



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y  
TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES**

## **Cinética De Degradación De Paracetamol E Identificación De Subproductos En Medio Acuoso Mediante Electro Oxidación**

**Tesis**

**Que para obtener el grado de Maestría En Ingeniería Ambiental y Tecnologías  
Sustentables presenta**

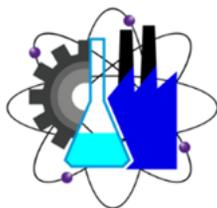
**Ing. Monserrat Paredes Medina**

**Director de tesis**

**Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña**

**Codirector**

**Dra. Irene Iliana Ramírez Bustos**



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

Cuernavaca, Morelos

noviembre del 2022

**Tesis**

**Cinética De Degradación De Paracetamol E Identificación De Subproductos En  
Medio Acuoso Mediante Electro Oxidación**

**Que presenta**

Ing. Monserrat Paredes Medina

**para realizar estudios de maestría**

**Comité revisor**

**Director**

Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña

**Codirector**

Dra. Irene Iliana Ramírez Bustos

**Secretario**

Dra. Areli Rizo Aguilar

**Vocal**

Dra. Josefina Vergara Sánchez

Este proyecto se realizó en el Laboratorio de Química Analítica y Ambiental del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, bajo la asesoría del Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña y con la co-asesoría de la Dra. Irene Iliana Ramírez Bustos con el apoyo financiero del Programa de Becas Nacionales de Posgrado, otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

## CONTENIDO TEMÁTICO

### ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1 PARACETAMOL.....	7
2.2 AGUA .....	8
2.2.2 CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	9
2.3.3 TRATAMIENTO PRIMARIO.....	10
2.3.4 TRATAMIENTO SECUNDARIO .....	10
2.3.5 TRATAMIENTO TERCIARIO O AVANZADO .....	10
2.4 LA ELECTROQUÍMICA.....	11
2.4.1 REACCIONES REDOX.....	12
2.4.2 ELECTRO-OXIDACIÓN .....	14
2.4.3 PROCESOS ELECTROQUÍMICOS DIRECTOS .....	15
2.4.4 PROCESOS ELECTROQUÍMICOS INDIRECTOS .....	16
2.4.5 APLICACIÓN DE LA ELECTROXIDACIÓN EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES .....	17
2.5 SUBPRODUCTOS DE LA DEGRADACIÓN.....	17
2.6 CROMATOGRAFÍA.....	17
2.7 ESPECTROMETRÍA DE MASAS.....	18
2.8 DETECCIÓN DE LOS IONES Y PRODUCCIÓN DE LA CORRESPONDIENTE SEÑAL ELÉCTRICA.....	20
2.9 IONIZACIÓN POR ELECTROSPRAY (ESI).....	20
2.10 IONIZACIÓN QUÍMICA (APCI).....	22
2.11 ESPECTROS DE MASA MOLECULAR.....	22
2.12 ACOPLAMIENTO CROMATOGRAFIA DE LÍQUIDOS DE ALTA RESOLUCIÓN- ESPECTROMETRÍA DE MASAS (CLAR-EM).....	23
2.13 CINÉTICA QUÍMICA.....	25
2.13.1 REACCIONES DE ORDEN CERO .....	26
2.13.2 REACCIONES DE PRIMER ORDEN.....	28
2.13.3 REACCIONES DE SEGUNDO ORDEN .....	29
2.13.4 DETERMINACIÓN DE LOS ÓRDENES DE REACCIÓN Y CONSTANTES DE VELOCIDAD .....	32

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACION .....	32
4. JUSTIFICACIÓN.....	32
5. HIPÓTESIS .....	33
6. OBJETIVOS.....	33
6.1 GENERAL.....	33
6.2 ESPECÍFICOS.....	33
7. METODOLOGÍA.....	33
7.1 OBTENCIÓN DE MUESTRA .....	33
7.2 DEGRADACIÓN DE PARACETAMOL MEDIANTE CELDA ELECTROQUÍMICA .....	34
7.3 CLAR-EM.....	34
7.4 REALIZACIÓN DE LA CINÉTICA.....	35
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
8.1 SELECCIÓN DE LA MAYOR LONGITUD DE ONDA PARA EL PARACETAMOL .....	35
8.2 CINÉTICA DE DEGRADACIÓN .....	42
8.3 IDENTIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS.....	44
9. CONCLUSIONES.....	46
10. PERSPECTIVAS .....	46
11. BIBLIOGRAFÍA.....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Molécula de paracetamol (Candela, 2017).....	8
Figura 2. Molécula de agua (Ondarse, 2021).....	9
Figura 3. Esquema de una celda electroquímica y reacción que se lleva a cabo (Hurley y Masterton, 1997). .....	12
Figura 4. Esquema de mecanismo de electroxidación de una celda electroquímica (Mollah <i>et al.</i> , 2004). 15	
Figura 5. Fase de los componentes durante la cromatografía (Olguín y Rodríguez, 2004). .....	18
Figura 6. Cono de Taylor (Meixueiro, 2016).....	21
Figura 7: Esquema del proceso de ionización química a presión atmosférica (Academic Institutional Research, 2016) .....	22
Figura 8. Esquema de un cuadrupolo simple (Academic Institutional Research, 2016) .....	24
Figura 10. Grafica de reacción de orden cero.....	27

Figura 11. Grafica de reacción de primer orden .....	28
Figura 12. Grafica de reacción de segundo orden.....	29
Figura 13. Muestra de paracetamol en agua .....	33
Figura 14. Celda electroquímica.....	34
Figura 15. Espectro de UV para la detección de paracetamol. ....	35
Figura 16. Ejemplo de un cromatograma obtenido para el estándar de paracetamol antes de ser sometido a la degradación. ....	36
Figura 17. Cromatograma de paracetamol a los 20 minutos de ser sometido a la degradación. ....	36
Figura 18. Cromatograma de paracetamol a los 40 min de ser sometido a degradación.....	37
Figura 19. Cromatograma de paracetamol a los 60 minutos de ser sometido a degradación. ....	37
Figura 20. Cromatograma de paracetamol a los 80 minutos de ser sometido a degradación. ....	38
Figura 21. Cromatograma de paracetamol a los 100 minutos de ser sometido a degradación. ....	38
Figura 22. Cromatograma de paracetamol a los 120 minutos de ser sometido a degradación. ....	38
Figura 23. Cromatograma de paracetamol a los 140 minutos de ser sometido a degradación. ....	39
Figura 24. Cromatograma del paracetamol a los 160 minutos de ser sometido a degradación.....	39
Figura 25. Cromatograma de paracetamol a los 180 minutos de ser sometido a degradación. ....	39
Figura 26. Gráfica del porcentaje de degradación de paracetamol en un tiempo de 180 minutos. ....	41
Figura 27. Grafica de cinética de primer orden. ....	43
Figura 28. Grafica de cinética de segundo orden.....	43
Figura 29. Grafica de cinética de orden cero. ....	44
Figura 30. Espectro de masas para los subproductos observados en la degradación de paracetamol. ....	45
Figura 31. Mecanismo de degradación del paracetamol (Villota <i>et al.</i> , 2014)	45

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un creciente interés por el estudio de los contaminantes emergentes (CE), debido a su origen y naturaleza química, cuya presencia en el ambiente pueden provocar efectos negativos sobre los seres vivos (Gil *et al.*, 2012). El término de CE generalmente se utiliza para aquellos que por las concentraciones en el ambiente no se considera significativo en términos de distribución, por lo que pasan inadvertidos (Stuart, 2012). No están regulados por la legislación vigente debido al desconocimiento que se tiene de su evolución en el medio acuático y consecuencias a largo plazo, se caracterizan por los efectos para la salud humana y medio ambiente (Villota *et al.*, 2019; Jiménez y Schenone, 2018).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales que operan en México fueron diseñados para depurar sólidos, materia orgánica disuelta y nutrientes, por lo tanto, muchos compuestos tóxicos pasan el proceso de tratamiento con poca o ninguna modificación en su concentración.

Entre los fármacos más utilizados por la sociedad se encuentra el paracetamol, al entrar en contacto con los cuerpos de agua se observan efectos crónicos principalmente en organismos acuáticos, a través de la exposición a diferentes concentraciones durante un prolongado período de tiempo; estos efectos crónicos se miden por medio de los parámetros específicos tales como el índice de crecimiento o tasas de reproducción en los diferentes niveles tróficos, algas, zooplancton y otros invertebrados y peces debido a que metabolitos (NAPBQ) son más persistentes que el paracetamol (Acevedo-Barrios *et al.*, 2017). Entre las tecnologías disponibles para eliminar paracetamol del agua se encuentran (Sierra, 2018):

- Adsorción con carbón activado
- Fotocatálisis heterogénea
- Radiación gamma
- Proceso foto electro fenton

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 PARACETAMOL

El paracetamol es un fármaco con propiedades analgésicas y antipiréticas, de fórmula molecular  $C_8H_9NO_2$  y denominación N-(4- hidroxifenil) acetamida ó N-(4-hidroxifenil) etanamida. Según la IUPAC, es una molécula orgánica que consta de un anillo de benzeno con una sustitución por un grupo hidroxilo y un nitrógeno perteneciente a un grupo amida (acetamida) en las posiciones para (1,4), como se muestra en la Figura 1 (Candela, 2017).

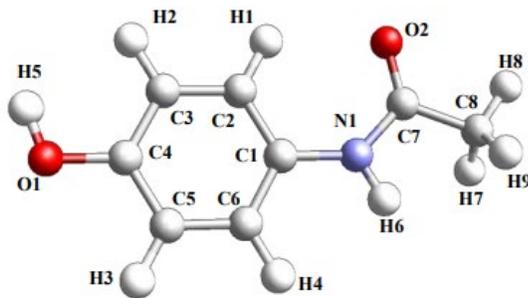


Figura 1. Molécula de paracetamol (Candela, 2017).

## 2.2 AGUA

El agua es una sustancia líquida desprovista de olor, sabor y color, que existe en estado más o menos puro en la naturaleza y cubre un porcentaje importante (71%) de la superficie del planeta Tierra. Es bastante común en el Sistema Solar y el universo, aunque en forma de vapor (su forma gaseosa) o de hielo (su forma sólida). En nuestro planeta, el agua se encuentra contenida principalmente en los mares y océanos (96.5 %), en los glaciares y casquetes polares (1.74 %) y en depósitos acuíferos y permafrost (1.72 %). El resto del agua del planeta (0.04 %) queda repartido entre lagos, humedad de los suelos, vapor atmosférico, embalses, ríos y en el cuerpo de los seres vivos (Mazari, 2003).

El agua del planeta se encuentra sometida a un ciclo natural conocido como el ciclo hídrico o hidrológico, en el cual del estado líquido se evapora por acción del sol y asciende a la atmósfera en forma gaseosa, luego se condensa en las nubes y vuelven a precipitarse al suelo como lluvia. Este ciclo es vital para la estabilidad climática y biológica del planeta (Del Valle, 2010).

### 2.2.1 COMPOSICIÓN DEL AGUA

Una molécula de agua contiene únicamente dos elementos: un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno ( $H_2O$ ) enlazados covalentemente. Esto se descubrió en 1782 gracias al químico Henry Cavendish, pues desde épocas antiguas se pensaba como un elemento. Tiene una estructura no lineal. Sus dos átomos de hidrógeno se encuentran enlazados al átomo de oxígeno y forman un ángulo de  $104.5^\circ$  entre sí; esta distribución, sumado al alto valor de electronegatividad del átomo de oxígeno, genera la formación de un dipolo eléctrico que determina la polaridad del agua (Figura 2). El agua es considerada como el disolvente universal, pues la mayoría de las sustancias pueden disolverse en ella. Estas sustancias son polares y llamadas hidrófilas. Por otra parte, las sustancias no polares (apolares), como el aceite o la gasolina, son llamadas hidrófobas y no se disuelven en agua (Ondarse, 2021).

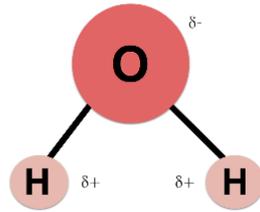


Figura 2. Molécula de agua (Ondarse, 2021).

### 2.2.2 CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La falta de planeación y el desconocimiento de las posibles consecuencias de un mal aprovechamiento de los recursos naturales traen consigo la contaminación del ambiente. La contaminación del agua es cualquier cambio químico, físico o biológico en su calidad generando efectos adversos al ambiente y a la salud humana, sin embargo, ha sido fuertemente afectado por sustancias cada vez más agresivas y difíciles de tratar debido a su naturaleza química de sustancias presentes en residuos que caen a las corrientes (Guadarrama-Tejas *et al.*, 2016)

Los principales responsables de la contaminación de los cuerpos de agua son el crecimiento demográfico, la urbanización y la industrialización. (Castañeda *et al.*, 2018), siendo los principales contaminantes del agua los agentes patógenos, compuestos demandantes de oxígeno, sustancias químicas orgánicas e inorgánicas (Guadarrama-Tejas *et al.*, 2016).

