

# Aerobic biodegradation of Aroclor 1221, 1242 and 1254 by *Pseudomonas aeruginosa*

Brenda Grace Huamaní-Flores, Ing.<sup>1</sup>, Kónyzi Núñez-Zevillanos, Ing.<sup>1</sup>, José Antonio Villanueva-Salas, PhD<sup>1</sup>,  
Elvis Gilmar Gonzales-Condori, MSc.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Católica de Santa María, Perú, [brendagrace20@gmail.com](mailto:brendagrace20@gmail.com), [konyuz@gmail.com](mailto:konyuz@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica del Perú, [elvgonzalesc@gmail.com](mailto:elvgonzalesc@gmail.com)

**Abstract**– The use of polychlorinated biphenyls (PCBs) represents a threat to the environment and to the health of living beings, including humans. Therefore, the objective of this research was to aerobically biodegrade a mixture of PCBs using *Pseudomonas aeruginosa*. For this purpose, a biodegradation assay was developed, as well as an analytical method by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) to quantify Aroclor 1221, 1242 and 1254, which proved to be linear ( $R^2 > 0.995$ ), precise ( $CV < 2.7\%$ ), accurate with recovery percentages higher than 80 % with detection limits of 0.006, 0.02 and 0.18 mg/L and quantification limits of 0.35, 0.67 and 0.65 mg/L for Aroclor 1221, 1242 and 1254, achieving biodegradation percentages of 97.62% and 97.40% for Aroclor 1221 and 1242 respectively, these values being higher than those reported in previous studies, and 25.40% for Aroclor 1254.

**Keywords:** Polychlorinated biphenyls, Aroclor 1221, Aroclor 1242, *Pseudomonas aeruginosa*, biodegradation.

# Biodegradación aeróbica de Aroclor 1221, 1242 y 1254 por *Pseudomona aeruginosa*

Brenda Grace Huamaní-Flores, Ing.<sup>1</sup>, Kónyzi Núñez-Zevillanos, Ing.<sup>1</sup>, José Antonio Villanueva-Salas, PhD<sup>1</sup>,  
Elvis Gilmar Gonzales-Condori, MSc.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Católica de Santa María, Perú, [brendagrace20@gmail.com](mailto:brendagrace20@gmail.com), [konyuz@gmail.com](mailto:konyuz@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica del Perú, [elvgonzalesc@gmail.com](mailto:elvgonzalesc@gmail.com)

**Resumen-** El uso de bifenilos policlorados (BPC) representa una amenaza al medio ambiente y a la salud de los seres vivos incluyendo al ser humano, por lo cual, la presente investigación tuvo como objetivo biodegradar aeróbicamente una mezcla de BPC mediante el empleo de *Pseudomona aeruginosa*. Para ello se desarrolló un ensayo de biodegradación, así como un método analítico por Cromatografía Líquida de Alta Performance (HPLC) para cuantificar Aroclor 1221, 1242 y 1254 resultando ser lineal ( $R^2 > 0.995$ ), preciso ( $CV < 2.7\%$ ), exacto con porcentajes de recuperación mayores de 80 % con límites de detección de 0.006, 0.02 y 0.18 mg/L y límites de cuantificación de 0.35, 0.67 y 0.65 mg/L para Aroclor 1221, 1242 y 1254, logrando porcentajes de biodegradación de 97.62% y 97.40% para Aroclor 1221 y 1242 respectivamente, siendo estos valores mayores que los reportados en estudios anteriores, y 25.40% para Aroclor 1254.

**Palabras clave:** Bifenilos policlorados, Aroclor 1221, Aroclor 1242, *Pseudomona aeruginosa*, biodegradación.

**Abstract-** The use of polychlorinated biphenyls (PCBs) represents a threat to the environment and to the health of living beings, including humans. Therefore, the objective of this research was to aerobically biodegrade a mixture of PCBs using *Pseudomona aeruginosa*. For this purpose, a biodegradation assay was developed, as well as an analytical method by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) to quantify Aroclor 1221, 1242 and 1254, which proved to be linear ( $R^2 > 0.995$ ), precise ( $CV < 2.7\%$ ), accurate with recovery percentages higher than 80 % with detection limits of 0.006, 0.02 and 0.18 mg/L and quantification limits of 0.35, 0.67 and 0.65 mg/L for Aroclor 1221, 1242 and 1254, achieving biodegradation percentages of 97.62% and 97.40% for Aroclor 1221 and 1242 respectively, these values being higher than those reported in previous studies, and 25.40% for Aroclor 1254.

