

CAPÍTULO 1

Introducción a la Ecotoxicología

Pedro Carriquiriborde

Surgimiento de la Ecotoxicología

Desde su origen en el planeta tierra, la vida ha evolucionado adaptándose a las condiciones del ambiente. Pocas son las especies que, como el ser humano, han logrado invertir esa lógica y adaptar el ambiente a sus necesidades. Desde los inicios, los ancestros de la especie humana fueron capaces de construir herramientas rudimentarias, dominar el fuego o construir su vestimenta. Justamente al dominio del fuego se le han atribuido los primeros casos de contaminación prehistórica intramuros. Posteriormente, los propios seres humanos lograron domesticar plantas y animales, dominar los metales y construir aldeas y ciudades. El crecimiento poblacional y el hacinamiento en las ciudades, sumado a las pobres condiciones de alimentación e higiene, condujeron en las Edad Media a la peste negra, la mayor pandemia que azotó Europa en el Siglo XIV y que acabó con más de un tercio de su población y el 20% de la población mundial de la época.

Luego, las transformaciones económicas, tecnológicas y sociales permitieron un crecimiento y distribución de la población humana y una capacidad de extraer recursos y energía del ambiente sin precedentes. Con una concepción respecto a que los recursos eran inagotables, rápidamente se empezaron a manifestar los primeros problemas de **degradación ambiental** a través de la agricultura, la silvicultura, la minería, la fundición y otras actividades. En 1723, Hans Carl von Carlowitz acuña el término “sustentabilidad” en un tratado comprensivo sobre silvicultura “Sylvicultura Oeconomica” en respuesta a la desaparición de los bosques de Saxony en Alemania, como producto de la minería indiscriminada. Sin embargo, el problema siguió potenciándose con la revolución industrial en el siglo XVIII a tal punto que, a principios del Siglo XX, fue necesario la promulgación de las primeras leyes de conservación, tales como la Ley Lacey aprobada en 1900 en EEUU para prohibir el tráfico de flora y fauna silvestres.

El crecimiento de las urbanizaciones y la intensificación de la industrialización condujo, a su vez, la producción y utilización de una inmensa variedad de sustancias químicas. Ello llevó a otro problema ambiental, el vinculado con la **contaminación ambiental**. Los efectos corrosivos del aire contaminado de las ciudades sobre las esculturas de mármol fueron ya advertidos desde el Siglo XVII por John Evelyn, pero fue Robert Angus Smith quien recién en 1852 demostró los efectos de la contaminación atmosférica sobre la vegetación en los

alrededores de Newcastle y Liverpool, acuñando el término de “lluvia ácida” en 1872. En el mismo período, 1824 y 1827, Josep Fourier y Claude Pouillet describieron que los gases de la atmósfera eran capaces de atrapar el calor entregado por la radiación solar y en 1896 Svante Arrhenius realizó la primera predicción de un hipotético calentamiento global causada por el aumento de los niveles de CO₂ en la atmósfera. Otros autores continuaron la idea, atribuyéndose al científico inglés John Henry Poynting haber utilizado por primera vez el término “efecto invernadero” en 1909.

La contaminación del aire asociado al desarrollo industrial causó el incremento de enfermedades respiratorias, e incluso la muerte en poblaciones urbanas. A principio del Siglo XX por la combinación de la contaminación del aire y de las condiciones climáticas (inversión térmica y niebla) que causaron problemas respiratorios a miles de personas y la muerte de 60 y 20 personas en el del Valle de Mosa en Bélgica (1930) y la ciudad de Donora en Estado Unidos (1948), respectivamente. Sin embargo, el caso más trágico ocurrió en Londres en 1952 debido a la contaminación del aire producto de la combustión del carbón combinado con la niebla (smog) que terminó prematuramente con la vida de 12000 personas. Producto de ello en 1956 Gran Bretaña aprobó la “Ley de Aire Limpio”.

A su vez, las precarias condiciones de trabajo y la introducción de nuevas sustancias químicas en la floreciente industria de inicios del Siglo XX trajeron aparejados problemas de contaminación que afectaron la salud humana. Tal fue el caso del envenenamiento con tetraetilo de plomo que en 1924 afectó a 49, y mató a 5, trabajadores de la empresa “Standar Oil” que trabajaban en la refinería de Nueva Jersey en EEUU apodada “Loony Gas Building” (edificio de la gasolina loca). En tal sentido, los trabajos de la médica estadounidense, Alice Hamilton, permitieron avances en el campo de la medicina ocupacional vinculado a sustancias peligrosas como el mercurio, el fósforo, el benceno y el radio. En resumen, durante la primera mitad del Siglo XX se generó conciencia e instituciones dirigidas a la conservación de los recursos naturales, la calidad del aire urbano, la higiene industrial y la seguridad de los alimentos. Sin embargo, no fue hasta la segunda mitad del Siglo XX que la contaminación del ambiente se convirtió en un problema que llamó la atención de la opinión pública.

El desarrollo industrial luego de la Primera Guerra Mundial y el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial tuvo un costo elevado para el medioambiente. Para esa época, el **paradigma de la dilución**, la solución para la contaminación es la dilución, reinaba en el mundo con consecuencias nefastas. En el año 1955, el Dr. Hagino y sus colegas descubrieron que la enfermedad de “itaí-itaí” (nombre acuñado por el severo dolor que causa la enfermedad) observada en los campesinos que habitaban la cuenca del Río Jinzu en Japón desde 1946, era debida a la contaminación de los arrozales por cadmio, producto de la actividad minera de Kamioka, gestionada por la minera “Mitsui Mining and Smelting”. Unas 184 víctimas fueron reconocidas oficialmente por el gobierno de Japón. Contemporáneamente, en 1959 investigadores de la Universidad de Kumamoto, Japón, identificaron que la “Enfermedad de Minamata” detectada en 1956 en la población de la ciudad homónima, y relacionada con la “fiebre

de los gatos bailarines” observada desde principios de los 50, era producto del envenenamiento por metil-mercurio producto del consumo de pescado y mariscos provenientes de la Bahía de Minamata que había sido contaminada con mercurio por la empresa Chisso Corporation desde que en 1951 cambió la catálisis con manganeso por la de mercurio para la producir acetaldehído. En 2001, Japón reconoció 2265 víctimas, de las cuales 1784 han muerto. Otro caso emblemático de la contaminación ambiental, ha sido el Río Cuyahoga en Ohio, Estados Unidos, que producto de la contaminación industrial del agua con aceites y petróleo se incendió 13 veces desde 1868, siendo la de 1952, la más severa en cuanto a los daños, pero la de 1969 la que causó mayor reacción social por su publicación en el diario “Times”, estimulando la formación de movimientos ambientalistas que llevaron a la promulgación de la Ley de Agua Limpia, el Acuerdo sobre Calidad de las Aguas en los Grandes Lagos y la creación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Al año siguiente, 1970, otro importante caso de contaminación industrial estalló en Estados Unidos en el “Love Canal”, un vecindario de 28 ha próximo a las Cataratas del Niágara que en la década del 20 fue abandonado y se convirtió en un basurero municipal que 20 años después fue comprado por dos empresas, Hooker Chemical Company y Occidental Chemical Corporation, que lo utilizaron para descartar más de 20 mil toneladas de residuos peligrosos. Ello lo convirtió en la causa de un desastre masivo de contaminación ambiental que dañó la salud de cientos de residentes y que culminó en una extensa operación de limpieza que en 1980 dio origen a la ley “CERCLA” (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act) o “Superfund” sobre la limpieza de sitios contaminados. Todos estos casos de contaminación hicieron que gradualmente se fuera cambiando del paradigma de la dilución al **paradigma del boomerang**, que sostiene que todo lo que se tira al ambiente termina volviendo para dañarnos.

