

## Hongos filamentosos y su papel en la eliminación de compuestos farmacéuticos

Araceli Tomasini <sup>1,\*</sup>, Román Rubio-Roque <sup>2</sup>, Héctor Hugo León-Santiesteban <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa, 09310, Col. Reyes de Reforma, Alcaldía Iztapalapa, CDMX, México.

<sup>2</sup> Licenciatura en Ingeniería Bioquímica Industrial del Departamento de Biotecnología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa.

<sup>3</sup> Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. CP 02200, Col. Reynosa Tamaulipas, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX, México.

\* Autor de correspondencia: [atc@xanum.uam.mx](mailto:atc@xanum.uam.mx)

### Artículo de divulgación científica

Recibido: 14 de febrero de 2025

Aceptado: 10 de marzo de 2025

Publicado: 20 de marzo de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.393>

**Resumen:** Los microcontaminantes, también conocidos como contaminantes emergentes (CE), son compuestos de diverso origen y naturaleza cuya presencia en el ambiente había pasado inadvertida hasta hace aproximadamente dos décadas debido a las bajas concentraciones en las que se encuentran (nanogramos por litro). Los CE incluyen productos activos farmacéuticos (CAFs), productos de cuidado personal, agentes de diagnóstico, desinfectantes, drogas y pesticidas. Las plantas de tratamiento de aguas residuales no están diseñadas para su eliminación, por lo que son liberados en fuentes de aguas naturales; su acumulación causa toxicidad y afecta negativamente a los organismos acuáticos. Por lo tanto, es importante proponer procesos para la remoción de estos CE. Una alternativa económica es la remoción de estos compuestos empleando hongos filamentosos. Los hongos utilizan dos vías para su eliminación: sorción y degradación. La sorción implica remover los compuestos a través de una matriz donde quedan sorbidos, mientras que la degradación conlleva la transformación química del compuesto. La degradación puede ser directamente por los hongos, durante su metabolismo o bien o por la acción de enzimas fúngicas. Los hongos más estudiados para remover los CE son los basidiomicetos como *Trametes versicolor* y *Pelurotus ostratus*, aunque también ha sido estudiada la capacidad de otros hongos, como los ascomicetos y zigomicetos.

**Palabras clave:** microcontaminantes, compuestos farmacéuticos, hongos filamentosos, mecanismos de eliminación

### Introducción

El agua es un recurso natural limitado, cada vez más deteriorado debido al aumento de la población, al desarrollo tecnológico y a la industrialización. La manufactura de productos químicos ha ido en aumento y con ello el número de compuestos considerados potencialmente peligrosos para el medio ambiente (Bolong *et al.*, 2009). La contaminación del agua es un tema que supone una preocupación de las autoridades científicas y gubernamentales a nivel mundial. Recientemente se ha demostrado que, en las fuentes de agua naturales, incluso en el agua potable, existen distintos tipos de microcontaminantes o contaminantes emergentes (CE) que se encuentran en concentraciones muy pequeñas, del orden de nanogramos a microgramos por litro. Estos incluyen compuestos activos farmacéuticos (CAFs), compuestos de contraste, productos del cuidado personal, drogas de recreación lícitas e ilícitas, productos de limpieza, desinfectantes y pesticidas.

El principio activo de un medicamento, llamado compuesto activo farmacéutico (CAF) es la molécula capaz de modificar la actividad celular o metabólica en el organismo y por lo tanto producir un efecto biológico con beneficio al organismo al que se administra (Urbano, 2011).

El uso de los CAFs en los humanos ha significado beneficios importantes, como el curar y/o controlar enfermedades y evitar dolor, mejorando así la calidad de vida y aumentando la edad promedio de esperanza de vida de las personas. Su uso en los animales se refleja en la economía de los países y la disponibilidad de alimentos para los humanos.

