

**Interacciones
tóxicas entre
contaminantes
ambientales y
el hombre**

JAIME ALBERTO LEAL AFANADOR

Rector

CONSTANZA ABADÍA GARCÍA

Vicerrector Académica y de Investigación

EDGAR GUILLERMO RODRÍGUEZ

Vicerrector de Servicios a Aspirantes, Estudiantes y Egresados

LEONARDO YUNDA PERLAZA

Vicerrector de Medios y Mediaciones Pedagógicas

JULIA ALBA ANGEL OSORIO

Vicerrector de Desarrollo Regional y Proyección Comunitaria

LEONARDO EVEMELETH SANCHEZ TORRES

Vicerrector de Relaciones Internacionales

JORDANO SALAMANCA BASTIDAS

Decano Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

JUAN SEBASTIÁN CHIRIVÍ SALOMÓN

Líder Nacional de Investigación UNAD

YOLVI PRADA

Líder Nacional de Investigación Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente



Interacciones tóxicas entre contaminantes ambientales y el hombre

Cindy Lorena García Pinto

cindy.garcia@unad.edu.co

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3454-8934>



Ficha Bibliográfica Diligencia por Biblioteca

Título: Interacciones tóxicas entre contaminantes ambientales y el hombre

Autores: Cindy Lorena García Pinto

Grupo de Investigación: ZOOBIOS

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

DOI: 10.22490/notas.4286

©Editorial
Sello Editorial UNAD
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Calle 14 sur No. 14-23
Bogotá D.C

Edición No. 1

Año 2021.

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons - Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional. https://co.creativecommons.org/?page_id=13.



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| Resumen | 6 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 7 |
| 2. MOVILIDAD, PERSISTENCIA Y BIODISPONIBILIDAD | 8 |
| 2.1. Interacción en los ecosistemas | 8 |
| 2.2. Movilidad y persistencia de los xenobióticos | 9 |
| 2.3. Comprensión de conceptos | 13 |
| 3. COMPARTIMIENTOS AMBIENTALES Y LOS TÓXICOS | 14 |
| 3.1. Comprensión de conceptos | 18 |
| 4. INTERACCIONES DE LOS XENOBIÓTICOS | 18 |
| 4.1. Material particulado | 18 |
| 4.2. Metales pesados | 20 |
| 4.3. Compuestos orgánicos volátiles (COV) | 23 |
| 4.4. Plaguicidas | 24 |
| 4.5. Hidrocarburos | 26 |
| 4.6. Bifenilos policlorados | 28 |
| 4.7. Dioxinas y furanos | 29 |
| 4.8. Fertilizantes | 30 |
| 4.9. Comprensión de conceptos | 31 |
| 5. CONCLUSIONES | 32 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA | 34 |

Resumen

Contextualización: Los contaminantes tóxicos pueden provenir de fuentes de origen natural o antropogénica, distribuyéndose por los compartimientos ambientales agua, suelo y aire; siguiendo lo que se conoce como la ruta del tóxico e ingresan a los organismos a través de las vías de exposición. **Información relevante:** Los contaminantes tóxicos de origen antropogénico, se conocen como xenobióticos, los cuales pueden interactuar con el ambiente y el hombre, bioacumulándose en los organismos y biomagnificándose en la cadena trófica, lo cual dependerá de las características del tóxico. Cuando los xenobióticos entran en contacto con el organismo, se efectúa el mecanismo de adsorción, distribución, metabolismo y excreción (ADME), afectando diferentes órganos en su paso, dando lugar a los procesos de toxicocinética y toxicodinamia. Entre los xenobióticos existentes, se pueden resaltar el material particulado, los metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, los hidrocarburos, plaguicidas, bifenilos policlorados y las dioxinas y furanos; ocasionando diferentes impactos al ambiente y a la salud de las personas, lo cual depende de la concentración, tiempo de exposición y naturaleza química de cada uno. **Propósito de la nota de campus:** El documento busca entregar conceptos básicos entorno a la interacción de los contaminantes tóxicos para comprender cómo los xenobióticos se comportan en el ambiente y dentro de los organismos vivos, constituyéndose en una herramienta necesaria en el estudio de la toxicidad de las sustancias. **Metodología:** En este documento, se expondrán conceptos sobre la forma en que sucede la interacción de los xenobióticos en el ambiente y en el ser humano y se destaca algunas sustancias tóxicas comunes indicando la fuente de generación, su comportamiento y efectos negativos. **Cursos de formación:** 358027 Toxicología Ambiental; 358009 Epidemiología Ambiental; 358006 Biología Ambiental. **Conclusiones:** El conocer cómo ocurren las interacciones de los xenobióticos, su mecanismo de transporte, cómo ingresan a los organismos, las fuentes que los originan, su naturaleza fisicoquímica y cómo se comportan, puede ayudar a prevenir, controlar, mitigar o compensar los impactos negativos que dichas sustancias ocasionan a la salud de las personas y a los ecosistemas.

Palabras clave: Bioacumulación; biodisponibilidad; biomagnificación; compartimientos ambientales; tóxicos; Xenobióticos.

1. INTRODUCCIÓN

En la toxicología ambiental es de gran importancia estudiar las sustancias químicas producidas por el hombre y los efectos que éstos causan a la salud del hombre y los ecosistemas (Shaw y Chadwick, 1998). Establecer cómo éstos interactúan con el medio desde que son emitidos o generados, hasta que entran en contacto con los organismos, ayudan a predecir cómo se podrían comportar en cada situación, implementar medidas para controlarlos (Peña *et al.*, 2001) e incluso, apoyar políticas públicas para evitar los efectos adversos; en muchas ocasiones, graves, a la salud de los seres vivos y al equilibrio de los ecosistemas (Batterman *et al.*, 2014; Moscoso *et al.*, 2019). Los xenobióticos se transportan en el ambiente dependiendo de sus características químicas; si son persistentes, contribuyendo a la bioacumulación, si son propensos a biomagnificarse, si son solubles o no en el agua, si son lipófilos o si se encuentran biodisponibles (Wasi *et al.*, 2013), lo cual producirán distintas respuestas biológicas en los seres vivos como afectación de diferentes órganos, disminución del desarrollo o afectación en el crecimiento, teratogénesis e incluso cáncer (Tsatsakis *et al.*, 2011; Zeliger, 2011). Con base en lo aquí expuesto, esta nota de campus pretende entregar conceptos básicos entorno a la interacción de los contaminantes tóxicos, con el fin de comprender cómo los xenobióticos se comportan en el ambiente y dentro de los organismos vivos, convirtiéndose en una herramienta necesaria en el estudio de la toxicidad de las sustancias, permitiendo plantear posteriormente las alternativas de solución más apropiadas.

2. MOVILIDAD, PERSISTENCIA Y BIODISPONIBILIDAD

2.1. Interacción en los ecosistemas

Es de conocimiento que los ecosistemas se encuentran conformados por elementos bióticos, siendo éstos los organismos vivos y los elementos abióticos, el aire, el agua y la tierra (Sansolini, 1994); los cuales interactúan entre sí, intercambiando materia y energía, reciclando los elementos y nutrientes esenciales para la vida de las especies, todo en perfecto equilibrio (Rodríguez Martínez, 2016). Sin embargo, ese equilibrio puede romperse a causa de agentes contaminantes, que pueden provenir de dos tipos de fuentes a saber:

- Fuentes naturales o biogénicas.
- Fuentes de actividades desarrolladas por el hombre o antropogénicas.