La revolución verde, surgida a inicio de la década del 40, promovió la incorporación de pesticidas y fertilizantes para incrementar la producción agrícola, pero no siendo inocua para el ambiente. En tal sentido, quizá el caso más resonante, y que generó por primera vez preocupación pública por el efecto de los contaminantes sobre especies no humanas, estuvo vinculado al uso del DDT (dicloro-difenil-tricloroetano), un insecticida que comenzó a utilizarse durante la década de los 40 y cuyos efectos deletéreos sobre la biota fueron evidenciados recién 20 años después. En 1954 en el estado de Michigan se evidenciaron mortandades de petirrojos luego de las aplicaciones de DDT, que se utilizaba para combatir la enfermedad del olmo holandés. Luego, entre 1957 y 1960 se detectaron mortandades del achichilique occidental por acumulación de DDD (dicloro-difenil-dicloroetano), insecticida de la familia del DDT utilizado para combatir el mosquito del Lago Claro. Sin embargo, estos estudios no tomaron relevancia en la opinión pública hasta que en 1962 fueron compilados y publicados por la periodista estadounidense Rachel Carson en su libro “Silent Spring”. Por su resonancia en la opinión pública este trabajo suele ser considerado un hito vinculado al surgimiento de la **ecotoxicología**.

Definiciones y peculiaridades de la disciplina

La primera definición del término “**ecotoxicología**” suele ser atribuida al toxicólogo francés René Truhaut, quien en junio de 1969 la definió, durante una reunión del “International Council of Scientific Unions” (ICSU) en Estocolmo, como *“la rama de la toxicología relacionada con el estudio de los efectos tóxicos, causados por contaminantes naturales o sintéticos, a los componentes de los ecosistemas, animales (incluidos los humanos), vegetales y microbianos, en un contexto integral”*. Esta definición se caracteriza por considerar a la ecotoxicología como una rama de la toxicología y por enfocarse en los efectos tóxicos de los contaminantes sobre el componente biótico del ecosistema, incluyendo a los seres humanos como blancos de tales efectos. La definición no contemplaría otros efectos adversos que el ser humano causa sobre los ecosistemas, tales como la deforestación, la sobreexplotación, la introducción de especie exóticas, escaparían del alcance de dicha definición.

Muchas otras definiciones fueron dadas posteriormente. Quizá, las que introducen variantes más marcadas respecto a la definición de Truhaut, sean la de Suter (1993) quien excluye a los seres humanos de la definición, o la de Shane (1994) y Forbes & Forbes (1994) que remarcan en la definición la inclusión del estudio de la distribución y destino ambiental de los contaminantes. Hoffman y col. (1995) mencionan explícitamente el concepto de “especies no blanco” en su definición.

Es importante remarcar que muchas veces el término ecotoxicología se utiliza como sinónimo de “**toxicología ambiental**” cuando es concebido en el contexto de la definición dada por Landis & Yu (1995), como *“el estudio del impacto de los contaminantes sobre la estructura y función de los sistemas ecológicos (desde las moléculas a los ecosistemas)”*. Sin embargo, para otros autores como Walker (2014) la toxicología ambiental sería una disciplina más amplia, ya que abordaría, por un lado, a la ecotoxicología (efecto de los tóxicos sobre el ecosistema), y por otro, a los efectos de los contaminantes sobre la salud humana.

En el presente libro se utilizará el término ecotoxicología como una *“disciplina científica aplicada que tiene por objeto comprender y predecir la distribución, destino y efectos, directos e indirectos, causados por agentes contaminantes de naturaleza física, química (de origen natural o sintético) o biológica que, producto de la acción antrópica, alcanzan en el ambiente niveles anormales alterando la estructura y/o función de los ecosistemas, con el fin de proveer herramientas de gestión que permitan prevenir, mitigar o remediar tales efectos”*.

En esta definición hace hincapié primero en incluir el estudio de la distribución y destino del contaminante, en particular referido a la biodisponibilidad, dado que ello condicionará significativamente la fase de exposición. Es importante remarcar que la ecotoxicología, según esta definición, intenta comprender los efectos indirectos causados por los contaminantes. Ello es de relevancia porque como se verá más adelante, los contaminantes suelen actuar a nivel molecular y luego generar una cascada de efectos que pueden terminar teniendo efectos a niveles de organización superiores como el de comunidad. A este nivel, por lo general el efecto del contaminante no es directo, sino que actúa indirectamente, por ejemplo, causando la pérdida de una especie

clave del ecosistema que modifica las relaciones tróficas en la comunidad, alterando a su vez los flujos de materia y energía en el ecosistema.

Además, en la definición dada, se trata de especificar qué se entiende por contaminante, aspecto que no siempre ha sido definido claramente. Aquí se entiende por contaminante a cualquier agente físico, químico (de origen natural o sintético) o biológico pero introducido por el hombre en el ambiente a niveles anormales. Puede tratarse de un efluente a alta temperatura, niveles de iluminación nocturna altos o sombras inadecuadas, ruidos elevados, bacterias o virus presentes en residuos patogénicos, niveles de metales, nutrientes u hormona naturales (ej. estradiol) anormales. Otro aspecto a destacar es que, en la definición se enfatiza que los agentes contaminantes deben ser introducidos al ambiente por actividades propias del ser humano. Esto quiere decir que se excluyen fenómenos naturales como erupciones volcánicas, dado que se tales fenómenos son considerados naturales, independientemente que puedan generar un perjuicio para el ser humano o un ecosistema dado. Su estudio no deja de ser relevante o interesante, pero es improbable que dos fenómenos se repitan del mismo modo o que puedan ser regulados por el ser humano y por tanto ello escaparía a la naturaleza de los problemas que ha dado históricamente origen a la ecotoxicología.