**Keywords:** Polychlorinated biphenyls, Aroclor 1221, Aroclor 1242, *Pseudomona aeruginosa*, biodegradation.

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.17>  
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

## I. INTRODUCCIÓN

Los bifenilos policlorados (BPC) son un grupo de sustancias químicas orgánicas conformados por 209 compuestos clorados que se han utilizado durante casi 100 años [1]. Su uso se ha restringido debido a su alta persistencia y en la actualidad se sabe que prácticamente todos los compartimentos del ecosistema, incluidos el aire, el agua, el suelo, los sedimentos y los organismos vivos están contaminados con BPC [2]. Debido a su estabilidad térmica y a su elevada constante dieléctrica, los BPC se han utilizado para diversas aplicaciones industriales, como lubricantes, fluidos dieléctricos y plastificantes y se estima que se han producido 1.5 millones de toneladas en todo el mundo [3]. Los BPC se caracterizan por su alta toxicidad y su capacidad de bioacumulación en la cadena alimenticia representando una importante amenaza al sistema biótico y a los ecosistemas, ya que, su presencia en alimentos puede ocasionar neurotoxicidad, carcinogénesis, toxicidad para el desarrollo y la reproducción, toxicidad dérmica, efectos endocrinos, hepatotoxicidad y la inducción enzimática de fármacos [4]. Recientes estudios han encontrado que el Aroclor 1221 pertenece al grupo de sustancias químicas disruptoras endocrinas encontrando mayor alteración en la expresión y morfología de los genes del hipotálamo en ratas [5] y a niveles ambientales el Aroclor 1254 induce la enfermedad del hígado graso no alcohólico en ratones machos [6], por otro lado, Aroclor 1242 interrumpe la reproducción en monos rhesus machos adultos (*Macaca mulatta*) [7].

Debido a la importancia de un buen manejo y tratamiento adecuado de los BPC, es necesario desarrollar tecnologías de biorremediación eficaces y de bajo costo, para así mejorar la calidad de vida como contribuir en el cuidado del medio ambiente. Además, los BPC son contaminantes ambientales difíciles de cuantificar y remediar [8]. Varias investigaciones han informado cierta eficiencia de la degradación de contaminantes orgánicos por los microorganismos ya que, se adaptan a los cambios del medio ambiente y sus diversas enzimas metabólicas suelen emplearse para la eliminación segura de los contaminantes del medio ambiente, lo cual, resulta de gran utilidad para elaborar métodos biotecnológicos más seguros y económicos para la recuperación de suelos y aguas contaminados con esos compuestos [9], generando un gran interés en desarrollar alternativas de biorremediación rentables, pese a que se reportaba que los BPC eran inalterables por los procesos biológicos, frente a esto, la

literatura actual indica que, los BPC pueden ser metabolizados significativamente por varios tipos de organismos, incluidos mamíferos, plantas, hongos y bacterias [3]. Además de tomar en cuenta el marco legal internacional aplicable a la gestión de BPC, que son el Convenio de Basilea, Convenio de Estocolmo, Convenio de Rotterdam y el Reglamento técnico para la gestión sanitaria y ambiental de los BPC, en los cuales se establece la obligación para eliminar y restringir su uso. Por lo cual, el presente estudio tuvo por finalidad degradar aeróbicamente una mezcla de bifenilos policlorados (PCBs) (Aroclor 1221, 1242 y 1254) mediante el empleo de *Pseudomona aeruginosa* como alternativa para acelerar la eliminación de estos contaminantes. Considerando también el aspecto económico es un punto importante en el desarrollo de la tecnología propuesta debido a que existen ventajas que justifican la aplicación de un método analítico por Cromatografía Líquida de Alta Performance (HPLC) con respecto al método por Cromatografía de Gases (GC) como el bajo costo, uso de la gravedad en lugar de una bomba de alta velocidad, facilidad de obtener resultados, etc. Y con respecto al proceso de biorremediación abrir nuevas perspectivas en torno a los usos biotecnológicos de *Pseudomona aeruginosa*.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Reactivos químicos

El estándar analítico de Aroclor Mix 2 de 200 µg/mL fue obtenido de Sigma-Aldrich. El acetonitrilo y metanol grado HPLC, los medios de cultivo, y reactivos en general fueron obtenidos de Merck. El agua Ultrapura (18.2 MΩ cm) fue producido por un purificador de agua Thermo Scientific Barnstead Easypure II – RF.

### B. Condiciones cromatográficas

Se utilizó un Cromatógrafo Líquido de Alta Performance (HPLC) Hitachi LaChrom Elite®, una Columna Chromolith® Performance RP-18e 100-4.6 mm (2 µm). La Fase móvil para la separación de los Bifenilos policlorados (BPC) consistió en un sistema isocrático de acetonitrilo: agua (70:30) con un flujo de 1.5 ml/min a una longitud de onda de 205 nm y un tiempo de corrida de 15 minutos.

