y la velocidad de adsorción serán mayores (Crini y Badot, 2008).

La adsorción es un fenómeno superficial, cuando se disminuye el tamaño de partícula de la cascarilla de arroz, aumenta la capacidad de adsorción (q), ya que la adsorción está vinculada con el área superficial, es decir, el área de contacto entre el material adsorbente y la fase líquida, el tamaño del adsorbato es proporcional a la velocidad del proceso y determina la capacidad de adsorción, por lo tanto se recomienda, trabajar con un tamaño de partícula pequeño, ya que se observa que trabajando con un tamaño de partícula pequeña se obtiene mejor eficiencia en la remoción del contaminante.

La ceniza de cáscara de arroz se presenta como un buen adsorbente del metronidazol en solución acuosa, siendo capaz de remover altas concentraciones de este compuesto gracias a la afinidad entre sus grupos funcionales por lo que la ceniza de cascarilla de arroz constituye un material adsorbente de bajo costo y amplia disponibilidad.

X. REFERENCIAS

- Agudelo, E. A. (2019a). Modelo cinético para la degradación de contaminantes emergentes (antibióticos) presentes en un agua residual, bajo un sistema de tratamiento secuencial vermifiltración –tecnologías de oxidación avanzada.
- Duque, M. A. B., & León, M. F. C. (s. f.). Evaluación de la remoción de amoxicilina mediante el uso de bentonita modificada por la técnica de delaminación.
- Fierro, V., Muñiz, G., Basta, A. H., El-Saied, H., & Celzard, A. (2010). Rice straw as precursor of activated carbons: Activation with ortho-phosphoric acid. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.062>
- Flores, J. E. C. (2020). Evaluación de la eficiencia de la cascarilla de arroz para eliminar cafeína y triclosán de agua residual sintética mediante adsorción.
- Jaraba, L. E. G., & Romero, S. C. C. (2012). Evaluación de la capacidad de adsorción en la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) modificada con quitosano para la remoción de Cr(VI) en aguas residuales.
- Martínez-Alcalá, I., Soto, J., & Lahora, A. (2020). Antibiotics as emerging pollutants. Ecotoxicological risk and control in wastewater and reclaimed water. *Ecosistemas*, 29(3). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2070>
- Quijano, C. C. C. (s. f.). Producción de carbón activado y sílice a partir de cascarilla de arroz—Una revisión. 18(2).
- Ramírez, a. C., & cruz, a. N. D. (2018). Obtención de carbón activado a partir de cascarilla de arroz y hueso de coco, para la adsorción de oro de soluciones cianuradas.
- Tejada, C., Quiñonez, E., & Peña, M. (2014). Contaminantes Emergentes en Aguas: Metabolitos de Fármacos. Una Revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 10(1), 80. <https://doi.org/10.18359/rfcb.341>
- Villanueva-Reynoso, J. H., Guzmán-Hernández, D. S., Ramírez-Silva, M. T., Juárez-Gómez, J., & Rojas-Hernández, A. (2023). Determinación de la constante de acidez del metronidazol por espectroscopia ultravioleta en medio acuoso. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(Especial), 50-53. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial.10232>
- Álvarez, J., López, G., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2014). Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 128, 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.074>
- Bansal, M., Garg, U., Singh, D., & Garg, V. K. (2009a). Removal of Cr(VI) from aqueous solutions using pre-consumer processing agricultural waste: a case study of rice husk. *Journal of Hazardous Materials*, 162(1), 312-320. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.037>

