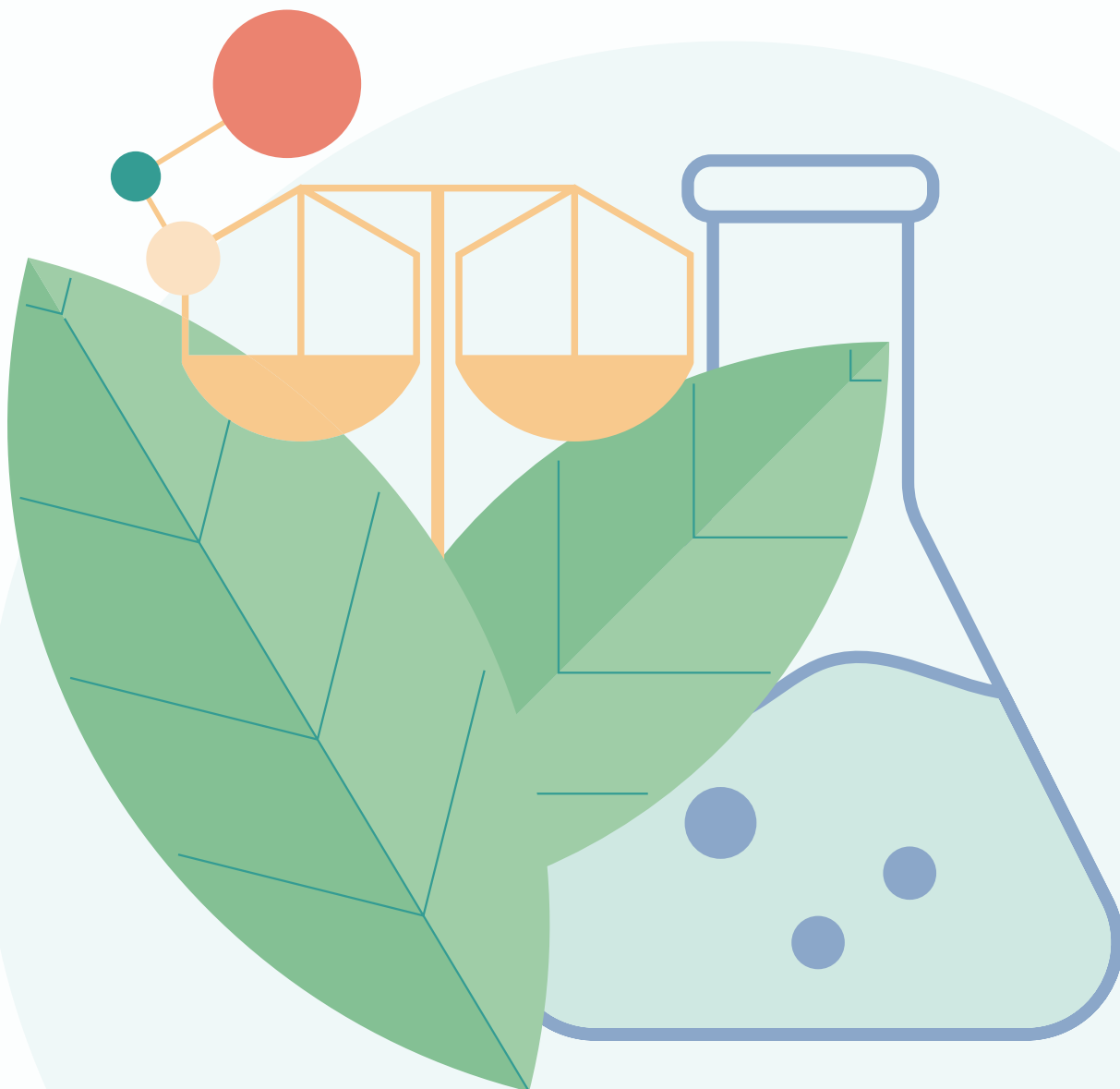


Elementos y criterios científicos para la atribución de **responsabilidad ambiental**



Suprema Corte
de Justicia de la Nación



Unidad General de
Conocimiento Científico
y Derechos Humanos

Sistema Bibliotecario de la Suprema Corte de Justicia de la Nación Catalogación

PO

F880.113

E435e

Elementos y criterios científicos para la atribución de responsabilidad ambiental / esta obra estuvo a cargo de la Unidad General de Conocimiento Científico y Derechos Humanos de la Suprema Corte de Justicia de la Nación ; apoyo a la coordinación Cecelic Reséndiz Arias ; apoyo a la coordinación y revisión José Manuel Vilchis-Conde, José David Camaño Galván y Oliver Joaquín Giménez Héau; revisión de contenido María Andrea Niño Rivera, Areli León Pérez, Estephania Zluhan Martínez. -- Primera edición. -- Ciudad de México, México : Suprema Corte de Justicia de la Nación, 2025.

1 recurso en línea (xxi, 297 páginas : ilustraciones, cuadros, tablas)

Material disponible solamente en PDF.

ISBN 978-607-552-542-6

1. Responsabilidad ambiental – Conocimiento científico – Ensayos – México 2. Peritos científicos – Valoración de pruebas 3. Ciencia – Argumentación jurídica 4. Evaluación de daño ambiental I. Reséndiz Arias, Cecelic, colaboradora II. Vilchis Conde, José Manuel, colaborador III. Camaño Galván, José David, colaborador IV. Giménez Héau, Oliver Joaquín, colaborador V. Niño Rivera, María Andrea, revisora VI. León Pérez, Areli, revisora VII. Zluhan Martínez, Estephania, revisora VIII. México. Suprema Corte de Justicia de la Nación. Unidad General de Conocimiento Científico y Derechos Humanos
LC KGF3421

Primera edición: diciembre de 2025

D.R. © Suprema Corte de Justicia de la Nación

Avenida José María Pino Suárez núm. 2

Colonia Centro, Alcaldía Cuauhtémoc

C.P. 06060, Ciudad de México, México.

Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin autorización escrita de los titulares de los derechos.

El contenido de los capítulos publicados es de responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente refleja la opinión ni la política de la Suprema Corte de Justicia de la Nación.

Esta obra estuvo a cargo de la Unidad General de Conocimiento Científico y Derechos Humanos de la Suprema Corte de Justicia de la Nación.

La edición y el diseño estuvieron al cuidado de la Dirección General de la Coordinación de Compilación y Sistematización de Tesis de la Suprema Corte de Justicia de la Nación.

Créditos: apoyo a la coordinación Cecelic Reséndiz Arias; apoyo a la coordinación y revisión José Manuel Vilchis-Conde, José David Camaño Galván y Oliver Joaquín Giménez Héau; revisión de contenido María Andrea Niño Rivera, Areli León Pérez, Estephania Zluhan Martínez.