Los CAFs, después de ser ingeridos, dentro del organismo realizan su actividad farmacológica y estos compuestos y/o sus metabolitos son excretados a través de la orina y las heces fecales, de esta forma llegan al suelo y a las fuentes de aguas naturales convirtiéndose en un problema de contaminación. La concentración de CAFs vertidos en el ambiente es baja, pero su entrada continua al ecosistema es un riesgo para los organismos acuáticos no objetivos (Klavarioti *et al.*, 2009; Tomasini and Macías-Paredes, 2023; Calderón, *et al.*, 2019).

Estos compuestos causan daños a los organismos acuáticos, por ejemplo, afectan su reproducción, afectan las funciones y comportamientos sexuales, inhiben la biosíntesis de clorofila, tienen efectos teratogénicos, muchos de ellos son disruptores endócrinos. Los antibióticos causan que las bacterias desarrollen resistencia hacia dichos compuestos (Robitaille *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2025). Por eso es muy importante proponer métodos para eliminar los CAFs del ambiente.

Se han reportados métodos fisicoquímicos y biológicos para la eliminación de los CAFs. Los biológicos son más económicos y amigables al medio ambiente (Pandey *et al.*, 2025). Los métodos biológicos pueden ser por sorción y/o degradación por bacterias, algas y hongos (Kózka *et al.*, 2023).

Este trabajo tiene como objetivo explicar cómo los hongos filamentosos pueden contribuir a la eliminación de compuestos farmacéuticos en aguas residuales.

## Desarrollo

### *Remoción de CAF*

Los CAFs pueden ser removidos del agua por procesos fisicoquímicos y biológicos, ambos procesos incluyen dos mecanismos diferentes que son la sorción y la degradación. En los procesos fisicoquímicos por sorción se pueden usar sorbentes como carbón activado, alginato u otro material capaz de absorber los CAFs. Los procesos de degradación pueden ser por fotocatalisis y por sistemas de oxidación avanzado que pueden producir subproductos de cloro muy tóxicos (Bolong *et al.*, 2009).

Los procesos biológicos implican el uso de algas, bacterias y hongos. En general el costo es más bajo, en algunos casos lleva más tiempo que los procesos fisicoquímicos. Los procesos igualmente pueden ser por biosorción y biodegradación.

A continuación, se mencionará el uso de los hongos filamentosos en la remoción de CAFs. Se dará brevemente las características de los hongos filamentosos y se explicarán los mecanismos que usan para remover estos compuestos.

### *Hongos filamentosos*

Los hongos filamentosos son organismos pluricelulares constituidos por estructuras llamadas hifas. Estas poseen capacidad de ramificación y al conjunto de hifas se denomina micelio. Morfológicamente, las células son alargadas, varían en longitud y poseen un diámetro de 3 a 15  $\mu\text{m}$ . Se reproducen a través de esporas sexuales y/o asexuales y estas pueden sobrevivir en condiciones extremas. Su reproducción también puede ser vegetativa (a partir de micelio). Las esporas pueden ser pigmentadas y le dan el color al hongo. La apariencia de micelio es algodonosa y densa, el color del micelio es blanquecino, crema o gris claro, presentan crecimiento en 24 a 48 h, crecen en lugares húmedos y oscuros, condiciones de baja humedad no favorecen su crecimiento (Campbell *et al.*, 2001).

### *Los hongos filamentosos y la degradación de materia orgánica en la naturaleza*

Los hongos son los principales degradadores de materia orgánica del suelo y liberan los nutrientes para los vegetales. Muchos de los productos de desechos secundarios son ácidos orgánicos; por ello, los hongos ayudan a incrementar la acumulación de materia orgánica rica en ácidos húmicos, resistentes a una degradación posterior, y mejoran la fertilidad de los suelos.