### 2.3 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

Las etapas de tratamiento de aguas residuales están clasificadas de la siguiente manera:

- Tratamiento preliminar
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario
- Tratamiento avanzado o terciario
- Desinfección
- Disposición de lodos
- 

#### 2.3.2 TRATAMIENTO PRELIMINAR

Este consiste en la preparación o acondicionamiento de las aguas residuales con la finalidad de eliminar o reducir las condiciones indeseables relacionadas principalmente con la apariencia estética de las plantas de tratamiento como, por ejemplo (Díaz, 2013):

- Rejas y tamices
- Trituradores
- Desarenadores
- Desengrasadores
- Preaireación

### **2.3.3 TRATAMIENTO PRIMARIO**

Consiste en la remoción de una parte sustancial del material sedimentable o flotante por medios físicos o químicos, removiendo una fracción importante de la carga orgánica, entre los tipos de tratamiento primario se encuentran:

- Sedimentación primaria
- Flotación
- Precipitación química
- Floculación y filtración

### **2.3.4 TRATAMIENTO SECUNDARIO**

En este tipo de tratamiento oxida la materia orgánica eliminando contaminantes orgánicos y sólidos disueltos de menor tamaño que no fueron removidos por el tratamiento primario. Este proceso reduce o convierte la materia orgánica finamente dividida y/o disuelta, en sólidos sedimentables floculentos que puedan ser separados por sedimentación en tanques de sedimentación, entre ellos se encuentran:

1. Filtración biológica
2. Lodos activados
3. Lagunas de estabilización y aereadas

### **2.3.5 TRATAMIENTO TERCIARIO O AVANZADO**

Los tratamientos terciarios pueden ser físicos, químicos y/o biológicos, estos complementan los procesos anteriormente, los cuales ayudan a complementar los procesos anteriores con la finalidad de lograr efluentes más puros, con menor carga contaminante, algunos de los procesos como (Rojas, 2002):

- Arrastre de amoníaco
- Filtración
- Destilación
- Flotación
- Congelación
- Osmosis inversa
- Procesos electroquímicos
- Carbón activado

Entre los tratamientos terciarios se encuentran los procesos electroquímicos de oxidación avanzada que en este proyecto se abordara más a profundidad, actualmente la búsqueda de nuevos tratamientos para reducir la contaminación ambiental ha llevado a realizar investigaciones donde se considera el uso de métodos electroquímicos para transformar y remover los contaminantes de efluentes de agua,

## **2.4 LA ELECTROQUÍMICA**

La electroquímica es una rama de la química que trata acerca de la relación entre la corriente eléctrica y las reacciones químicas y de la conversión de la energía química en eléctrica y viceversa. En un sentido más amplio, es el estudio de las reacciones químicas que producen efectos eléctricos y los fenómenos químicos causados por la acción de las corrientes o voltajes (Zumdahl y Zumdahl, 2000; Masterton *et al.*, 1989; Rajeshwar e Ibañez, 1997). Los procesos electroquímicos para el tratamiento de aguas residuales involucran el uso de una celda electrolítica y un par de electrodos metálicos a través de los cuales se hace circular una corriente eléctrica; pueden ocurrir por transferencia directa del electrón de la reacción a la reducción o de la oxidación del compuesto orgánico indeseado, o por la reacción química del contaminante con las especies electrogeneradas, las cuales permanecen en la superficie del electrodo. Casi todos los métodos electroquímicos están basados en la electrolisis indirecta en la cual el contaminante es removido de la solución por las especies activas producidas reversible o irreversiblemente en el electrodo (Tarr, 2003). Estos métodos utilizan una instrumentación robusta y compacta, de fácil acceso que pueden reemplazar procesos sofisticados, ya que requieren contenedores de bajo volumen. Entre sus ventajas se encuentran: compatibilidad, versatilidad, eficiencia de energía, seguridad, selectividad, facilidad de automatización del proceso y bajos costos, que nos dan una alta factibilidad en aplicaciones ambientales (Mollah *et al.*, 2004).

### 2.4.1 REACCIONES REDOX

Los procesos electroquímicos son reacciones redox, que son aquellas en las que se transfieren electrones de una sustancia a otra. Una celda electroquímica es un dispositivo experimental para generar electricidad mediante una reacción redox (celda galvánica o voltáica). En la figura 3 se muestran los componentes de una celda galvánica.

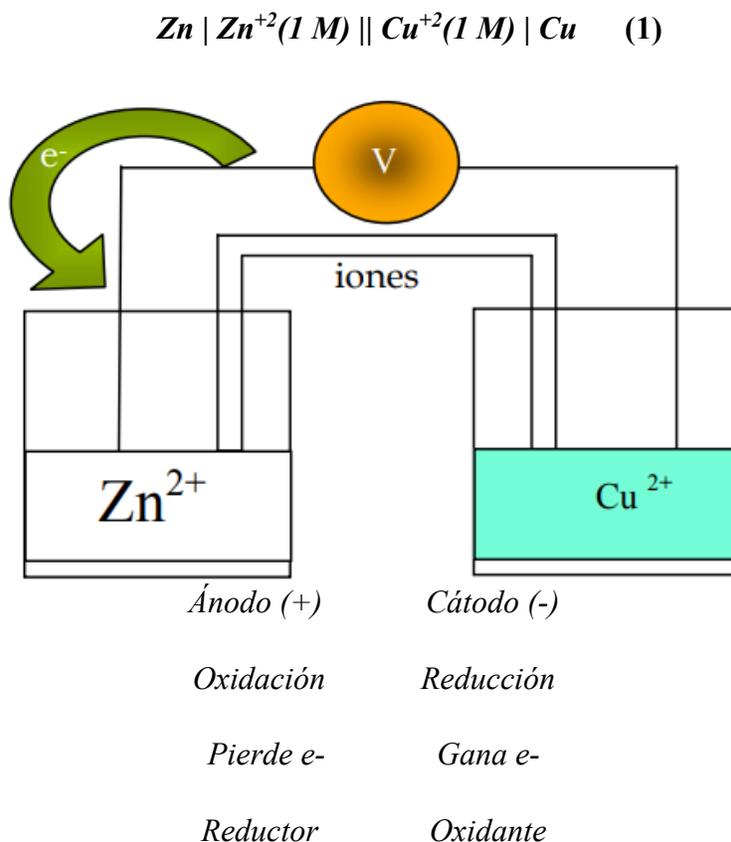
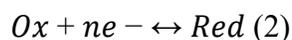


Figura 3. Esquema de una celda electroquímica y reacción que se lleva a cabo (Hurley y Masterton, 1997).

Algunos compuestos orgánicos al ser disueltos en agua se disocian en componentes cargados positiva o negativamente, lo cual tiene la propiedad de conducir la energía eléctrica, esta solución es conocida como electrolítica (Hurley y Masterton, 1997); allí ocurre la electrolisis, y este proceso consiste en forzar una corriente a través de una celda por medio de un par de electrodos para producir un cambio químico en el cual el potencial de la celda es negativo; esto quiere decir que el trabajo eléctrico genera una reacción no espontánea (Brown *et al.*, 1998).

En el cátodo tiene lugar una reducción de un ion, o de una molécula, al aceptar electrones. Entretanto en el ánodo se producen electrones debido a la oxidación de un ion o una molécula. La reacción global es la suma de las dos semirreacciones de los electrodos. Mientras se produce esta reacción, hay un flujo estacionario de iones hacia los dos electrodos. Los iones positivos (cationes) se dirigen hacia el cátodo; los iones negativos (aniones) van hacia el ánodo. La ecuación general para la reacción que ocurre en los electrodos es la siguiente (Bagotsky, 2006):



En donde:

*Ox*: es la forma oxidada del principal componente de la reacción.

*Red*: es la forma reducida del principal componente de la reacción.

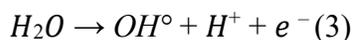
*ne<sup>-</sup>*: es el número de electrones transferidos por mol.

Para que las reacciones electroquímicas se lleven a cabo inevitablemente ocurrirá la polarización de los electrodos, la cual es definida como la desviación del potencial aplicado respecto al potencial de equilibrio por el paso de corriente. Este cambio de potencial es conocido como: *sobre potencial*, el cual puede ser controlado aumentando la conductividad de la solución, el área efectiva de los electrodos o la distancia entre ellos; por lo tanto, en las reacciones electroquímicas se da básicamente, un intercambio entre los electrones de los electrodos y los iones o moléculas de la solución, mediante la aplicación de una diferencia de potencial, que genera una corriente donde los electrones que fluyen desde el punto más negativo hasta el más positivo. Este tipo de reacciones se clasifican según el lugar donde ocurran, ya sea en la solución, que son las llamadas homogéneas o en la superficie del electrodo, llamadas heterogéneas (Hurley y Masterton, 1997). Los dos procesos más importantes que rigen el comportamiento de este tipo de reacciones son: el transporte de masa, que es el movimiento de masa desde la solución a la superficie del electrodo, debido a la diferencia del potencial eléctrico (migración), químico (difusión) y por el movimiento global del líquido, y la transferencia de electrones, que es la contribución de cada densidad de corriente parcial (anódica y catódica) a la densidad de corriente total, esta corriente de intercambio junto al *sobre potencial* afecta la velocidad de la reacción, pues a mayor corriente circulando mayor será la velocidad de reacción. (Rajeshwar e Ibañez, 1997; Goodridge y Scott, 1995).

## 2.4.2 ELECTRO-OXIDACIÓN

Los procesos convencionales para el tratamiento de aguas son ineficientes para remover o disminuir contaminantes tóxicos de bajo peso molecular y orgánicos biorecalcitrantes. En los últimos años, una gran variedad de métodos químicos, fotoquímicos y electroquímicos han sido desarrollados para tratar de solucionar este problema de manera eficiente. Estos procedimientos llamados procesos avanzados de oxidación (PAO) están basados en el uso de un fuerte agente oxidante tal como el radical hidroxilo ( $\text{OH}^\circ$ ), el cual es generado in situ en el medio de la reacción. (Oturán y Brillas, 2007). Estos son aplicados cuando las técnicas convencionales de oxidación se vuelven insuficientes por razones cinéticas o porque los contaminantes son refractarios a la oxidación química en medio acuoso o son parcialmente oxidados, dando productos en la reacción incluso con mayor toxicidad que el contaminante inicial. En contraste los radicales hidroxilos generados en PAO son capaces de desintegrar/destruir sin ser selectivo la mayoría de los contaminantes orgánicos y organometálicos hasta su completa mineralización, que equivale a su conversión a  $\text{CO}_2$ , agua y iones inorgánicos. Estos radicales reaccionan rápidamente con compuestos orgánicos principalmente, ya sea por abstracción del átomo de hidrógeno (deshidrogenación) o por adición a un enlace no saturado (hidroxilación). (Oturán y Brillas, 2007). El PAO más popular es la oxidación anódica (AO), la cual consiste en la destrucción de compuestos orgánicos en una celda electrolítica bajo la acción del radical hidroxilo formado como intermediario de la oxidación del agua a  $\text{O}_2$  en la superficie del ánodo. (Brillas et al, 2009; Oturán y Brillas, 2007)

El método electroquímico de electro –oxidación, es una técnica efectiva y limpia para la producción directa oxidación anódica (AO) o generación indirecta vía reactivo Fenton (Electro-Fenton) de radicales hidroxilos. En la oxidación anódica estos radicales son formados de la oxidación del agua (reacción 2) en el ánodo tal como un electrodo de Pt ó  $\text{PbO}_2$ .



**Oxidación anódica:** La oxidación anódica es el método electroquímico más común para la degradación de contaminantes orgánicos. Esta técnica utiliza un ánodo de sobrepotencial como Pt o PbO<sub>2</sub> para generar radicales OH<sup>•</sup> adsorbido en su superficie, en soluciones acuosas. El radical hidroxilo es un poderoso agente oxidante no- selectivo, que reacciona rápidamente con los compuestos orgánicos vía hidroxilación con la adición de un grupo hidroxilo a un enlace no saturado o vía deshidrogenación con la pérdida de un átomo de hidrógeno siguiendo un mecanismo radical hasta su total mineralización (Figura 4). Por ejemplo, la transformación de los contaminantes iniciales a dióxido de carbono, agua y iones inorgánicos (Oturán y Brillas, 2007).

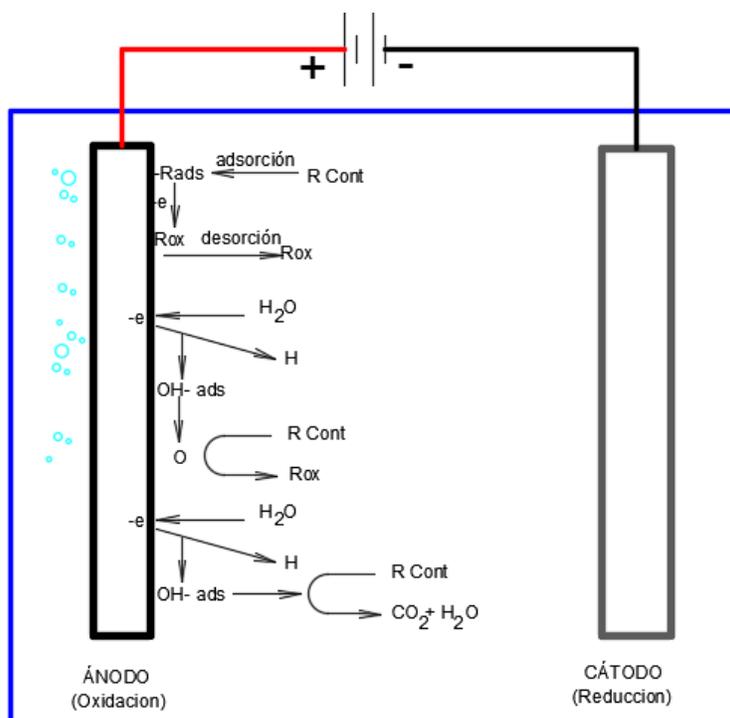


Figura 4. Esquema de mecanismo de electrooxidación de una celda electroquímica (Mollah *et al.*, 2004).

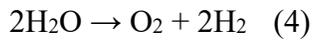
La aplicación de procesos electroquímicos para la eliminación de contaminantes emergentes y compuestos refractarios en el agua residual radica en las reacciones de oxidación que tienen lugar en el ánodo. La oxidación de estos contaminantes puede ocurrir por dos vías: oxidación directa y oxidación indirecta (Mora, 2020).

### 2.4.3 PROCESOS ELECTROQUÍMICOS DIRECTOS

Los procesos electroquímicos directos son aquellos en los que la transferencia electrónica a la especie contaminante tiene lugar directamente sobre la superficie del electrodo. Este tipo de procesos puede tener lugar mediante dos vías:

1.- Cuando la oxidación de los contaminantes presentes en agua se da sobre la superficie anódica, mediante la sustracción de electrones a esta especie para generar un nuevo compuesto químico. El contaminante puede continuar adsorbido y ser oxidado a otras especies diferentes, o bien ser des-adsorbido y pasar al líquido en tratamiento como producto final de la reacción.

2.- A través de la generación de oxígeno activo mediante la reacción anódica directa del agua a tratar:



En el primer caso, los contaminantes se dirigen desde el fluido hacia la superficie del electrodo.

La oxidación tiene lugar en dos pasos:

- a) Difusión del contaminante desde la disolución a la superficie del ánodo
- b) Oxidación de los contaminantes en la superficie del ánodo.

Por ello, la eficiencia del proceso dependerá de la relación entre la transferencia del sustrato y la transferencia de electrones en la superficie del electrodo, siendo esta última dependiente de la actividad del electrodo y de la densidad de corriente aplicada.

En la mayoría de los casos la velocidad de transferencia de materia de los contaminantes hasta la superficie del electrodo es inferior a la del proceso electroquímico (reacción superficial de oxidación), convirtiéndose la transferencia de materia en el factor limitante del proceso. Este hecho es de gran importancia ya que, si no llegan suficientes contaminantes a la superficie del electrodo, los electrones serán consumidos en la oxidación del agua para generar oxígeno, dando lugar a una pérdida de eficiencia del proceso. (García, 2012).