### C. Desarrollo de un método para cuantificar Aroclor 1221, 1242 y 1254 por HPLC

Para evaluar la linealidad del método propuesto, se construyó un gráfico de calibración preparando una solución estándar stock de 20 mg/L en metanol grado HPLC a partir del Aroclor Mix 2. Posteriormente, se prepararon soluciones de calibración a concentraciones de 2 a 14 mg/L, estas soluciones fueron filtradas usando un filtro WHATMAN de 45 µm NYL y se procedió a leer por HPLC a condiciones establecidas. Dicho procedimiento se realizó por triplicado. La regresión

lineal fue calculada usando el método de los mínimos cuadrados con la finalidad de hallar la ecuación de la recta.

$$y = a + bx \quad (1)$$

Donde, “y” es el área expresado en mili unidades de absorbancia (mAU), “x” es la concentración en de cada BPC, “a” corresponde al intercepto y “b” a la pendiente.

Posteriormente, se calculó el coeficiente de determinación  $R^2$  que debe ser mayor a 0.995 [10] para cuantificar BPC en muestras.

La sensibilidad se determinó calculando los límites de detección (LD) y cuantificación (LC) del método.

EL LD que corresponde a la mínima cantidad de BPC que el método puede determinar, mas no cuantificar, fue calculado mediante la siguiente ecuación [10]:

$$LD = \frac{y_{bl} + 3S_{bl}}{b} \times \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Por otro lado, el LC que corresponde a la mínima cantidad de BPC que el método puede cuantificar con precisión y exactitud, fue calculada con la siguiente ecuación [10]:

$$LC = \frac{y_{bl} + 10S_{bl}}{b} \times \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Donde, “ $y_{bl}$ ” corresponde al intercepto (a) de la ecuación de la recta, “n” es el número de puntos en el gráfico de calibración y “ $S_{bl}$ ” corresponde al intercepto de la ecuación de la recta obtenida relacionado la concentración y la desviación estándar de los datos del gráfico de calibración.

La precisión se determinó preparando seis soluciones del Mix de BPC para luego ser analizados por HPLC. La preparación y los análisis de muestras se realizaron por diferentes analistas para expresar la precisión en términos de reproducibilidad y fue evaluada por el coeficiente de variación (CV) usando la siguiente fórmula:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (4)$$

Donde: “ $\bar{x}$ ” es el promedio de las seis mediciones y “s” corresponde a la desviación estándar de dichas mediciones.

La exactitud se determinó por el método del porcentaje de recuperación (% R), para esto, en primer lugar, se cuantificó la concentración de Aroclor 1221, 1242 y 1254 en una muestra del estudio de degradación, luego, se

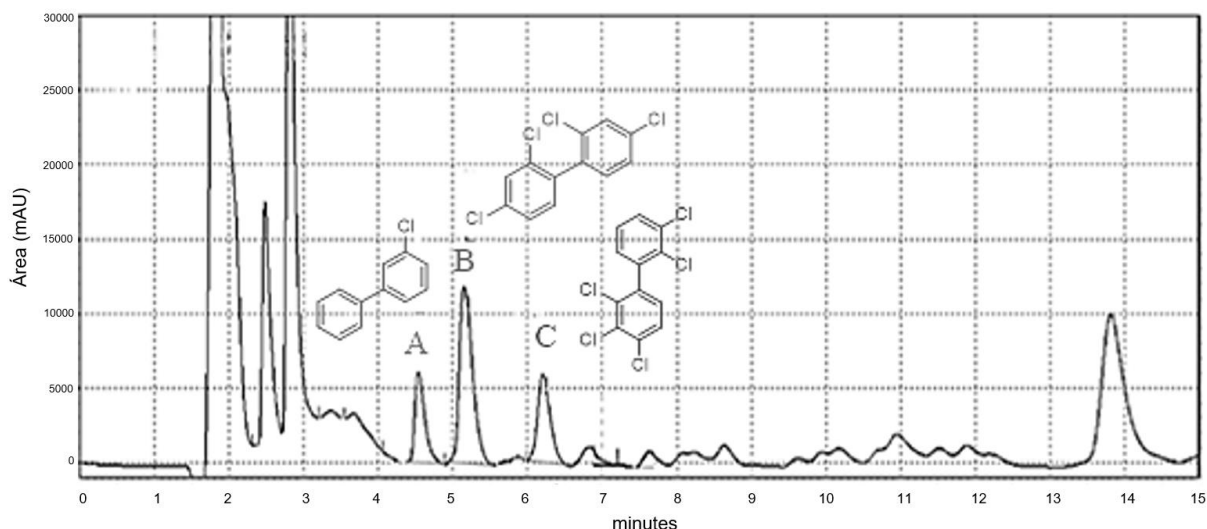


Fig. 1. Cromatograma de la determinación de A) Aroclor 1221, B) Aroclor 1242 y C) Aroclor 1254 por HPLC