Elementos y criterios científicos para la atribución de **responsabilidad ambiental**



Suprema Corte
de Justicia de la Nación



Unidad General de
Conocimiento Científico
y Derechos Humanos

Suprema Corte de Justicia de la Nación

Ministro Hugo Aguilar Ortiz
Presidente

Ministra Lenia Batres Guadarrama
Ministro Irving Espinosa Betanzo
Ministra Yasmín Esquivel Mossa
Ministro Giovanni Azael Figueroa Mejía
Ministro Aristides Rodrigo Guerrero García
Ministra Sara Irene Herrerías Guerra
Ministra Loretta Ortiz Ahlf
Ministra María Estela Ríos González

Unidad General de Conocimiento Científico y Derechos Humanos

Víctor Leonel Juan Martínez
Titular de la Unidad

Contenido

Presentación	IX
Reseñas curriculares	XIII

Capítulo I

El conocimiento científico en la atribución de responsabilidad ambiental: aproximaciones para su integración y valoración jurídica <i>José Manuel Vilchis-Conde y José David Camaño Galván</i>	1
Introducción	3
A. La ciencia en la búsqueda de legitimación y responsabilidad ...	8
B. Del conocimiento científico a la estimación de riesgos ambientales.....	15
C. El conocimiento científico en la toma de decisiones judiciales	17
D. La validez y la fiabilidad científicas aplicadas a la toma de decisiones judiciales	20
I. El concepto de validez jurídica	21
II. El concepto de validez científica	22
III. Validez interna.....	22
IV. Validez externa	23
E. Herramientas científicas y técnicas aplicables a peritajes en litigios ambientales	28

F.	Sistemas de Información Geográfica (SIG)	29
I.	Sistemas de Información Geográfica en el estudio del medio ambiente.....	30
II.	Sistemas de Información Geográfica en decisiones judiciales	32
G.	Detección remota	34
I.	Detección remota en el estudio del medio ambiente	35
II.	Detección remota en litigios ambientales	37
H.	Modelación de datos.....	38
I.	Modelado en litigios ambientales.....	41
I.	Integración del conocimiento científico en el peritaje ambiental.....	43
J.	La importancia del conocimiento científico en el litigio ambiental.....	48
K.	La axiología como herramienta para la atribución de responsabilidad ambiental en contextos de incertidumbre científica.....	49
	Referencias	51

Capítulo II

Revisión de la literatura científica sobre peritajes ambientales: estándares científicos y valoración probatoria para la atribución de responsabilidad

	<i>Michael Peter Hantke-Domas</i>	59
	Introducción	61
A.	Revisión de la literatura especializada	64
B.	Fundamentos y metodologías del peritaje ambiental.....	67
I.	Disciplinas forenses implicadas.....	68
II.	Técnicas analíticas	73
1.	Identificación de la fuente y reconstrucción de eventos	77
2.	Reconstrucción de eventos: establecimiento de cronologías y vías de contaminación.....	80
i.	Métodos de fechamiento (<i>Age Dating</i>)	80
ii.	Análisis de vías de transporte.....	82
3.	Objetividad y reproducibilidad del peritaje ambiental	83

C. Valoración probatoria en sede judicial	87
I. Finalidad del procedimiento probatorio.....	88
II. Los momentos de la actividad probatoria.....	89
III. Estrategia probatoria.....	90
IV. Estándares de admisibilidad de los peritajes ambientales ...	91
V. Ponderación de la prueba	93
VI. Estándares de prueba.....	93
VII. La prueba científica	94
D. Peritaje y atribución de responsabilidad	95
I. La importancia del peritaje ambiental.....	96
II. La responsabilidad ambiental	97
III. El proceso judicial	98
IV. El desafío de la causalidad	99
V. Inteligencia artificial en el peritaje ambiental	100
E. Conclusiones y recomendaciones	101
I. Resumen ejecutivo de aportes.....	101
II. Recomendaciones.....	102
1. Práctica pericial	102
2. Formación.....	103
Referencias	103

Capítulo III

Transdisciplina en la argumentación jurídica. Integrando ciencia y derecho en la atribución de responsabilidad ambiental

<i>Sibel Alejandra Villalobos Volpi</i>	113
Introducción	115
A. Transdisciplina: ante problemas complejos, soluciones integrativas.....	116
B. La transdisciplina como marco conceptual	120
C. La transdisciplina como herramienta	134
D. ¿ <i>Homo transdisciplinensis</i> ?	144
Referencias	149

Presentación

En la actualidad, la humanidad enfrenta lo que la Organización de las Naciones Unidas (ONU) denomina una triple crisis planetaria, integrada por el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y el incremento de la contaminación. Esta crisis constituye un fenómeno complejo, ya que sus causas y consecuencias son multifactoriales, persistentes y de alcance global.

Frente a este panorama, la acción conjunta de los distintos sectores de la sociedad resulta esencial. Esta problemática tampoco es ajena al derecho, y menos aún a la labor judicial, pues cada vez es más frecuente que la sociedad recurra al litigio para frenar a quienes, por acción u omisión, provocan o favorecen alguna de estas tres grandes amenazas.

En este contexto, si bien en las últimas décadas se han logrado avances significativos en la protección de la naturaleza mediante litigios ambientales, tanto a nivel nacional como internacional, persisten desafíos relevantes. Uno de los más comunes es la dificultad para identificar al agente causal de un daño, requisito indispensable para establecer su responsabilidad ambiental.

Es en torno a este concepto que se articula la presente obra, la cual, a través de tres capítulos, reúne conceptos teóricos e incorpora elementos prácticos orientados a brindar a las personas operadoras de justicia algunas claves que faciliten la determinación de la responsabilidad ambiental. Si bien se incluyen ciertas definiciones

vinculadas al derecho, el énfasis recae en establecer las bases teóricas del conocimiento científico que suelen emplearse como sustento en el litigio ambiental, así como resaltar la estrecha interrelación entre ciencia y derecho en este ámbito.

En el primer apartado: “El conocimiento científico en la atribución de responsabilidad ambiental: aproximaciones para su integración y valoración jurídica”, se recapitula acerca de lo que se entiende por responsabilidad ambiental, haciendo un recorrido por la jurisprudencia nacional, así como por instrumentos internacionales que apoyan en comprender el estado del arte actual acerca de este tema. Posteriormente se introduce el papel de la ciencia en la determinación de la responsabilidad ambiental desde un punto de vista técnico. Esto da pie a la segunda mitad del capítulo en la cual se ejemplifican algunas de las herramientas que se utilizan frecuentemente como apoyo en el litigio ambiental como lo son la integración de conocimiento científico, los Sistemas de Información Geográfica, la detección remota, y la modelación. Para cada una de estas herramientas se explica el fundamento teórico, así como se ejemplifica su uso desde la actividad científica hasta ejemplos de aplicaciones que se les han dado en litigios ambientales o climáticos.