Los hongos que producen estructuras fructíferas (setas o champiñones) pertenecen a los basidiomicetos tienen un papel importante en la descomposición de la materia orgánica en la naturaleza. También las especies de hongos activas en el suelo, pero que no son visibles, realizan funciones importantes como descomponedores, como los zigomicetos y los ascomicetos. Los hongos son organismos aeróbicos y mueren cuando un suelo se convierte en anaeróbico, por ejemplo, en el caso de inundaciones o compactación del suelo. Los hongos se clasifican de acuerdo con el origen de sus fuentes de energía en: Descomponedores, que obtienen su energía de organismos muertos. Mutualistas que son hongos que viven en simbiosis con otros organismos y ambos obtiene su energía gracias a esta

relación, es decir, ambos organismos obtienen beneficio. Parásitos son los hongos que obtienen su energía de organismos vivos a los que parasitan y solamente los hongos obtienen beneficio (Tomasini and León-Santiesteban, 2019).

Los hongos al ser los descomponedores naturales se han usado para degradar compuestos xenobióticos que son originados por la actividad antropogénica de los humanos. Se ha estudiado la capacidad de estos microorganismos para degradar compuestos, como los derivados de hidrocarburos, los bifenilos policlorados, clorofenoles, colorantes tipo azo, plaguicidas entre otros (Dao *et al.*, 2019). Su capacidad para degradar dichos compuestos se debe a que estos hongos producen sistemas enzimáticos con capacidad óxido-reductora.

En las últimas décadas, también se ha estudiado la capacidad de los hongos para crecer en presencia de CAFs (León-Santiesteban *et al.*, 2024), y poder caracterizar su capacidad para remover los CAFs de las aguas residuales. Los hongos son capaces de remover los CAFs por biosorción y biodegradación (Figura 1).

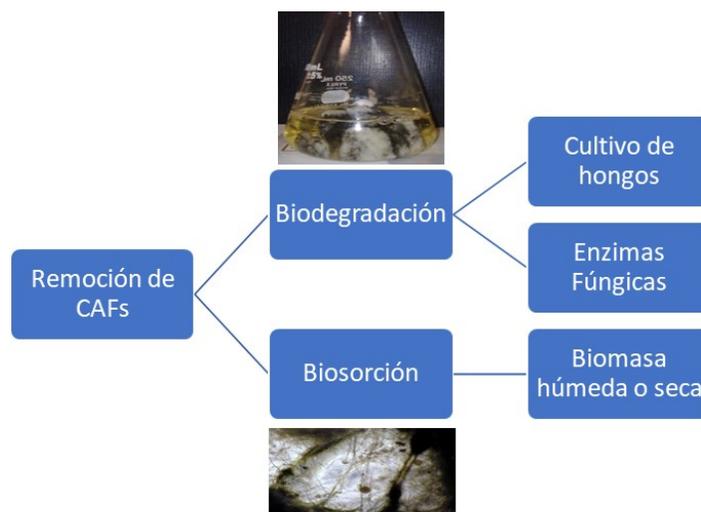


Figura 1. Muestra los procesos utilizados por los hongos filamentosos para remover compuestos tóxicos.

#### Biosorción de los CAFs

La biosorción de los CAFs es el proceso mediante el cual los compuestos son removidos de una fase acuosa, como las aguas residuales; implica la absorción de CAFs dentro de las células de los hongos, y la adsorción proceso en el cual los CAFs son retenidos en la pared celular de los hongos (Figura 2).

La biomasa fúngica, activa o muerta, ha sido empleada para sorber compuestos tóxicos y metales pesados, es decir removerlos del agua. Es un proceso económico y no produce subproductos tóxicos. De esta forma se remueven los compuestos tóxicos del agua y se concentran en la biomasa fúngica. Los compuestos tóxicos se pueden desorber de la biomasa o bien ser tratados junto con la biomasa para su degradación.



Figura 2. Esquema del proceso de biosorción de fármacos por biomasa húmeda de un hongo filamentoso.