enriquecieron con una concentración conocida de Aroclor 1221, 1242 y 1254. Posteriormente, se analizaron por HPLC y se procedió a calcular el %R usando la siguiente fórmula:

$$\%R = \frac{C_e - C}{C_{es}} \times 100 \quad (5)$$

Donde, “C” es la concentración de Aroclor 1221, 1242 y 1254 en la muestra, “C<sub>e</sub>” es la concentración de la muestra enriquecida con estándares de Aroclor 1221, 1242 y 1254 y “C<sub>es</sub>” es la concentración de los estándares de Aroclor 1221, 1242 y 1254 con los que se enriquecieron a las muestras.

#### D. Ensayo de degradación de Aroclor 1221, 1242 y 1254 por *Pseudomona aeruginosa*

Para los ensayos de degradación se utilizó el Medio Mineral Gray & Thornton [11] y estuvo compuesto por KNO<sub>3</sub> (1.0 g/L), FeCl<sub>3</sub> (0.02 g/L), MgSO<sub>4</sub> (0.2g/L), NaCl (0.1 g/L), CaCl<sub>2</sub> (0.1 g/L) y K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (1.0 g/L) ajustado a un pH de 6.8 con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, posteriormente fue enriquecido con 10 mg/L de Aroclor Mix 2.

Para el inóculo bacteriano se utilizó a *Pseudomona aeruginosa* identificada como tal en un estudio previo [12], sometiendo la cepa a un medio mineral de baja concentración de sales [11] enriquecido con BPC a una concentración final de 10 ppm, con el propósito de adaptación a los BPC como fuente de energía, y se dejó incubando a pH 6.5 y 37 °C por 6 días. Los ensayos de biodegradación se realizaron mezclando 2254 μL del medio mineral enriquecido con 46 μL de dilución bacteriana 10<sup>6</sup> cell/mL en un vial ámbar. El vial se llevó a incubación a 37°C por 7 días y se tomaron muestras de 200 μL a los 0, 1, 2, 3, 5 y 7 días en tubos eppendorf de 1.5 mL y se analizaron por HPLC previa extracción de los BPC.

Para la extracción de BPC de lo medios, se midieron 200 μL de muestra en un eppendorf, luego, se agregó 0.67 g de sulfato de sodio anhidro y se dejó reposar por 10 minutos. Posteriormente, se añadieron 200 μL de acetonitrilo grado HPLC y se agitó en un vórtex por 5 minutos, se centrifugó por 3 minutos a 3000 rpm [13] en una microcentrífuga Centra CL2 Thermo IEC, se recuperó el sobrenadante y se almacenó en un tubo eppendorf para su posterior análisis por HPLC.

El porcentaje de biodegradación se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Biodegradación}(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (6)$$

Donde, “C<sub>t</sub>” es la concentración de BPC en el medio mineral en un tiempo determinado, “C<sub>0</sub>” es la concentración inicial de BPC.

#### E. Estudios cinéticos

Los datos de biodegradación obtenidos fueron modelados en la herramienta de *fiteo* del software *Origin Pro 9.0* donde se eligió el modelo exponencial que mejor se ajustara a los valores obtenidos experimentalmente, lo cual, se verificó por el coeficiente R<sup>2</sup>.

El modelo matemático de mejor ajuste a los datos se utilizó para calcular la concentración teórica a cada tiempo del experimento de biodegradación, estos valores, fueron contrastados con los valores experimentales (concentración práctica) para evaluar su correlación teórico-práctica, lo cual, también se verificó con el coeficiente R<sup>2</sup>.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se observa que, los tiempos de retención para Aroclor 1221, 1242 y 1254 son 4.65, 5.22 y 6.34 minutos respectivamente, utilizando una fase móvil de acetonitrilo: agua (70:30) y un tiempo de corrida de 15 minutos. Por otro lado, en la Tabla 1 se presentan los resultados de los parámetros de validación evaluados respecto al método por HPLC desarrollado para cuantificar Aroclor 1221, 1242 y 1254. El gráfico de calibración preparado a concentraciones desde 2 a 14 mg/L de cada Aroclor dio como resultado coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre 0.9997 a 0.9999. Los valores de coeficientes de variación están entre 1.50 a 1.81 % y el porcentaje de recuperación (% R) estuvieron entre 84.58 a 89.02 %. Con dichos resultados, se comprueba que, el método es lineal ( $R^2 > 0.995$ ), preciso ( $CV < 2.7\%$ ) y exacto con %R superior a 80 % [10].