#### **2.4.4 PROCESOS ELECTROQUÍMICOS INDIRECTOS**

El intercambio de electrones no se produce directamente en la superficie del electrodo, sino que se produce a través de especies “mediadoras” generadas en el mismo sistema, que actúan de intermediarios para que tenga lugar el intercambio de electrones entre contaminante y electrodo. Estos procesos tienen lugar en el seno de la disolución, sobre alguna de las superficies electrónicas se generan especies oxidantes, denominadas oxidantes secundarios que posteriormente degradan a los contaminantes contenidos en el efluente. En algunas situaciones, para incrementar el rendimiento del proceso electroquímico se añade al agua, especies químicas susceptibles de actuar una vez activadas en los electrodos como oxidantes. Por lo general se añaden iones inorgánicos y metálicos, cuyo objetivo es generar agentes oxidantes enérgicos en

las superficies de los electrodos, que posteriormente oxidan a los contaminantes en todo el volumen del fluido a tratar. El mecanismo de funcionamiento es similar al de los otros procesos de oxidación convencional y avanzada y en ocasiones el agente oxidante que se emplea es el mismo. Entre los iones metálicos más utilizados se encuentran  $\text{Ag}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , entre otros (García, 2012).

#### **2.4.5 APLICACIÓN DE LA ELECTROXIDACIÓN EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES**

Entre los PAOs más utilizados para la eliminación de contaminantes emergentes se encuentra la ozonización, la fotocatalisis, la radiación UV y los procesos Fenton y foto-fenton (De Souza Santos L.V *et al.*, 2015, Chen W y otros, 2016). Recientemente, el método de oxidación por vía electroquímica para la eliminación de degradación de compuestos orgánicos ha sido muy utilizada en diversas numerosas (Domínguez *et al.*, 2012, y García *et al.*, 2017). Este método es eficiente en la eliminación de contaminantes de agua, incluso en bajas concentraciones, y no requiere de la adición de productos químicos, por lo que es relativamente económico en comparación con otros métodos (Mora, 2020).

#### **2.5 SUBPRODUCTOS DE LA DEGRADACIÓN**

La oxidación total de los materiales orgánicos disueltos, hasta su mineralización, en una solución acuosa, por cualquier oxidante es poco probable. En términos generales cualquier proceso avanzado de oxidación aplicado a moléculas orgánicas presentes en medio acuoso, genera subproductos tales como formaldehído, acetaldehído, glioxal, ácidos pirúvico, oxálico, succínico, fórmico, acético entre otros (Mingda *et al.*, 2019).

#### **2.6 CROMATOGRAFÍA**

Es un método físico de separación en el cual los componentes a ser separados son distribuidos entre dos fases, una estacionaria y otra en movimiento en una dirección definida (Olguín y Rodríguez, 2004).

Su propósito es identificar, cuantificar o purificar cada uno de los componentes de una mezcla de solutos, basándose en las velocidades con las que se mueve cada soluto a través de un medio poroso (Fase estacionaria) arrastrado por un disolvente, una mezcla de disolventes o por gas (Fase Móvil).

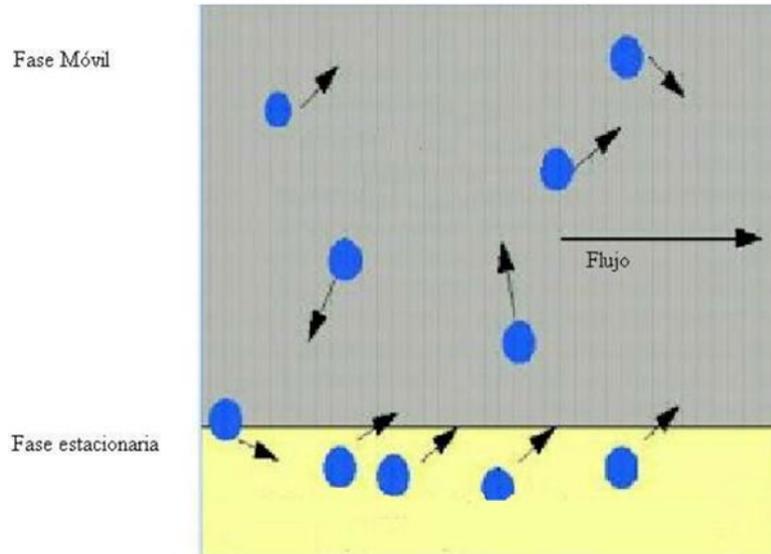


Figura 5. Fase de los componentes durante la cromatografía (Olguín y Rodríguez, 2004).

## 2.7 ESPECTROMETRÍA DE MASAS

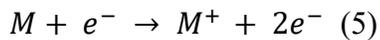
La espectrometría de masas (EM) es una técnica analítica que proporciona información tanto cualitativa (estructura) como cuantitativa (masa molecular o concentración) de las moléculas analizadas previamente convertidas en iones. Las moléculas de interés forman parte generalmente de una mezcla heterogénea que no requiere necesariamente una separación previa, y se someten en primer lugar a una fuente de ionización donde se ionizan adquiriendo carga negativa o positiva. Los iones atraviesan el analizador de masas hasta que alcanzan diferentes partes del detector de acuerdo con su relación masa/carga ( $m/z$ ). Una vez en contacto con el detector, se generan señales que son registradas en el sistema informático y representado en un espectro de masas que muestra la abundancia relativa de las señales en función de su relación  $m/z$ .

### 2.7.1 FUNDAMENTOS DE LA ESPECTROSCOPIA DE MASAS

El proceso de la espectrometría de masas comprende básicamente cuatro etapas:

- Ionización de la muestra.
- Aceleración de los iones por un campo eléctrico.
- Dispersión de los iones según su masa/carga.
- Detección de los iones y producción de la correspondiente señal eléctrica.

**Ionización de la muestra:** la ionización de la muestra se consigue por bombardeo mediante electrones (e-) según el proceso:



**Aceleración de los iones por un campo eléctrico:** Convertimos una fracción significativa de los átomos formados en la etapa 1 en un flujo de iones, generalmente positivos y de carga única. La velocidad que adquieren viene regida por la fórmula:

$$V = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (6)$$

Donde:

V: es el potencial aplicado

e: la carga del electrón

m: la masa

Cuando las partículas aceleradas se someten a la acción de un campo magnético (H) describen una trayectoria circular de radio r alrededor de este campo, desarrollando una fuerza centrífuga  $mv^2/r$ , la cual es igual a la fuerza de atracción del campo  $Hev$ .

De esto se deduce que el radio es igual a:

$$r = \sqrt{\frac{2V * m}{H^2 * 2e}} \quad (7)$$

**Dispersión de los iones según su relación masa/carga:** Basándonos en la ecuación anterior podemos calcular la relación m/e que es:

$$\frac{m}{e} = \sqrt{\frac{H^2 r^2}{2V}} \quad (8)$$

Dado que la mayoría de los iones formados en la segunda etapa tienen una sola carga y que el resto de los parámetros se mantienen constantes, la relación  $m/e$  suele ser la masa del ion. La utilidad analítica de un espectrómetro de masas depende de la resolución del instrumento, o capacidad de este para separar dos partículas de diferente masa.

## **2.8 DETECCIÓN DE LOS IONES Y PRODUCCIÓN DE LA CORRESPONDIENTE SEÑAL ELÉCTRICA**

El ordenador al que está conectado el aparato identifica (recopila), las distintas señales y las reproduce en forma de espectrograma, formato de fácil interpretación. La ionización de la muestra es clave y puede llevarse a cabo de diferentes formas: según la naturaleza de la propia muestra y lo que se pretenda detectar en el análisis. Puede efectuarse en condiciones de alto vacío, por impacto electrónico (IE), o a presión atmosférica (API, por sus siglas en inglés). En este último caso, si se trata de un análisis en fase líquida, se realizará una ionización por electrospray (ESI, por sus siglas en inglés), mientras que, si es en fase gaseosa, se efectuará una ionización química (APCI) o bien una fotoionización (APPI). Las técnicas de ionización más empleadas en el laboratorio clínico son la ESI y la ACPI.

## **2.9 IONIZACIÓN POR ELECTROSPRAY (ESI)**

Es uno de los métodos de ionización más recientemente desarrollados en espectrometría de masas. El diseño y operación de fuentes de ionización por ESI son usadas comúnmente en los espectrómetros de masas que están basados en diseños descritos por Yamashita y Fenn 1984. Este método es llevado a cabo a presión atmosférica a diferencia de otros métodos, por lo que se le conoce también como un método de ionización a temperatura ambiente (atmospheric pressure ionization API). ESI es Espectrometría de Masas ampliamente utilizado en aplicaciones de ciencias bioquímicas y biomédicas debido a su capacidad de analizar moléculas altamente polares tales como péptidos, oligonucleótidos y oligosacáridos, entre otros.

En el proceso general de ESI, que ocurre en la punta del emisor (capilar o aguja), una solución acuosa ácida o básica (dependiendo de la muestra) diluida del analito ( $10^{-4}$ - $10^{-5}$  molar) es rociada desde la punta del emisor en el cual se aplica un potencial de 3-4 kV, la solución debe proveer conductividad eléctrica que puede ser obtenida por el uso de analitos o aditivos iónicos tales como buffers o por algún grado de disociación electrolítica del disolvente. El líquido comienza a salir de la aguja, incrementa su carga y asume una forma cónica, llamada cono de Taylor, en honor a G.I. Taylor quien describió este fenómeno en 1964 (Figura 7). El líquido asume esta forma cuando incrementa su carga ya que una forma cilíndrica puede retener más carga que una esfera. En la punta del cono, el líquido cambia de forma a una línea fina, que se vuelve inestable ya que es forzado a retener más y más carga, y finalmente llega a un punto crítico donde no puede soportar más carga eléctrica y la solución entonces se dispersa en forma de niebla de pequeñas gotas (de menos de 10  $\mu$ m de diámetro) altamente cargadas que vuelan buscando una superficie de carga opuesta. Debido a que las gotas están altamente cargadas con la misma carga eléctrica se repelen fuertemente, las gotas vuelan y se dispersan cubriendo un área cada vez mayor y se van reduciendo de tamaño ya que las moléculas del disolvente se evaporan en su superficie, y la distancia entre las moléculas cargadas disminuye dramáticamente. Si la gota no encuentra donde disipar su carga, las cargas eléctricas llegan a un estado crítico y la gota explota violentamente. Este proceso fue originalmente observado por el físico John Zeleny en 1914.



**Figura 6. Cono de Taylor (Meixueiro, 2016)**

## 2.10 IONIZACIÓN QUÍMICA (APCI)

APCI: Utiliza una descarga de corriente y es un proceso en tres pasos, como se aprecia en la Figura 9.

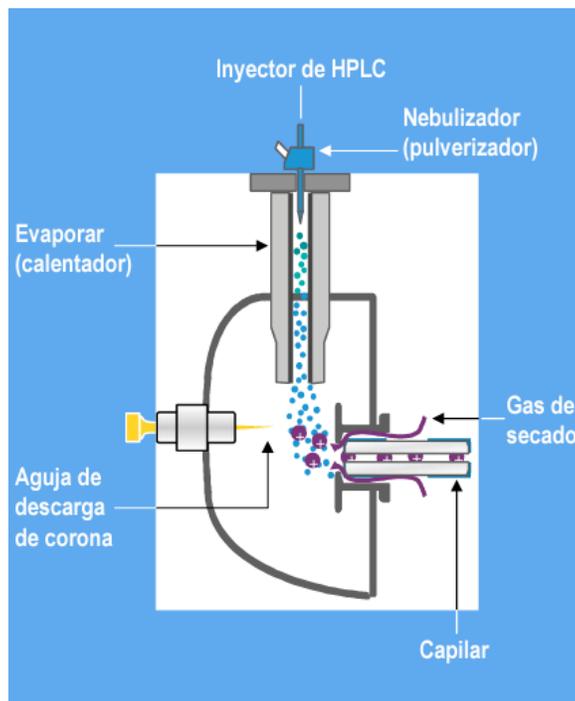


Figura 7: Esquema del proceso de ionización química a presión atmosférica (Academic Institutional Research, 2016)

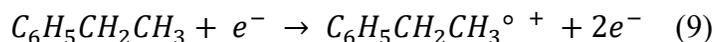
A continuación, se explican las etapas de la APCI:

- 1) Mediante un alto voltaje, se ioniza el gas nebulizante (aire o nitrógeno) formando los primeros iones.
- 2) Estos primeros iones reaccionan inmediatamente con las moléculas de disolvente formando iones reactivos.
- 3) Los iones reactivos reaccionan (por transferencia de un protón) con las moléculas del analito formando  $(M^+H)^+$  en modo positivo o  $(M^-H)^-$  en modo negativo. Como características generales, utiliza un flujo de inyección grande (0.2 – 2.0 mL/min) y se aplica a moléculas no polares, compuestos estables térmicamente, normalmente de peso molecular inferior a 1300 uma. Se requiere un gas nebulizador y una descarga de corriente para producir la ionización (APCI).

## 2.11 ESPECTROS DE MASA MOLECULAR

En la figura 10 se ilustra la forma común en que se presentan los espectros de masas. Por ejemplo, el etilbenceno, cuya masa molecular nominal es de 106 daltons (Da). Para obtener este espectro, se

bombardea el vapor de etilbenceno con un haz de electrones, lo cual origina la pérdida de un electrón del analito y la formación del ion  $C_6H_5CH_2CH_3^{\circ+}$  como se muestra en la reacción:

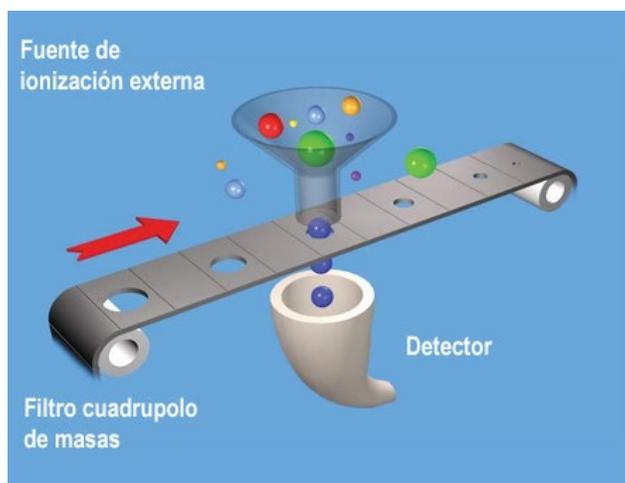


La especie cargada  $C_6H_5CH_2CH_3^{\circ+}$  es el ion molecular, el cual es un radical y tiene la misma masa molecular que la molécula. En general, el choque entre los electrones energéticos y las moléculas de analito proporcionan a éstas suficiente energía para dejarlas en estado excitado. A menudo se produce la relajación por la fragmentación de parte de los iones moleculares para dar lugar a iones de masas más bajas.