Aquí resulta oportuno hacer una distinción entre dos términos de la literatura anglosajona que en español suelen utilizarse bajo la misma denominación de contaminante. En inglés, se hace una diferenciación clara entre el término “**contaminant**” y “**pollutant**”. El primer término se aplica un agente (químico, físico o biológico) que se encuentre en el ambiente a niveles anormales respecto a un nivel de base, pero sin que ello implique este genere un daño sobre el ecosistema. En el caso de “pollutant”, se trata de un contaminante para el cual existe evidencia concreta a cerca de su efecto dañino sobre el ecosistema. Desafortunadamente en español el término “poluente” no existe en el diccionario de la lengua y por tanto suele utilizarse el término contaminante con ambas acepciones.

En coincidencia con la definición de Suter (1993), se excluye de la definición dada a los efectos que los contaminantes puedan tener sobre el ser humano, debido a que se considera dicho aspecto más afín a la toxicología, y que, en la práctica suele ser incumbencia de los médicos o los bioquímicos más que de los ecotoxicólogos, que no se encuentran habilitados profesionalmente para trabajar con muestras humanas.

Finalmente se resalta el carácter práctico de la disciplina en cuanto a que el conocimiento generado busca en última instancia ser aplicado a la resolución de problemas concretos, en cierto modo, asemejándose así a la medicina humana o veterinaria, pero aplicada al ecosistema. En tal sentido, la ecotoxicología adquiriría una característica propia de las ciencias ambientales que, según la definición brindada por Cunningham & Cunningham (2010), a diferencia de las disciplinas más teóricas, están orientadas a la misión. Es decir, busca generar un conocimiento nuevo, válido y contextual sobre el mundo natural y nuestros impactos en él, pero *al obtener tal información crea la responsabilidad de involucrarse en tratar de hacer algo sobre los problemas que hemos encontrado.*

Una peculiaridad de la ecotoxicología, es que se trata de una **disciplina sintética**, ello quiere decir que toma conocimientos de muchas otras disciplinas tanto desde las ciencias exactas y de la tierra (química, geoquímica. Hidrología, geología, etc.) como de las ciencias de la vida (biología, ecología, toxicología, bioquímica, etc.). Muchas de la herramientas y conocimientos utilizados, tales como las dosis respuestas o los bioensayos de toxicidad, han sido heredados de la toxicología. Otros, vinculados a la distribución y destino de los contaminantes han sido tomados de la química y así se podrían mencionar numerosos ejemplos.

Otra particularidad, es que es una disciplina que debe integrar diferentes **niveles de organización jerárquica**, desde el nivel molecular hasta el nivel de ecosistema o más aún el de biósfera ([Figura 1.1.](#)). Ello conlleva el problema que cada nivel posee sus propias propiedades emergentes, características que son únicas de ese nivel y que no se pueden evaluar ni en los niveles inferiores o superiores. Por ejemplo, el nivel molecular es definido por la relación entre diferentes átomos que conforman la molécula, y por tanto un enlace químico, será propiedad emergente de dicho nivel, y no será hallado ni a nivel atómico, ni a nivel de las organelas. Lo mismo ocurre con el nivel de comunidad, conjunto de especies que conforman un ecosistema, donde las propiedades emergentes estarán vinculadas a las relaciones entre especies (ej. relación predador presa, riqueza específica, biodiversidad) que no podrán ser evaluadas a nivel de una población o de un ecosistema. Este carácter aparentemente “estanco” entre niveles de organización, ha dificultado encontrar vasos comunicantes entre el efecto de un contaminante que generalmente se inicia a nivel molecular y luego se propaga como modificaciones a nivel de la población, de la comunidad o del ecosistema, incluso muchas veces como efectos indirectos y difíciles de asociar claramente con el tóxico. Además, la dinámica propia de cada nivel hace que las respuestas frente a un contaminante sean relativamente rápidas y específicas a nivel molecular haciendo más fácil el establecimiento de las relaciones entre las causas y los efectos y pudiendo ser utilizadas de forma proactiva (predecir efectos adversos antes que sean irreversibles). Sin embargo, a ese nivel no se sencillo predecir fácilmente cuáles serán los efectos del contaminante a niveles ecológicos. Contrariamente, los estudios a niveles de poblaciones, comunidades o ecosistemas, poseen importancia en cuanto a detectar efectos de relevancia ecológica, pero suelen ser reactivos (los efectos se detectan cuando el daño ocurrió y a veces ya es irreversible), exige de tiempos largos de observación y resulta complejo establecer las relaciones causa efecto. Ello requiere, a su vez, de diferentes herramientas ecotoxicológicas (ej. bioensayos) de diferentes niveles de complejidad. Como se verá más adelante en los últimos años, se ha intentado abordar esta problemática mediante estrategias metodológicas como las AOPs (Vías de Efectos Adversos).