TABLA I  
PARÁMETROS DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO PARA CUANTIFICAR  
AROCLOR 1221, 1242 Y 1254 POR HPLC

Parámetro	Aroclor 1221	Aroclor 1242	Aroclor 1254
$R^2$	0.9999	0.9999	0.9997
LD (mg/L)	0.0593	0.0197	0.1759
LC (mg/L)	0.3532	0.6729	0.6536
CV (%)	1.50	1.81	1.51
%R	84.58	88.53	89.02
a	-4231.5	-14954	-535.55
b	17922	57470	18587

\*  $R^2$ : Coeficiente de determinación, LD: Límite de detección, LC: Límite de cuantificación, CV: Coeficiente de variación, %R: Porcentaje de recuperación, a: Intercepto, b: Pendiente

En el inóculo preparado, luego de 6 días de incubación, se observó la disminución progresiva en la concentración de BPC, lo que indica que la bacteria empleada se ha adaptado rápidamente a la fuente carbonada, siendo capaz de transformarla. Presenta turbidez debido al crecimiento microbiano.

En la Figura 2, se observa la biodegradación porcentual de Aroclor 1221, Aroclor 1242 y Aroclor 1254 en presencia de *Pseudomona aeruginosa* durante siete días, siendo sus concentraciones iniciales de 9.93, 9.95 y 9.76 mg/L respectivamente. Se puede notar que, el Aroclor 1221 y 1242 se degradaron hasta valores de 97.62 % y 97.39 % respectivamente, esto podría deberse a que estas moléculas poseen menor cantidad de cloros en su estructura, mientras que el Aroclor 1254 que posee mayor cantidad de grupos cloros (Figura 1) lo que podría explicar su baja biodegradación a los 7 días (25.40 %). Aroclor 1242 del 81% y de Aroclor 1254 del 35 % por cepas de *Alcaligenes eutrophus* H850 en condiciones aerobias [14]. Así mismo se evidencia el incremento de biomasa de  $5.7 \times 10^5$  hasta  $2.09 \times 10^6$  células/mL, lo que indica que los microorganismos utilizan de los BPC el carbono como única fuente de energía y nutrientes.

Un estudio realizado por Yadav con hongos, se llegó a degradar de 30.5% de Aroclor 1254 y 60.9% para Aroclor 1242 con cultivos de *P. chrysosporium* en un periodo de 30 días [15]. En el presente estudio se obtienen mayores porcentajes de biodegradación que los reportados para Aroclor 1221 y 1242. El bajo porcentaje de biodegradación de Aroclor 1254 se debe a que se trabajó en condiciones aerobias, ya que, estudios realizados indican que la biodegradación de BPC altamente clorados es efectiva cuando se trabaja en condiciones anaerobias removiendo los átomos de cloro en posición meta- y para- obteniendo productos menos sustituidos en posición orto- que después pueden ser biodegradados en condiciones aerobias [16].

Otro aspecto importante fue que, el pH del medio disminuyó desde el valor inicial de 6.8 a intervalos a aproximadamente 5.5 a los 7 días esto tiene que ver con el tipo de metabolito que se está produciendo por parte de la actividad bacteriana. La literatura señala que casi siempre los indicadores del crecimiento de los microorganismos en contaminantes orgánicos son el incremento de la turbidez del sistema y el decremento del pH [17]. Además, se sabe que, en el proceso de biodegradación, se producen como subproductos ácido pirúvico, ácido benzoico y acetaldehído, por lo que se deduce que esta disminución es por la producción progresiva del ácido pirúvico y ácido benzoico [14], [18].

Los datos de biodegradación fueron modelados en el software de análisis *Origin Pro 9.0* donde se eligió el modelo no lineal exponencial de mejor ajuste a los datos de biodegradación, encontrando que, el modelo que mejor se ajustó a los datos fue el modelo exponencial de decaimiento Exp3P2 el que presentó un ajuste  $R^2$  de 0.9937 para Aroclor 1221 (Figura 3) y 0.9968 para Aroclor 1242 (Figura 4).