Por ejemplo, en el caso del etilbenceno, el producto principal es el  $C_6H_5CH_2^+$ , que surge de la pérdida de un grupo  $CH_3$ . También se forman otros fragmentos más pequeños, aunque en menor cantidad, con carga positiva. Los iones positivos producidos por ionización pasan a través de la rendija del espectrómetro de masas, en donde se clasifican de acuerdo con sus relaciones masa-carga y originan un espectro de masas. En la gráfica, las barras representan la intensidad relativa de los picos de masas respecto a su relación masas-carga. Al pico más alto en cada espectro, se le denomina pico base, se le asigna el valor arbitrario de 100. Se considera que la altura del resto de los picos es un porcentaje de la altura del pico base. Los espectrómetros de masas modernos están programados para identificar de manera automática el pico base; luego se normalizan los picos restantes en el espectro en relación con el pico base.

## **2.12 ACOPLAMIENTO CROMATOGRAFIA DE LÍQUIDOS DE ALTA RESOLUCIÓN- ESPECTROMETRÍA DE MASAS (CLAR-EM)**

El espectrómetro de masa cuadrupolar es probablemente el analizador de masas más utilizado, ya que además de su alto desempeño analítico combina facilidad de uso. Este tipo de analizador está compuesto de cuatro barras organizadas paralelamente como dos grupos de dos barras conectadas eléctricamente. Una combinación de voltajes de radiofrecuencia (rf) y corriente directa (dc) son aplicados a cada par de barras, este arreglo simétrico permite producir campos hiperbólicos. Superficies diagonalmente opuestas que están conectadas juntas a fuentes de voltajes rf y dc. Los iones se extraen de la fuente de iones y son acelerados dentro del espacio central formado por el cuadrupolo a lo largo del eje longitudinal hacia el detector (Figura 11).



**Figura 8. Esquema de un cuadrupolo simple (Academic Institutional Research, 2016)**

Los sistemas de cromatografía líquida pueden acoplarse a detectores de espectrometría de masa mediante interfaces que permiten la ionización de las moléculas a presión atmosférica (API), tanto mediante el proceso de electrospray (ESI) como de ionización química a presión atmosférica (APCI). Los principales componentes de esta interfase son la cámara de “spray” (aerosol) y la región de transporte y enfocado de iones (skimmer, octapolos y lentes). Mientras la cámara de “spray” está a presión atmosférica, los componentes de transporte y enfocado de iones se encuentran localizados dentro de la región de vacío (Figura 12).

Hay cuatro zonas de vacío distintas establecidas por las bombas del instrumento que crean un flujo desde la zona a presión atmosférica hacia el interior del espectrómetro de masa y aseguran la transmisión y detección eficiente de iones (Brucker, 2006).

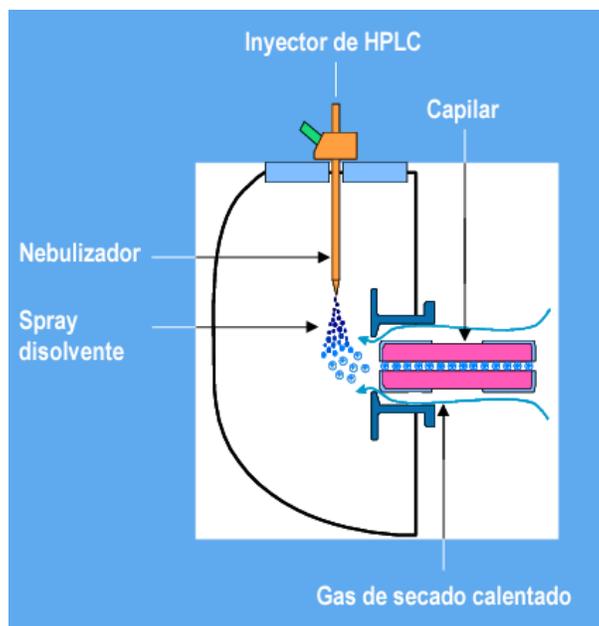


Figura 9. Cámara de spray (Academic Institutional Research, 2016).

### 2.13 CINÉTICA QUÍMICA

La química se puede dividir de manera arbitraria en el estudio de:

- Estructuras: las cuales están descritas en forma precisa por la mecánica cuántica
- Equilibrios: fenómenos de equilibrios por la mecánica estadística y la termodinámica
- Velocidades de reacción: área de la cinética

La cinética química estudia las velocidades de las reacciones químicas (que incluye tanto cambios de enlaces covalentes como no covalentes) y explorar las leyes que rigen el cambio de la composición de un sistema en el tiempo y su relación con las variables que definen su estado, en particular, con la presión, temperatura y la composición.

Para describir la velocidad de una reacción, se debe conocer la concentración, ya sea de un reactivo o un producto a distintos tiempos conforme procede la reacción, la velocidad puede expresarse en términos de la velocidad a la que desaparece uno de los reactivos:

$$-\frac{\Delta[A]}{\Delta t} = -\frac{\Delta[B]}{\Delta t} \quad (10)$$

O bien, a la velocidad que aparece uno de los productos:

$$\frac{\Delta[C]}{\Delta t} = \frac{\Delta[D]}{\Delta t} \quad (11)$$

Una vez que se ha establecido la estequiometría de una reacción, la primera tarea de la cinética química es establecer la reacción global y como se descompone en sus reacciones elementales. Los estudios de velocidad determinan los efectos de las diversas variables posibles:

- Temperatura
- Presión
- Concentraciones de los reactivos
- Fuerza iónica
- Disolvente
- Efectos de las superficies

La ecuación de la velocidad de reacción se expresa de la siguiente forma:

$$V = k [A]^m [B]^n \quad (12)$$

En donde:

K: se refiere a la constante de velocidad y es en función de la temperatura

m: es el orden de la reacción con respecto al reactivo A

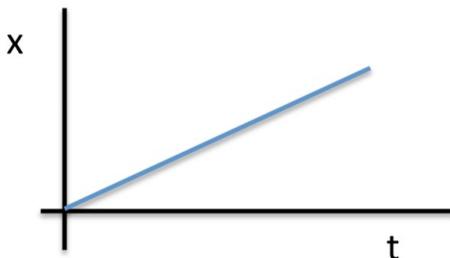
n: el orden con respecto al reactivo B (Moreno, s.f).

La rapidez de una reacción es proporcional a las concentraciones de los reactantes elevadas a una potencia, a esta potencia se le denomina orden de reacción.

### 2.13.1 Reacciones de orden cero

En las reacciones de orden cero, la rapidez es constante e independiente de la concentración del reactante a cualquier tiempo.

Para saber si una reacción sigue una cinética de orden cero, es necesario trazar una gráfica de  $x$  en función del tiempo que dé como resultado una línea recta con pendiente igual a  $K$  y ordenada al origen de cero como la que se muestra a continuación:



**Figura 10. Grafica de reacción de orden cero**

Otro método para conocer la constante de rapidez de reacción es por medio de su tiempo de vida media ( $t_{1/2}$ ) que se define como el tiempo necesario para que desaparezca la mitad del reactante original.

La ley de velocidad, a la que responde será:

$$v = k[A]^0 = k \quad (13)$$

Teniendo en cuenta que la velocidad la podemos expresar como la variación de la concentración en función del tiempo, con signo negativo (dado que se refiere al reactivo):

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = k \quad (14)$$

Si reescribimos la ecuación anterior, se obtiene lo siguiente:

$$d[A] = -k dt \quad (15)$$

Las reacciones de orden cero se encuentran más frecuentemente en reacciones heterogéneas en superficies. La velocidad de reacción en este caso es independiente de la concentración de la sustancia reactiva.

Al integrar la ecuación 15:

$$\int d[A] = -k \int dt \quad (16)$$

Se obtiene:

$$[A] = -kt + constante \quad (17)$$

Para determinar el valor de la constante de integración, se analiza el punto donde  $t = 0$ : el inicio de la reacción, por tanto, **la concentración es la inicial de A**. Esta concentración la denotaremos con el subíndice cero:

$$[A] = -kt + [A]_0 \quad (18)$$

### 2.13.2 Reacciones de primer orden

En las reacciones de primer orden la concentración de reactante en solución no cambia a medida que transcurre la reacción. En una reacción de primer orden se obtiene una relación sencilla entre  $t_{1/2}$  y la constante de rapidez como se muestra en la siguiente gráfica: (enumerarlas gráficas y figuras)

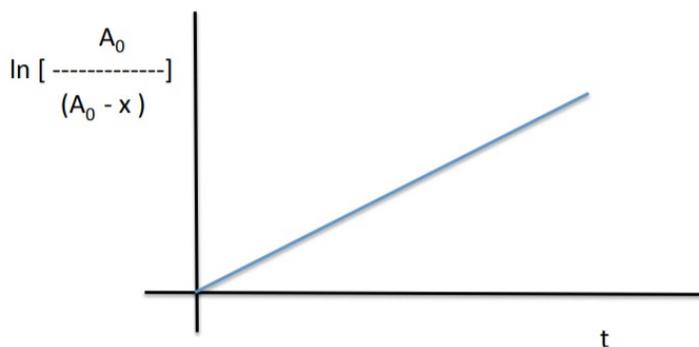


Figura 11. Gráfica de reacción de primer orden

La ley de velocidad es:

$$v = k[A]^1 \quad (19)$$

escrito de otra manera:

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = k[A] \quad (20)$$

Resolviendo la ecuación diferencial, se llega a la expresión:

$$\ln [A] = -kt + \ln[A]_0 \quad (21)$$

Las unidades de la constante de velocidad, en el caso de las reacciones de primer orden, es:  $s^{-1}$ .

De esta manera, se obtiene una ecuación que cumple con los requerimientos de la ecuación de la recta al relacionar las concentraciones y el tiempo, si en una reacción hay exceso de uno de los reactantes, de forma tal que su concentración no cambia apreciablemente a medida que transcurre el tiempo, la investigación cinética no revelara dependencia alguna de rapidez respecto a la concentración de esa sustancia siendo un resultado diferente al real llamado pseudo orden.

### 2.13.3 Reacciones de segundo orden

En las reacciones de segundo orden existen dos posibilidades: la rapidez puede ser proporcional al producto de dos concentraciones iniciales iguales, o al producto de dos concentraciones diferente, tomando en cuenta la relación entre el tiempo de vida media y la constante de rapidez de la reacción como en la siguiente gráfica:

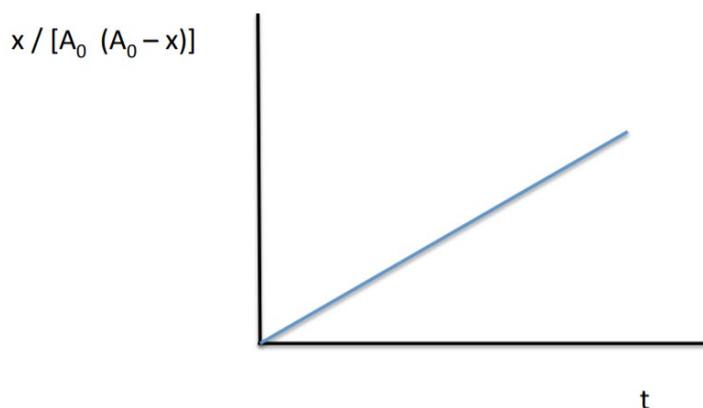


Figura 12. Grafica de reacción de segundo orden

Hay dos casos de cinéticas de segundo orden. El primer caso es una reacción entre dos especies idénticas:



La ley de velocidad para ambas será:

$$v = k[A]^2 \quad (23)$$

descrito de otra manera:

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = k [A]^2 \quad (24)$$

Resolviendo la ecuación diferencial, se llega a la expresión:

$$\frac{1}{[A]} = kt + \frac{1}{[A]_0} \quad (25)$$

Las **unidades de la constante de velocidad**, en el caso de reacciones de segundo orden, es:  $\frac{1}{Ms}$

El segundo caso es una reacción global de segundo orden entre dos especies diferentes:



Tenemos que:

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = k[A][B] \quad (27)$$

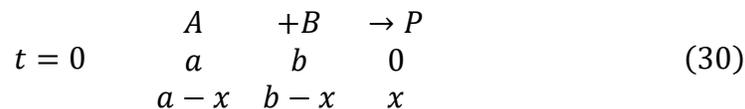
Escrito de otra manera tenemos:

$$-\frac{d[A]}{[A][B]} = kdt \quad (28)$$

Por lo tanto:

$$-\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A][B]} = \int_{t_0}^t kdt \quad (29)$$

Como A Y B varían con el tiempo, la integración se resuelve en función de la cantidad que se pierda de A y de B. Estimamos entonces:



Utilizaremos:

$$-\int_0^x \frac{dx}{(a-x)(b-x)} = \int_{t_0}^t kdt \quad (31)$$

Desarrollamos la integral:

$$-(b-x) \int_0^x \frac{dx}{(a-x)} - (a-x) \int_0^x \frac{dx}{b-x} = \int_{t_0}^t k dt \quad (32)$$

Resolviendo, tenemos que:

$$-(b-x) \text{Ln} \left( \frac{a-x}{a} \right) - (a-x) \text{Ln} \left( \frac{b-x}{b} \right) = kt \quad (33)$$

Simplificamos

$$\text{Ln} \frac{b(a-x)}{a(b-x)} = (a-b)kt \quad (34)$$

O bien:

$$\text{Ln} \frac{[B]_0[A]}{[A]_0[B]} = ([A]_0 - [B]_0)kt \quad (35)$$

Si uno de los reactivos se encuentra en exceso, por ejemplo:

Si [B] está en exceso:

$$[B] = [B]_0 = \text{constante} \quad (36)$$

La ecuación de la velocidad de reacción es:

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = k[A][B] \quad (37)$$

Entonces:

$$-\frac{d[A]}{[A]} = k [B]_0 dt = k' dt \quad (38)$$

Por lo que tenemos:

$$\text{Ln}[A] - \text{Ln}[A]_0 = k't \quad (39)$$

Despejamos Ln [A]:

$$\text{Ln} [A] = -k't + \text{Ln}[A]_0 \quad (40)$$

Donde:

$$k' = k[B]_0 \quad (41)$$

#### **2.13.4 Determinación de los órdenes de reacción y constantes de velocidad**

Existen varios métodos para la determinación de los órdenes de reacción:

- A) Métodos diferenciales. Método de velocidades iniciales
- B) Métodos integrales
- C) Periodo de semirreacción

Con las condiciones que se obtienen de manera experimental el óptimo para la determinación de los órdenes de reacción, es el método de integrales, que consta a partir de las ecuaciones integradas de velocidad de cada orden, graficar el valor dependiendo del orden de reacción de “Y” con respecto al tiempo. A partir del resultado el orden otorgado será para aquella que cumpla la mayor linealidad en el rango graficado, dicho de otra manera, aquella que posea un coeficiente de determinación más cercano a 1.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACION**

Las actividades antropogénicas que se encuentran asociadas con la industrialización y la urbanización han llevado a un deterioro acelerado de la calidad del agua en las últimas décadas. Entre los principales contaminantes se encuentran los metales pesados, los hidrocarburos aromáticos policíclicos, pesticidas colorantes y productos farmacéuticos, generando afectaciones a la salud de la población y efectos adversos en el ambiente. Por estas razones, la búsqueda de nuevas alternativas de tratamiento de agua, que sean amigables con el ambiente y altamente eficientes son una prioridad para la comunidad científica actual.