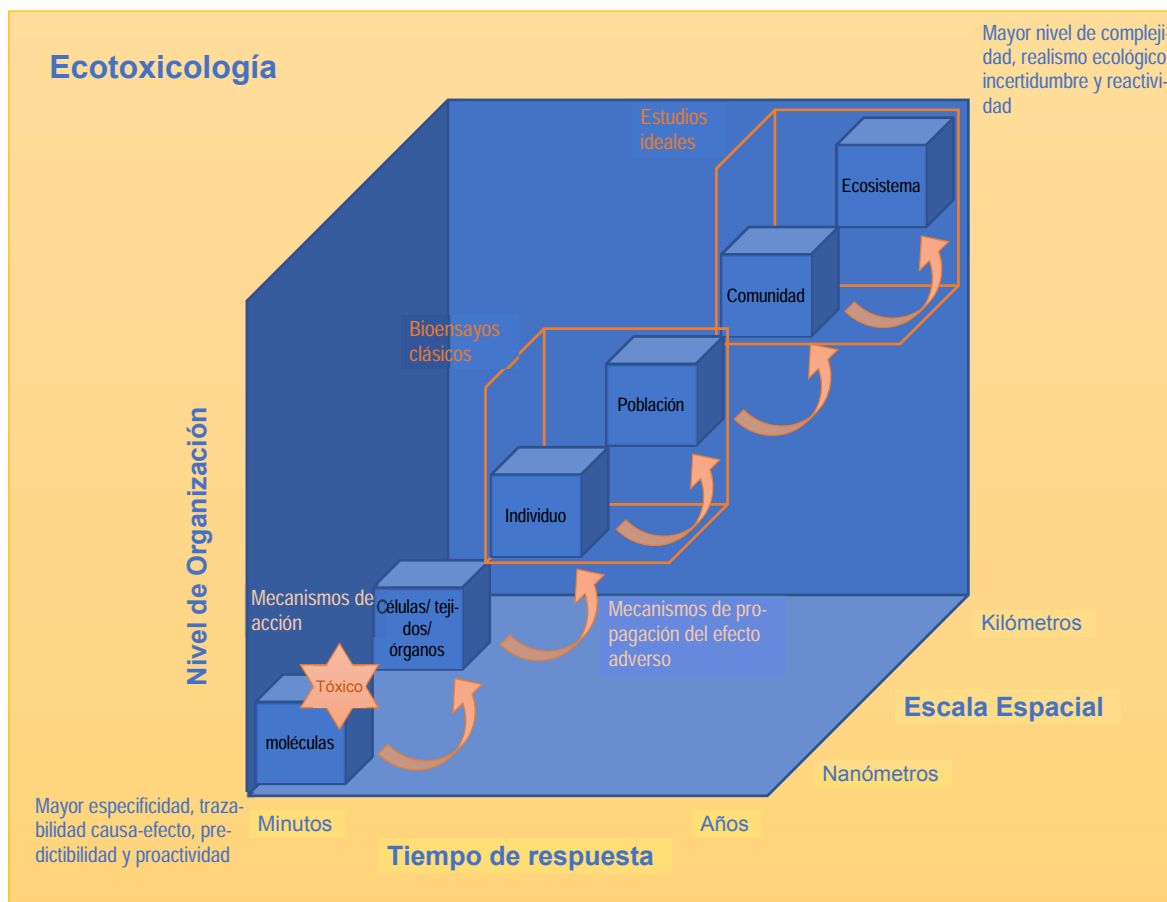


Figura 1.1: Complejidad de análisis de los niveles de organización jerárquicos en la ecotoxicología

Un aspecto muy interesante de la disciplina, planteado en su libro “Fundamentos de Ecotoxicología” por Prof. Michael Newman, es que pueden distinguirse en ella tres metas fundamentales, la meta científica, la tecnológica y la aplicada (Figura 1.2.). La **meta científica** tiene que ver con generar conocimiento básico sobre cómo los contaminantes inducen efectos adversos a los diferentes niveles de organización, estudiar los mecanismos de acción, las causas que explican la existencia de tolerancia individual o respuestas estocásticas, los factores que afectan la bioacumulación no la biomagnificación de los contaminantes, los vínculos entre los efectos sobre los organismos y la viabilidad de las poblaciones, etc. El alcance de esta meta suele ser universal y los tiempos de desarrollo del conocimiento suele ser relativamente prolongados. La **meta tecnológica** se encuentra vinculada a la aplicación de los conocimientos básico en el desarrollo de herramienta de evaluación, tales como bioensayos de toxicidad, nuevas pruebas “in vitro”, aplicación de las tecnologías ÓMICAs (transcriptómica, proteómica, metabolómica), desarrollo estrategias como las AOP’s o de procedimientos como las evaluaciones de riesgo ecológica (ERA). Esta meta suele tener un alcance un poco más acotado, dependiendo de las necesidades de cada país o región y los tiempos de elaboración suelen ser más acotados. Finalmente, las **metas prácticas**, están dirigidas a aplicar las herramientas desarrolladas para abordar problemas concretos en general a una escala más local y en tiempos más cortos. Así un municipio podrá utilizar los bioensayos

para evaluar la calidad de los efluentes que vuelcan sus industrias, o una agencia del estado utilizar la ERA para juzgar oportuna o no la aprobación de una determinada sustancia nueva para el mercado.

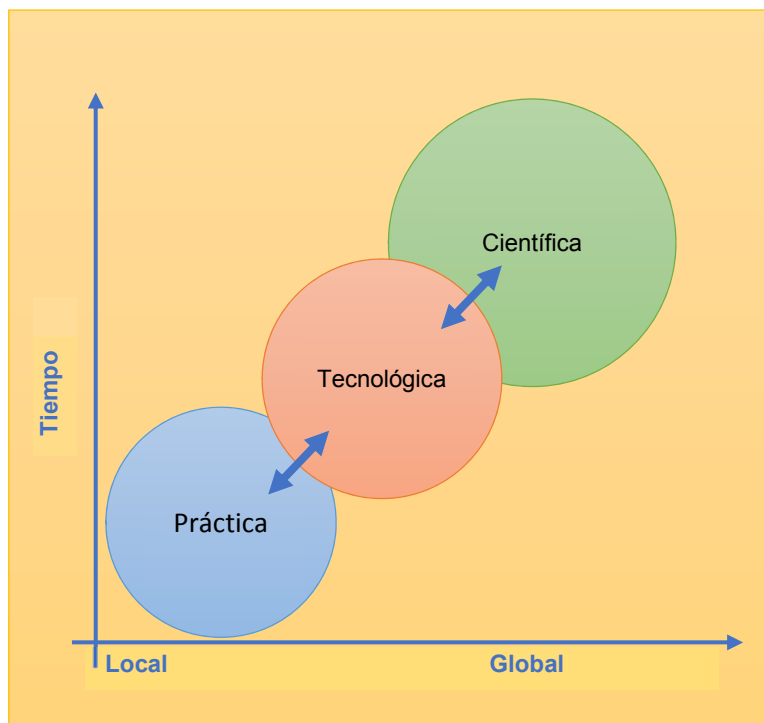


Figura 1.2: Metas de la ecotoxicología propuestas por el Prof. Michael Newman y su relación con la escala espacial y temporal

Contexto internacional en materia ambiental durante el desarrollo de la disciplina

A partir de la década del 70 en adelante la preocupación pública por las problemáticas medioambientales ha ido tomando cada vez mayor impulso forzando a los gobiernos a intervenir en el asunto mediante acciones concretas. El 22 de abril de 1970 se realizó en Estados Unidos una manifestación multitudinaria en reclamo de mayor concientización ambiental, promovida por el Senador y activista norteamericano Gaylord Nelson, que contribuyó a la creación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y una serie de leyes destinadas a la protección del medio ambiente, conmemorándose luego en el “Día Internacional de la Madre Tierra”. Luego, entre el 5 y 16 de junio de 1972, se llevó a cabo en Suecia la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, mejor conocida como “Conferencia de Estocolmo, que fue la primera gran conferencia de estados del mundo que se organizó sobre cuestiones medioambientales. La conferencia condujo al establecimiento de muchas agencias nacionales de protección ambiental y al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). En el mismo año, el Club de Roma publicó los límites del crecimiento, prediciendo el colapso de la civilización debido al crecimiento de la población y la disminución de los recursos naturales. En 1985 se elaboró el

Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono que entró en vigor en 1988, y que, en 1989 dio lugar al Protocolo de Montreal, diseñado para proteger la capa de ozono reduciendo la producción y el consumo de sustancias que reaccionan con ella y eran responsables del agotamiento de la misma. Contemporáneamente, la Comisión Brundtland de la ONU elaborará en 1987 un informe sobre problemas ambientales y de desarrollo críticos en todo el mundo, definiendo el **desarrollo sostenible** como "desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". En 1989 se adopta el Convenio de Basilea, un Acuerdo Multilateral entre 170 países dentro del sistema de Naciones Unidas sobre que convinieron proteger el medio ambiente y la salud humana de los efectos nocivos provocados por la generación, manejo, movimientos transfronterizos y eliminación de desechos peligrosos. Más tarde, en 1992 casi doscientos gobiernos participaron en la Cumbre de la Tierra de Río, Brasil, dando como resultado un acuerdo en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Seguido, en 1997 se firmará el Protocolo de Kioto, un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento global. El mismo fue adoptado por los Estados Unidos y otras 121 naciones, pero no ratificado por el Congreso de los Estados Unidos porque la industria estadounidense predijo un "desastre económico" si se aplicaban las reducciones de emisiones de CO₂. En 2000 se establecieron los "Objetivos de Desarrollo del Milenio" que fueron lanzados por la ONU para ser alcanzados en 2015. En 2015 se firma el Acuerdo Climático de París que estableció un objetivo a nivel mundial para limitar el calentamiento global a menos de 2 °C. Sin embargo, en 2017 se anuncia la retirada de los Estados Unidos del Acuerdo de París. Afortunadamente, los otros diecinueve miembros del G20 reafirmaron su compromiso. En 2018 se firma el primer acuerdo regional en asuntos ambientales de América Latina y el Caribe (Acuerdo de Escazú), que trata sobre el acceso a la información, la participación pública y el acceso a la justicia en asuntos ambientales en América Latina y el Caribe. Toda esta serie de acuerdos y protocolos internacionales demuestran un cambio de conciencia a nivel internacional respecto a la importancia que los problemas ambientales tienen en relación al bienestar y viabilidad de las generaciones presentes y futuras.

Evolución de la disciplina alrededor del mundo desde su surgimiento

La evolución de la disciplina en el mundo desde su gestación a fines de la década del 60, cuando Truhaut le acuñó el nombre, a la actualidad puede observarse mediante un análisis rápido y no exhaustivo, utilizando la base de datos Scopus®, a analizar la primera vez que el término fue utilizado en el título, resumen o palabras clave de trabajos publicados en revistas internacionales indexadas (Figura 1.3.). Ente los países analizados, los primeros en adoptar el término fueron Japón, Canadá, Estados Unidos y Alemania, que lo hicieron tempranamente

durante la década del 70. Luego, se distingue otro grupo de países en los que la comunidad científica adoptó el término durante la década del 80, como el caso del Reino Unido, España, India, Australia y Argentina, primer país Latinoamericano en utilizar el término en una publicación. Otros países, como Méjico, Brasil y China, recién lo emplearon en la década del 90. En el caso de China quizá explicado por su apertura más tardía a la cultura occidental. Finalmente, algunos países utilizaron la palabra ecotoxicología más tardíamente, recién luego de comenzado el Siglo XXI. Entre ellos cabe destacar a Uruguay, Ecuador y Paraguay. Salvo para la Argentina, en el que la disciplina se inició antes, en los demás países latinoamericanos pareciera que la Cumbre de Río, celebrada en 1992, hubiera tenido importancia sobre la instalación de la disciplina como tal.

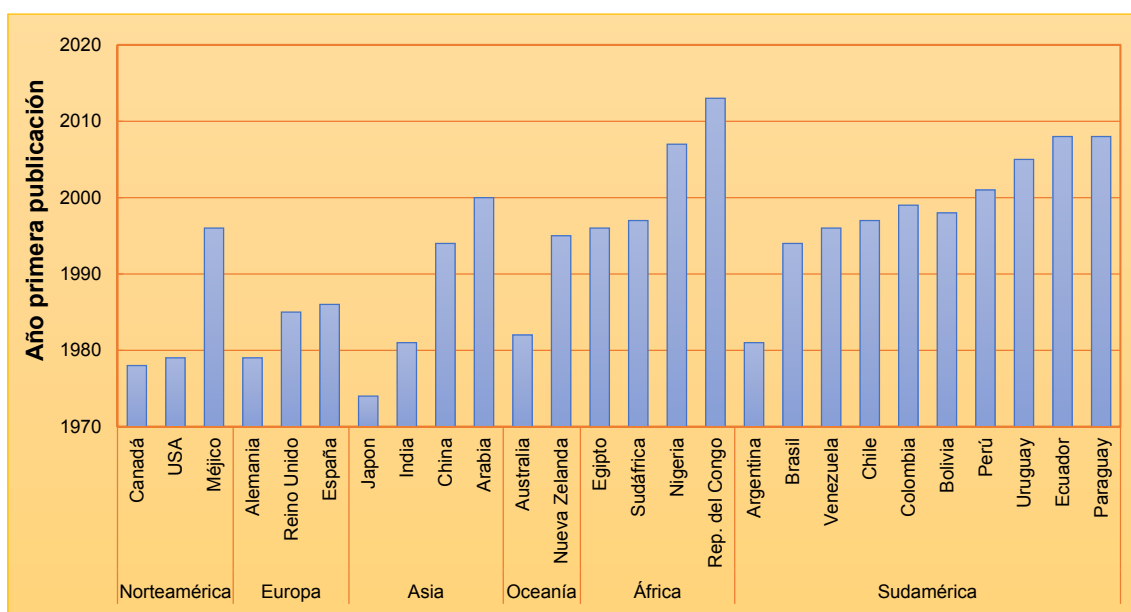


Figura 1.3: Comparación del momento de aparición del uso del término ecotoxicología en las publicaciones científicas (título, resumen, palabras claves) en países de diferentes regiones del mundo. Fuente Scopus®

Otro análisis interesante es el que se obtiene de comparar, para los diferentes países analizados, el número total de publicaciones, utilizando la palabra en el título, resumen y palabras claves, desde la primera publicación hasta 2019 (Figura 1.4.). Puede observarse un grupo de países que ha generado más de 1000 trabajos en la temática, encabezado por Estados Unidos y seguido por China, los países europeos y Brasil. Es interesante destacar el rápido crecimiento en la materia de China y Brasil, en particular considerando su inicio relativamente tardío. En algunos países africanos y sudamericanos el desarrollo de la disciplina se observa aún muy postergado, mostrando oportunidades para generar interacciones con los países con mayor grado de avance de forma de acelerar el desarrollo de la misma.

Por consiguiente, puede observarse que la evolución de la disciplina alrededor del mundo ha sido de forma bastante despareja, habiendo avanzado en los países con economía más fuertes y ha quedado más relegada en países con problemáticas socio-económicas básicas aún no resueltas. En Latinoamérica, Brasil, Argentina y Chile, muestran un mayor nivel de avance a nivel

científico, pero aún la aplicación práctica de la disciplina a nivel de la legislación y la gestión se encuentra muy relegada en comparación a los países de Nortea América y Europa. Ello es aún más marcado a nivel de la integración internacional donde ya deberían existir criterios de calidad ambiental y herramientas de evaluación, con fundamentos ecotoxicológicos, comunes entre los países de la región.