Las fuentes biogénicas las constituyen fenómenos como las erupciones volcánicas, la degradación de la materia orgánica, los incendios forestales, tormentas de arena, etc. (Jaramillo *et al.*, 2009). Mientras que las fuentes antropogénicas como el transporte, la agricultura y ganadería, la industria química, metalurgia, minería, tratamiento de residuos sólidos y líquidos (Capó, 2009); producen sustancias químicas, llamadas también xenobióticos, las cuales poseen propiedades que al interactuar con el medio o con los organismos vivos, se transforman en otras sustancias en muchas ocasiones más perjudiciales; originando diferentes problemas ambientales y deteriorando la salud de las personas. La materia o energía que ingresan a los ecosistemas y que se acumulan, alteran o exceden las concentraciones iniciales de un sistema, se le conoce como contaminación y cuando esas sustancias son de carácter tóxico, generando perjuicios al

sistema donde ingresan se le denomina como contaminación por tóxicos (Jaramillo *et al.*, 2009). Por otro lado, si la clasificación se realiza según la naturaleza del agente contaminante, se tiene tres tipos de contaminación como sigue: *i*) la contaminación biológica como los virus y bacterias; *ii*) contaminación física, incluyéndose la causada por ruido, radiación, vibraciones y *iii*) contaminación química que es la causada por sustancias artificiales o xenobióticos.

Para el caso de la toxicología ambiental, los xenobióticos son de especial atención por cuanto su potencial de causar daños tanto al medio ambiente como a las personas (Peña *et al.*, 2001).

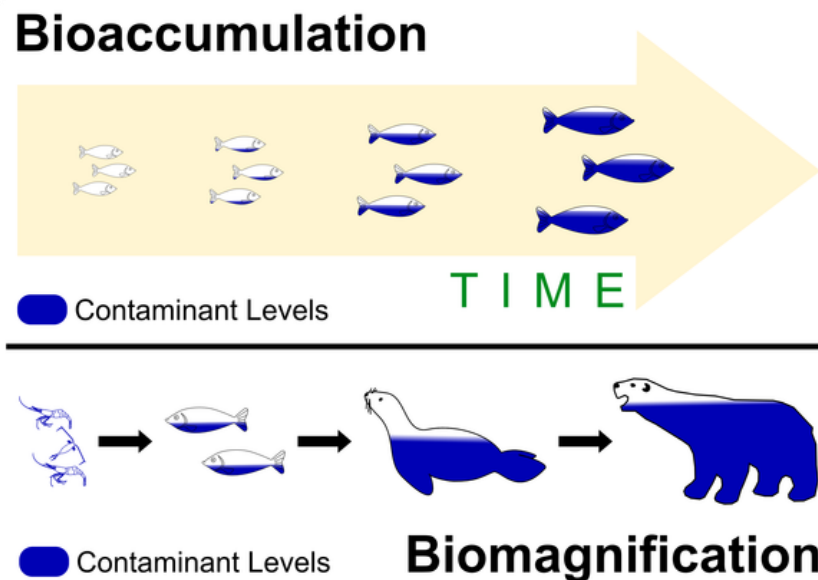
2.2. Movilidad y persistencia de los xenobióticos

Dependiendo de sus características, una vez son descargadas las sustancias químicas al ecosistema, éstas se transforman y distribuyen por los diferentes niveles de la cadena trófica (Walker *et al.*, 2012). Los productores primarios, representados por los organismos autótrofos como las plantas y algas, son el primer eslabón de la cadena. Éstos toman la energía del sol para la producción de alimento y pueden así mismo, ser afectados por sustancias por vías de ingreso como la absorción a través de sus raíces, y en este caso, si la sustancia es persistente, puede llegar a bioacumularse y aumentar su concentración con el paso del tiempo (Rodríguez Martínez, 2016; Sansolini, 1994). Más tarde en el siguiente eslabón, los consumidores herbívoros se alimentan de los productores, que al tener en su sistema una sustancia que se ha bioacumulado, éstos son afectados también por aquella sustancia empezando de esta manera la biomagnificación. Posteriormente, el eslabón que sigue representado por los consumidores carnívoros, toman su alimento consumiendo a los

herbívoros, biomagnificando la sustancia a través de la cadena trófica (Rodríguez Martínez, 2016). Es así como al llegar al final de la cadena, las concentraciones de la sustancia son muy superiores a la inicial. Este comportamiento se puede observar en la Figura 1.

Figura 1

Representación de niveles de contaminante en bioacumulación y biomagnificación



Fuente: Científico Nano (2014).

Con lo anterior, se puede observar que cuando se habla de Bioacumulación, se hace referencia al almacenamiento de tóxicos persistentes en los organismos a través del tiempo, acumulándose a través de alimentos contaminados o por su entorno, y que no pueden ser desechados o metabolizarlos de forma rápida, por ello se acumulan. Por otro lado, la Biomagnificación es el aumento de los niveles de la concentración del tóxico a través de la cadena trófica, donde el último

eslabón de la cadena, tendrá altas concentraciones del tóxico con respecto al organismo inicial (Figura 1) (Científico Nano, 2014).

Un ejemplo de la distribución de contaminantes tóxicos en el ambiente, son los Bifenilos Policlorados (PCB's), los cuales son un compuesto químico muy persistente; dada su estabilidad, no se degradan con facilidad, no son solubles en agua pero si en grasas, lo que le permite alojarse en el tejido graso de los animales y al no poder ser metabolizados adecuadamente, tienden a bioacumularse en dichos organismos (Safe, 1992). Posteriormente, estos organismos contaminados son consumidos por otros seres vivos, siendo éstos afectados también por la sustancia química alojada en el primer organismo, produciéndose de esta forma la biomagnificación (Sansolini, 1994). Así mismo, los PCB's cuando se destruyen por incineración, éstos desprenden pequeñas cantidades de dioxinas y furanos, los cuales son compuestos muy tóxicos debido a que afectan el sistema inmunológico y poseen características teratogénicas, cancerígenas y mutagénicas; es por ello que se constituyen en un importante contaminante ambiental (Marinković *et al.*, 2010; Olie *et al.*, 1998; Safe, 1992). Dada la persistencia de los PCB's otorgada por su estabilidad química, estos compuestos permanecen mucho tiempo en el ambiente afectando a los organismos de la forma como se ha descrito previamente (Marinković *et al.*, 2010).

Otro ejemplo respecto a contaminantes atmosféricos, son los gases de compuestos que contienen azufre como el dióxido de azufre SO_2 ; el cual surge a partir de la quema de combustibles fósiles con contenido de azufre (Zakrzewski, 2002). Estos SO_2 , son contaminantes primarios que, al emitirse al entorno, se combinan con el agua de la atmósfera mediante procesos fotoquímicos (a causa de la luz solar), se convierte en trióxido

de azufre SO_3 parcialmente y en ácido sulfúrico H_2SO_4 ; éstos últimos compuestos son contaminantes secundarios que se consideran así porque surgen indirectamente y a partir del contaminante primario; es decir, que supone, existió una transformación en el ambiente (Shaw y Chadwick, 1998; Zakrzewski, 2002). El SO_2 es soluble en el agua, causa irritación en las vías respiratorias de las personas expuestas, provocando broncoconstricción, estimulando las secreciones del árbol respiratorio, produciendo una sensación astringente y pérdida del reconocimiento de olores y sabores; con exposición crónica en lo específico, causa bronquitis en las poblaciones humanas (Jaramillo *et al.*, 2009), mientras que el SO_3 pasa a ser H_2SO_4 , el cual al precipitarse en forma líquida, genera lluvia ácida (Capó, 2009). Dentro de este mismo mecanismo, se encuentran los gases monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV), los cuales una vez son emitidos al ambiente, interactúan con la humedad y la luz solar; convirtiéndose en otras sustancias (contaminantes secundarios), causando diversos problemas al ambiente y al ser humano (Liu *et al.*, 2017) (Ver figura 2).