En el segundo capítulo “Revisión de la literatura científica sobre peritajes ambientales: estándares científicos y valoración probatoria para la atribución de responsabilidad”, el autor hace una revisión minuciosa de la literatura que hay en torno a peritajes ambientales, esto en el objetivo de hacer una recapitulación no solo de algunos elementos teóricos importantes, sino que busca retomar aquellas herramientas técnicas comunes que suelen encontrarse en peritajes de diversas disciplinas pero cuyo objetivo es común: conocer quién es el agente responsable del daño ambiental.

A lo largo de este segundo apartado, el autor no se centra únicamente en la identificación de la responsabilidad en eventos aislados, sino que profundiza en aquellas herramientas que la literatura suele reportar para la reconstrucción de eventos de contaminación, el rastreo de los contaminantes a lo largo del sistema, así como la identificación de las fuentes de contaminación. Otro punto relevante es el subapartado donde se discute acerca de la integración del conocimiento científico al litigio

ambiental, pero visto no únicamente desde un punto de vista procesal, sino como un análisis crítico de la relevancia de incluir el conocimiento científico y técnico, estableciendo criterios y estándares, entendiendo tanto los usos potenciales como las limitaciones. Además, hacia la parte final del capítulo se discute la integración de las pruebas periciales y conocimiento científico en el litigio ambiental desde un punto de vista procesal, discutiendo acerca de la admisión y valoración de las pruebas para, finalmente, dar algunas de las pautas acerca del peritaje ambiental y las perspectivas hacia la búsqueda de la integración de la ciencia y nuevas tecnologías en pro de la búsqueda de la responsabilidad ambiental.

Finalmente, el último capítulo, “Transdisciplina en la argumentación jurídica”, al integrar la ciencia y el derecho en la atribución de la responsabilidad ambiental, aborda uno de los enfoques más relevantes de los últimos tiempos: la transdisciplina. A través de una discusión conceptual, la autora presenta una base sólida sobre la formación de este enfoque, revisando cómo se construye el conocimiento colectivo. Esta sección no solo incorpora referencias académicas y principios que invitan a profundizar en sus fundamentos, sino que también, mediante esquemas y tablas, ilustra las propuestas teóricas, ofreciendo al lector un apoyo visual que facilita su comprensión y aplicación práctica.

En la segunda mitad de este capítulo, una vez establecidas las bases teóricas, se ejemplifica el uso de la transdisciplina aplicado al quehacer jurisdiccional, proponiendo el cumplimiento de tres requisitos básicos para este tipo de investigación: el enfoque en problemas sociales relevantes, la promoción del aprendizaje mutuo entre disciplinas y la generación de conocimiento enfocado en la resolución de problemas. Cada uno de estos requisitos necesarios y aplicables a la crisis planetaria presente. Finalmente, la autora cierra con una reflexión acerca de la necesidad no solo de pensar en la transdisciplina, sino de ejercerla y promoverla como una nueva manera de hacer y generar conocimiento en pro de la resolución de problemas complejos.

Esta obra busca presentar las bases para la discusión sobre la responsabilidad ambiental, con un énfasis en el uso de herramientas de conocimiento científico en litigios de esta naturaleza. Considera desde la admisión y valoración de las pruebas

periciales hasta la revisión de métodos y recursos disponibles para sustentar los argumentos. Con ello, se ofrece un punto de partida que permita profundizar en temas técnicos y científicos aplicables a la acreditación de la responsabilidad ambiental, tanto en casos puntuales como en problemáticas de mayor complejidad, como la contaminación difusa o prolongada. En última instancia, el libro busca aportar elementos para enfrentar uno de los grandes retos del litigio ambiental: identificar a los agentes responsables de los daños ocasionados al medio ambiente.

*Subdirección General de Conocimiento Científico
para los Derechos Humanos*

Reseñas curriculares

Villalobos Volpi, Sibel Alejandra. Licenciada en Biología Marina y Magíster en Ciencias con mención en Recursos Hídricos por la Universidad Austral de Chile, con una sólida formación complementada por diplomados en gestión ambiental, evaluación de impacto, mediación en conflictos socioambientales y argumentación jurídica, entre otros.

Con más de 15 años de trayectoria en gestión ambiental, se ha desempeñado como ministra titular y suplente licenciada en Ciencias del Tercer Tribunal Ambiental de Chile, así como en cargos de liderazgo en el Ministerio del Medio Ambiente, donde fue encargada de la Unidad de Política y Regulación Ambiental, SEREMI subrogante y encargada regional del Departamento de Control de la Contaminación. En el ámbito académico, ha impartido clases en la Universidad de Los Lagos y en la Universidad Austral de Chile, y es autora y coautora de publicaciones sobre modelación de ecosistemas lacustres y el rol transdisciplinario de los tribunales ambientales.

Hantke-Domas, Michael Peter. Licenciado en Ciencias Jurídicas por la Universidad Andrés Bello, Chile; Investido con el Título de Abogado, por la Excelentísima Corte Suprema y Doctor en regulación económica de monopolios naturales por la Universidad de East Anglia, Reino Unido.

Actualmente se desempeña como profesor asociado en la Facultad de Derecho y Gobierno de la Universidad de San Sebastián en Santiago de Chile; abogado y

consultor senior en derecho ambiental, derecho de aguas y recursos naturales; miembro del Comité Editorial Actas de Derecho de Aguas en la Pontificia Universidad Católica de Chile; asociado honorario en Centre for Water Law, Policy and Science en la Universidad de Dundee, Escocia. Ha ejercido funciones judiciales como ministro titular abogado en el Tercer Tribunal Ambiental de Valdivia; ha participado en proyectos sobre cambio climático, delitos ambientales y gestión hídrica; y es autor de publicaciones sobre regulación de recursos naturales, tribunales ambientales y políticas públicas en agua y saneamiento en América Latina.

Vilchis-Conde, José Manuel. Biólogo por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México y Maestro en Ciencias Biológicas por el Instituto de Biología de la misma Universidad. Actualmente, forma parte de la Unidad General de Conocimiento Científico para los Derechos Humanos de la Suprema Corte de Justicia de la Nación.


Ha colaborado en diversas publicaciones en revistas arbitradas y de divulgación, además de participar como ponente en foros nacionales e internacionales. Sus intereses se enfocan en la taxonomía aplicada a la conservación de fauna, el uso del conocimiento científico en la toma de decisiones y la comunicación de la ciencia.

Camaño Galván, José David. Estudió la Licenciatura en Derecho en el Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM) y cuenta con estudios de Maestría en Derechos Humanos y Garantías en la misma institución, así como formación en Prueba Pericial por la Escuela Federal de Formación Judicial. Actualmente forma parte de la Unidad General de Conocimiento Científico y Derechos Humanos de la Suprema Corte de Justicia de la Nación.

Desde 2019, ha enfocado su investigación y práctica profesional en la intersección entre ciencia y derecho, aplicando soluciones científicas y tecnológicas a problemáticas jurídicas, con un énfasis especial en la justicia constitucional, los sistemas probatorios; así como, en la promoción, defensa y garantía de los derechos humanos.