La remoción de CAFs por sorción usando biomasa fúngica ha sido poco estudiada hasta el momento (Figura 2). Hongos basidiomicetos como *Trametes versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium* y algunos ascomicetos como *Aspergillus*

niger y *Penicillium sp.*, y zigomicetos como *Rhizopus oryzae* han mostrado tener capacidad de sorber algunos CAFs, como sulfametoxazol, ibuprofeno, naproxeno, sulfamidas, carbamazepina entre otros. Se ha demostrado que la biomasa no viable y seca es más eficiente para sorber los CAFs que la biomasa húmeda. Melgoza *et al.*, (2020) estudiaron la remoción de naproxeno usando biomasa húmeda y seca de *R. oryzae*. Los autores demostraron que la biomasa de *R. oryzae* es capaz de remover 80% del naproxeno inicial usando biomasa seca a pH ácido (pH 4.7). Mientras que con biomasa húmeda se remueve 66% del naproxeno inicial en condiciones de pH básico (pH 9.0). La biosorción de sulfametoxazol por *Rhizopus oryzae* fue caracterizada y se demostró que la biomasa del hongo puede adsorber SMX por la diferencia de cargas y también puede absorber el antibiótico por la presencia de lípidos en su biomasa (León-Santiesteban *et al.*, 2025).

### Degradación de los CAFs

La biodegradación de los CAFs se presenta tanto fuera como dentro de las células del hongo gracias a las enzimas peroxidadas y fenoloxidasas que producen. Este proceso involucra la modificación química de los CAFs mediante la oxidación o reducción de la molécula formando moléculas más o menos tóxicas (Figura 3). Es importante identificar los intermediarios producidos durante la degradación con el fin de confirmar que sean moléculas menos tóxicas.

Las enzimas pueden ser intracelulares, es decir están dentro de las células de los hongos y también las hay extracelulares, significa que son secretadas por los hongos a los medios de cultivo donde crecen. Se ha utilizado el hongo en cultivo sumergido, con el hongo libre e inmovilizado, para degradar los CAFs. Se ha reportado la degradación de ibuprofeno, ácido clofíbrico, carbamazepina, ácido salicílico, ketoprofeno, carbamazepina, iboprufo, naproxeno, ciprofloxacina, sulfametoxazol, diclofenaco, entre otros, utilizando hongos basidiomicetos como *T. versicolor*, *Trametes hirsuta*, *Irpex lacteus*, *Ganoderma lucidum* y *P. chrysosporium*, *Armillaria mellea* (Patel *et al.*, 2019; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2012; Kózkas *et al.*, 2023). Las principales reacciones de transformación de los CAFs son oxidación, formilación, hidroxilación, deshalogenación y desaminación (Cruz-Morató *et al.*, 2013). *T. versicolor* degradó 100% de sulfonamida a una concentración inicial de 10 mg/L, mientras que se degradó el 80% de ofloxacina a la misma concentración inicial (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2012).

También se ha reportado la degradación de los CAFs empleando las enzimas fúngicas ligninolíticas, como lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa y lacasas extracelulares (Gosh *et al.*, 2023). *Trametes* y *Pleurotus* son buenos productores de lacasa. Esta enzima ha sido ampliamente estudiada para degradar CAFs. La lacasa puede llevar a cabo dos tipos de reacciones para la transformación de los CAFs, reacciones de óxido-reducción y reacciones de polimerización produciendo polímeros, que al ser moléculas más grandes y menos reactivas pierden toxicidad como se muestra en la Figura 4 (Sahay, 2021). Se ha reportado que algunos CAFs no son degradados por la lacasa, es necesario adicionar mediadores que funcionan como agentes que incrementan el potencial óxido-reductor. La degradación de CAFs con enzimas fúngicas son procesos muy eficientes y limpios, y generan pocos desechos tóxicos. Se deben de analizar los productos de degradación de los CAFs, para asegurarse que sean menos tóxicos que los compuestos originales. Las enzimas se pueden usar libres, es decir disueltas en soluciones acuosas o inmovilizadas en algún soporte como alginato o poliuretano.



Figura 3. Ejemplo de la degradación de fármacos, carbamazepina, con cultivo de hongo y con el extracto enzimático libre de hongo. En ambos casos se presentan los dos mecanismos de degradación, (óxido-reducción y polimerización) en diferente proporción, de acuerdo con el hongo empleado, el tipo de fármaco, las condiciones de cultivo y las características del extracto enzimático obtenido del cultivo del hongo.