Figura 2

Interacción de contaminantes atmosféricos



Fuente: Sistema de Información Ambiental de Colombia -SIAC (2020).

Por otro lado, hablando de los organismos expuestos, los efectos que causan en ellos las sustancias tóxicas van a ser variados, debido a que dicho efecto no depende solamente de la concentración o cantidad de la sustancia, sino que entran a influir diferentes factores, siendo estos los siguientes: *i)* el tipo de especie; *ii)* tamaño; forma de exposición a la sustancia tóxica; *iii)* edad; *iv)* nutrición, entre otros aspectos (Zakrzewski, 2002).

2.3. Comprensión de conceptos

Una vez se haya culminado el capítulo de movilidad, persistencia y biodisponibilidad; sírvase de reflexionar y responder los siguientes cuestionamientos:

1. ¿Qué se entiende como toxicología ambiental?
2. ¿Qué son y de dónde provienen las sustancias llamadas xenobióticas?
3. ¿Una sustancia tóxica, es lo mismo que un contaminante? Justifique su respuesta.
4. Describa con sus propias palabras, el significado de biomagnificación y bioacumulación.
5. ¿Cuándo una sustancia tóxica es persistente?
6. ¿Qué factores influyen en la respuesta o efectos que pueden ocasionar las sustancias tóxicas?

3. COMPARTIMIENTOS AMBIENTALES Y LOS TÓXICOS

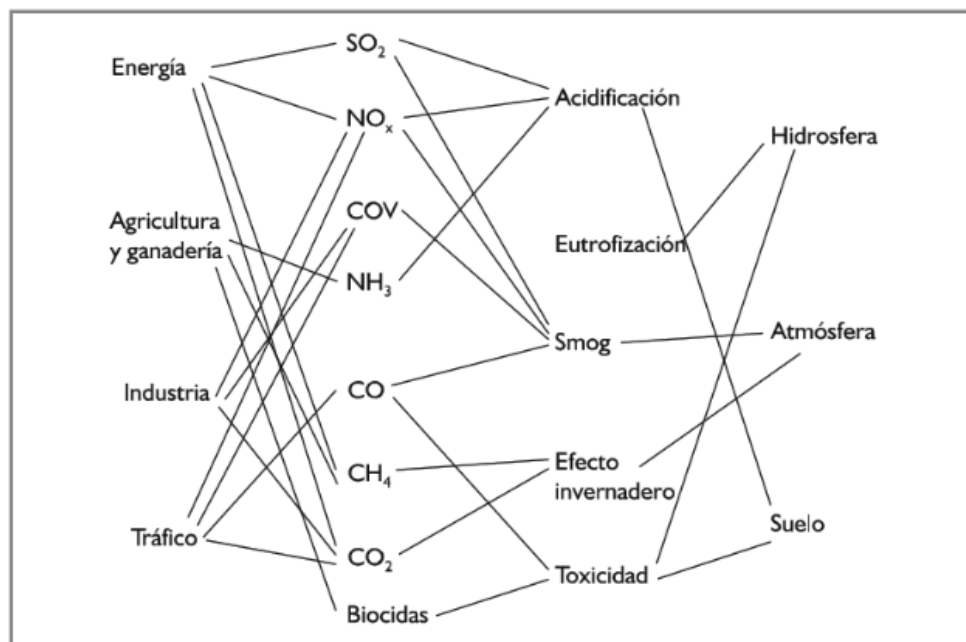
Dentro de los ecosistemas se pueden identificar diferentes medios naturales a donde llegan los xenobióticos como el compartimiento atmosférico, el compartimiento agua y el compartimiento suelo.

Al compartimiento atmosférico, llegarán las sustancias en forma de gases, partículas sólidas o líquidas (vapor), emisiones causadas por fuentes móviles como los vehículos, ferrocarriles, fuentes fijas como calderas industriales, refinerías de petróleo, ladrilleras o fuentes de área como los rellenos sanitarios o almacenamiento y distribución de gas LP (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático-INECC, 2007). Al compartimiento agua, pueden llegar los tóxicos a través de vertimientos, escorrentía e incluso, precipitación y dada a la capacidad del agua de disolver, pueden contener gran cantidad de elementos contaminantes en forma disuelta o suspendida (Capó, 2009). Las fuentes de contaminación para el compartimiento agua, pueden provenir de fuentes puntuales como las descargas de vertimientos de aguas residuales, vertimientos de plantas de tratamiento e hidroeléctricas y fuentes no puntuales como la

escorrentía (Jaramillo *et al.*, 2009). En el compartimiento suelo, pueden llegar tóxicas situaciones como uso de pesticidas, vertimientos líquidos con contenido de solventes, metales pesados, biocidas y disposición inadecuadas de residuos sólidos entre otros. En la figura 3, se puede observar algunos contaminantes tóxicos, los cuales al ser emitidos al medio, ocasionan diferentes impactos como acidificación, efecto invernadero, smog fotoquímico, eutrofización y toxicidad en el agua y suelo (Capó, 2009).

Figura 3

Interrelaciones existentes entre fuentes, receptores y los impactos ambientales causados



Fuente: Capó (2009).

Entre las sustancias químicas y elementos nocivos más comunes que afectan a los ecosistemas por su toxicidad en cada uno de los compartimientos ambientales, se tienen las siguientes de acuerdo con

Walker *et al.* (2012): *i*) material particulado; *ii*) metales pesados como el Plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), cromo (Cr), arsénico (As); *iii*) compuestos orgánicos volátiles (COV); *iv*) plaguicidas; *v*) hidrocarburos; *vi*) bifenilos policlorados (PCB) y *vii*) dioxinas y furanos.

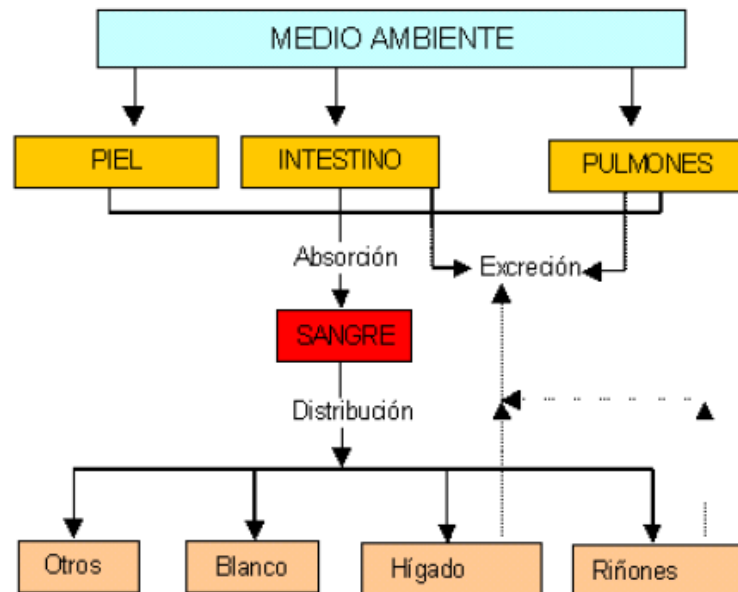
Cabe anotar que todos estos compuestos van a afectar a los individuos a través de las vías de exposición. Cuando se habla de las “vías de exposición” de los organismos, éstas se dividen en oral, cutánea o dérmica y respiratoria. Las vías de exposición constituyen el mecanismo o lugar por donde los tóxicos ingresan al organismo que se encuentra expuesto a las sustancias, mientras que la “ruta de exposición” es el camino que recorren dichos tóxicos desde que son emitidos hasta llegar finalmente al individuo u organismo (Peña *et al.*, 2001). Para describir la ruta de exposición se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Fuente que causa la liberación de la sustancia tóxica al ambiente.
- Medio por el cual se transporta la sustancia liberada.
- Lugar o entorno donde entraría en contacto el individuo con el medio contaminado (punto de contacto).
- Vías de exposición o manera de ingreso del tóxico al organismo.