- Bansal, M., Garg, U., Singh, D., & Garg, V. K. (2009b). Removal of CR(VI) from aqueous solutions using pre-consumer processing agricultural waste: a case study of rice acid from aqueous solution. *Adsorption Science & Technology*, 33(5), husk. *Journal of Hazardous Materials*, 162(1), 312-320. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.037>
- Bishnoi, N. R., Bajaj, M., Sharma, N., & Gupta, A. (2004). Adsorption of CR(VI) on activated rice husk carbon and activated alumina. *Bioresource Technology*, 91(3), 305-307. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(03\)00204-9](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(03)00204-9)
- Deokar, S. K., & Mandavgane, S. A. (2015). Rice husk ash for fast removal of 2,4-Dichlorophenoxyacetic 429-440. <https://doi.org/10.1260/0263-6174.33.5.429>
- Díaz, C. A. (2018). Remoción de oxitetraciclina presente en soluciones acuosas usando cenizas de cáscara de arroz. Tesis de grado. https://iconline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/3555/1/Trabalho%2bfinal%2bde%2bcurso_Christhel%2bD%3%adaz.pdf
- Edwards, D. I. (1986). Reduction of nitroimidazoles in vitro and DNA damage. *Biochemical Pharmacology*, 35(1), 53-58. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(86\)90554-x](https://doi.org/10.1016/0006-2952(86)90554-x)
- Edwards, D. I. (1993). Nitroimidazole drugs-action and resistance mechanisms i. Mechanism of action. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 31(1), 9-20. <https://doi.org/10.1093/jac/31.1.9>
- Eggs, N. E., Salvarezza, S. A., Azario, R. R., Fernández, N., & Del Carmen García, M. (2012). ADSORCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN LA CÁSCARA DE ARROZ MODIFICADA QUÍMICAMENTE. *DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals)*. <https://doaj.org/article/4d47c018529f427aa26c5f728532c730>
- Ensuncho, A. E., Robles, J., & Carriazo, J. G. (2015). Adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos a partir de desechos agrícolas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81(2), 135-147. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v81i2.23>
- Estrada-Arriaga, E. B., Nacheva, P. M., Moeller-Chávez, G., Gabriela, M., Norma, R., & Sánchez-Zarza, M. (2013). Presencia y tratamiento de compuestos disruptores endócrinos en aguas residuales de la Ciudad de México empleando un biorreactor con membranas sumergidas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 14(2), 275-284. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(13\)72242-x](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(13)72242-x)
- Evaluate Pharma (2018). Evaluate Pharma world preview 2018, outlook to 2024 [en línea]. <https://www.evaluate.com/thought-leadership/pharma/evaluatepharmaworld-preview-2018-outlook-2024> 11/08/2020

- Félix-Cañedo, T. E., Durán-Álvarez, J. C., & Jiménez-Cisneros, B. (2013). The occurrence and distribution of a group of organic micropollutants in Mexico City's water sources. *Science of The Total Environment*, 454-455, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.088>
- Galár-Martínez, M., García-Medina, S., Gómez-Oliván, L. M., Pérez-Coyotl, I., Mendoza-Monroy, D. J., & Arrazola-Morgain, R. E. (2015). Oxidative stress and genotoxicity induced by ketorolac on the common Carp *Cyprinus carpio*. *Environmental Toxicology*, 31(9), 1035-1043. <https://doi.org/10.1002/tox.22113>
- Gibson, R. W., Durán-Álvarez, J. C., Estrada, K. L., Carrillo-Chávez, A., & Cisneros, B. J. (2010). Accumulation and leaching potential of some pharmaceuticals and potential endocrine disruptors in soils irrigated with wastewater in the Tula Valley, Mexico. *Chemosphere*, 81(11), 1437-1445. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.006>
- Gnanamanickam, S. S. (2009). Rice and its importance to human life. En *Springer eBooks* (pp. 1-11). https://doi.org/10.1007/978-90-481-2465-7_1
- Herrera, G. M. D., Anaguano, A. H., & Suárez, D. G. (2011). Cascarrilla de arroz: material alternativo y de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo (VI). *Gestión y Ambiente*, 14(1), 73-84. <http://www.redalyc.org/pdf/1694/169422215006.pdf>
- Karnib, M., Kabbani, A., Holail, H., & Olama, Z. A. (2014). Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite. *Energy Procedia*, 50, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.014>
- Llanos-Paez, O., Navarro, A. R., Páez, C. A. J., & Herrera, L. F. R. (2016). La cascarrilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación. *Produccion + Limpia*, 11(2), 150-160. <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a12>
- Madrigal-Zúñiga, K., Ruíz-Hidalgo, K., Chin-Pampillo, J. S., Masís-Mora, M., Castro-Gutiérrez, V., & Rodríguez-Rodríguez, C. E. (2015). Fungal bioaugmentation of two rice husk-based biomixtures for the removal of carbofuran in on-farm biopurification systems. *Biology and Fertility of Soils*, 52(2), 243-250. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1071-7>
- Mansour, F., Al-Hindi, M., Saad, W., & Salam, D. A. (2016). Environmental risk analysis and prioritization of pharmaceuticals in a developing world context. *Science of The Total Environment*, 557-558, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.023>
- Morachis-Valdez, A. G., Dublán-García, O., López-Martínez, L. X., Galár-Martínez, M., Saucedo-Vence, K., & Gómez-Oliván, L. M. (2015). Chronic exposure to