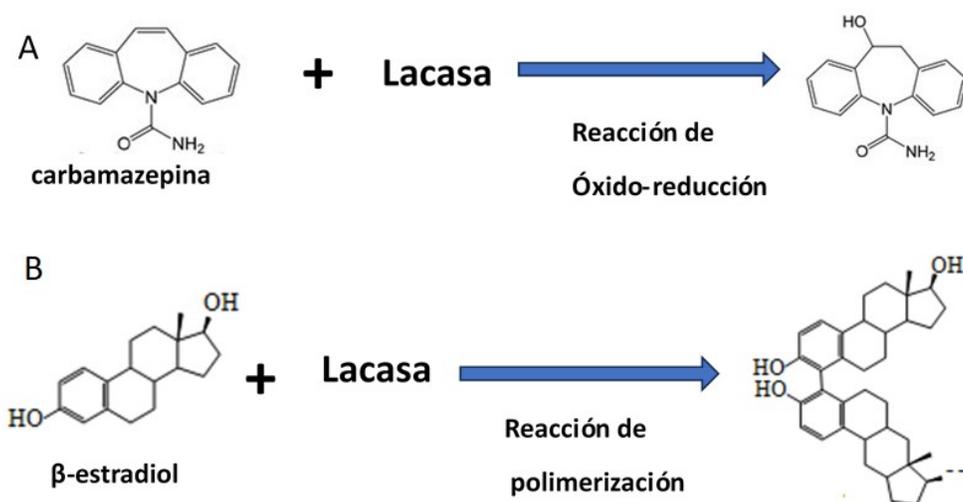


Figura 4. reacción de la degradación de la carbamazepina (A) y del  $\beta$ -estradiol (B) por la enzima fúngica lacasa (Sahay 2021).

## Conclusiones

Los CAFs en el medio ambiente causan daño a los organismos acuáticos y resistencia de bacterias a los antibióticos. Por ello se han estudiado varios métodos para la eliminación de microcontaminantes. Los métodos biológicos tienen la ventaja de ser más económicos y amigables al ambiente, no se producen más desechos tóxicos.

Un método biológico para la eliminación de CAFs presentes en aguas residuales es usando hongos filamentosos. La remoción de los CAFs de soluciones acuosas, por los hongos, puede ser a través la biosorción y la biodegradación. La biosorción es un mecanismo que no genera otras sustancias, simplemente los CAFs quedan retenidos en la biomasa del hongo. La biodegradación puede llevarse a cabo usando cultivo de hongos o extractos enzimáticos. En ambos casos actúan las enzimas para transformar las moléculas de los CAFs, y se obtienen diversos productos de biodegradación; o bien polimerizan las moléculas de los CAFs obteniendo así moléculas inocuas.