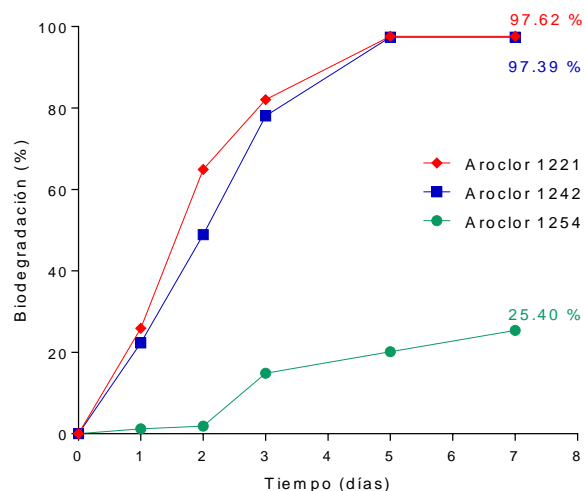


Fig. 2. Gráfica de biodegradación porcentual de Aroclor 1221, 1242 y 1254 en presencia de *Pseudomona aeruginosa* durante 7 días.

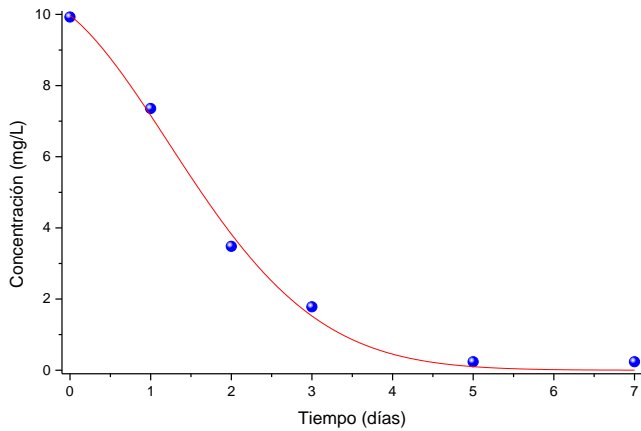


Fig. 3. Expresión gráfica de la modelación matemática para la biodegradación de Aroclor 1221.

La ecuación resultante (modelo Exp3P2) fue la siguiente:

$$y = e^{(a+bx+cx^2)} \quad (7)$$

Observando la ecuación anterior, “y” corresponde a la concentración en mg/L de Aroclor 1221 o 1242, “x” corresponde al tiempo de tratamiento en días, además, se nota que, el modelo presentó 3 constantes, donde “a” es una constante independiente que corresponde a la concentración inicial cuando el tiempo es cero cuyas unidades son mg/L, “b” corresponde a la constante que depende del tiempo cuyas unidades son mg/L.día, lo que indica que esta es la constante de biodegradación; y “c” que también es una constante que depende del tiempo al cuadrado, cuyas unidades son mg/L.día<sup>2</sup>.

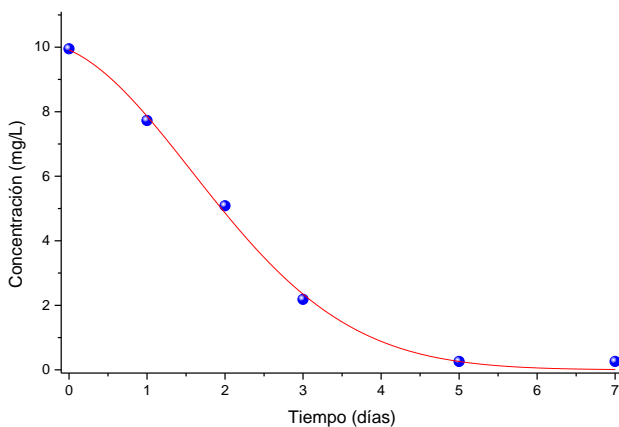


Fig. 4. Expresión gráfica de la modelación matemática para la biodegradación de Aroclor 1242.

Para Aroclor 1221, la constante de degradación es de 0.1551 mg/L.día y para Aroclor 1242 es de 0.0637 mg/L.día, lo que indica que la biodegradación de Aroclor 1221 se da con mayor rapidez que Aroclor 1242, debido a la menor sustitución de cloros que presenta Aroclor 1221, convirtiéndose en un sustrato más fácilmente de ser biodegradado.

No se realizó el modelamiento matemático de Aroclor 1254, debido a que, el porcentaje de biodegradación fue muy bajo.

Luego de reemplazar los valores en la ecuación (7) se obtiene lo siguiente:

$$Aroclor1221_{(mg/L)} = e^{(2.3048-0.1551x-0.1556x^2)} \quad (8)$$

$$Aroclor1242_{(mg/L)} = e^{(2.2946-0.0637x-0.1356x^2)} \quad (9)$$

Estas ecuaciones permiten predecir las concentraciones teóricas de los Aroclor 1221 y 1242 a diferentes días de degradación. Calculando las concentraciones teóricas a los días en los que se monitorearon los niveles BPC estudiados en los medios, se evaluó la correlación con las concentraciones prácticas o experimentales determinadas en laboratorio.