En este sentido, aparecen conceptos como Toxicocinética y Toxicodinamia. Como se ha descrito previamente, los tóxicos emitidos al ambiente, poseen características que predisponen un comportamiento de distintas maneras, produciendo efectos negativos en los ecosistemas y en los individuos expuestos; tal como el proceso que sufre un tóxico desde que ingresa al organismo hasta que éste es excretado, a lo cual se le denomina, toxicocinética y en ello, surten diferentes etapas a saber: adsorción, distribución, metabolismo y excreción; conformándose la sigla conocida como ADME (Peña *et al.*, 2001) (ver figura 4).

Figura 4

Metabolismo del tóxico en un organismo expuesto



Fuente: Peña *et al.*(2001).

Por otro lado, la toxicodinamia se encarga de evaluar cómo esos xenobióticos actúan en el organismo expuesto, es decir, las alteraciones o efectos producidos, debido a que estas alteraciones se presentan a nivel celular; lo cual, dependiendo de su magnitud, pueden producir trastornos funcionales, estructurales o incluso la muerte (Jaramillo *et al.*, 2009). Por estas interacciones, resulta importante el identificar y evaluar los agentes tóxicos emitidos al ambiente, para conocer cómo se pueden establecer medidas que ayuden a evitar este tipo de impactos.

3.1. Comprensión de conceptos

En esta oportunidad, una vez leído el capítulo de compartimientos ambientales y los tóxicos, sírvase de responder lo siguiente:

1. ¿Cuáles son los compartimientos ambientales?
2. ¿Cuáles son las vías de exposición?
3. ¿Qué es la ruta de exposición y qué aspectos se deben tener en cuenta para describir la misma?
4. ¿Cuál es la diferencia entre los procesos de toxicocinética y toxicodinamia?
5. ¿A qué se refiere la sigla ADME?

4. INTERACCIONES DE LOS XENOBIÓTICOS

De acuerdo lo mencionado antes, entre las sustancias más comunes consideradas como tóxicas, las que afectan a los distintos compartimientos ambientales (Walker *et al.*, 2012), se encuentran el material particulado, metales pesados (Pb, Cd, Hg, Cr, As), compuestos orgánicos volátiles (COV), plaguicidas, hidrocarburos, bifenilos policlorados (PCB) y las dioxinas, furanos y fertilizantes. Para comprender más la forma en que cada una de estas sustancias afectan a los ecosistemas y a las personas, se hace necesario conocer cómo las mismas interactúan con el medio de acuerdo a sus características fisicoquímicas.

4.1. Material particulado

Se conoce como material particulado a sustancias que pueden estar en estado sólido o líquido suspendidos en la atmósfera (Moscoso *et al.*, 2019), las cuales pueden provenir de la naturaleza por emisiones

volcánicas, levantamiento de la arena e incluso el polen que es arrastrado por el viento, y por actividades antropogénicas donde se emiten a la atmósfera vapores y partículas provenientes de la industria cementera, fábricas de acero, actividades de construcción, fundidoras, vehículos automotores, etc. (Perez *et al.*, 2010). Estas partículas se encuentran en distintos tamaños a saber: *i*) partículas suspendidas totales (PST) con un tamaño de diámetro entre 10 y 100 micras; *ii*) material particulado con diámetro de 10 micras o inferior (PM_{10}) y *iii*) material particulado de diámetro de 2.5 micras o inferior ($PM_{2.5}$) e incluso, aquellas partículas que tienen un diámetro de 1 micra (PM_1) (Perez-Vidal *et al.*, 2010). Las PST y PM_{10} , se consideran material grueso y las de tamaño de 2.5 y 1 micra, son material fino y ultrafino respectivamente; donde se consideran respirables las de tamaño de 10 micras y menores, con la diferencia de que las PM_{10} , se quedan atrapadas en las fosas nasales, mientras que las $PM_{2.5}$ y tamaños inferiores, pueden llegar a penetrar hasta los alveolos pulmonares provocando diversos problemas de salud. El material fino es de gran importancia debido al poder de penetración en el organismo y a su composición química, puesto que pueden contener sustancias orgánicas de toxicidad alta como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), carbono elemental e incluso algunos metales pesados que son por mencionar algunos el arsénico (As), plomo (Pb), cromo (Cr), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) y hierro (Fe), causando graves problemas de salud tales como cáncer, complicaciones cardíacas, bronquitis y artritis reumatoide (Gélvez *et al.*, 2012).

El aire de las ciudades, sobre todo el de las grandes capitales, el material particulado es causado principalmente por el parque automotor, donde las emisiones de los vehículos entregan gases y vapores con partículas del orden de tamaño respirable PM_{10} e inferiores, siendo los motores que

funcionan a base de diésel, los generadores de $PM_{2.5}$. Este tipo de material fino proveniente del diésel, es altamente tóxico, produciendo efectos cancerígenos en las personas expuestas a largo tiempo y en el ambiente, contribuyendo a la formación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Gélvez *et al.*, 2012).

Así mismo, en el ambiente se pueden observar diferentes efectos a causa de la deposición de estas partículas, llevando a afectar la composición de la química del suelo que alteran en esta medida el crecimiento y reproducción de las plantas (Moscoso-Vanegas *et al.*, 2019). Por otro lado, al depositarse este material sobre las hojas de las plantas dificulta la respiración y fotosíntesis de las mismas, llevando a producirse efectos físicos y químicos que son visibles con la caída de flores, pérdida del color, desecación, disminución en el crecimiento de la radícula de la planta, manchas, enrollamiento foliar, necrosis y clorosis (Moscoso-Vanegas *et al.*, 2019). Estas respuestas observadas en las plantas se conocen como efectos fitotóxicos y existen ensayos destinados a evaluar dichos efectos, para lo cual se utilizan semillas de plantas terrestres vasculares, monitoreando la germinación y la elongación de la radícula durante sus primeros días de crecimiento principalmente (Moscoso-Vanegas *et al.*, 2019).

4.2. Metales pesados

Se denomina a metales pesados al grupo de elementos químicos con característica o naturaleza metálica, que presenta una alta densidad y toxicidad (Walker *et al.*, 2012), estos son: el plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plata (Ag), cromo (Cr), cobre (Cu), aluminio (Al), berilio (Be), arsénico (As), hierro (Fe), zinc (Zn), níquel (Ni), cobalto (Co), titanio

(Ti), selenio (Se), antimonio (Sb), estaño (Sn), manganeso (Mn), bario (Ba), molibdeno (Mo) y vanadio (V). Sin embargo, entre el listado de metales pesados, algunos de ellos, intervienen en procesos biológicos importantes debido a que son oligoelementos necesarios para la vida siendo el caso del Cr, Fe y Cu; otros presentan características metaloides, encontrándose dentro de éstos, el As, Te y Sb y el Selenio, el cual es un elemento no metal, pero se colocan en el mismo grupo de metales pesados debido a su densidad de 4 g.cm^{-3} o peso atómico mayor a 20 (Jaramillo *et al.*, 2009; Londoño-Franco *et al.*, 2016). A los metales que funcionan como oligoelementos, se encuentran dentro de la clasificación dado a que, si éstos superan las cantidades requeridas por los organismos; pueden ser muy perjudiciales generando niveles considerables de toxicidad (González *et al.*, 2010).