pollutants in Madín Reservoir (Mexico) alters oxidative stress status and flesh quality in the common carp *Cyprinus carpio*. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(12), 9159-9172. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4061-7>

Mihçioğur, H., & Oğuz, M. (2016). Removal of oxytetracycline and determining its biosorption properties on aerobic granular sludge. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 46, 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2016.07.017>

Naiya, T. K., Bhattacharya, A. K., Mandal, S., & Das, S. (2009). The sorption of lead(II) ions on rice husk ash. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 1254-1264. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.119>

Okoro, H. K., Alao, S. M., Pandey, S., Jimoh, I. A., Basheeru, K. A., Caliphs, Z., & Ngila, J. C. (2022). Recent potential application of rice husk as an eco-friendly adsorbent for removal of heavy metals. *Applied Water Science*, 12(12). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01778-1>

Ortega, J. J. (2020, 9 junio). *INVESTIGADORES DEL IRNAS PATENTAN UN FILTRO PARA ELIMINAR CONTAMINANTES ORGÁNICOS EMERGENTES EN AGUA FABRICADO a PARTIR DE CASCARILLA DE ARROZ PIROLIZADA*. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla. <https://www.irnas.csic.es/investigadores-del-irnas-patentan-un-filtro-para-eliminar-contaminantes-organicos-emergentes-en-agua-fabricado-a-partir-de-cascarilla-de-arroz-pirolizada/>

Pérez, R. H., Castillo, A., Castillo, A., Delgado, A. M. S., Medrano, A. S., & Candia, F. R. M. (2022). Manejo de la cascarilla de arroz como residuo postcosecha y su conversión en nanocelulosa. *Mundo nano*, 16(30), 1e-17e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69697>

Pérez-Trallero, E., & Iglesias, L. (2010a). Tetraciclinas, sulfamidas y metronidazol. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 28(2), 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2009.10.002>

Rico, A., Martínez-Blanco, J., Montlleó, M., Rodríguez, G., Tavares, N. J., Arias, A., & Oliver-Solà, J. (2019). Carbon footprint of tourism in Barcelona. *Tourism Management*, 70, 491-504. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.09.012>

Roe, F. J. C. (1983). Toxicologic evaluation of metronidazole with particular reference to carcinogenic, mutagenic, and teratogenic potential. *PubMed*, 93(1 Pt 2), 158-164. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6336861>

Saravanan, M., Hur, J., Narayanasamy, A., & Ramesh, M. (2014). Toxicological effects of clofibric acid and diclofenac on plasma thyroid hormones of an Indian major carp, *Cirrhinus mrigala* during short and long-term exposures. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 38(3), 948-958. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2014.10.01>

ANEXO 1. PRUEBAS PARA LA DETERMINACIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ

El tamaño de partícula del material adsorbente afecta la adsorción. Esto se debe a que la adsorción se produce dentro de las partículas o en las paredes de los poros en lugares específicos. Se sabe que la cantidad de adsorbato (solute) que se puede absorber es igual que el volumen, igual que el área externa, y las partículas más pequeñas tienen más superficie, es decir, más masa. Área de superficie interna por volumen de poros por unidad de masa. Cuanto menor sea el tamaño de partícula, mayor será el número de centros energéticos por unidad y mayor será la capacidad de absorción (Jaraba y Romero, 2012).