Los resultados de la correlación se observan en las Figuras 5 y 6 para Aroclor 1221 y 1242 respectivamente con sus coeficientes  $R^2$  de 0.9957 y 0.9968, esto corrobora la correlación lineal entre los resultados de ambos modelos matemáticos y los resultados determinados en laboratorio.

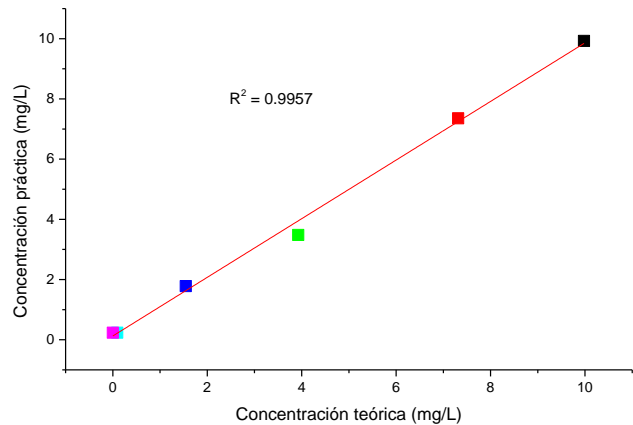


Fig. 5. Correlación entre las concentraciones de Aroclor 1221 obtenidas mediante el modelo matemático y los resultados experimentales o prácticos.

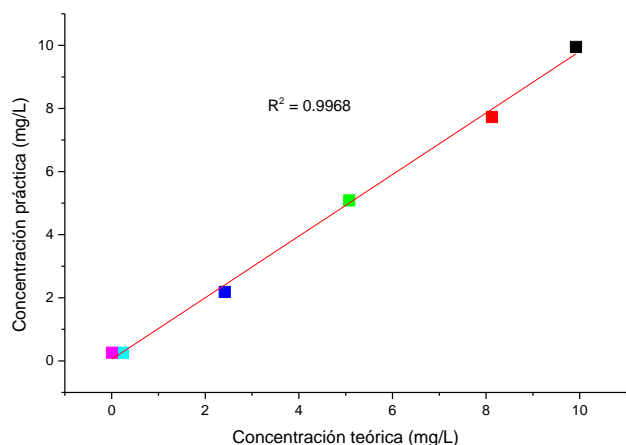


Fig. 6. Correlación entre las concentraciones de Aroclor 1242 obtenidas mediante el modelo matemático y los resultados experimentales o prácticos

#### IV. CONCLUSIONES

Se validó un método analítico por HPLC para la cuantificación de bifenilos policlorados obteniendo un método lineal, preciso, exacto y con una sensibilidad aceptable a 205nm, siendo una alternativa sencilla de análisis para la cuantificación de BPC. Los estudios de degradación con *Pseudomona aeruginosa* lograron porcentajes de biodegradación de 97.62% y 97.40% para Aroclor 1221 y 1242 respectivamente, y 25.40% para Aroclor 1254, lo que indicaría la necesidad de un pre-tratamiento anaerobio, ya que, la cantidad de cloros en la estructura química de los BPC podría influir en la persistencia a la degradación por microorganismos. Por lo que, tanto el método de análisis como el proceso de biodegradación son de interés científico e industrial, siendo de gran importancia para el medio ambiente, ya que los BPC son considerados uno de los contaminantes más peligrosos.

Considerando los datos experimentales se estableció un modelo matemático de biodegradación de tipo exponencial para Aroclor 1221 y 1242 que presentan respuesta lineal con los valores de biodegradación desarrollados en laboratorio ( $R^2 > 0.995$ ). De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible proyectarse a conformar un estudio de biodegradación a mayor escala, incluyendo el diseño de un biorreactor para la optimización del proceso, monitoreando parámetros como pH y temperatura.

#### REFERENCES

[1] P. R. S. Kodavanti, «Polychlorinated Biphenyls (PCBs)», en *Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology*, Elsevier, 2017.

[2] D. Megson, «Polychlorinated Biphenyls☆», en *Encyclopedia of Analytical Science (Third Edition)*, P. Worsfold, C. Poole, A. Townshend, y M. Miró, Eds. Oxford: Academic Press, 2019, pp. 318-327.

[3] B. Van Aken y R. Bhalla, «6.14 - Microbial Degradation of Polychlorinated Biphenyls», en *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)*, M. Moo-Young, Ed. Burlington: Academic Press, 2011, pp. 151-166.

[4] M. Aneeqa, S. A. Muhammad, T. J. Muhammad, y S. Muhammad, «Polychlorinated biphenyls (PCBs): Characteristics, toxicity, phytoremediation, and use of transgenic plants for PCBs degradation», *Handbook of Bioremediation*, pp. 677-687, ene. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-819382-2.00043-0.