Las principales fuentes de emisión de metales pesados al ambiente son las actividades antrópicas (Briffa *et al.*, 2020; Walker *et al.*, 2012). Actividades industriales como la minería, fundición, metalmecánica, petroquímica, producción de baterías y elementos electrónicos, las curtiembres y producción de cerámicas, son las principales actividades, seguido en segunda instancia, por actividades agrícolas que involucran el uso de fertilizantes, plaguicidas e insecticidas (Briffa *et al.*, 2020; Wasi *et al.*, 2013), liberando estos contaminantes por acción del ciclo del agua, llegando afectar aguas superficiales y subterráneas, a las plantas y animales; introduciéndose en la cadena trófica, generando graves problemas a la salud de personas y animales (Doria y Deluque, 2015; Londoño *et al.*, 2016; Wasi *et al.*, 2013).

Es muy importante monitorear los metales pesados debido a que tienen afinidad por ligandos biológicos (sulfitos, purinas, ácido nucleico,

fostatos), interfiriendo así con la normal actividad de la célula, además que influyen en procesos biológicos como la inactivación de enzimas y no permiten la replicación del material genético de las células. En adición, los metales pesados por ser casi nula su biodegradación, son persistentes, debido a esto, se bioacumulan y biomagnifican, generando de esta manera mutaciones y alteraciones metabólicas en los seres vivos (Doria y Deluque, 2015). Por otro lado, la toxicidad de los metales pesados depende de dos aspectos: *i*) concentración total y *ii*) biodisponibilidad (Wasi *et al.*, 2013). La biodisponibilidad de un metal pesado será mayor o menor dependiendo de su estado químico y físico, es por ello, que un metal pesado se encontrará disponible para su absorción si éste se encuentra ionizado y en estado soluble. Por otro lado, las formas insolubles del metal que se encuentren en forma coloidal junto con la materia orgánica suspendida en agua o en sedimento, no se encuentra biodisponible siempre y cuando esa condición no cambie; condición que se conoce como inmovilización del metal (Jaramillo *et al.*, 2009). Así mismo, el estado de oxidación del metal llega a influir sobre cuál de las especies químicas es más tóxica dada su biodisponibilidad, un ejemplo es el Cr(IV) y el Cr(III), donde el Cr(III) es menos soluble con respecto al Cr(VI), por lo que se encuentra menos biodisponible y por ende, menos tóxico (Jaramillo *et al.*, 2009). Otro aspecto importante a considerar es el pH, el cual puede influir en el equilibrio de las formas solubles y no solubles de los metales pesados. Un pH más ácido en los cuerpos de agua, es un escenario que puede presentarse cuando se degrada la materia orgánica, hace que aumente la solubilidad y biodisponibilidad de los metales pesados (Jaramillo *et al.*, 2009).

4.3. Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Los compuestos orgánicos volátiles se conocen normalmente con la sigla COV (en inglés VOC), conformando este grupo, los hidrocarburos alifáticos como el metano y el propano, los aromáticos en el caso del benceno y tolueno, alcoholes como el etanol y metanol, los hidrocarburos clorados, los éteres y glicoles; los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su peligrosidad, composición o aplicabilidad en diferentes actividades (Jaramillo *et al.*, 2009). Estos compuestos tienen la propiedad de ser muy volátiles y liposolubles, por ello, es posible encontrarlos en los diferentes compartimientos ambientales, dada su alta volatilidad, pueden dispersarse muy fácil en el aire, disolverse en el agua o introducirse en el suelo (Montero *et al.*, 2018) y debido a su liposolubilidad, permite atravesar epitelios mucosos del tracto respiratorio y membranas celulares de diferentes órganos (Montero *et al.*, 2018).

En lo que respecta a aplicabilidad, los COV's, son utilizados en la industria en diferentes usos, dentro de los que se destacan: productos disolventes, aromatizantes, productos de limpieza, repelentes, entre otros. En cuanto a la emisión al ambiente como sustancia contaminante, la industria es la principal fuente de generación, seguido por el transporte vehicular, donde la combustión incompleta de combustibles fósiles emite a la atmosfera importantes cantidades de COV's (Batterman *et al.*, 2014; Montero *et al.*, 2018). Así mismo, los COV's, pueden provenir de fuentes naturales como incendios forestales por la combustión incompleta de la materia orgánica o de emisiones biogénicas provenientes de la vegetación, la digestión de animales rumiantes, las erupciones volcánicas, océanos o suelos por la actividad microbiana (Jaramillo *et al.*, 2009; Montero *et al.*, 2018).

La emisión al ambiente de este tipo de compuestos, ha cobrado importancia en su estudio a causa de los efectos tóxicos desde leves hasta graves, que pueden producir a la salud humana y a los ecosistemas. Entre los efectos leves a la salud, se destaca la irritación de los ojos, dolor de cabeza, mareo, afectación de vías respiratorias, náuseas y fatiga, y en entre los efectos graves, se encuentra la generación de daños en la función del hígado, el sistema respiratorio, sistema neuronal; demostrándose otras afectaciones como la relación del bajo peso al nacer de los bebés y el desarrollo de cáncer (Montero *et al.*, 2018). Por otro lado, en los ecosistemas pueden llegar a influir la fotosíntesis, afectando de esta forma el crecimiento y metabolismo de las plantas, además de hacerlas mucho más sensibles a condiciones de calor o heladas y sequías; en las ciudades se comportan como precursores del ozono troposférico, debido a que es un agente muy tóxico y oxidante que causa afectaciones a las vías respiratorias y los ojos (Jaramillo *et al.*, 2009).

4.4. Plaguicidas

Los plaguicidas como su nombre lo indica, son sustancias químicas que son diseñados para eliminar plagas, por ello, en su composición están presentes diferentes sustancias que resultan tóxicas para esos organismos con objeto de supresión. Los pesticidas se liberan al ambiente para que puedan ejercer su acción y dado que éstos pueden contener distintos elementos tóxicos para los organismos, diferentes leyes se han elaborado para establecer la debida regulación de los compuestos con los que se fabrican éstos, buscando que sean lo menos nocivos para el ambiente (Hernández *et al.*, 2013; Nogar y Ayelén, 2014). Dentro del grupo de pesticidas, se encuentran los herbicidas, funguicidas e insecticidas; siendo los herbicidas los más ampliamente utilizados. La

composición química de los plaguicidas es variada, debido a que dependerá de la función específica que éste ejercerá. La exposición a estos químicos puede ocurrir vía respiratoria, digestiva y dérmica; debido a que es posible que ingresen al organismo a través de la comida o el agua; a través de una exposición directa durante su utilización o fabricación de estas sustancias (Hernández *et al.*, 2013). Entre los plaguicidas más utilizados, se encuentra el dicloro difenil tricloroetano (DDT), el cual es un plaguicida organoclorado bastante persistente dado a su gran estabilidad química, se bioacumula, se biomagnifica y como no permite el crecimiento microorganismos, se degrada de forma muy lenta en el ambiente (Científico Nano, 2014; Kopytko *et al.*, 2017). En Colombia, se realizaron experimentos con cultivos de algodón especialmente entre los años 1970 y 1980; sin embargo, en la actualidad, su utilización se encuentra prohibida debido a que se ha demostrado su afectación a la salud de las personas. Entre las afectaciones más significativa a las personas, se encuentran: *i*) afectación al sistema nervioso; *ii*) el cerebro; *iii*) hígado; *iv*) sistema reproductivo y *v*) cáncer (Kopytko *et al.*, 2017).