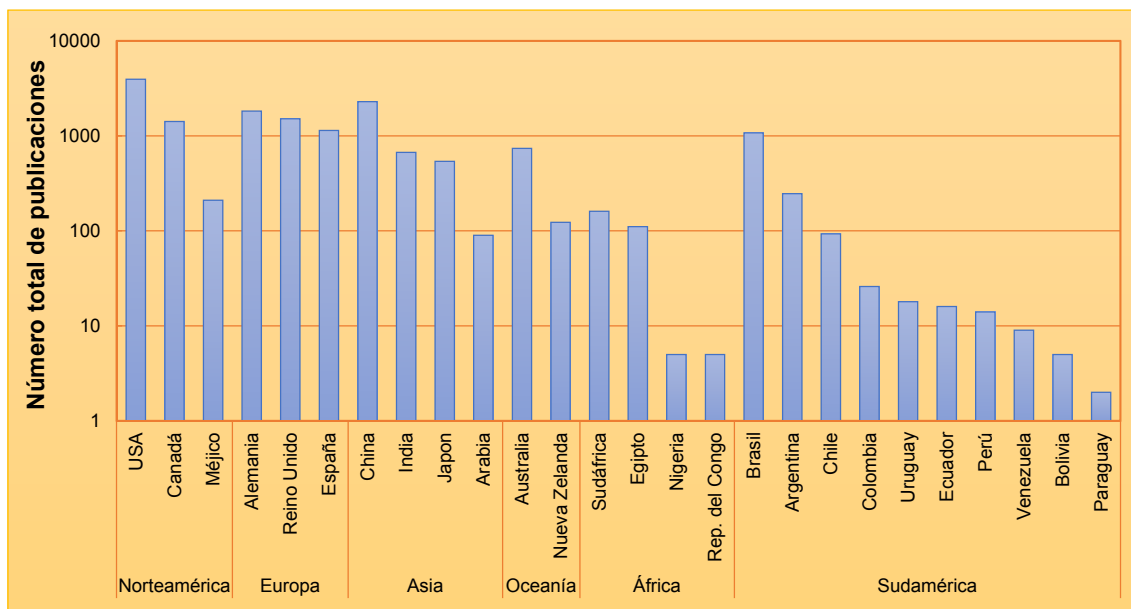


Figura 1.4: Comparación de la cantidad de publicaciones científicas conteniendo la palabra ecotoxicología (título, resumen o palabras claves) en países de diferentes regiones del mundo hasta 2019. Fuente: Scopus®

Necesidades actuales y perspectivas futuras

Para el estudiante recién iniciado resultará de valor comprender cual es el papel actual y las necesidades futuras de la disciplina. Han sido expuestos previamente los problemas pasados que han llevado a la necesidad del surgimiento de la ecotoxicología, los cambios de paradigma en materia ambiental que han ido ocurriendo en las últimas décadas y como se ha ido desarrollando la disciplina en diferentes países. Hacia adelante, se vislumbra que los problemas no sólo no han sido completamente resueltos, sino que, además cada día surgen problemas nuevos.

En el contexto de una sociedad tecno-industrial gobernada por una economía de consumo, puede decirse que la ecotoxicología es una disciplina necesaria para sopesar los costos y beneficios de las innumerables decisiones tecnológicas e industriales que afectan nuestras vidas. Más allá de los aspectos éticos, que deberían prevalecer desde una filosofía más “ecocéntrica”, incluso desde una visión “antropocéntrica” los servicios que brindan los sistemas naturales no deberían ser hoy visto como un “lujo” para la humanidad, sino “esenciales” para su subsistencia. Como se ha mencionado al inicio del capítulo, las actividades humanas han causado cambios sobre la superficie de la tierra tan significativos que en la década del 80 Eugene Stoermer acuñó el nombre de Antropoceno a una época geológica que comenzaría a finales del Siglo XVIII y que

estaría caracterizada por cambios a nivel de la biósfera inducidos por el ser humano sobre los ciclos del carbono (cambio climático), nitrógeno, fósforo y azufre (eutrofización) y del agua, además de estar causando la sexta extinción masiva en la historia de la tierra. El término ha sido luego adoptado por muchos otros autores, como el Premio Nobel Paul Crutzen. De hecho, autores como Rockström y colaboradores en 2009 establecieron valores límite para diferentes parámetros ecológicos y consideraron que muchos de ellos estaban excedidos, como el caso de la biodiversidad y el ciclo del nitrógeno. Michael Newman en su libro se pregunta si los contaminantes han pasado su valor límite, o si ya lo han sobrepasado y lo desconocemos.

De acuerdo con el “Chemical Abstract System” (CAS) hay 100 millones de sustancias registradas y alrededor de 4000 son incorporadas diariamente. De acuerdo al número de sustancias registradas y pre-registradas en el REACH (Registro, Evaluación y Autorización de Sustancias Químicas de la Unión Europea), existen entre 30 a 50 mil sustancias industriales utilizadas en productos de uso diario. Se han mostrado varios ejemplos en los que la introducción de sustancias en el ambiente ha causado problemas de contaminación en el pasado y cómo el paradigma de la dilución ha fracasado y actualmente resulta inaceptable por las consecuencias nefastas que ha tenido para la salud humana y la integridad de los ecosistemas dando paso al paradigma del boomerang. El hecho que el progreso tecno-industrial y la legislación ambiental evolucionen de manera desigual dentro y entre los países genera grandes posibilidades para la repetición de errores pasados.

En tal contexto, la ecotoxicología aparece como esencial para sopesar los costos y beneficios de las innumerables decisiones tecnológicas e industriales que afectan nuestras vidas. La ecotoxicología nos permite conocer el riesgo asociado a muchos de los contaminantes tradicionales (PCBs, Hg, DDT) que siguen estando entre nosotros y que varios, pese a haber sido prohibidos (ej. DDT), siguen siendo aún utilizados en algunos países del mundo.

Otra problemática, sobre la que deberá enfocarse, es la producción, transporte y consumo de petróleo. Está claro que sigue siendo un problema latente desde el punto de vista ambiental como ya se ha visto en el accidente ocurrido en la plataforma “Deepwater Horizon” en 2010 en el golfo de Méjico, el derrame del “Exxon Valdez” en 1989 en Alaska, o en relación a los riesgos asociados a las explotaciones no convencionales como las “oil sands” en Canadá o el “oil fracking” en la Patagonia argentina.

Los problemas ambientales asociados a la producción minera tampoco escapan de la necesidad de contar con la ecotoxicología. El caso de contaminación de varios ríos con cianuro por la Minera Barrick Gold en Veladero en San Juan en 2015, son un claro ejemplo de ello.