### **4. JUSTIFICACIÓN**

Los tratamientos de aguas residuales actualmente no remueven de manera eficiente los productos farmacéuticos, lo que provoca que puedan estar presentes en los efluentes de las plantas de tratamiento, en distintos cuerpos de agua e incluso en el agua potable a muy bajas concentraciones, por lo tanto, en este proyecto se pretende optimizar una metodología que garantice la degradación del paracetamol en agua mediante un reactor electroquímico.

## 5. HIPÓTESIS

La aplicación de electro oxidación a pH neutro en muestras acuosas, degrada de manera eficiente el paracetamol, asimismo se podrán identificar los principales subproductos a través de la cromatografía de líquidos acoplada a espectrometría de masas.

## 6. OBJETIVOS

### 6.1 GENERAL

- Evaluar la cinética de degradación del paracetamol en agua mediante la aplicación de una celda electroquímica.

### 6.2 ESPECÍFICOS

- Optimizar las condiciones electroquímicas para la degradación del paracetamol a pH neutro.
- Optimizar las condiciones cromatográficas para la detección del paracetamol y los subproductos.
- Evaluar la cinética de degradación.
- Identificar los subproductos observados después del proceso de degradación.

## 7. METODOLOGÍA

### 7.1 OBTENCION DE MUESTRA

Se preparó una muestra de paracetamol en agua tomada del grifo (pH = 6.8), este se obtuvo a partir de una tableta comercial a una concentración de 650 mg/L, la tableta se pulverizó con un mortero, posteriormente se disolvió en agua y se agitó hasta que se disolviera completamente, finalmente se realizó una extracción por ultrasonido a temperatura ambiente, y se filtró.



Figura 13. Muestra de paracetamol en agua

## 7.2 DEGRADACIÓN DE PARACETAMOL MEDIANTE EL USO DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA

Para la degradación se utilizaron 700mL de muestra de paracetamol obtenida previamente a una concentración de 650 mg/L. Este volumen se depositó en una celda electroquímica (Figura 14), se aplicó un voltaje de 4000 mV, se tomaron muestras de 20 mL cada 20 minutos hasta llegar a un tiempo total de 180 minutos. Posteriormente cada una de las fracciones se analizó por CLAR-EM.



Figura 14. Celda electroquímica

## 7.3 CLAR-EM

El análisis de cada una de las fracciones obtenidas se llevó a cabo en un cromatógrafo de líquidos Agilent Technologies con ionización espectrospray y cuadrupolo simple (ESI-UV-EM). Se utilizó una columna en fase reversa C18 (Symmetry, Waters Co.), la fase móvil fue acetonitrilo: agua (50:50) a un flujo de 0.5 mL/min. Para seleccionar la mejor longitud de onda se realizó un barrido con el detector de UV. Asimismo, se establecieron las condiciones en el espectrómetro de masas para lograr los principales iones de los subproductos obtenidos del proceso de degradación.

## 7.4 REALIZACIÓN DE LA CINÉTICA

Para evaluar la cinética de degradación del paracetamol, se evaluaron diversos modelos cinéticos, orden cero, orden 1 y orden 2. Para ello, se utilizó la concentración observada en los diferentes tiempos. Para el orden cero se realizó una gráfica de  $t$  vs concentración, para el orden 1,  $t$  vs  $\ln$  (Concentración) y para el orden 2,  $t$  vs  $1/\text{Concentración}$ .

## 7.5 IDENTIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS

La identificación de los subproductos se llevó a cabo mediante la comparación de los tiempos obtenidos entre la molécula de paracetamol registrada en el tiempo ( $t_0$ ) y los picos observados a partir del tiempo “ $t_1$ ”, hasta llegar al tiempo final. De igual forma, se consideraron los espectros de masas obtenidos en cada tiempo de retención, determinado en cada una de las fracciones. Los espectros de masas fueron comparados contra los espectros de masas reportados por la base de datos de referencia de la NIST (National Institute of Standards and Technology).

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1 SELECCIÓN DE LA MAYOR LONGITUD DE ONDA PARA EL PARACETAMOL

Para determinar la mejor longitud de onda para la detección del paracetamol, en primera instancia se inyectó el estándar, la absorción máxima se observó en 220.4 nm, la cual se utilizó para el análisis de todas las fracciones (Figura 15).

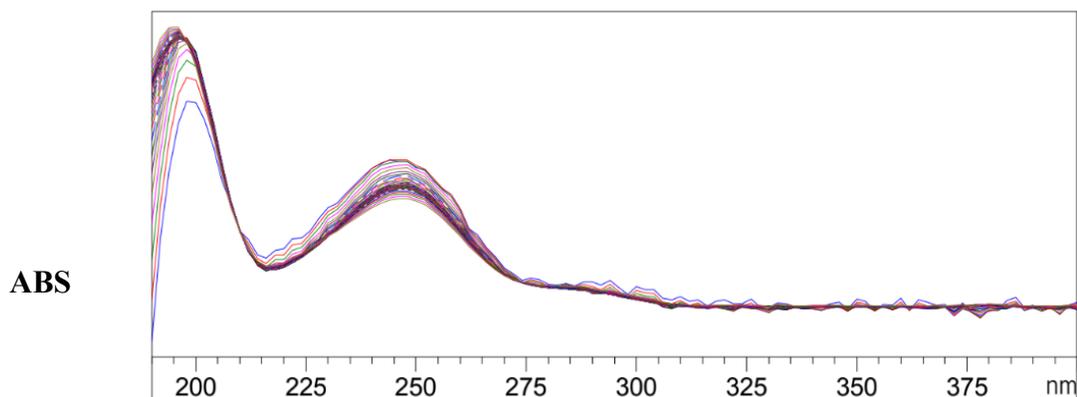


Figura 15. Espectro de UV para la detección de paracetamol.

Una vez inyectadas todas las muestras, la identificación del paracetamol se llevó a cabo mediante el tiempo de retención (tr) (Figura 16), tal como se observa el tr del paracetamol es de 4.957 minutos

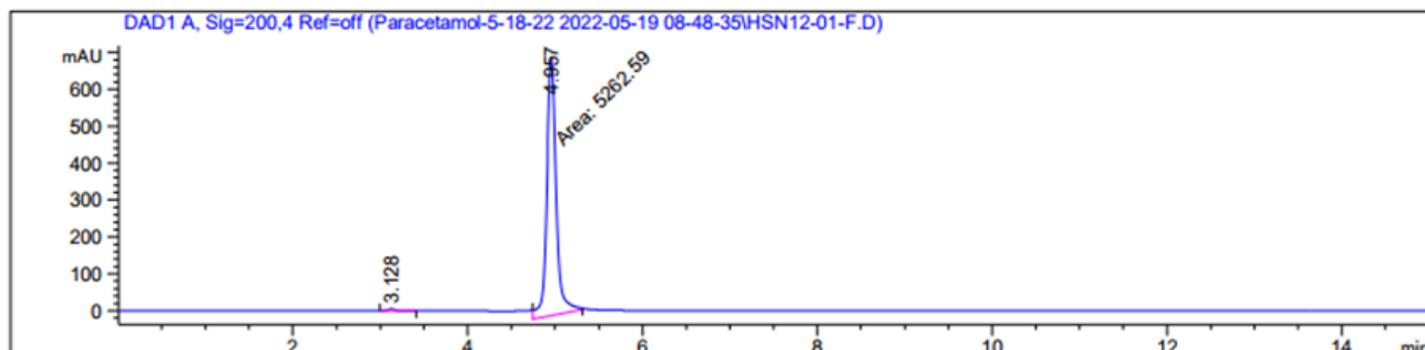


Figura 16. Ejemplo de un cromatograma obtenido para el estándar de paracetamol antes de ser sometido a la degradación.

Después de iniciado el proceso electroquímico, se observaron picos adicionales, correspondientes a los subproductos de degradación. En la figura 16 se observan tres picos adicionales al paracetamol para la muestra tomada en el minuto 20 ( $tr_1 = 4.294$ ,  $tr_2 = 4.692$  y  $tr_3 = 5.264$ ) (Figura 17).

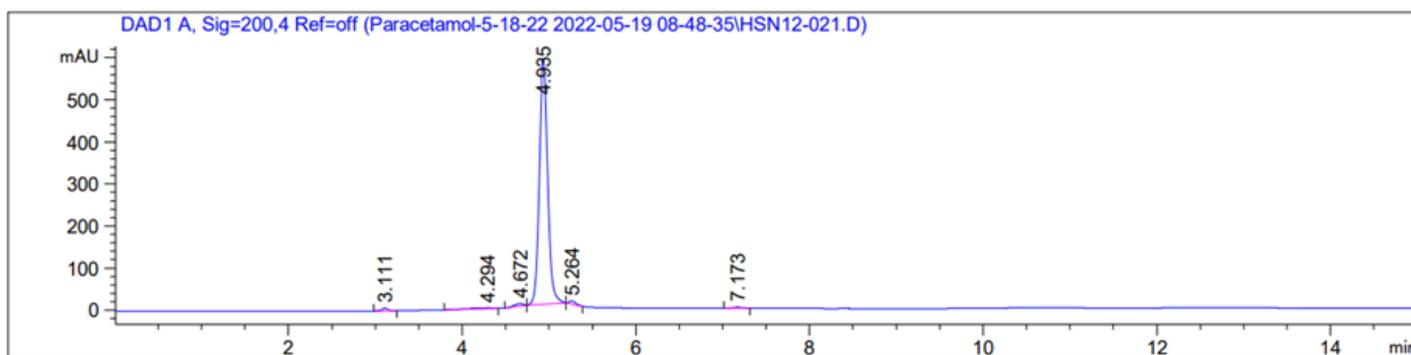


Figura 17. Cromatograma de paracetamol a los 20 minutos de ser sometido a la degradación.

Entretanto, en el minuto 40 se observan los mismos picos, pero se van pronunciando, conforme avanza la reacción, mientras que el paracetamol va disminuyendo el área bajo la curva (Figura 18,19,20,21,22,23, 24 y 25).

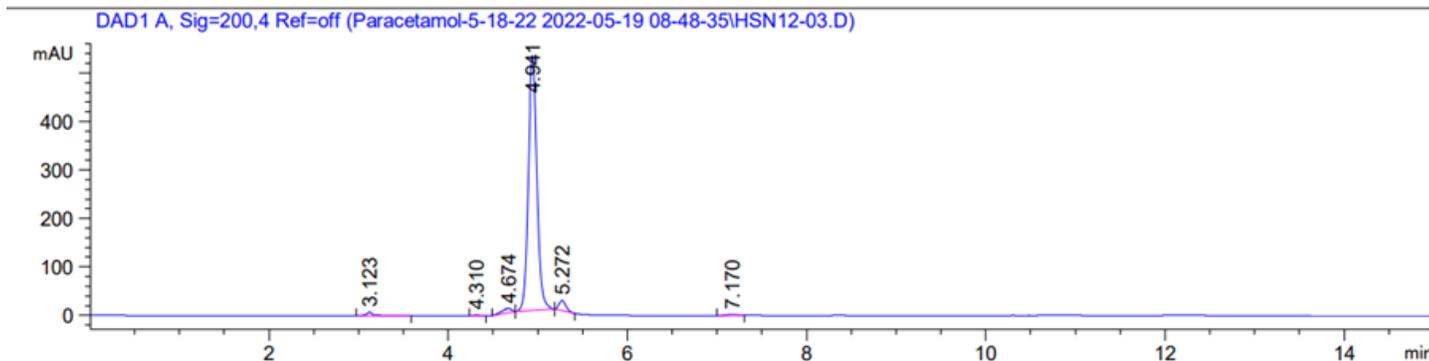


Figura 18. Cromatograma de paracetamol a los 40 min de ser sometido a degradación.

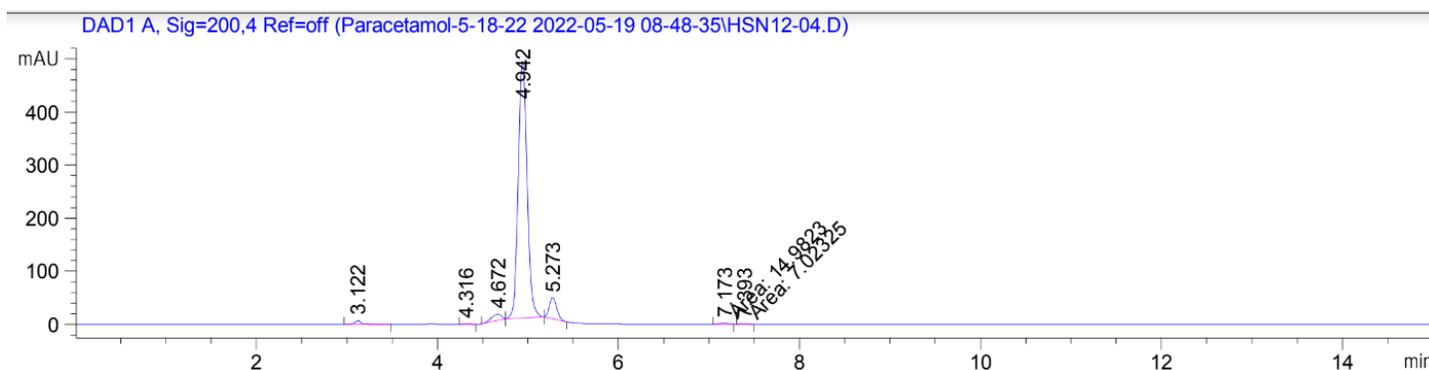


Figura 19. Cromatograma de paracetamol a los 60 minutos de ser sometido a degradación.