Los plaguicidas son tóxicos para los seres humanos en cualquier dosis, ya sea dosis alta o baja, y así mismo, resulta tóxica la mezcla de éstos, debido a que interactúan con el organismo deteriorando la salud de las personas; provocando enfermedades de orden respiratorio, enfermedades neurodegenerativas, afectaciones a la reproducción e incluso, pueden llegar a causar cáncer cuando se presentan exposiciones a largo plazo (Hernández *et al.*, 2013; Tsatsakis *et al.*, 2011; Zeliger, 2011). Estas interacciones toxicocinéticas y toxicodinámicas, van a depender del mecanismo de acción de cada compuesto del plaguicida (Rizzati *et al.*, 2016). En cuanto a la afectación al ambiente, los

plaguicidas con contenido significativo de algunos metales pesados como el arsénico (As), cobre (Cu) o cromo (Cr), se convierten en generadores de emisión de contaminación por metales pesados, provocando los efectos que este tipo de elementos ocasionan en las cadenas tróficas (Briffa *et al.*, 2020; Walker *et al.*, 2012).

4.5. Hidrocarburos

El petróleo es un recurso de origen natural, producto de la transformación de la materia orgánica fosilizada bajo condiciones extremas de presión y temperatura durante miles de años (Hunt *et al.*, 2019; Jaramillo *et al.*, 2009; Todd *et al.*, 1999). Gracias al petróleo, se obtienen derivados como la gasolina, queroseno, aceite mineral o lubricantes, entre otros; los cuales son necesarios para proveer energía, siendo además materia prima para distintos procesos. Tanto el petróleo en sí como sus derivados, son denominados hidrocarburos, dado que se componen en su mayoría, de hidrógeno (H) y carbono (C), haciendo que su composición sea muy variada entre un compuesto de hidrocarburo y otro (Todd *et al.*, 1999). La emisión de hidrocarburos en el ambiente, se presenta principalmente por derrames accidentales en actividades durante el transporte a través de embarcaciones o camiones, en actividades industriales como la refinación, la extracción del crudo en yacimientos, y perforación, o en subproductos de actividades comerciales; afectando considerablemente los cuerpos de agua y suelo (Jaramillo *et al.*, 2009; Todd *et al.*, 1999).

Cuando se presentan los derrames en cuerpos de agua, pueden suceder diversos procesos a saber: *i*) en la superficie, se forma una fina capa delgada que permanece flotando y *ii*) las fracciones más pesadas del

hidrocarburo, pueden llegar a depositarse en el fondo. La capa de la superficie interrumpe el intercambio gaseoso de oxígeno entre el agua y la atmósfera; provocando la disminución del oxígeno disuelto en agua. Por otro lado, el hidrocarburo sedimentado, termina causando afectación a los peces que se alimentan del fondo. Los hidrocarburos, además, pueden infiltrarse en capas más profundas del suelo y afectar las aguas subterráneas (Todd *et al.*, 1999). Entre otros efectos significativos en la salud humana está que, por contacto directo, se presenta degradación de las membranas celulares, pues estos compuestos actúan como solventes de los lípidos, por otro lado, pueden presentarse bioacumulación y biomagnificación dado a que los organismos no tienen la capacidad de expulsarlos de manera rápida, afectando de igual manera la cadena trófica. Así mismo, se ha visto que éstos compuestos tienen relación con la aparición de efectos cancerígenos, mutagénicos y teratogénicos (Ossai *et al.*, 2020).

Por otro lado, el transporte vehicular, emite a la atmósfera, gases tóxicos como los óxidos de carbono CO_x (CO y CO_2), los óxidos de nitrógeno NO_x (NO y NO_2) y compuestos orgánicos volátiles (COV); los cuales son generados por la combustión incompleta de la gasolina o el diésel ocurrida normalmente dentro de los motores de los vehículos (Liu *et al.*, 2017; Shaw y Chadwick, 1998). Los óxidos de carbono aportan al calentamiento global, los óxidos de nitrógeno y los COV, reaccionan químicamente junto con la luz solar, generando ozono troposférico y contribuyendo de esta manera con el smog fotoquímico (Wang *et al.*, 2017). Así mismo, cuando los hidrocarburos se encuentran poco refinados o presentan contenido de azufre (S); durante la quema de éstos, se emiten a la atmósfera los óxidos de azufre SO_x (SO y SO_2), los cuales reaccionan con la humedad del aire

y producen lluvia ácida, causando acidificación de suelos, deterioro de infraestructuras y daños en cultivos (Wang *et al.*, 2017).

4.6. Bifenilos policlorados

Los bifenilos policlorados, conocidos como PCBs (sigla en inglés), son un grupo de compuestos pertenecientes a los compuestos orgánicos aromáticos, en su estructura presentan cloro (Cl) y son fabricados comercialmente para diferentes usos; por ejemplo, como aislante térmico en transformadores y condensadores, a causa de la propiedad de soportar altas temperaturas por poseer un punto de ebullición muy alto y no ser inflamables (Peña *et al.*, 2001; Safe, 1992). Sin embargo, se ha discontinuado su uso, debido a que se hace muy persistente en el ambiente, debido a que no se biodegrada y más aún, mantiene una movilidad significativa en los diferentes compartimientos ambientales, encontrándose presencia en el agua, suelo, aire y sedimentos. Es además, son lipofílico (es decir, disuelve las grasas) por lo que se ha encontrado en peces, tejido adiposo de los humanos, leche materna y no son solubles en agua (Safe, 1992). Estos compuestos pueden pasar por evaporación desde el suelo o agua a la atmósfera y posteriormente, con la precipitación del agua, vuelven a caer ya sea a cuerpos de agua o suelo; afectando incluso a los acuíferos. Estos una vez en el agua, una parte puede volver a evaporarse y otra, puede llegar a depositarse en el fondo y aferrarse a la materia orgánica y los sedimentos, haciendo que permanezcan en el ambiente mucho tiempo, debido a que la acción de los microorganismos sobre estos compuestos se torna muy lenta (Jaramillo *et al.*, 2009; Safe, 1992).

Entre los efectos tóxicos de estos compuestos, se correlacionan la causa de enfermedades o lesiones en la piel (cloracné), problemas auditivos, visuales y respiratorios, problemas gastrointestinales, niveles elevados de lípidos séricos, afectación del hígado e incluso, ha llegado a ser categorizado como agente probable causante de cáncer en humanos (Safe, 1992).