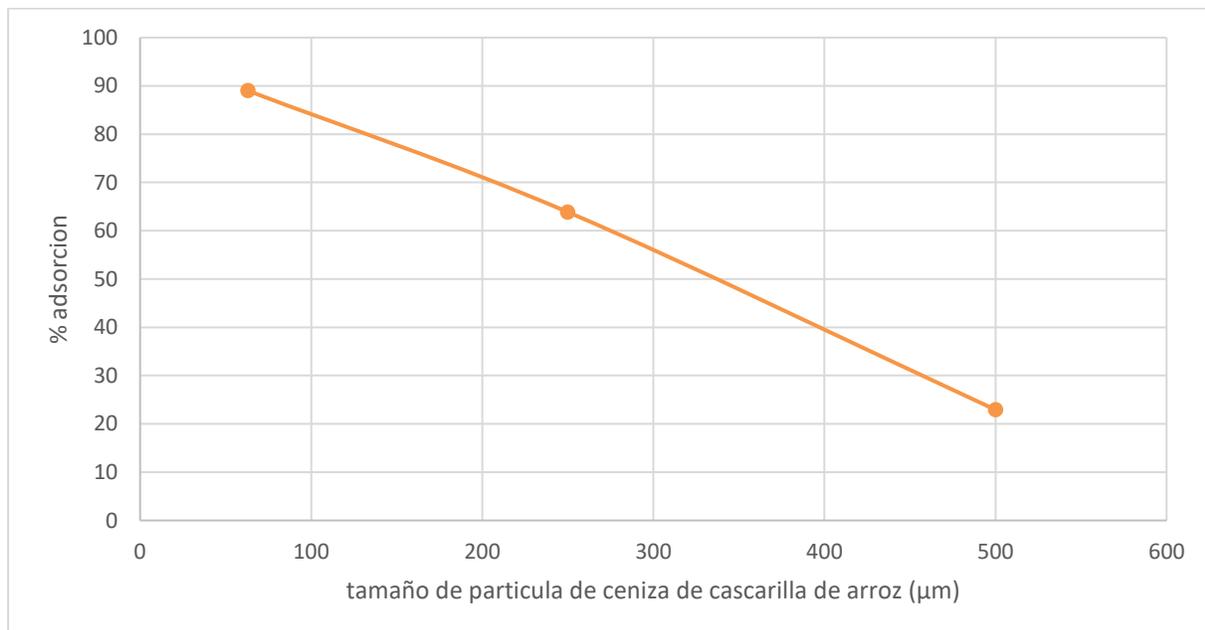


Figura 25. Tamaño de partícula seleccionado para la cascarilla de arroz

De acuerdo a la figura 25, se escogió como material de trabajo, el tamaño de partícula de 0.63 μm , debido a que con ese tamaño se obtuvieron resultados favorables. El mayor porcentaje de adsorción fue el obtenido por la cascarilla de arroz, con un tamaño de partícula de 0.63 μm , fue de 83%.



Figura 26. Tamaño de partícula seleccionado para la cascarilla de arroz



Figura 27. Ceniza de cascarilla de arroz tamizada.

ANEXO 2. DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD DE AGITACIÓN ÓPTIMA

La agitación en todo proceso tanto químico como biológico es fundamental, una buena agitación favorece una óptima distribución de reactivos y de temperatura además de favorecer la transferencia de adsorción.



Figura 28. Velocidad de agitación para el proceso de adsorción de la ceniza de cascarilla de arroz.