[5] A. C. Gore, K. Krishnan, y M. P. Reilly, «Endocrine-disrupting chemicals: Effects on neuroendocrine systems and the neurobiology of social behavior», *Hormones and Behavior*, vol. 111, pp. 7-22, may 2019, doi: 10.1016/j.yhbeh.2018.11.006.

[6] J. Ruan, J. Guo, Y. Huang, Y. Mao, Z. Yang, y Z. Zuo, «Adolescent exposure to environmental level of PCBs (Aroclor 1254) induces non-alcoholic fatty liver disease in male mice», *Environmental Research*, vol. 181, p. 108909, feb. 2020, doi: 10.1016/j.envres.2019.108909.

[7] S. U. Ahmad, S. Tariq, S. Jalali, y M. M. Ahmad, «Environmental pollutant Aroclor 1242 (PCB) disrupts reproduction in adult male rhesus monkeys (*Macaca mulatta*)», *Environmental Research*, vol. 93, n.º 3, pp. 272-278, nov. 2003, doi: 10.1016/S0013-9351(03)00110-5.

[8] A. Wolf-Rainer, «Microbial degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment», *Progress in Industrial Microbiology*, vol. 36, pp. 29-67, ene. 2002, doi: 10.1016/S0079-6352(02)80006-6.

[9] K. Paramdeep, M. Deepanshu, y S. Baljinder, «Microbes as natural degraders of polychlorinated biphenyls», *Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants*, pp. 129-139, ene. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-821199-1.00013-4.

[10] O. Quattrocchi, S. Abelaira, y R. Felipe Laba, *Introducción a la HPLC, Aplicación y Práctica*. 1992.

[11] R. R. Clark, E. S. Chian, y R. A. Griffin, «Degradation of polychlorinated biphenyls by mixed microbial cultures.», *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 37, n.º 4, pp. 680-685, abr. 1979.

[12] E. G. Gonzales-Condori, S. A. Ramirez-Revilla, y J. A. Villanueva-Salas, «Role of *Eisenia foetida* in the degradation of profenofos in presence of native bacterial communities», *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 19, n.º Sup. 1, Art. n.º Sup. 1, jun. 2020, doi: 10.24275/rmiq/IA1505.

[13] S. Ni, J. K. Fredrickson, y L. Xun, «Purification and characterization of a novel 3-chlorobenzoate-reductive dehalogenase from the cytoplasmic membrane of *Desulfomonile tiedjei* DCB-1.», *J Bacteriol*, vol. 177, n.º 17, pp. 5135-5139, sep. 1995.

[14] D. L. Bedard, R. E. Wagner, M. J. Brennan, M. L. Haberl, y J. F. Brown, «Extensive degradation of Aroclors and environmentally transformed polychlorinated biphenyls by *Alcaligenes eutrophus*

- H850», *Appl Environ Microbiol*, vol. 53, n.º 5, pp. 1094-1102, may 1987, doi: 10.1128/AEM.53.5.1094-1102.1987.
- [15] J. S. Yadav, J. F. Quensen, J. M. Tiedje, y C. A. Reddy, «Degradation of polychlorinated biphenyl mixtures (Aroclors 1242, 1254, and 1260) by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* as evidenced by congener-specific analysis», *Appl Environ Microbiol*, vol. 61, n.º 7, pp. 2560-2565, jul. 1995, doi: 10.1128/AEM.61.7.2560-2565.1995.
- [16] E. Sobiecka y K. Cedzyska, «Biodegradation effects of waste transformer oil polluted of PCBs in various culture conditions», *3rd Announcement for the 9th International Conference on Environmental Science and Technology - 2005. Rhode Island, Greece*, [En línea]. Disponible en: [https://conferences.gnest.org/cest/Default\\_9cest.htm#Review%20of%20Papers%20-%20Conference%20Proceedings](https://conferences.gnest.org/cest/Default_9cest.htm#Review%20of%20Papers%20-%20Conference%20Proceedings).
- [17] O. Nwinyi, «Enrichment and Identification of Askarel oil (PCB blend) degrading bacteria enriched from landfill sites in Edo State, Nigeria.», 2011, doi: 10.5251/ABJNA.2011.2.1.89.100.
- [18] F. Fava, «Aroclor 1221 aerobic dechlorination by a bacterial co-culture: role of chlorobenzoic acid degrading bacteria in the process», *Chemosphere*, vol. 32, n.º 8, pp. 1477-1483, abr. 1996, doi: 10.1016/0045-6535(96)00056-2.