4.7. Dioxinas y furanos

Se conocen como dioxinas y furanos, los compuestos orgánicos como los clorados, siendo sus nombres completos dibenzodioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF), respectivamente; donde de 210 especies de dioxinas y furanos, 17 son tóxicos, siendo la 2,3,7,8-Tetraclorodibenzo-*p*-*dioxina* (más conocida como TCDD), el compuesto más tóxico del grupo (Marinković *et al.*, 2010). Las dioxinas no tienen ninguna aplicabilidad, solo se generan como producto de la combustión incompleta de la materia orgánica, donde sus fuentes naturales son los incendios forestales y la erupción volcánica, mientras que en las actividades antropogénicas, son un subproducto indeseado de la combustión de residuos con contenido de cloro principalmente, la quema de combustibles fósiles, la incineración de compuestos clorados tales como los bifenilos policlorados o tubos de PVC (Marinković *et al.*, 2010) y un herbicida conocido como 2,4,5 T (ácido 2,4,5-triclorofenoxiacético), el cual fue prohibido por el convenio de *Róterdam* a causa de sus efectos en la salud humana y el ambiente (Olie *et al.*, 1998). Dependiendo de la temperatura de combustión y la presencia del cloro en los elementos incinerados, así como la concentración de oxígeno y dióxido de carbono, se producirán más o menos dioxinas. En temperaturas entre 200 a 400°C, se generan las dioxinas, pero en temperaturas por encima de los 800°C,

se presenta una disminución significativa en su formación hasta casi destruir la totalidad de las mismas (Marinković *et al.*, 2010; Olie *et al.*, 1998).

Entre los efectos tóxicos que se presentan más comúnmente en humanos, se encuentran la teratogenicidad, toxicidad hepática, reducción en la reproducción, cloracné, disfunción sexual, trastornos neurológicos y cambios en el comportamiento (Olie *et al.*, 1998).

4.8. Fertilizantes

A medida que se cultiva, se requiere que los suelos repongan los nutrientes que las plantas toman para así, favorecer la productividad, lo cual, se logra con la aplicación de fertilizantes a base de nitrógeno (N) o fósforo (P) (Hodge, 1994). El nitrógeno (N), es importante para diversos procesos en los ecosistemas, en los ciclos biogeoquímicos y en la misma productividad de las plantas. Sin embargo, esa aplicación artificial de nutrientes de nitrato amónico, urea y fósforo (P), puede conllevar a problemas ambientales por arrastres de nitrógenos y fósforo en exceso hacia cuerpos de agua, generando de esta forma, eutroficación (Shaw y Chadwick, 1998), además de una alteración en el equilibrio de los suelos, afectando la fertilidad de los mismos por la disminución de calcio (Ca) y potasio (K) (Marco, 2002; Yepis *et al.*, 1999). También el exceso de nitrógeno (N), genera gases nitrogenados hacia la atmósfera, aportando a la formación de lluvia ácida, a la acidificación de los suelos y una parte, puede infiltrarse llegando a contaminar aguas subterráneas (Marco, 2002). En los seres humanos, el consumo de agua contaminada con nitratos, puede causar graves problemas, entre ellos; la metahemoglobinemia, (principalmente en bebés), en donde la

metahemoglobina pierde la capacidad de transportar oxígeno, causando asfixia de tejidos y por otro lado, los nitratos, se convierten en nitrosaminas que se encargan de provocar cáncer a mediano plazo (Marco, 2002; Shaw y Chadwick, 1998). Por otro lado, cabe anotar que en la naturaleza, el fósforo (P) es escaso, por lo que para la actividad agrícola, se aporta al suelo con la aplicación de fertilizantes, si se incorpora bien (es poco móvil), pero cuando éste logra movilizarse, puede llegar a aguas superficiales y causar eutrofización; siendo esto la proliferación de algas que da lugar a un agotamiento del oxígeno disuelto en agua y la misma capa de algas, evita que la luz del sol penetre a las aguas más profundas (Mosquera y Sainz, 2011).

Debido al uso indiscriminado de fertilizantes, la agricultura es una de las mayores fuentes de emisión excesiva de nutrientes que afectan principalmente los cuerpos de agua; afectando el uso de la misma para actividades en la industria, la recreación y el agua para consumo humano (Carpenter *et al.*, 1998).

4.9. Comprensión de conceptos

Con el fin de revisar los conceptos abordados en el capítulo de interacciones de los xenobióticos, se plantean las siguientes preguntas:

1. Indique ¿qué es material particulado y cómo se clasifican? ¿Cuál de los tamaños de partícula es el más nocivo y por qué?
2. ¿Cuáles son las propiedades de los elementos considerados metales pesados?

3. ¿Qué son los compuestos orgánicos volátiles? ¿en dónde se pueden encontrar?
4. ¿Cómo puede suceder la contaminación por hidrocarburos y qué consecuencias puede traer para el ambiente y los organismos vivos?
5. ¿En dónde se pueden encontrar los bifenilos policlorados? ¿cuáles son sus características más importantes?
6. ¿Por qué los fertilizantes se encuentran enlistados como sustancias que pueden generar toxicidad?
7. Identifique en su vida diaria dónde puede encontrar las sustancias tóxicas: compuestos orgánicos volátiles, dioxinas y furanos, metales pesados y plaguicidas.
8. ¿Qué enfermedades puede causar la exposición a material particulado, metales pesados, dioxinas, fertilizantes a base de nitrógeno?
9. Mencione ¿cuáles son los efectos al ambiente que generan los derivados del petróleo (gasolina / diesel)?
10. ¿Por qué considera que es importante conocer los efectos que pueden causar las sustancias tóxicas?

En adición a lo anterior y con el fin de repasar los temas claves, se recomienda revisar el recurso digital:

García, C. (2020). Interacción de los contaminantes tóxicos. [OVI]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/35172>

5. CONCLUSIONES

Las actividades del hombre o antropogénicas, emiten a cada compartimiento ambiental, sustancias químicas que generan diferentes

efectos en los ecosistemas y los seres vivos; lo cual depende de distintos factores que van desde el tipo de sustancia química o xenobiótico, hasta la forma en cómo se comportan, se transforman o se movilizan. Los factores como el tipo de especie, edad, tamaño y sensibilidad a la sustancia también influyen en los efectos que pueden causar los xenobióticos. Las sustancias químicas pueden ingresar a los organismos vivos por las vías de exposición y causar toxicidad a corto, mediano o largo plazo; presentándose escenarios relacionados con enfermedades respiratorias, alteraciones mutagénicas e incluso cáncer. El conocer de dónde provienen dichas sustancias y cómo actúan en el medio, permite poder establecer posibles soluciones para evitar las afectaciones que éstas producen.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Batterman, S., Feng-Chiao, S., Li, S., Mukherjee, B. and Jia, C. (2014). Personal exposure to mixtures of volatile organic compounds: modeling and further analysis of the riopa data. *Res Rep Health Eff Inst*, 181, 3-63.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4577247/pdf/nihms706229.pdf>.
- Briffa, J., Sinagra, E. and Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6, 26. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Capó, M. A. (2009). *Principios de ecotoxicología: diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente*. 2^{da} Edición. Tébar Flores (Eds). Madrid, España. 326p.
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N. and Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559-568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)
- Científico Nano, (2014). La moraleja de DDT- Biomagnificación, bioacumulación y la motivación de nuestra investigación.
<http://nano-sostenible.com/2014/04/15/la-moraleja-de-ddt-biomagnificacion-bioacumulacion-y-la-motivacion-de-nuestra-investigacion/>
- Doria-Argumedo, C. y Deluque-Viloria, H. (2015). Niveles y distribución de metales pesados en el agua de la zona de playa de Riohacha, La