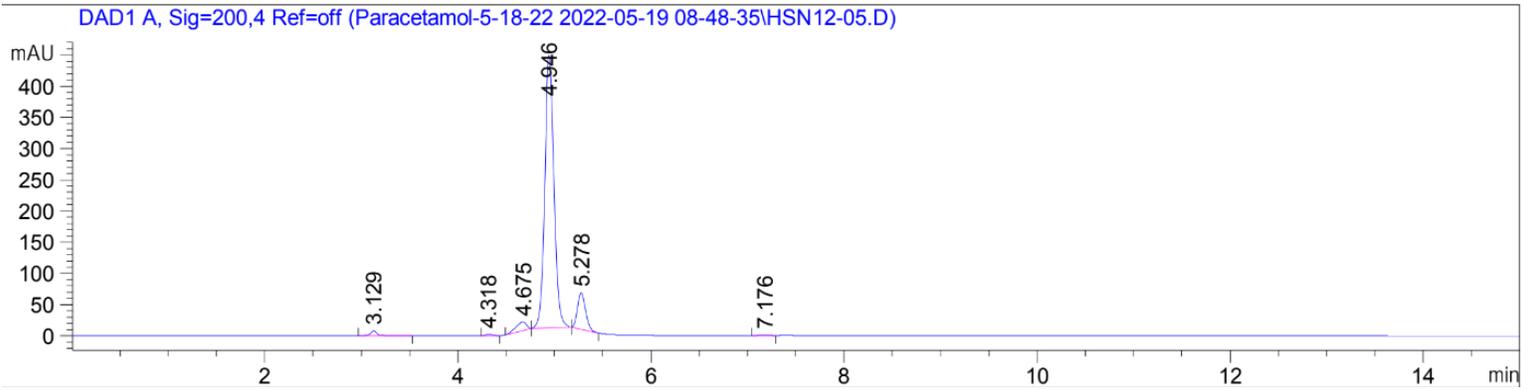


Figura 20. Cromatograma de paracetamol a los 80 minutos de ser sometido a degradación.

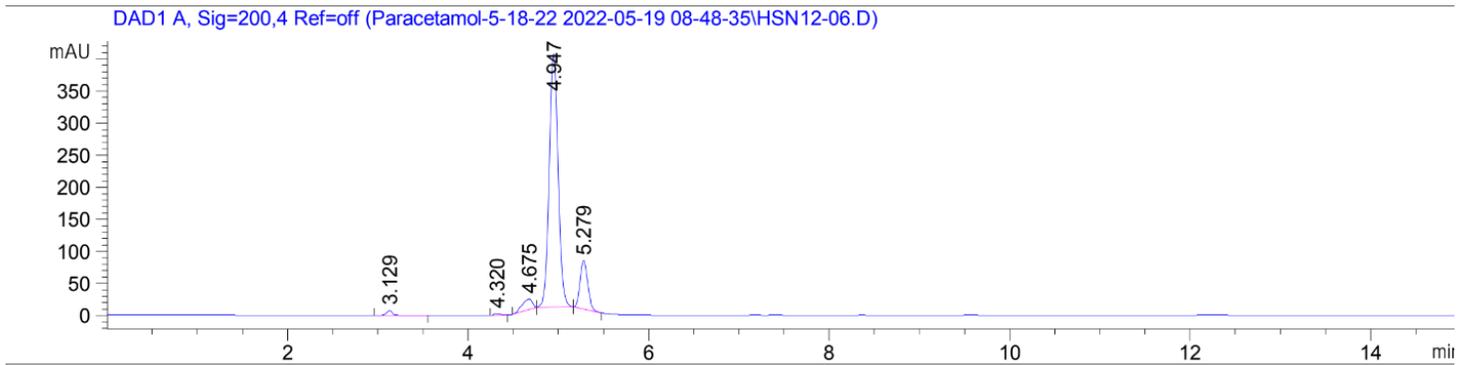


Figura 21. Cromatograma de paracetamol a los 100 minutos de ser sometido a degradación.

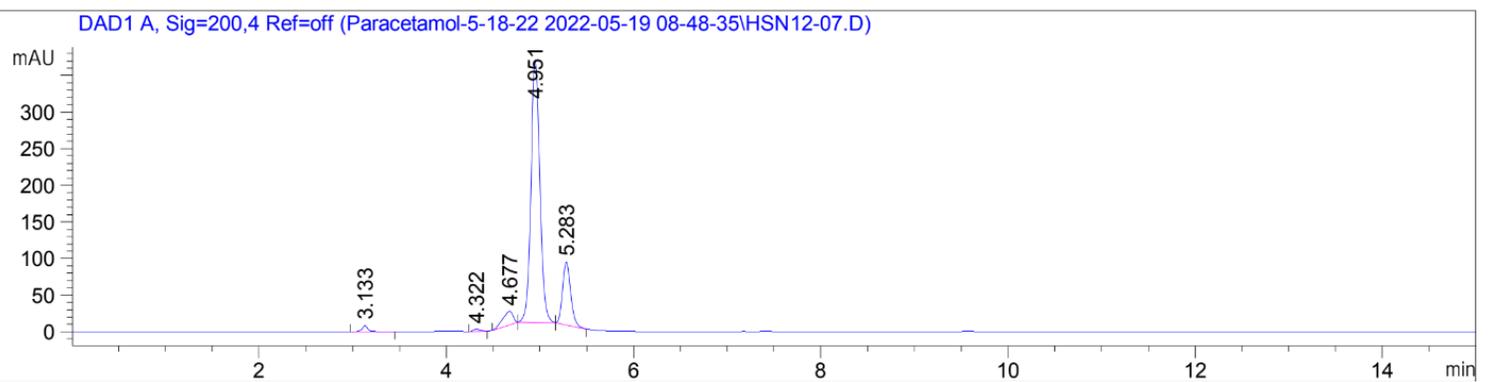


Figura 22. Cromatograma de paracetamol a los 120 minutos de ser sometido a degradación.

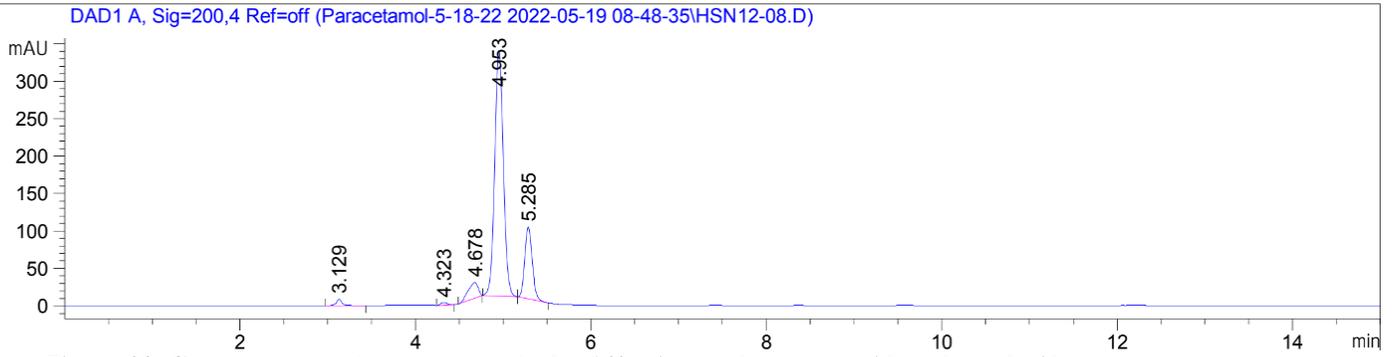


Figura 23. Cromatograma de paracetamol a los 140 minutos de ser sometido a degradación.

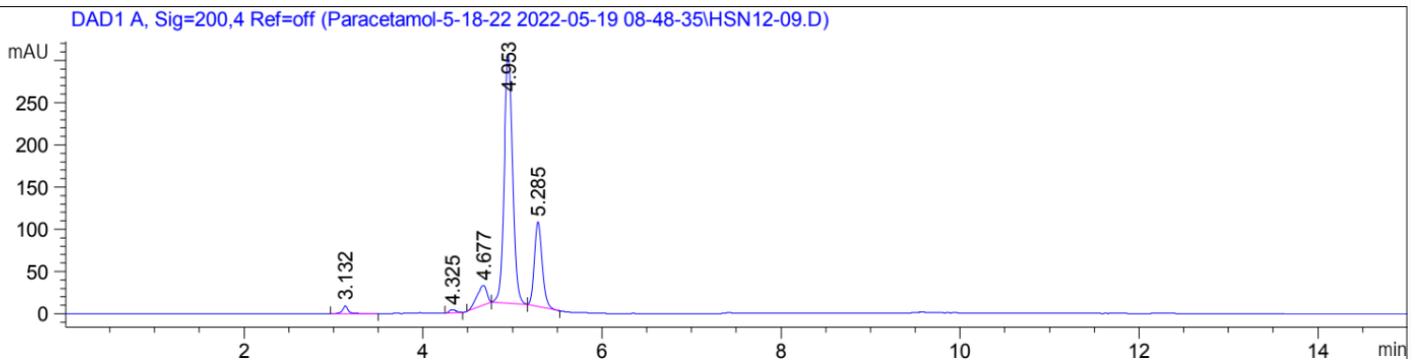


Figura 24. Cromatograma del paracetamol a los 160 minutos de ser sometido a degradación.

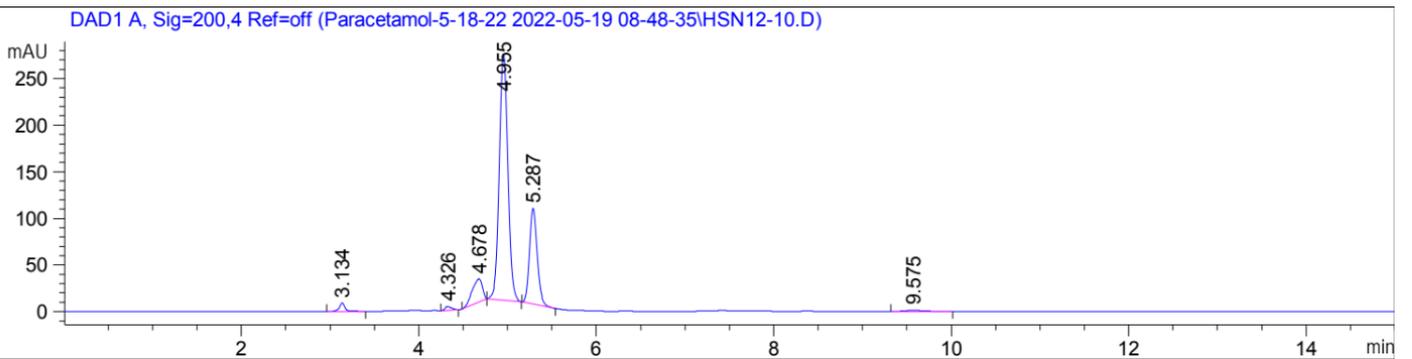


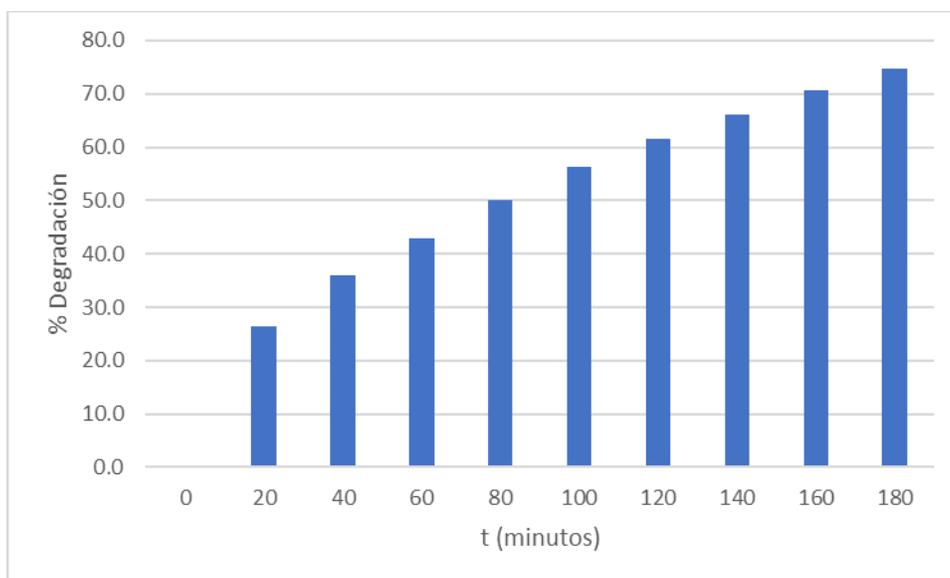
Figura 25. Cromatograma de paracetamol a los 180 minutos de ser sometido a degradación.

En tabla 1, se observa los valores observados del área bajo la curva, observada para cada uno de los tiempos de retención, asimismo se reportan las áreas corregidas por el factor de concentración. Con estos valores, se determinó el porcentaje de degradación en cada uno de los tiempos, utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Degradación} = \frac{(Area_0 - Area_t)}{(Area_0)} * 100$$

**Tabla 1. Resultados de la degradación de paracetamol.**

	<b>t</b>	<b>Área</b>	<b>Volumen</b>	<b>Factor Concentración</b>	<b>Área corregida</b>	<b>% Degradación</b>
1	0	137.9	750.0	1.000	137.9	0.0
2	20	111.9	730.0	0.973	108.9	21.0
3	40	99.7	710.0	0.947	94.3	31.6
4	60	91.1	690.0	0.920	83.8	39.2
5	80	81.7	670.0	0.893	72.9	47.1
6	100	73.7	650.0	0.867	63.9	53.6
7	120	66.9	630.0	0.840	56.2	59.2
8	140	60.9	610.0	0.813	49.5	64.1
9	160	54.1	590.0	0.787	42.5	69.2
10	180	48.4	570.0	0.760	36.8	73.3



**Figura 26. Gráfica del porcentaje de degradación de paracetamol en un tiempo de 180 minutos.**

Como se puede observar en la tabla 1 el mayor porcentaje de degradación se obtuvo en el tiempo de 180 minutos obteniendo un porcentaje de degradación de 73.3% similar al que obtuvo (Sierra, 2018) en la degradación de paracetamol mediante oxidación electroquímica que fue de 74.14 % en un tiempo de 3.5 horas. Sin embargo, fue superior a lo reportado por Cruz et al., 2016, en la degradación de paracetamol mediante radiación gama (48.9%) y He et al., 2015 (54%) utilizando oxidación anódica. Todos estos procesos de degradación se realizaron en medio acuoso.