La tendencia creciente a la producción de energía a partir de plantas nucleares pondrá desafíos en cuanto a los problemas asociados a la reactividad, frente a posibles fugas como ocurrida en 2011 en la Central de Fukushima Daiichi, en Japón.

A 50 años del libro “Silent Spring” los riesgos de los plaguicidas asociados a la producción agrícola continúan siendo un desafío para la ecotoxicología. En países de Latinoamérica, como Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, la expansión de la frontera agrícola y el incremento del consumo de plaguicidas asociado con el cultivo de soja transgénica es un ejemplo de ello.

El problema de contaminación urbano-industrial sigue siendo aún otro reto para la ecotoxicología. Ya se han mencionado en casos icónicos como el del “Love Canal” durante la década del 40 en Niagara, Estados Unidos. En Argentina, sitios como “Villa Inflamable” en la cuenca del Río Matanza/Riachuelo son un claro ejemplo de esta complejidad y desafío que quedan por delante.

Finalmente, la incorporación de nuevos productos químicos, “contaminantes emergentes”, al medioambiente se está convirtiendo en una preocupación creciente. Los retardantes de fuego bromados, los subproductos de cloración, los productos químicos fluorados, los estrógenos sintéticos, las hormonas de la producción ganadera, los etoxilatos de alquifenol y sus productos de degradación, los productos desinfectantes, los productos farmacéuticos y los componentes de los productos para el cuidado personal son ejemplos importantes de contaminantes ignorados hasta ahora que se descargan actualmente en grandes cantidades. En tal sentido, la ecotoxicología aporta herramientas indispensables para la evaluación de la inocuidad ambiental de nuevas sustancias que ingresarán al mercado.

En términos más generales, aquellos contaminantes que pueden ser susceptibles de transporte atmosférico, como el caso de contaminantes orgánicos persistentes como los organoclorados, o que manifiesten efectos inesperados tales como la inducción de disrupción endócrina y desviación de la proporción de sexos en anfibios, asociada al herbicida atrazina, serán temas de relevancia para la ecotoxicología.

Desde el punto de vista de los desafíos para la propia disciplina, siguen siendo poder predecir con mayor precisión los efectos crónicos de los contaminantes que actúan a muy bajas concentraciones con el caso de los disruptores endocrinos, sustancias inmunosupresoras, neurotóxicas o genotóxicas. Identificar los múltiples efectos que pueden ser inducidos por un único contaminante o predecir los efectos inducidos por mezclas de sustancias y el efecto conjunto de múltiples factores de estrés (ej. contaminante y radiación, temperatura o patógenos). Poder dilucidar la complejidad de los efectos que ocurren a nivel de los ecosistemas dados por la diferencia de sensibilidad entre especies, determinar claramente la relación tóxico-efecto y entender como es la propagación de los efectos adversos de un nivel de organización biológica a otro (ej. individuo -> población -> comunidad). Se plantea, además, un desafío inicial que es evaluar dicha complejidad, en el contexto de un escenario cambiante debido al cambio climático.

Los futuros ecotoxicólogos contarán con nuevas herramientas mucho más potentes para evaluar tanto exposición como efectos. Los métodos de análisis químicos, con mejores niveles de detección y capacidad de identificación de sustancias en matrices complejas, como la espectrometría de masas, o en sistemas de monitoreo a gran escala como la que brindan los sensores satelitales. En cuanto a los efectos, las tecnologías ÓMICAs como la transcriptómica, proteómica o metabolómica, permite el análisis simultáneo en los cambios de miles de genes, proteínas o metabolitos en respuesta a un tóxico o mezcla de ellos. Muchas técnicas nuevas para trabajos a campo como identificación de especies por el ADN presente en el ambiente, uso de trampas cámara, satélites con sensores de alta resolución, drones, etc. Por otro lado, los modelos computacionales son cada vez más potentes y precisos y permiten procesar cada

vez mayores volúmenes de información. Todas estas herramientas permitirán trabajar a niveles de complejidad y escalas espaciales y temporales antes impensadas, anticipando un apasionante futuro para la disciplina.

Buenas prácticas en ecotoxicología

Como en cualquier otra disciplina científica, la capacidad predictiva dependerá de la calidad de la información obtenida para generar el conocimiento y los modelos para hacer la predicción. En tal sentido Catherine Harris y John Sumpter han realizado una gran contribución a la disciplina, proponiendo en 2015 una serie de principios básicos a considerar al momento de realizar cualquier trabajo experimental en el campo de la ecotoxicología. Los mismos son:

1. *La planificación adecuada y el buen diseño experimental son esenciales:* Si la planificación no se analiza adecuadamente, podría desperdiciarse un estudio completo.
2. *Definir la línea base:* Cuando se evalúa cualquier punto final, se debe establecer primero el nivel "normal" de ese punto final en un organismo no expuesto.
3. *Incluir controles apropiados:* Deben usarse controles de reactivos y controles positivos cuando sea posible/apropiado.
4. *Use rutas y concentraciones de exposición apropiadas:* Debe asegurarse que la ruta de exposición sea adecuada respecto al escenario que se desea evaluar (por ejemplo, a través del agua o de los alimentos) y que las concentraciones aplicadas se discutan dentro del contexto de las concentraciones halladas en el medio ambiente.
5. *Definir la exposición:* Es importante medir las concentraciones reales de la sustancia utilizada, de modo que se pueda describir el escenario de exposición real, en lugar de uno hipotético. Además, en los medios de exposición debería evaluarse la presencia de otros posibles contaminantes no deseados en el experimento.
6. *Comprende tus herramientas:* El conocimiento del organismo y la sustancia de prueba utilizada son vitales para generar resultados reproducibles.
7. *Piense en el análisis estadístico de los resultados al diseñar un experimento:* Es necesario considerar "a priori" cuidadosamente en el diseño experimental que modelo estadístico se utilizará posteriormente para su análisis, como así el número de concentraciones de exposición y el de organismos, de modo que los resultados tengan suficiente poder estadístico para dar una respuesta a la hipótesis que se está probando.
8. *Considere la dosis-respuesta:* Tratar siempre de describir la función tóxica mediante la curva dosis-respuesta o tiempo-respuesta construida con no menos de 5 niveles de tratamiento (concentraciones o tiempos de exposición). Cualquier patrón de respuesta "inusual" necesita más análisis y justificación.
9. *Repita el experimento:* Esto puede no ser necesario cuando los resultados son consistentes y el poder estadístico es fuerte. Sin embargo, en general, y particularmente cuando los

resultados son inesperados y/o ambiguos, se debe demostrar que los resultados obtenidos no han sido aleatorios y que por el contrario son reproducibles.

10. *Considerar factores de confusión*: Deben tenerse en cuenta factores como la temperatura, enfermedades y la exposición a otras múltiples sustancias; Estos pueden ser especialmente relevantes en el trabajo de campo.