- Guajira, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1), 123. <https://doi.org/10.22490/21456453.1268>
- Gélvez, I. M., Montañez, M. L. M. y Parra, A. Q. (2012). Actividad mutagénica y genotóxica en el material particulado fracción respirable MP 2,5 en Pamplona, Norte de Santander, Colombia. *Iatreia*, 25(4), 347-356.
<https://revistas.udea.edu.co/index.php/iatreia/article/view/13131/1880>
- González-Rojas, E., Gutiérrez, S., Rey Leon, A. y Soto, C. (2010). Biotransformación de metales pesados presentes en lodos ribereños de los ríos Bogotá y Tunjuelo. *Nova*, 8(14), 195.
<https://doi.org/10.22490/24629448.450>
- Hernández, A. F., Parrón, T., Tsatsakis, A. M., Alarcón, R. and López-Guarnido, O. (2013). Toxic effects of pesticide mixtures at a molecular level: Their relevance to human health. *Toxicology*, 307, 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2012.06.009>
- Hodge, C. A. (1994). Pollution control in fertilizer production. 1st edition. CRC Press-Taylor & Francis Group (Eds.). New York, USA. 520p.
<https://doi.org/10.1002/ep.670150110>
- Hunt, L. J., Duca, D., Dan, T. and Knopper, L. D. (2019). Petroleum hydrocarbon (PHC) uptake in plants: A literature review. *Environmental Pollution*, 245, 472-484.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.012>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC. (2007). Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos.
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>

- Jaramillo, F., Rincón, A. R. y Rico, R. (2009). Toxicología ambiental. Universidad Autónoma de Aguascalientes (Eds.). Guadalajara, México. 436p. <https://ebookcentral-proquest-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/lib/unadsp/reader.action?docID=3221575#>
- Kopytko, M., Correa-Torres, S. N. y Estévez- Gómez, M. J. (2017). Biodegradación estimulada de los suelos contaminados con pesticidas organoclorados. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 119-130. <https://doi.org/10.22490/21456453.1843>
- Liu, J., Wu, D., Fan, S., Liao, Z. and Deng, T. (2017). Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Pearl River Delta. *China Environmental Science*, 37(3), 813-820.
- Londoño-Franco, L., Londoño-Muñoz, P., & Muñoz-García, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- Marco, A. (2002). Contaminación global por Nitrógeno y declive de anfibios. *Revista española de herpetología*, 16(5), 17. http://www.herpetologica.org/revespherp/volespecial_2002/097-109%20MARCO.pdf.
- Marinković, N., Pašalić, D., Ferenčak, G., Gršković, B. and Rukavina, A. S. (2010). Dioxins and human toxicity. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 61(4), 445-453. <https://doi.org/10.2478/10004-1254-61-2010-2024>
- Montero-Montoya, R., López-Vargas, R. and Arellano-Aguilar, O. (2018). Volatile organic compounds in air: sources, distribution, exposure

- and associated illnesses in children. *Annals of Global Health*, 84 (2), 225-238. <https://doi.org/10.29024/aogh.910>
- Moscoso-Vanegas, D. L., Monroy-Morocho, L. M., Narváez-Vera, M. A., Espinoza-Molina, C. y Astudillo-Alemán, A. L. (2019). Efecto fitotóxico del material particulado PM10 recolectado en el área urbana de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *ITECKNE*, 16(1), 12-20. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v16i1.2157>
- Mosquera, E. y Sainz, J. (2011). Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola. Servicio de Publicacións e Intercambio Científico-Universidade de Santiago de Compostela (Eds.). Madrid, España. 227p.
- Nogar, A. G. y Ayelén Larsen, B. (2014). Análisis de riesgos en la salud de la población rural de la pampa argentina por uso de agroquímicos en cultivo de soja. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(2), 71. <https://doi.org/10.22490/21456453.1327>
- Olie, K., Addink, R. and Schoonenboom, M. (1998). Metals as catalysts during the formation and decomposition of chlorinated dioxins and furans in incineration processes. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 48(2), 101-105. <https://doi.org/10.1080/10473289.1998.10463656>
- Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A. and Hamid, F. S. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology and Innovation*, 17, 1-42. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>
- Peña, C. E., Carter, D. E., Ayala-Fierro, F., Superfund, A., Research, B., & Program, T. (2001). Toxicología ambiental. Evaluación de riesgos

- y restauración ambiental. Southwest hazardous waste program. University of Arizona (Eds.). Arizona, USA. 234p. USA <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>.
- Perez-Vidal, H., Lunagomez-Rocha, M. y Acosta-Perez, L. (2010). Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM10), en Cunduacán, Tabasco. *Universidad y Ciencia*, 26(2), 151-162. <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v26n2/v26n2a3.pdf>.
- Rizzati, V., Briand, O., Guillou, H. and Gamet-Payrastre, L. (2016). Effects of pesticide mixtures in human and animal models: An update of the recent literature. *Chemico-Biological Interactions*, 254, 231-246. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2016.06.003>
- Rodriguez-Martínez, J. (2016). Ecología. 4^{ta} Ed. Difusora Larousse - Ediciones Pirámide. 504p.
- Safe, S. (1992). Toxicology, structure-function relationship, and human and environmental health impacts of polychlorinated biphenyls: progress and problems. *Environmental Health Perspectives*, 100, 259-268. <https://doi.org/10.1289/ehp.93100259>
- Sansolini, D. (1994). Manual de ecología diaria. Espacio Editorial (Eds.). Buenos Aires, Argetina.109p.
- Shaw, I. and Chadwick, J. (1998). Principles of environmental toxicology. (1st Ed). CRC Press (Eds.). London, UK.216 p. <https://doi.org/10.1201/9781315273785>
- Sistema de Información Ambiental de Colombia -SIAC-. (2020). Aire. <http://www.siac.gov.co/aire>
- Todd, G. D., Chessin, R. L. and Colman, J. (1999). Toxilogical profile for

total petroleum hydrocarbons (TPH). U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Eds.). New York, USA.18p.

<https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp123-p.pdf>.

Tsatsakis, A. M., Androutsopoulos, V. P., Zafiropoulos, A., Babatsikou, F., Alegakis, T., Dialyna, I., Tzatzarakis, M. and Koutis, C. (2011). Associations of xenobiotic-metabolizing enzyme genotypes PON1Q192R, PON1L55M and CYP1A1*2A MspI with pathological symptoms of a rural population in south Greece. *Xenobiotica*, 41(10), 914-925. <https://doi.org/10.3109/00498254.2011.590545>

Walker, C. H., Sibly, R. M., Hopkin, S. P. and Peakall, D. B. (2012). Principles of ecotoxicology (4th Ed). CRC Press (Eds.). Boca Raton, USA.386p. <https://doi.org/10.1201/b11767>

Wang, T., Xue, L., Brimblecombe, P., Lam, Y. F., Li, L. and Zhang, L. (2017). Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects. *Science of the Total Environment*, 575, 1582-1596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.081>

Wasi, S., Tabrez, S. and Ahmad, M. (2013). Toxicological effects of major environmental pollutants: An overview. In: *Environmental Monitoring and Assessment*. 185 (3). (pp. 2585-2593). Springer (Eds.). <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2732-8>

Yepis, O., Fundora, O., Pereira, C. y Crespo, T. (1999). Contaminacion ambiental por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenado en el cultivo del tomate. *Scientia gerundensis*, 12(24), 5-12. <https://www.raco.cat/index.php/Scientia/article/view/45579/55143>.

Zakrzewski, S. F. (2002). Environmental toxicology (3th Ed). Oxford University Press (Eds.). New York, USA. 353p.
http://pustaka.unp.ac.id/file/abstrak_kki/EBOOKS/Environmental%20Toxicology%203rd%20edition.pdf.

Zeliger, H. (2011). Human toxicology of chemical mixtures: toxic consequences beyond the impact of one-component product and environmental exposures. 2nd edition. New York, USA. 574p.
<https://doi.org/10.1016/C2010-0-67068-4>