En la figura 28, se observa que mayor velocidad de agitación se obtiene un menor pico de adsorción, lo cual se le puede atribuir a que a mayor velocidad de agitación favorece el contacto entre el adsorbato y adsorbente y por lo tanto muestra un mejor resultado. Por tal motivo, es determinado que, como material de trabajo, la velocidad de agitación con la que se trabajó fue de 700 rpm.



Figura 29. Agitación para la obtención de velocidad de agitación óptima

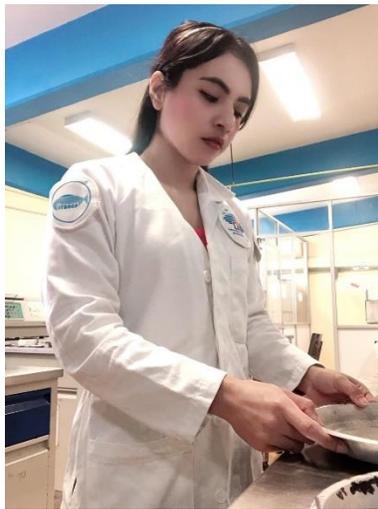


Figura 30. Preparación de muestras

ANNEXO 3. CURVA DE CALIBRACIÓN

Los resultados de la curva de calibración se resumen en el cuadro 10, donde se muestran las concentraciones utilizadas.

Cuadro 17. Datos obtenidos para la realización de la curva de calibración

Matraz de dilución a 50 mL de solución madre	Solución diluyente (agua destilada) ml	Concentración Aproximada (mg/L)	Etiquetas
5	45	5	1
10	40	10	2
20	30	20	3
30	20	30	4
40	10	40	5
50	0	50	6

En la figura 31 se muestra la curva de calibración para el metronidazol a diferentes concentraciones.