## 8.2 CINÉTICA DE DEGRADACIÓN

Con las áreas bajo la curva obtenidos en el tiempo de retención detectado para el paracetamol, se llevó a cabo la descripción de la cinética de degradación. Para ello se evaluaron distintos modelos, cinética de orden cero, primero y segundo orden. Para evaluar la cinética de orden cero se realizó una gráfica para cada uno de los *tiempos “vs” el área bajo la curva* (Tabla 2), para la cinética de primer orden, se graficó el *tiempo “vs” el ln(área)* (tabla 3), mientras que, para segundo orden, se graficó el *tiempo “vs” 1/área* (tabla 4).

**Tabla 2: Cinética de orden cero.**

t	Área
0	137.9
20	108.9
40	94.3
60	83.8
80	72.9
100	63.9
120	56.2
140	49.5
160	42.5
180	36.8

**Tabla 3: Cinética de primer orden**

t	Área	ln Área
0	137.9	4.92619443
20	108.9	4.69054906
40	94.3	4.54693207
60	83.8	4.42807102
80	72.9	4.28970021
100	63.9	4.15757812
120	56.2	4.02901253
140	49.5	3.90192213
160	42.5	3.7500782
180	36.8	3.60534516

**Tabla 4: Cinética de segundo orden**

t	Área	1/Área
0	137.9	0.00725406
20	108.9	0.00918164
40	94.3	0.01059967
60	83.8	0.01193749
80	72.9	0.01370903
100	63.9	0.0156454
120	56.2	0.01779189
140	49.5	0.02020304
160	42.5	0.02351591
180	36.8	0.02717806

Los resultados revelan que la degradación corresponde a una cinética de primer orden, considerando el mayor coeficiente de determinación ( $r^2=0.9972$ ). Este comportamiento sugiere probablemente una mayor incidencia del radical hidroxilo ( $^{\circ} \text{OH}$ ) en la degradación del paracetamol.

Cabe mencionar, que a valores de pH cercanos a 7.0, predominan las formas desprotonadas (-) del paracetamol sobre las protonadas (+). Las formas desprotonadas en presencia de los radicales  $^{\circ} \text{OH}$ , sugieren transiciones electrónicas  $\pi-\pi^*$  fuertes, promoviendo la deslocalización de electrones en los anillos aromáticos, ocasionando la apertura de estos, para generar estructuras conjugadas o ácidos orgánicos (Litter and Quici 2010).

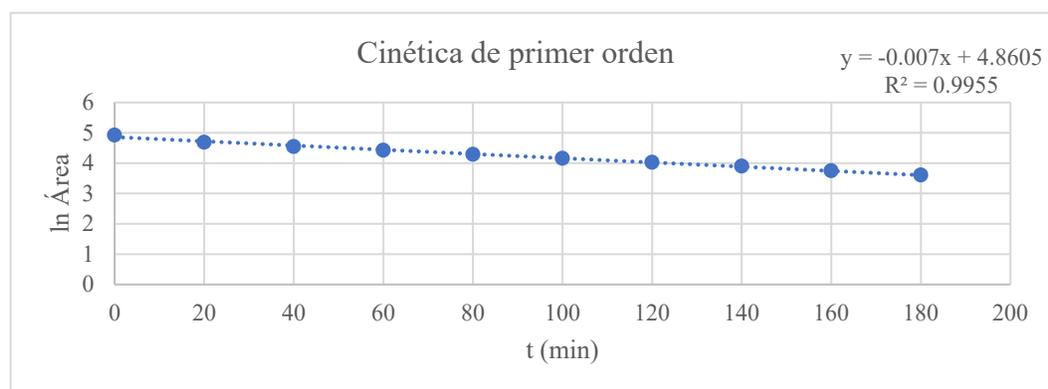


Figura 27. Grafica de cinética de primer orden.

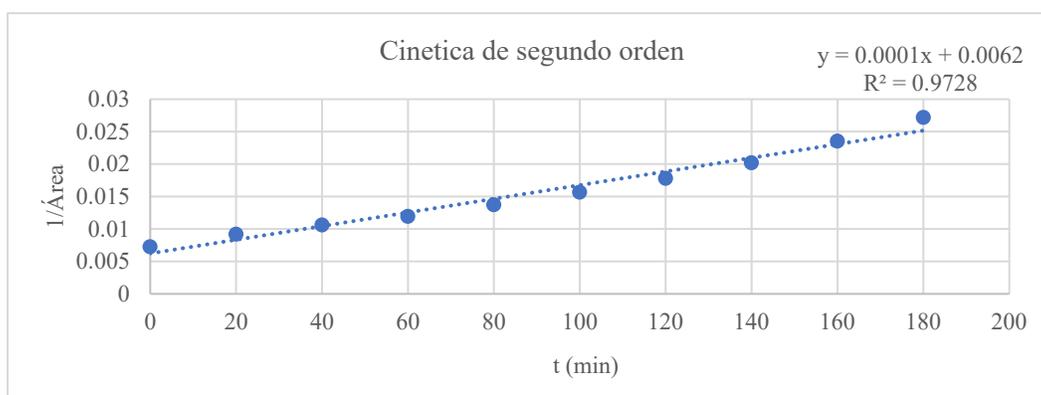


Figura 28. Grafica de cinética de segundo orden.

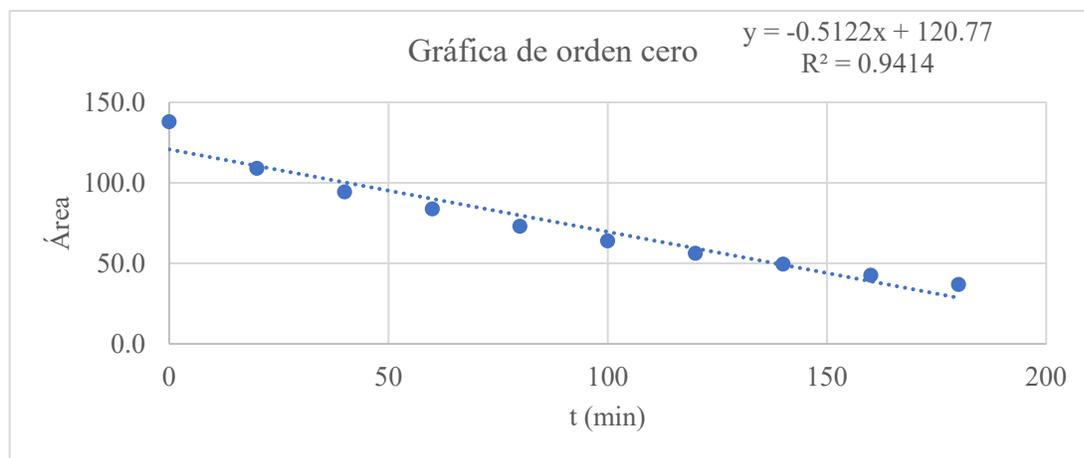


Figura 29. Gráfica de cinética de orden cero.

### 8.3 IDENTIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS

Para identificar los posibles subproductos obtenidos de la degradación, se tuvieron en cuenta los espectros de masas. En la figura 30 se observa el ion M+1 (152.1 m/z), que hace referencia al peso molecular del paracetamol y tomando en cuenta el mecanismo de degradación de este, da como resultado la generación de ciertos subproductos como se muestran en la figura 31, relacionando los pesos moleculares observados en la figura 31, se puede deducir que el ion M-1 (108.1 m/z), corresponde al 4-aminifenol, de acuerdo con (Bermeo y Bermeo, 2020) el 4-aminofenol (4-AP) es un producto de degradación del paracetamol, otro de los subproductos obtenidos es la benzoquinona el cual se observa en la gráfica con un peso molecular de (108.1m/z), lo que es congruente con lo reportado por Gómez, 2019. De acuerdo con (Rodríguez, 2020) otro de los subproductos obtenidos de la degradación de paracetamol son los ácidos carboxílicos tales como ácido fumárico con un peso molecular de (116.1m/z) y el ácido málico con un peso molecular de (134.9m/z), lo que es congruente con lo observado en nuestro estudio (figura 30).

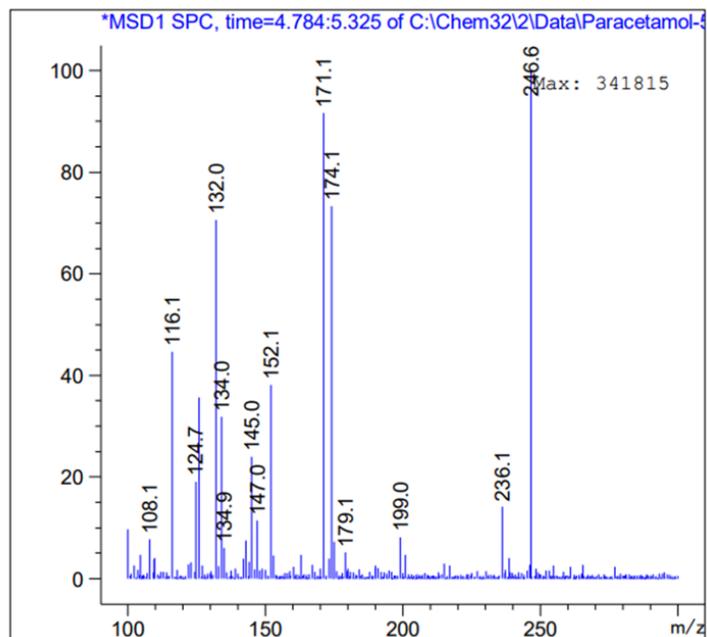


Figura 30. Espectro de masas para los subproductos observados en la degradación de paracetamol.

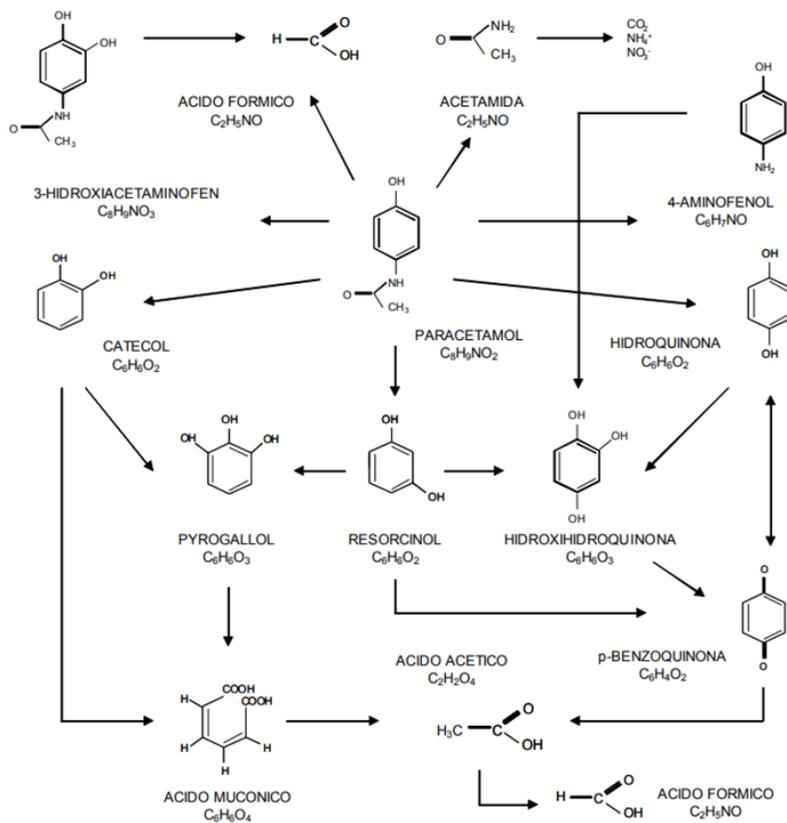


Figura 31. Mecanismo de degradación del paracetamol (Villota *et al.*, 2014)

## 9 CONCLUSIONES

El trabajo de investigación presenta las siguientes conclusiones:

- El porcentaje de degradación del paracetamol fue de 73.3 % mediante el proceso de electro oxidación.
- En este trabajo se puede concluir que la degradación del paracetamol responde a una cinética de primer orden.
- Un alto porcentaje de recuperación indica que el método se puede utilizar con éxito.
- La eficiencia de energía, la seguridad, la selectividad, la facilidad de automatización del proceso y los bajos costos dan una alta factibilidad para la aplicación de electro oxidación para la degradación de paracetamol.
- Se obtuvieron diferentes subproductos derivados de la degradación de paracetamol mediante el proceso de electro oxidación.

## 10 PERSPECTIVAS

Se sugiere realizar el método en mayor rango de tiempo para obtención de una remoción total, y de igual forma estudiar diversos valores de pH con la finalidad de identificar si con un pH que no sea el neutro se puede mejorar la remoción, de igual forma probarse el reactor con diferentes tipos de fármacos más utilizados. Realizar un análisis más profundo de los subproductos generados y considerar una reutilización para otros métodos.

## 11 BIBLIOGRAFÍA

Academic Institutional Research. (2016). Espectrometria de masas fundamentos y teoria. Agilent Technologies. Academic Institutional Research Recuperado de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.agilent.com/cs/library/slidepresentation/public/5991-5857\_Agilent\_MS\_Theory\_ES.pdf

Acevedo-Barrios, L., Severiche-Sierra, C., Jaimes, J. (2017). Efectos tóxicos del paracetamol en la salud humana y el ambiente. 2022, de universidad tecnológica de Boliva Sitio web: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1845/2064>

BAGOTSKY V.S. Fundamentals of electrochemistry, Second edition. Editorial Wiley Interscience 2006. Moscú. ISBN: 100-47170058-4

Bermeo, J & Bermeo, V. 2020 “Determinación de la relación entre 4-aminofenol del acetaminofén jarabe y las condiciones de almacenamiento en farmacias del cantón naranjito” Recuperado el 23 de Junio del 2022 (Tesis de licenciatura) UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL

Brillas, E., I. Sirés, M. A. Oturan (2009). Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton’s reaction chemistry. *Chemical Reviews*, vol. 109: 6670.

Brown, T., LeMay, H., Bursten, B. “Química la Ciencia Central”. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. México. 1998.

Bruker Daltonics User Manual. 2006. 1.

Candela, M. 2017. Resolución de la estructura cristalina del paracetamol en base a la difracción de rayos X en polvo. Tesis de grado en física. Universidad de Cantabria.

Castañeda, J. Foladori, G. León, S. Robles-Belmont, E., Záyago, E. (2018). Panorama de la investigación y desarrollo de las nanotecnologías para el tratamiento de agua en México. *Revista Posgrado y Sociedad Sistema de Estudios de Posgrado Universidad Estatal a Distancia*, 16, pp. 71-78.