Capítulo



El conocimiento científico en la atribución de responsabilidad ambiental: aproximaciones para su integración y valoración jurídica

José Manuel Vilchis-Conde
José David Camaño Galván

El conocimiento científico en la atribución de responsabilidad ambiental: aproximaciones para su integración y valoración jurídica. Introducción, A. La ciencia en la búsqueda de legitimación y responsabilidad, B. Del conocimiento científico a la estimación de riesgos ambientales, C. El conocimiento científico en la toma de decisiones judiciales, D. La validez y la fiabilidad científicas aplicadas a la toma de decisiones judiciales, E. Herramientas científicas y técnicas aplicables a peritajes en litigios ambientales, F. Sistemas de Información Geográfica (SIG), G. Detección remota, H. Modelación de datos. I. Integración del conocimiento científico en el peritaje ambiental. J. La importancia del conocimiento científico en el litigio ambiental. K. La axiología como herramienta para la atribución de responsabilidad ambiental en contextos de incertidumbre científica, Referencias.

Introducción

El fenómeno del cambio climático y la pérdida de la biodiversidad, por causas antropogénicas, son los dos principales riesgos para la sobrevivencia y prosperidad de la vida en el planeta Tierra según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.¹ Desafortunadamente, los efectos de esta doble crisis son tan diversos que no solo afectan a la flora y la fauna de los ecosistemas, sino que repercuten directamente en el bienestar y los derechos de las personas.

Frente a esta realidad, el derecho internacional ha reconocido “la necesidad de una respuesta progresiva y eficaz a la amenaza apremiante del cambio climático, sobre la base de los mejores conocimientos científicos disponibles”.² Por supuesto que los poderes legislativos y ejecutivos nacionales tienen un papel importante en

¹ International Union for Conservation of Nature, “Tackling the Twin Climate Change and Biodiversity Crises”, IUCN, 19 de septiembre de 2023. Disponible en: «<https://iucn.org/events/iucn-event/tackling-twin-climate-change-and-biodiversity-crises>».

² Naciones Unidas, Acuerdo de París. Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 21ª sesión, París, 30 de noviembre-13 de diciembre de 2015. Disponible en: «https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf».

el desarrollo de leyes y políticas públicas para alcanzar este fin, pero en este trabajo nos centraremos en los litigios ambientales que se desarrollan en el Poder Judicial; lo que se ha descrito como el área del derecho que impone las mayores exigencias a la evidencia científica.³

Hay que señalar que tanto las causas como los efectos de la crisis ambiental no son homogéneos. Por ejemplo, los países industrializados históricamente han desempeñado un papel mayor en la emisión de contaminantes como gases de efecto invernadero que son los que promueven la proliferación del calentamiento global.⁴ Estas emisiones repercuten directamente en el cambio climático y en la pérdida de biodiversidad.

Por lo anterior, el actuar de cada uno de los países debe ser diferenciado. Esto lo reconoce el principio 7 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, el cual establece que “los Estados tienen responsabilidades comunes pero diferenciadas”. Esto implica que, si bien son fenómenos globales, el actuar que debe tener cada uno de los países será de acuerdo con sus posibilidades.

Un caso similar se presenta con los efectos del cambio climático, pues estos son heterogéneos a lo largo de las poblaciones y tienen un mayor impacto sobre aquellos grupos de personas más vulnerables. Esto se ha documentado por diversos equipos de estudio que han encontrado impactos diferenciados, por ejemplo: se ha estudiado cómo el aumento en la temperatura afecta a la salud especialmente de las personas de la tercera edad;⁵ cómo el aumento de temperatura promueve la expansión de enfermedades, como el dengue y la malaria, transmitidas por vectores como los mosquitos en regiones tropicales, cuyo índice de desarrollo es inferior al de países que se encuentran geográficamente más al norte; cómo es que la combinación entre la regresión de los glaciares y el aumento en las precipitaciones

³ Albright, Thomas, “A scientist’s take on scientific evidence in the courtroom”, PNAS, 2023. Disponible en: «<https://www.pnas.org/doi/epub/10.1073/pnas.2301839120>».

⁴ Page, Edward, “Distributing the burdens of climate change”, *Environmental Politics*, vol. 17, 2008, pp. 556-575.

⁵ McMichael, Anthony *et al.*, “Climate change and human health: present and future risks”, *The Lancet*, vol. 367, núm. 9513, 2006, pp. 859-869. Disponible en: «[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(06\)68079-3/abstract](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(06)68079-3/abstract)».

promueve el deslave en ecosistemas montañosos.⁶ Al respecto, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) en su informe “Cambio Climático 2022: impactos, adaptación y vulnerabilidad”⁷ resalta el papel que desempeña el cambio climático como factor de acercamiento de las personas en situación de pobreza hacia la pobreza extrema, esto a través de la interacción de afectaciones climáticas con afectaciones no climáticas sobre las personas.

Asimismo, la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC) ha reconocido que son particularmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático los países de baja altitud y otros países insulares pequeños, los países con zonas costeras bajas, zonas áridas y semiáridas, o zonas expuestas a inundaciones, sequía y desertificación, y los países en desarrollo con ecosistemas montañosos frágiles.⁸

Imaginemos, por ejemplo, una comunidad rural de personas dedicadas a la agricultura y con poco acceso a bienes y servicios que pierde su cosecha debido a fenómenos climáticos como sequías extremas o fenómenos de lluvias atípicas. El costo que tendrán por la pérdida de su cosecha será importante en términos económicos, sin embargo, este coste se verá exacerbado ante el incremento en el costo de vida asociado al proceso de urbanización, el cual, es un fenómeno no climático. Este incremento en el coste de vida, así como la pérdida de la cosecha compromete la capacidad de respuesta de la comunidad para asegurar sus condiciones de vida, lo que conllevará a un incremento en la desigualdad que ya sufre con respecto a las personas con mayores oportunidades de acceso a bienes y servicios.

A pesar del reconocimiento de este fenómeno por parte de la comunidad científica, de diferentes Estados, así como de instancias internacionales como el IPCC

⁶ Thornton, Philip *et al.*, “Climate variability and vulnerability to climate change: a review”, *Global change biology*, 2014, pp. 3313-3328.

⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change, “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, *Cambridge University Press*, 2022.

⁸ Naciones Unidas, *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Nueva York, 1992. Preámbulo. Disponible en: «<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>».

o la Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES por sus siglas en inglés), hay temas en torno a los impactos del cambio climático que aún no están resueltos y que impactan directamente en estas dinámicas socioambientales. Uno de esos grandes temas es entender quiénes son los actores clave que influyen en que el cambio climático siga progresando de una forma tan acelerada, así como cuál es el papel que desempeñan estos actores en las afectaciones que tienen los fenómenos climáticos y no climáticos sobre la naturaleza, el bienestar y los derechos de las personas.