## Bibliografía

- Bolong, N., Ismail, A. F., Salim, M. R. & Matsuura, T. (2009). A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *Desalination*, 239(1), 229-246, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.020>.
- Calderón, A., Meraz, M. and Tomasini, A. (2019). Pharmaceuticals Present in Urban and Hospital Wastewaters in Mexico City. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 41(2), 105-112. <https://doi.org/10.3103/S1063455X19020073>.
- Campbell, N. A., Lawrence, G. M. and Jane, B. R. (2001). *Biología: conceptos y relaciones*. In. México: Pearson.
- Cruz-Morató, C., Ferrando-Climent, L., Rodríguez-Mozaz, S., Barceló, D., Marco-Urrea, E., Vicent, T. and Sarrà, M. (2013). Degradation of pharmaceuticals in non-sterile urban wastewater by *Trametes versicolor* in a fluidized bed bioreactor. *Water Research*, 47(14), 5200-5210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.06.007>.
- Dao, A. T. N., Vonck, J., Janssens, T. K. S., Dang, H. T. C., Brouwer, A. and de Boer, T. E. (2019). Screening white-rot fungi for bioremediation potential of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin. *Industrial Crops and Products*, 128, 153-161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.059>.
- Ghosh, S., Rusyn, I., Dmytruk, O. V., Dmytruk, K. V., Onyeaka, H., Gryzenhout, M., & Gafforov, Y. (2023). Filamentous fungi for sustainable remediation of pharmaceutical compounds, heavy metal and oil hydrocarbons. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1106973. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1106973>.
- Klavarioti, M., Mantzavinos, D. & Kassinos, D. (2009). Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. *Environment International*, 35(2), 402-417, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.009>.
- Kózka, B., Sońnicka, A., Nałęcz-Jawecki, G., Drobnińska, A., Turło, J., & Giebułtowitz, J. (2023). Various species of Basidiomycota fungi reveal different abilities to degrade pharmaceuticals and also different pathways of degradation. *Chemosphere*, 338, 139481. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139481>.
- León-Santiesteban, H.H., Severo, E.P. & Tomasini A. (2024). Modeling radial growth of *Amylomyces rouxii* and its tolerance to selected pharmaceutical active compounds. *Biotechnia*. 26, 416–424, <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v26.2292>.
- León-Santiestebán, H. H., Benítez-Cortez, J. J., Sánchez, K., & Tomasini, A. (2025). Characterization of sulfamethoxazole biosorption by *Rhizopus oryzae* biomass: Insights into sorption mechanism. *Separation Science and Technology*, 60(3-5), 389-402, <https://doi.org/10.1080/01496395.2024.2436465>.

- Liu, R., Long, Q., Liu, Y., & Wang, L. (2025). Screening of priority antibiotics in Fenhe River Basin based on the environmental exposure, ecological effects, and human health risk. *Chemosphere*, 370, 143953, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143953>.
- Melgoza, B., León-Santiesteban, H. H., López-Medina, R. & Tomasini, A. (2020). Naproxen Sorption by Non-viable *Rhizopus oryzae* Biomass. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(1), 30, <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4396-2>.
- Pandey B., Pandey, A.K., Bhardwaj, L. & Dubey, S.K. (2025). Biodegradation of acetaminophen: Current knowledge and future directions with mechanistic insights from omics. *Chemosphere*, 372, 144096, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144096>.
- Patel, M., Kumar, R., Kishor, K., Mlsna, T., Pittman, C. U., Jr. & Mohan, D. (2019). Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods. *Chemical Reviews*, 119(6), 3510-3673, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00299>.
- Robitaille, J., Desrosiers, M., Veilleux, É., Métivier, M., & Langlois, V. S. (2025). An estrogenic municipal effluent decreased fathead minnow reproduction to a near stop. *Chemosphere*, 370, 143957, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143957>.
- Rodríguez-Rodríguez, C. E., Barón, E., Gago-Ferrero, P., Jelić, A., Llorca, M., Farré, M., Díaz-Cruz, M. S., Eljarrat, E., Petrović, M., Caminal, G., Barceló, D. & Vicent, T. (2012). Removal of pharmaceuticals, polybrominated flame retardants and UV-filters from sludge by the fungus *Trametes versicolor* in bioslurry reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 233-234, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.024>.
- Sahay, R. (2021). Synthetic applications of Laccase and its Catalytic Potentials. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 8(6), <https://journal-repository.com/index.php/ijaers/article/view/3720>.
- Tomasini, A. and León-Santiesteban, H. H. (2019). The role of the filamentous fungi in bioremediation. In *Fungal Bioremediation* (pp. 3-21). CRC Press.
- Tomasini, A., & Macías-Paredes, C. (2023). ¿ Por qué los fármacos son contaminantes del ambiente?. *Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, (129), 48-55, <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/283>.
- Urbano, G. (2011). Principios básicos de farmacología: Farmacocinética. 1ª edición. Editorial Lito-Formas, San Cristóbal, Venezuela.