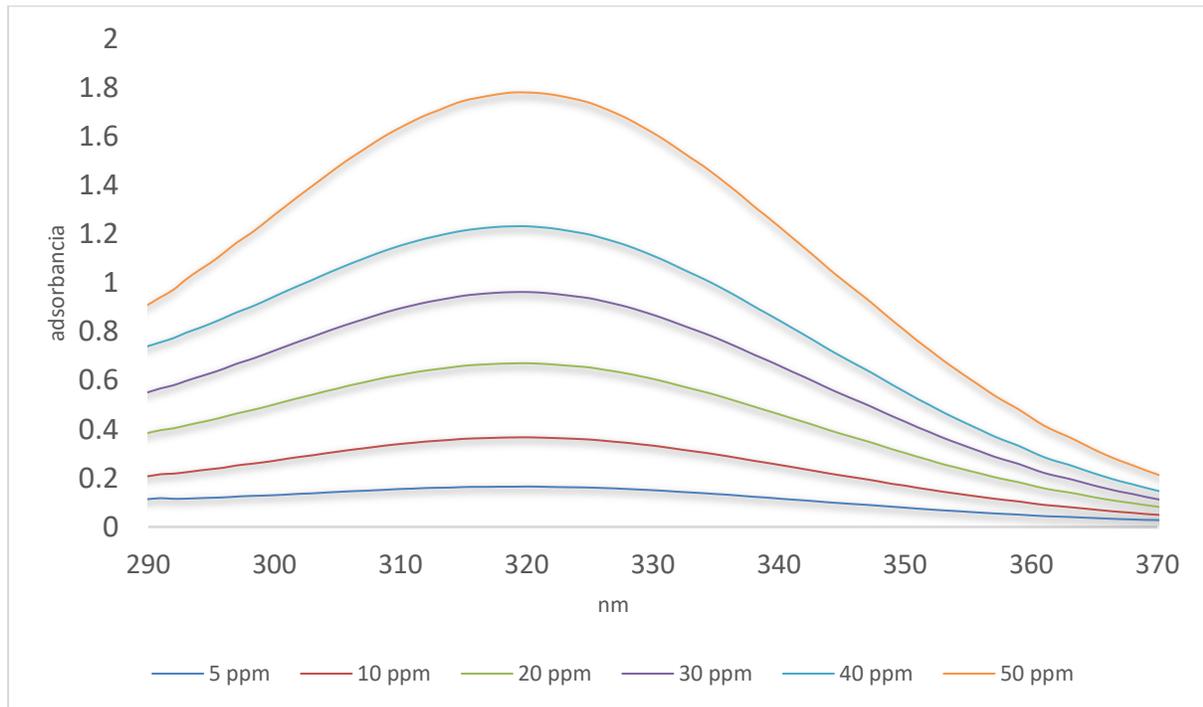


Figura 31. Espectros de adsorción atómica del metronidazol

ANEXO 4. PRUEBA DE ACTIVACIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ CON NAOH(0.1 M)

Se realizó una prueba de la ceniza de cascarilla de arroz con activación química para determinar si existe un aumento en el porcentaje de remoción del metronidazol utilizando NaOH (0.1), los parámetros del proceso para la prueba fueron los siguientes: pH 2, tamaño de partícula 63µm, tiempo de contacto 15 min y dosis del adsorbente de 50 mg/L. Se puede observar en la figura 32 que si existe un aumento en la remoción del porcentaje pero que este no es tan significativo.

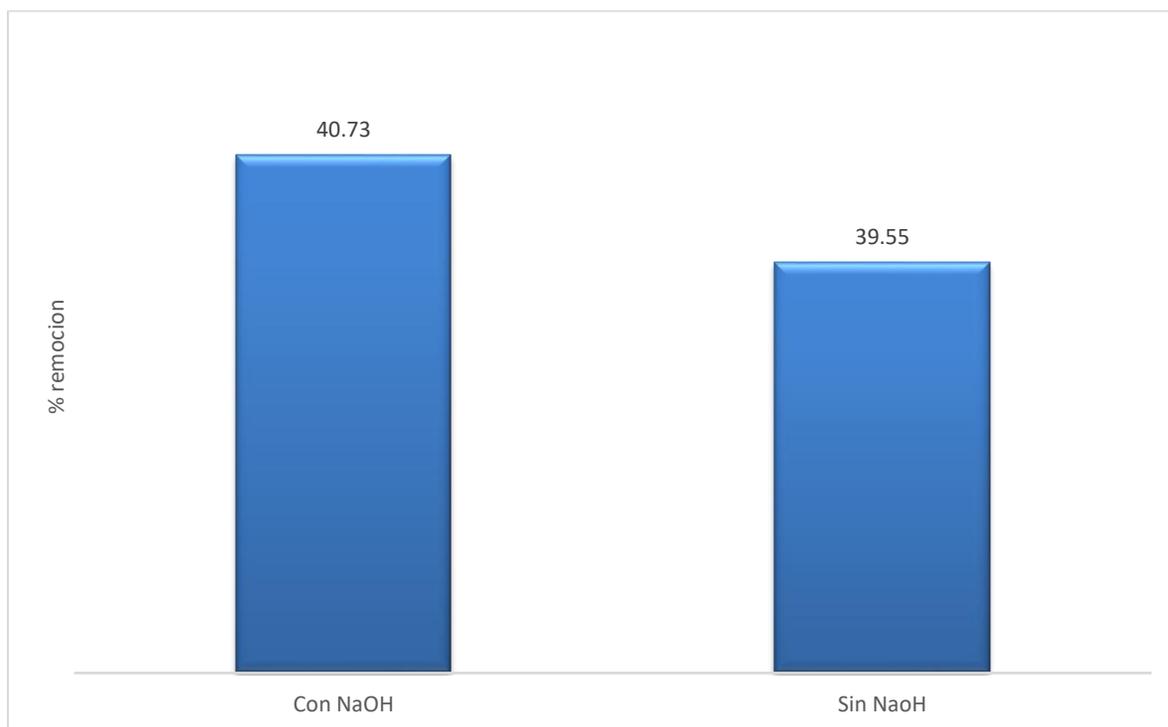


Figura 32. Comparación de tratamientos para la activación química