Si bien, como ya se dijo, se reconoce internacionalmente que los impactos de la crisis climática son diferenciados, persiste el reto de adoptar mejores herramientas que permitan establecer cuándo o cómo se puede determinar el grado de responsabilidad en contextos particulares, lo cual permitiría poder exigir acciones de mitigación, remediación, adaptación, reparación o compensación de manera puntual. Es precisamente en este punto donde se vuelve relevante la participación de diferentes sectores de la sociedad y de los gobiernos en la búsqueda de exigir que existan y se cumplan las diferentes disposiciones ambientales. No es en vano que en los últimos años ha incrementado la demanda por parte de la sociedad de justicia, señalando como principales responsables del daño asociado al medio ambiente y cambio climático a agentes gubernamentales y corporaciones.⁹

Los actores que adquieren gran relevancia en la determinación de la crisis climática son los tribunales, pues encuentran en la protección del medio ambiente una doble área de acción. Por un lado, la protección de los derechos humanos de las personas que se están viendo afectadas de manera directa y, por el otro, la protección de la naturaleza que se relaciona íntimamente con el derecho humano a un medio ambiente sano.

Un ejemplo de lo anterior es el Amparo en revisión 307/2016 en donde la Primera Sala de la Suprema Corte de Justicia de la Nación resolvió un caso relacionado a la construcción del “Parque Temático Ecológico Laguna del Carpintero”, el cual generaría la destrucción de un ecosistema, en particular, de un manglar. En este

⁹ SCJN, *Jurisprudencia climática comparada*, México, SCJN, 2024, pp. IX.

caso, en síntesis, dos mujeres alegaron que la remoción, relleno y fragmentado del mangle con motivo de la ejecución del proyecto implicó la alteración de los servicios ambientales que presta el manglar ubicado en la Laguna del Carpintero, circunstancia que les afectó directamente, al ser vecinas del lugar.¹⁰ Este caso es muy importante porque se reclamaron los derechos a un medio ambiente sano y a la salud.¹¹ En esta sentencia la Primera Sala consideró que “la salvaguarda efectiva de la naturaleza no solo descansa en la utilidad que ésta representa para el ser humano, sino en la convicción de que el medio ambiente exige una protección *per se*.”¹²

Este es un claro ejemplo de la doble dimensión¹³ que sustenta la Sala sobre la naturaleza del derecho al medio ambiente sano: en términos subjetivos o antropocéntricos, implica la protección de este derecho como una garantía para la realización y vigencia de los demás derechos reconocidos en favor de la persona, que en el caso se relaciona con el derecho a la salud humana. Mientras que, en términos objetivos o ecologistas, protege al medio ambiente como un bien jurídico fundamental en sí mismo, que atiende a la defensa y restauración de la naturaleza y sus recursos con independencia de sus repercusiones en el ser humano. En el caso esto se relacionó con las afectaciones al ecosistema y sus consecuencias a través de la afectación a los servicios ecosistémicos que prestan y la posibilidad de evaluarlos a través del principio de precaución y la teoría del entorno adyacente.

Cabe señalar que, desde la academia, el papel de los sistemas judiciales en la respuesta a la amenaza apremiante de la crisis ambiental no se limita únicamente a un ordenamiento jurídico particular, sino que se ha estudiado el papel de los tribunales para combatir esta crisis en países con diferentes tipos de sistemas judiciales. Por ejemplo, Colby y colaboradores analizaron cómo se ha tratado el cambio climático en sistemas judiciales tanto del *common law* como de *civil law*. Encontraron que las cortes han desempeñado un papel importante en la protección de

¹⁰ SCJN, Amparo en revisión 307/2016, párr. 175, Primera Sala, sentencia del 14 de noviembre de 2018.

¹¹ *Ibidem*, p. 17.

¹² *Ibidem*, párr. 77.

¹³ *Ibidem*, párr. 76.

los derechos ante el cambio climático.¹⁴ Por ejemplo, un caso emblemático en el derecho internacional fue Urgenda contra los Países Bajos, en el que una organización no gubernamental (ONG) reclamó el incumplimiento por parte del Estado neerlandés sobre la obligación de cuidado y la violación a los derechos fundamentales de ciudadanos al no haber adoptado las mejores medidas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, obteniendo una sentencia favorable para la parte quejosa.

Al analizar más a fondo el caso, Colby y colaboradores¹⁵ destacan puntos importantes que se desprendieron de ese precedente internacional. Por ejemplo, resaltan que, si bien se buscó que uno de los argumentos del caso fuera la afectación a los derechos humanos, los tribunales atendieron más bien la falta de deber de cuidado por parte del Estado hacia sus ciudadanos. Otro de los puntos importantes en este caso fue que los tribunales sustentaron su decisión en la doctrina jurídica nacional, la debida diligencia, así como la información científica y el análisis de política climática internacional.

A. La ciencia en la búsqueda de legitimación y responsabilidad

Si bien cada uno de los casos se resuelve de manera particular en cada una de las cortes del mundo, se pueden encontrar puntos en común; uno de ellos es la legitimación, que puede resumirse como la potestad legal de las personas para acudir a una instancia pertinente para comenzar un juicio ambiental. En el contexto mexicano, se ha hecho especial énfasis en el interés legítimo para casos relacionados con el medio ambiente en materia de amparo.

Otro de los grandes retos respecto al litigio ambiental es la manera en cómo se puede demostrar que existe una afectación a diversos derechos, que a su vez es causada por el cambio climático o por daños a la naturaleza. En ese sentido, hay avances

¹⁴ Colby, Heather *et al.*, “Judging Climate Change: The Role of the Judiciary in the Fight Against Climate Change”, *Oslo Law Review*, vol. 7, 2020, pp. 168-185.

¹⁵ *Ibidem*.

importantes en el litigio ambiental, pues se ha reconocido que este es particular y se han señalado algunos cambios o excepciones como lo es la reversión de la carga de la prueba hacia quienes podrían generar un daño, así como la necesidad de utilizar el mejor conocimiento científico disponible.¹⁶ Sin embargo, se presenta un reto mayor, que es precisamente el demostrar quién o quiénes son los responsables, ya sea a través de sus acciones u omisiones.

El caso de Ella Adoo-Kissi-Debrah, si bien no culminó en una sentencia —pues se resolvió por un acuerdo extrajudicial—, representa un claro ejemplo de la complejidad que implica la atribución de la responsabilidad. En este asunto, una niña que vivía en Reino Unido falleció debido a una crisis asmática agravada por la exposición prolongada a altos niveles de contaminación del aire. En 2020, una investigación forense determinó que la contaminación fue una causa directa de su muerte, convirtiéndose en la primera vez que este factor se reconocía oficialmente en un certificado de defunción de ese país.¹⁷

Si bien, a partir de la evidencia de la investigación forense y con el certificado como prueba, sería posible para un tribunal concluir expeditamente la controversia sobre la causa de muerte, la pregunta sobre quién es responsable de ocasionar esa causa directa —es decir la contaminación—, sigue sin poder ser contestada fácilmente. ¿La contaminación es atribuible a la acción de cada una de las personas que conducen un auto, es atribuible a las industrias que arrojan toneladas de contaminantes a la atmósfera, o es atribuible a la omisión del gobierno de establecer leyes y controles efectivos de la contaminación? ¿En qué medida cada uno de estos agentes contribuyó al resultado final?