11. *Considere el peso de la evidencia*: Los resultados deben compararse con estudios anteriores. Por ejemplo, ¿Se apoyan mutuamente el trabajo de campo y los estudios de laboratorio? ¿Los efectos se ajustan al mecanismo de acción conocido de las sustancias ensayadas? Considere la plausibilidad de los resultados.

12. *Informe los hallazgos de manera imparcial*: No extrapolar en exceso (por ejemplo, de in vitro a in vivo); ser consciente de las limitaciones del estudio; no exagere un resultado con muy poca importancia; informar hallazgos negativos (es decir, sin efecto) y positivos.

La consideración de los principios enumerados sin dudas redundará en una mejor calidad de la información, la confiabilidad del conocimiento y por tanto la capacidad de predicción de los modelos que se apliquen utilizándolos. Son principios que cualquier estudiante de ecotoxicología debería incorporar como base tanto para el diseño de su propio trabajo experimental como para el análisis crítico de trabajos realizados por sus colegas.

Bibliografía

- Beketov, M.A., Liess, M., 2012. Ecotoxicology and macroecology - Time for integration. *Environ. Pollut.* 162, 247-254.
- Carrquiriborde, P., Bainy, A.C.D., 2012. Environmental toxicology and chemistry in Latin America. *Environ. Toxicol. Chem.* 31, 931-934.
- Cunningham, W.P., Cunningham, M.A., 2010. Environmental science: a global concern (11th). The McGraw-Hill Companies, Inc, Boston, MA, USA.
- Davis, D.L., Bell, M.L., Fletcher, T., 2002. A Look Back at the London Smog of 1952 and the Half Century Since. *Environ. Health Perspect.* 110, A734-A735.
- Dulio, V., van Bavel, B., Brorström-Lundén, E., Harmsen, J., Hollender, J., Schlabach, M., Slobodnik, J., Thomas, K., Koschorreck, J., 2018. Emerging pollutants in the EU: 10 years of NORMAN in support of environmental policies and regulations. *Environmental Sciences Europe* 30, 5.
- Eggen, R.I., Behra, R., Burkhardt-Holm, P., Escher, B.I., Schweigert, N., 2004. Challenges in Ecotoxicology. *Environ. Sci. Technol.* 38, 58-64.
- Fairbrother, A., Muir, D., Solomon, K.R., Ankley, G.T., Rudd, M.A., Boxall, A.B.A., Apell, J.N., Armbrust, K.L., Blalock, B.J., Bowman, S.R., Campbell, L.M., Cobb, G.P., Connors, K.A., Dreier, D.A., Evans, M.S., Henry, C.J., Hoke, R.A., Houde, M., Klaine, S.J., Klaper, R.D., Kullik, S.A., Lanno, R.P., Meyer, C., Ottinger, M.A., Oziolor, E., Petersen, E.J., Poynton,

- H.C., Rice, P.J., Rodriguez-Fuentes, G., Samel, A., Shaw, J.R., Steevens, J.A., Verslycke, T.A., Vidal-Dorsch, D.E., Weir, S.M., Wilson, P., Brooks, B.W., 2019. Toward Sustainable Environmental Quality: Priority Research Questions for North America. *Environ. Toxicol. Chem.* 38, 1606-1624.
- Furley, T.H., Brodeur, J.C., Silva de Assis, H.C., Carriquiriborde, P., Chagas, K.R., Corrales, J., Denadai, M., Fuchs, J., Mascarenhas, R., Miglioranza, K., Miguez Caramés, D.M., Navas, J.M., Nugegoda, D., Planes, E., Rodriguez-Jorquera, I., Medina, M.O., Boxall, A.B.A., Rudd, M.A., Brooks, B.W., 2018. Towards Sustainable Environmental Quality: Priority Research Questions for Latin America. *Integrated Environmental Assessment and Management*, doi.org/10.1002/ieam.2023.
- Hannß Carl von Carlowitz Sylvicultura Oeconomica Hauswirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. Reprint of the 2. edition from 1732, Verlag Kessel, ISBN 978-3-941300-19-4.
- Hardy, K., Radini, A., Buckley, S., Sarig, R., Copeland, L., Gopher, A., Barkai, R., 2016. Dental calculus reveals potential respiratory irritants and ingestion of essential plant-based nutrients at Lower Palaeolithic Qesem Cave Israel. *Quaternary International* 398, 129-135.
- Harris, C.A., Scott, A.P., Johnson, A.C., Panter, G.H., Sheahan, D., Roberts, M., Sumpter, J.P., 2014. Principles of sound ecotoxicology. *Environ. Sci. Technol.* 48, 3100-3111.
- Likens, G. E.; Bormann, F. H.; Johnson, N. M. (1972). "Acid rain". *Environment*. 14 (2): 33–40. doi:10.1080/00139157.1972.9933001
- Poynting, J. H. (1907). On Prof. Lowell's Method for Evaluating the Surface-temperatures of the Planets; with an Attempt to Represent the Effect of Day and Night on the Temperature of the Earth. *Philosophical Magazine*, 14(84), 749–760.
- Seinfeld, John H.; Pandis, Spyros N (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics — From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley and Sons, Inc. ISBN 978-0-471-17816-3
- Stewart, A.J., 2018. Ecotoxicology: It's time for a hard re-look. *Environ. Toxicol. Chem.* 37, 9-10.
- Van den Brink, P.J., Boxall, A.B.A., Maltby, L., Brooks, B.W., Rudd, M.A., Backhaus, T., Spurgeon, D., Verougstraete, V., Ajao, C., Ankley, G.T., Apitz, S.E., Arnold, K., Brodin, T., Cañedo-Argüelles, M., Chapman, J., Corrales, J., Coutellec, M.A., Fernandes, T.F., Fick, J., Ford, A.T., Giménez Papiol, G., Groh, K.J., Hutchinson, T.H., Kruger, H., Kukkonen, J.V.K., Loutseti, S., Marshall, S., Muir, D., Ortiz-Santaliestra, M.E., Paul, K.B., Rico, A., Rodea-Palmares, I., Römbke, J., Rydberg, T., Segner, H., Smit, M., van Gestel, C.A.M., Vighi, M., Werner, I., Zimmer, E.I., van Wensem, J., 2018. Toward sustainable environmental quality: Priority research questions for Europe. *Environ. Toxicol. Chem.* 37, 2281-2295.
- Webb, D., Gagnon, M.M., Rose, T., 2008. Hepatic metabolism of contaminants in the terapontid fish, yellowtail trumpeter (*Amniataba caudavittata* Richardson). *Environ Toxicol* 23, 68-76.
- Werner, I., Hitzfeld, B., 2012. 50 Years of ecotoxicology since Silent Spring - A review. *GAIA* 21, 217-224.