Cruz, G., Rivas, I., González, K., Rapado, M., Chávez, A., Nuevas, L., and Jáuregui, U. (2016). Improving degradation of paracetamol by integrating gamma radiation and Fenton processes. *J. of Environ. Scien. and Healt., Part A*, 0(0), 1-6.

Del Valle, J. (2010). Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento de aguas. Recuperado el 12 de Julio del 2022, de Universidad Internacional de Andalucía Sitio web: [https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3632/2010\\_TratamientoAgua.pdf?sequence=1#page=8](https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3632/2010_TratamientoAgua.pdf?sequence=1#page=8)

Diaz, S. (2013) Propuesta técnica para el tratamiento primario de las aguas residuales generadas en la industria petrolera. Tesis licenciatura. UNAM.

Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción+ limpia*, 7(2), 52-73.

He, Y., Dong, Y., Huang, W., Tang, X., Liu, H., Lin, H., and Li, H. (2015). Investigation of borondoped diamond on porous Ti for electrochemical oxidation of acetaminophen pharmaceutical drug. *J.I of Electro. Chem.*, 759, 167-173.

Giménez, B., Schenone, A. (2018). Estudio de la degradación foto-Fenton del analgésico Paracetamol en agua para condiciones de pH natural. 2022, de Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC) Sitio web: [http://planificacion.bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/12753/gimnez-brbara-unl.pdf](http://planificacion.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/12753/gimnez-brbara-unl.pdf)

GOODRIDGE, F; Scott, K. Electrochemical Process Engineering: A guide to the design of electrolytic plant. 1995 Editorial Plenum press, New York. ISBN: 0-306-44794-0.

Gómez, M. (2019) ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA PARA AGUAS CONTAMINADAS. (Tesis Licenciatura) Universidad Politécnica de Catalunya.

GUADARRAMA-TEJAS, Rosendo, KIDO-MIRANDA, Juan, ROLDAN-ANTUNEZ, Gustavo y SALAS-SALGADO, Marco. (2016). Contaminación del agua. Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, 2, pp. 1-4.

HURLEY and Masterton. (1997). Chemistry Principles and Reaction. Ed. Saunders Golden Sunburst Series, 3a Edición, pp 498-525.

Mazari, M. (2003). El agua como recurso. Recuperado el 15 de marzo del 2022, de UNAM Sitio web: <http://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/54/el-agua-como-recurso#:~:text=El%20agua%20cubre%20aproximadamente%20el,y%20desarrollo%20de%20la%20vida>

Meixueiro, D. (2016) Efectos de la corriente sobre el cono de Taylor durante el electrohilado. (Tesis Licenciatura) Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

MOLLAH M. Yousuf; Morkovsky P; Gomes J.A; Kesmez M; Parga J; Cocke D.L. (2004) "Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation". Journal of Hazardous Materials. Vol B114. pp 199-210.

Moreno, A. (s.f). Cinética química. Recuperado el 23 de septiembre del 2020 de UNAM Sitio web: [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/CINETICAQUIMICA ACTUALIZADO\\_19881.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/CINETICAQUIMICA ACTUALIZADO_19881.pdf)

Nardy, J., Flores, A., Pinto de Oliveira, J., Tonani, R., Pereira, T. (2016). Green Mesocarp Coconut For Treatment of Water Contaminated With Paracetamol And Tetracycline. INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH, 5, pp. 319-323.

Olguín, L., Rodríguez, H. (2004). Métodos en biotecnología, cromatografía de gases. 2020, de UNAM  
Sitio web: [http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/met/cromatografia\\_de\\_gases.pdf](http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/met/cromatografia_de_gases.pdf)

Ondarse, D. (2021). *Agua*. Argentina. Enciclopedia concepto Recuperado de <https://concepto.de/agua/>

OTURAN, M y Brillas E. Electrochemical Advanced Oxidation Processes (EAOPs) for Environmental Applications. En: Portugaliae Electrochimica Acta 2007. Vol. 25; p. 1-18.

RAJESHWAR, Krishnan e IBANEZ, Jorge. (1997) Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement. San Diego: Academic Press.

Rodriguez, O. (2020) DEGRADACIÓN DE PARACETAMOL Y DICLOFENACO DE SODIO A PARTIR DE SISTEMAS TIPO FENTON (Tesis de Licenciatura) Universidad de Guanajuato.

Rojas, R. (2002). Gestión integral de tratamiento de aguas residuales. Recuperado el 23 de Mayo del 2022, de Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente Sitio web: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57123734/GESTION\\_INTEGRAL\\_DEL\\_TRATAMIENTO\\_AR\\_withcoverpagev2.pdf?Expires=1654123258&Signature=CYq3UTdRoaYYIFAhB1Juqms0f5e6NIwnLnmcM-OIZuu-k7IPL2UIT3b99JpDFrGibGkYsNu6g6uzmKBafI9Pk4QQz~hY5XAbGvQwyRYZNcXnzsy260PdjwMhTMqbJmMOgZ3qCtZ7qdCIOBJLmTzMbXSd36KRslvSLhWSdQAtAtpYKhgp7bt5rGZKv5TidIP32OKqH86uXLMXAeqNdeyPZC64JRrEYv2Aod4kaDFA6jWD7bdtqHeKow4kswXyPX1ahMKsJ7EmRfJXGgTTBjb32YGczRRikFZHOEBMGatDhfEx2~6G0u3kpmwd8TijZBmGbgvmi~kD1osh1CpKJw\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57123734/GESTION_INTEGRAL_DEL_TRATAMIENTO_AR_withcoverpagev2.pdf?Expires=1654123258&Signature=CYq3UTdRoaYYIFAhB1Juqms0f5e6NIwnLnmcM-OIZuu-k7IPL2UIT3b99JpDFrGibGkYsNu6g6uzmKBafI9Pk4QQz~hY5XAbGvQwyRYZNcXnzsy260PdjwMhTMqbJmMOgZ3qCtZ7qdCIOBJLmTzMbXSd36KRslvSLhWSdQAtAtpYKhgp7bt5rGZKv5TidIP32OKqH86uXLMXAeqNdeyPZC64JRrEYv2Aod4kaDFA6jWD7bdtqHeKow4kswXyPX1ahMKsJ7EmRfJXGgTTBjb32YGczRRikFZHOEBMGatDhfEx2~6G0u3kpmwd8TijZBmGbgvmi~kD1osh1CpKJw_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)

Sierra, G. (2018) “Tratamiento del n-(4-hidroxifenil) acetamida en solución acuosa mediante fotoelectrooxidación con una configuración DDB-Fe y DDB-Cu” Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma De México (UNAM)

STUART, Marianne; et al. Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. En: Science of the Total Environment. 2012. Vol. 416. p. 21

TARR, M. Chemical degradation Methods for Wastes and Pollutants. 2003. Editorial Marcel Dekker, Inc. New York p. 314 ISBN 0-8247-4307-5.

Villota N., Camarero L.M., Lomas J.M., García G. (2014) Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente. Escuela de Ingeniería de Vitoria- Gasteiz. Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU

Villota, N., Lomas, J., Camarero, L. (2019). Efecto de los parámetros de control del color del agua en un sistema foto-Fenton aplicado para oxidar paracetamol. 2022, de Dpto. Ingeniería Química y del Medio Ambiente. Universidad del País Vasco / Sitio web: [file:///C:/Users/Monserrat%20Paredes/Downloads/articulo-\\_efecto-de-los-parametros-de-control-del-color-del-agua-en-un-sistema-foto-fenton-aplicado-para-oxidar-paracetamol.pdf](file:///C:/Users/Monserrat%20Paredes/Downloads/articulo-_efecto-de-los-parametros-de-control-del-color-del-agua-en-un-sistema-foto-fenton-aplicado-para-oxidar-paracetamol.pdf)

ZUMDAHL, S y Zumdahl, S. Chemistry 5º Edición. Boston. Ediciones Houghton Mifflin Company, 2000. Pag.1140 ISBN 0-395-98581-1

Cuernavaca, Mor., a 22 de noviembre de 2022.

**DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ**  
**DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR**  
**DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA**  
**DRA. IRENE ILIANA RAMÍREZ BUSTOS**  
**DRA. ARELI RIZO AGUILAR**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta MONSERRAT PAREDES MEDINA, titulada: “CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE PARACETAMOL E IDENTIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS EN MEDIO ACUOSO MEDIANTE ELECTRO OXIDACIÓN”, realizada bajo la dirección del DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA del Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

**A T E N T A M E N T E**  
*Por una humanidad culta*

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA DE LA FCQEI**

**D I C T A M E N**

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA DE LA FCQEI**  
**P R E S E N T E**

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

**DICTAMEN**

<b>NOMBRE</b>	<b>VOTO</b>	<b>FIRMA</b>
Dra. Josefina Vergara Sánchez	APROBADO	
Dra. Mariana Romero Aguilar	APROBADO	
Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña	APROBADO	
Dra. Irene Iliana Ramírez Bustos	APROBADO	
Dra. Areli Rizo Aguilar	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ** | Fecha:2022-11-22 16:21:08 | Firmante

TyXkxSWn26DeckzJvZrDspBcSk0F4YTj3UaxZJC9yHktq2Capd1txwACYJFnOZhMijhObnUmvkhJqQD8I7ONUTiOcvTVJbmxAVdfgDpmkgnDp58jp8VX4LZ9r1dYpd6/7MJA+F9hl  
r6WZO224dFFZEzOFG4l/kLB2jnHhZ0lfGGcMVCJZchs4RfGaYE2wG6lm4Dppq/WaUelUP6DQssuq4affCLCuYzVEkGYi6NDOZqQJGjS2pCifJBRNNsEe0y8Bb4p5PegNEe/xWWK  
M6MGrhYwb2Nw+pTcALCFbiA355RnJtlvVvYXTyPMiv1IDRq+4GdQSCHEB7IGDdH1foqrctdg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[pszdGEUcM](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/hRa8tYSqUruRku1HG3hZklxXIOxAC0X>

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**JOSEFINA VERGARA SANCHEZ** | Fecha:2022-11-23 12:05:34 | Firmante

GWuCILS76sNVyd5FHyoiq8s+CVpP3GfzV87li8q4SCJeUUxsXgfhGNTwfeUuuyxRU6JO4DkCgzgsAdnbmdZi6oAZHcoM1NN2SWuhiXXDxjKzZv8qOKRs43cbXQpdOsREBK1j3Plg3KhK4wi1VuW0V0IU5S1x7cmvi4Xq+Da/zkAB8h+vJ9mtzH7gF5q4IWCvKMPR70jtsjB7zgU2ISrcz08NNIXVFPGBtD6NMa6ACF4TBr+B701jZ5zI3C+iGjumDp1So/YVVdCTed2i/8/XQbCJh1MWqIEy1KxkpAcjKX3YNzs6Rlgqy6Z4z0SFd/plWds/NrHBJ1coe/3bdOA==

**HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA** | Fecha:2022-11-23 12:10:31 | Firmante

EVVEhmw9xuer8b50P5Inc4ug9DQX8nhgC3SsYlf1euDHf3ULmY1UqCVJJP7Kp61xcinshpdXGua6R8w8mT3D59L8gQ0cDeCYuloOgkhG31vCea3kc+Wc5jEV+iHNAjD+qllsfQBIfcfno1AmThAcuf0yCy2EH0LKt+xdwuGp0Y3MPfyf0eZ52Q1zE3uX8R7V/ITKesSUulZ2HQh+V9SqiLbXGsDLU0NhW6hMcbY6c5J1ub3MhtE/8bp7YjXkr70jr8bFs15TrUIJ5O+0ZVOBEy+PY0vHmoPM+14qX9UIGgcXeu41c+DmqTLNjgzQIVtRTjKqvHNYbXjzDJ+OYUJWqA==

**MARIANA ROMERO AGUILAR** | Fecha:2022-11-23 13:14:18 | Firmante

mTujfBeQyKXhmYoVfo40zUXSL4acl+J70TZvqaRsnjBIFc8GF1rwszlrTq1mLctuxD4xZ9N2YWQdkSQ/27b3hQTQ8z7sF//VtWRR4M3cGJwsIUPpLj/jD5QSpUNNEO1luAyeA5vyDfKXjQSXde3WvC52iox4TQz9fMdcvFkrWfC8tXvRE3iXTbsLYIQRqoFIt/+bC9fWHR0fpOR6T+alrmrIzNizLP/RP+RdNESZl/8m+pQzdaRJPep8JQTnVKBf+e4QkKXFyHZCdU7gZGY10t0wf4eaRbuOHJTD0vNcMi/LdVggLISiWbutF/W44thwcnrSjcup3OBBxbeUn4HiZA==

**ARELI RIZO AGUILAR** | Fecha:2022-11-23 13:17:33 | Firmante

OMa6tFzTheiPNJLbDyeLgh/RDoflJpNtf9Hp/j8qC70WzDSvXX0tH+IO2p90UzFn03H3Okxc6NoBSNupg1mGey3ntrmDgAKjMX8NNZWWEZFDL7Bj7nc/ihSbopaFKfe14vbk9/fd09TP4jVX67gkRauHc8SL/2ezLX+uWxnnngjJHcTnOVb79g55nHUXuCO3HDWJ68zdtmjSsh27ahVQddYofly+q07rgKzI7KVCS+WtwXAM+KNPLZRYI3xxzcR5QaUg+Yk2Y5pg/9Diehq+NEWSStLyI6ACI/SFRpCkPhr/rWJOHF16gQNmiCItM6bfedLNYtAzXATe0Kdyb11Mehpg==

**IRENE ILIANA RAMIREZ BUSTOS** | Fecha:2022-11-23 21:48:49 | Firmante

cC7m8GDtwgJVX6UVgah4IIJ/vmKiDxAjg5jK72HmYAJrcvunPemMyBUXHcbQ2OMDI/i88T3qg2x4VDAMAIu0VjMMtGujFmuUgNEgj9lwrep3qYxAiA6b2ZdGZxt0th8ajd3aXLgTju8zcJAOTfEOPGWPU/w/PWmN2zD4fZHTDsFO2j81gNhMzRTY+ZRZRxx5pD46/UQtZWb8JQlyrv7jvbDKromzhnyM8UIEYfOutCLzaSd+x91C1ezHJZZTV+1wAfiJqW/iKJYE/F1VWI+8IRr+UgfiNY4Hs1pc+Qpso0ZQBKDo+evdYk/aHKZOYHOKdjY4mdLrW04def5n7Kxoxg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



SteXKDFb3

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/YR5Pz4uHxu15yD6sa8SsOJGhJ58clHf>