¹⁶ SCJN, *Apuntes para la implementación del Acuerdo de Escazú: ¿quién y cómo puede acceder a la justicia en asuntos ambientales?*, México, SCJN, 2024, pp. 21-22.

¹⁷ Cfr. BMJ, “Air pollution from road traffic contributed to girl’s death from asthma, coroner concludes”, *The BMJ*, 17 diciembre 2020; Mayor of London, “MD3183 Settlement relating to legal claim from the family and estate of Ella Adoo-Kissi-Debrah”. *London Assembly*, noviembre 2024. Disponible en: «<https://www.london.gov.uk/md3183-settlement-relating-legal-claim-family-and-estate-ella-adoo-kissi-debrah?ac=204023=204018>» y Hodge Jones & Allen, “Mother praised by government as she reaches settlement over daughter’s ‘air pollution’ death”, 31 octubre, 2024. Disponible en: «<https://www.hja.net/news-and-insights/press-releases/civil-liberties-human-rights/mother-praised-by-government-as-she-reaches-settlement-over-daughters-air-pollution-death/>».

Producto del dictamen forense se derivó otra serie de acciones que reflejan la búsqueda de justicia por parte de la familia de Ella. En 2024 la madre de la menor presentó una demanda contra agencias gubernamentales. Como resultado de este procedimiento se realizó un acuerdo extrajudicial que incluyó una disculpa pública por parte del Gobierno.

Este es un claro ejemplo de cómo la lucha en contra del cambio climático no siempre resulta tener un “culpable” directo o fácil de detectar, pues en el caso de Ella, fue la búsqueda de justicia, así como una investigación por parte de una persona experta, lo que ayudó a dilucidar parte del problema.

Así, tenemos que existen dos problemáticas comunes en casos relacionados con el medio ambiente. La primera se centra en cómo podemos correlacionar una afectación al medio ambiente con consecuencias específicas, ya sea sobre el ecosistema o, más complejo aún, sobre el bienestar y los derechos de una persona. Hay que señalar que para poder resolver esta cuestión existen mecanismos jurídicos que van desde las pruebas periciales hasta la aplicación de diferentes principios. Uno que se ha desarrollado de manera importante en materia ambiental es el principio precautorio. Este establece que “cuando la experiencia empírica refleja que una actividad es riesgosa para el medio ambiente, resulta necesario adoptar todas las medidas necesarias para evitarlo o mitigarlo, aun cuando no exista certidumbre sobre el daño ambiental.”¹⁸

La segunda problemática común es probar quién o quiénes son responsables de causar dichos daños o afectaciones. A esto se le denomina responsabilidad ambiental; como su nombre lo menciona, se trata de reconocer quién fue responsable de un daño ambiental. En el sistema jurídico mexicano, el artículo 10 de la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA) establece que “toda persona física o moral que con su acción u omisión ocasione directa o indirectamente un daño al ambiente, será responsable y estará obligada a la reparación de los daños, o bien, cuando la reparación no sea posible a la compensación ambiental que

¹⁸ SCJN, *Protocolo para juzgar casos que involucren derechos de acceso en materia ambiental*. Acuerdo de Escazú, México, SCJN, 2024, pp. 23-25.

proceda.”¹⁹ Sin embargo, a pesar de estar definido, la manera en la cual puede hacerse la atribución de dicha responsabilidad no es algo que ya esté resuelto.

Ahora bien, el marco normativo de la LFRA es bastante amplio al contemplar la reparación o compensación del daño al ambiente mediante un sistema mixto de responsabilidad ambiental objetiva²⁰ o subjetiva,²¹ los problemas se complejizan cuando se trasladan al ámbito probatorio. Esto debido a la propia naturaleza del daño ambiental o ecológico que suele ser, según el Amparo directo 20/2020 un “daño no común, diferente, dinámico, en continua redefinición, mutante, en el que opera la incertidumbre.”²²

Aunque la LFRA define el daño ambiental como “pérdida, cambio, deterioro, menoscabo, afectación o modificación adversos y mensurables de los hábitats, de los ecosistemas, de los elementos y recursos naturales, de sus condiciones químicas, físicas o biológicas, de las relaciones de interacción que se dan entre éstos, así como de los servicios ambientales que proporcionan”²³ la incertidumbre en su acreditación probatoria persiste, precisamente, por las notas distintivas que lo caracterizan.

En la jurisprudencia se han detectado, al menos, las siguientes notas características del daño ambiental:²⁴

1. No es de percepción inmediata para el ser humano, pues puede existir un periodo prolongado de tiempo entre el acto que lo causa y la manifestación del mismo.
2. Los elementos que producen la afectación ambiental son difusos y lentos, se suman y acumulan entre sí.

¹⁹ Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. Ley Federal de Responsabilidad Ambiental. *Diario Oficial de la Federación*. 2013, Artículo 10. Disponible en: «https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFRA_200521.pdf».

²⁰ LFRA, Artículo 12.

²¹ LFRA, Artículo 11.

²² SCJN, Amparo directo 20/2020, Primera Sala, Ministra Ponente Ana Margarita Ríos Farjat, 30 de abril de 2025.

²³ LFRA, Artículo 2.

²⁴ SCJN, Amparo en revisión 307/2016, párrs. 98-99, Primera Sala, sentencia del 14 de noviembre de 2018.

3. Las causas del riesgo y del daño ambiental son, en muchas ocasiones, despersonalizadas o anónimas, lo que implica una gran dificultad para determinar al agente responsable.
4. Suele ser resultado de actividades especializadas que utilizan técnicas específicas desconocidas para las víctimas.
5. La interdependencia de los fenómenos ambientales produce pluralidad de causas y consecuencias de los riesgos y daños ecológicos.

En este sentido, la responsabilidad ambiental objetiva, que en apariencia ofrece un marco claro sobre los elementos a probar en un litigio ambiental —como cualquier acción u omisión vinculada con materiales o residuos peligrosos, el uso u operación de embarcaciones en arrecifes de coral, la realización de actividades calificadas como altamente riesgosas y los supuestos previstos en el artículo 1913 del Código Civil Federal—,²⁵ continúa enfrentando dificultades probatorias que inciden directamente en la atribución de responsabilidad.

A modo de ejemplo, si concebimos la responsabilidad ambiental en términos clásicos —como la consecuencia de una acción vinculada con materiales peligrosos que ocurre de forma puntual, súbita e instantánea en un ecosistema—, podríamos pensar en el derrame de un contenedor con residuos industriales en un lago, acontecido en un día concreto y atribuible a un agente plenamente identificado. En un escenario así, el vínculo causal entre la acción y el daño resulta relativamente sencillo de probar, pues existe una correlación temporal directa, evidencia física inmediata y un responsable individualizado, lo que facilita la reconstrucción de los hechos y la atribución de la responsabilidad.

No obstante, esta concepción limitada excluye otros supuestos que presentan las notas características previamente señaladas, como los daños de afectación prolongada, difusa, lenta y acumulativa. Tal sería el caso de la contaminación del mismo lago ocasionada, a lo largo de varios años, por el arrastre de químicos agroindustriales debido a las lluvias, la filtración de lixiviados (líquidos residuales) procedentes de distintos basureros o las descargas de residuos de diversa índole,

²⁵ *Idem.*

generadas por una multiplicidad de agentes no identificados. En este tipo de escenarios, la ausencia de un momento preciso de ocurrencia, la dispersión geográfica de las fuentes y la multiplicidad de interacciones entre contaminantes y ecosistema dificultan establecer un nexo causal claro, incrementando la incertidumbre probatoria y, en consecuencia, los desafíos para atribuir responsabilidad ambiental.

Si este nivel de complejidad probatoria se presenta ya en el marco de la responsabilidad ambiental objetiva, las dificultades se intensifican aún más en el ámbito de la responsabilidad ambiental subjetiva. Esta última no solo requiere probar la existencia del daño y su nexo causal con la conducta de un agente, sino también demostrar que dicho daño proviene de actos u omisiones ilícitos; es decir, de acciones realizadas en contravención de disposiciones legales o reglamentarias, de normas oficiales mexicanas o de las condiciones impuestas en autorizaciones, licencias, permisos o concesiones otorgadas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) u otras autoridades competentes.

En consecuencia, en los casos de afectación prolongada, difusa y acumulativa, no solo es difícil identificar con certeza el agente causante y la relación causal, sino también precisar qué norma fue incumplida, por quién y en qué momento. Este conjunto de obstáculos refleja un problema más amplio: la presencia de incertidumbre epistémica en la determinación judicial del daño ambiental. Dicha incertidumbre no deriva únicamente de la falta de información o de pruebas técnicas, sino también de las limitaciones inherentes al conocimiento científico para captar y atribuir procesos ambientales complejos, dinámicos y multicausales dentro de los marcos de tiempo y certeza que demanda el derecho.

Este punto conecta directamente con la forma en que los tribunales valoran la evidencia científica en litigios ambientales. Ante escenarios donde la prueba directa es escasa o inexistente y la atribución de responsabilidad depende de inferencias complejas, la función judicial se ve obligada a ponderar datos técnicos, informes periciales y modelos científicos que, aunque útiles, están sujetos a márgenes de error y a interpretaciones divergentes. Así, la calidad epistémica de la decisión judicial no solo depende de la normativa sustantiva aplicable, sino también de la

capacidad institucional para comprender, evaluar y traducir la ciencia en términos jurídicos.

Es importante señalar que, a pesar del gran potencial del uso de las herramientas técnicas y científicas, se espera que las decisiones o argumentos sean basados en el conocimiento de las partes o de quien juzga, pues la deferencia ciega y acrítica hacia quienes realizan estas pruebas —como podrían ser peritos o personas expertas— no garantiza que los resultados sean los esperados, esto porque pueden aplicarse pruebas de manera correcta, en contextos donde no sean las idóneas.

En este sentido, en los litigios ambientales es común observar cómo el derecho se acerca a la ciencia y la tecnología, representando un reto técnico para las personas juristas.²⁶ Ejemplo de esta problemática es la Opinión Consultiva OC-32/25 sobre emergencia climática y derechos humanos, en la cual la Corte Interamericana de Derechos Humanos (Corte IDH) primero reconoce que el litigio ambiental, específicamente el climático, es de naturaleza compleja. Aunado a lo anterior, al referir a la parte probatoria, señala que la aplicación estricta de ciertas disposiciones podría ser contraproducente en este tipo de litigios, precisamente por la complejidad de establecer relaciones causales entre el daño y el origen, la asimetría de la cual ya se hablaba anteriormente en este texto, así como por el acceso a los medios probatorios. Con respecto a la admisibilidad, validez y valoración de la prueba en materia climática, la Corte IDH menciona que las disposiciones relativas deben de ser interpretadas de manera flexible para que las normas no sean barreras procesales.

Por lo anterior, en el presente capítulo se analiza cómo es que el derecho ha integrado el conocimiento científico en la búsqueda de la atribución de responsabilidad en litigios ambientales. Se aborda el uso de algunas de estas herramientas que, de manera conjunta o individual, han ayudado a los tribunales a visibilizar el problema, a entenderlo desde una perspectiva técnica, a dimensionar las implicaciones, además de establecer cómo es que se puede llegar a la atribución de la responsabilidad ambiental.

²⁶ SCJN, *op cit.*, 2024

B. Del conocimiento científico a la estimación de riesgos ambientales

En materia ambiental no siempre es necesario probar que ya se ha producido una afectación a los derechos de una persona —lo que correspondería a la dimensión subjetiva o antropocéntrica—, ni que el daño a la naturaleza —dimensión objetiva o ecológica— se haya materializado. En numerosos casos basta con acreditar la existencia de un riesgo potencial de daño ambiental.

Esta diferencia es clave, pues el derecho, en su concepción clásica, opera principalmente sobre la noción jurídica del “hecho”, entendido este como un acontecimiento ocurrido en el pasado o que está ocurriendo en el presente. En cambio, el derecho ambiental introduce la necesidad de considerar la ocurrencia probable de eventos futuros y de integrarlos al análisis jurídico. Esta cuestión no está exenta de debate, ya que plantea interrogantes sobre si la noción tradicional de “hecho” puede abarcar, de manera legítima, “hechos futuros” que aún no se han materializado, pero cuya probabilidad de ocurrencia es jurídicamente relevante.

A través del uso de herramientas técnicas y científicas es que se pueden realizar inferencias para estimar el riesgo potencial que alguna actividad, acción u omisión pueda tener consecuencias sobre el ambiente en tiempo futuro. Al ser un fenómeno tan complejo, multifactorial y con un componente técnico muy fuerte, es importante allegarse de cierto conocimiento como un medio para actuar en la incertidumbre,²⁷ que permita inferir o modelar cuáles son los riesgos que existen en el medio ambiente. Por lo anterior, en materia ambiental y más específicamente al hablar de temas como el cambio climático, el uso de conocimiento científico es casi obligado. Esto debido a que el conocimiento científico se presenta como el medio más confiable disponible para conocer cuáles son las posibles consecuencias, a futuro, de acciones u omisiones presentes.

²⁷ Roo, Gert, “Knowing in Uncertainty: On Epistemic Conditions Differentiated for Situations in Varying Degrees of Uncertainty, the Distinction Between Hierarchical and Flat Ontology, and the Necessary Merger with the Axiological Domain of Values”, *DIPS*, vol. 57, núm. 2, 2021, pp. 90-111.

Sin embargo, para tratar de aproximarnos al entendimiento del papel de la ciencia en la atribución de responsabilidad, primero tenemos que entender cómo es que la ciencia contribuye en la predicción de riesgos climáticos. Sarewitz y Pielke proponen que existen dos formas de entender la predicción. La primera de ellas refiere al uso que se le da en ciertas áreas de la ciencia que tratan de identificar leyes invariables y maneras en cómo estas pueden ser validadas. Por ejemplo, se busca predecir a través de leyes de la física cómo se comportará un satélite en órbita. La segunda forma de entender la predicción es a través del modelado de fenómenos complejos. En este tipo de predicción no se pretende generalizar leyes, sino más bien anticipar el comportamiento de los sistemas a través del análisis masivo de datos; no puede ser puesta a prueba, sino que podrá ser ajustada conforme se generen mayor cantidad de datos o evidencia. Un ejemplo de ello sería la meteorología que genera datos constantes que a su vez son usados para modelar el estado del tiempo de manera continua.

Esta última forma de entender la predicción es la que relaciona el conocimiento científico con la toma de decisiones, pues en los dos ámbitos se desea poder predecir los fenómenos futuros o los riesgos potenciales. Los autores hacen hincapié en que es en este sentido que se debe de entender la predicción cuando se habla de fenómenos cuyos resultados no pueden ser conocidos con certeza, sino solo de manera aproximada;²⁸ sin que esto implique un menor grado de rigurosidad o validez. Puntos que son esenciales en la toma de decisiones jurídicas.

Hay que señalar que más allá del alcance espacial de una predicción, está su carácter temporal, especialmente si se quiere utilizar información generada en el pasado lejano para resolver asuntos actuales. Si bien la idea de la inferencia es que los datos se mantengan vigentes, la generación de nuevas herramientas o de mayor número de datos puede modificar dichas predicciones y, con ello, generar nuevo conocimiento. Esta temporalidad hace que la correspondencia entre ciencia y derecho sea compleja. Es por ello por lo que, como ya se dijo, hay que privilegiar el mejor conocimiento disponible, lo que este significa en el momento de tomar las

²⁸ Sarewitz, Daniel y Pielke, Roger, "Prediction in science and policy", *Technology in Society*, vol. 21, núm. 2, abril 1999, pp. 121-133.

decisiones y no juzgar de manera retroactiva decisiones tomadas con otros modelos o predicciones a los casos contemporáneos.

Dicho esto, podemos ver por qué la modelación o estimación de las consecuencias del cambio climático puede resultar teóricamente válida; sin embargo, vale la pena profundizar un poco en cómo se hacen este tipo de modelaciones o predicciones para poder tener la certeza de su uso como herramientas en litigios ambientales.

Por todo lo anterior, es importante conocer cuáles son algunas de las herramientas de conocimiento científico que pueden apoyar no solo para el modelado, sino que podrán ayudar a determinar la responsabilidad ambiental con mayor certidumbre.

C. El conocimiento científico en la toma de decisiones judiciales

Si bien el uso de la predicción, particularmente de riesgos potenciales, es una herramienta que suele allegarse de conocimiento científico, vale la pena cuestionarse y analizar si este conocimiento es completamente válido, como lo han hecho varios autores. Por ejemplo, Houlahan cuestiona el poder y la validez de las predicciones y señala que en muchos casos se pueden ver influenciadas por factores externos como la estructura de la academia, aunque reconoce el poder de la predicción científica en la toma de decisiones, siempre y cuando desde la ciencia se trabaje con la transparencia y rigurosidad requeridas.²⁹

Otro ejemplo en el que podemos ver cómo es que se examina el papel del conocimiento científico en la toma de decisiones es el artículo de revisión de Spruijt y colaboradores, quienes explican cómo la literatura científica ha abordado los diferentes papeles que pueden desempeñar las personas expertas (científicas) en la intersección con la toma de decisiones en casos complejos, así como los factores alrededor de la interacción. Producto de este análisis encontraron que hay cinco principales intersecciones de estudio: la ciencia posnormal (*Post-normal*

²⁹ Houlahan, Jeff E., *et al.*, "The priority of prediction in ecological understanding". *Oikos*, vol. 126, núm. 1, 2017, pp. 1-7.

Science), en ciencia y tecnología, de políticas basadas en ciencia, de política del conocimiento experto y sobre la gobernanza del riesgo. Los autores señalan que se reconoce a lo largo de la muestra de textos, la relevancia general que adquiere el conocimiento científico, sin embargo, que es fundamental seguir desarrollando el diálogo entre los dos sistemas, el de la ciencia y el de la toma de decisiones, pues la complejidad de la primera y la falta de participación en la segunda suelen hacer que la interacción no sea la mejor.³⁰

Una vez establecido el potencial del uso del conocimiento científico en la toma de decisiones, vale la pena profundizar en cómo es que este se puede integrar no solo a la toma de decisiones para política pública, sino también a la resolución de casos judiciales. Como primer obstáculo nos encontramos que el lenguaje de la ciencia suele tener muchos tecnicismos y, además, que los canales de comunicación de la ciencia suelen estar limitados a espacios académicos. Además, la gran cantidad de información que se genera suele hacer virtualmente imposible el estudio de cada una de las investigaciones que hay relacionadas con un tema, sumado a que los tiempos en que avanza la ciencia son diferentes a los que evoluciona la jurisprudencia o a los que una persona juzgadora tiene que resolver un caso. Por lo anterior, vale la pena preguntarse qué es lo que se entiende por conocimiento científico, cómo identificarlo y, después, cómo se ha utilizado en casos relacionados con medio ambiente.

La comunicación del conocimiento científico es diversa, podemos encontrar que hay una gran variedad de recursos que van desde publicaciones arbitradas en revistas científicas, libros o fascículos especiales publicados por instituciones académicas reconocidas, comunicaciones orales que tienen lugar en foros de discusión públicos como lo son congresos, simposios o coloquios, así como informes técnicos, entre otros.³¹

Dadas la relevancia y la urgencia que hay sobre la crisis medioambiental, existen organismos e instituciones especializadas en la generación, recopilación y análisis

³⁰ Cfr. Spruijt, Pita *et al.*, "Roles of scientists as policy advisers on complex issues: A literature review", *Environmental Science & Policy*, vol. 40, 2014, pp.16-25.

³¹ SCJN, *Consulta de literatura especializada: Herramientas y criterios para la consulta de literatura científica*, México, SCJN, 2024, pp. 3-50.

de la información relacionada. Por ejemplo, el IPCC es un órgano internacional que evalúa el cambio climático —con el objetivo de ofrecer al mundo una visión científica del estado del conocimiento en materia de cambio climático— a través de la revisión y evaluación de la literatura científica, técnica y socioeconómica en materia de cambio climático; y la divide en tres ejes generales: las bases físicas del fenómeno, el impacto y las vulnerabilidades, así como las medidas de mitigación ante el cambio climático.³²

Es importante entender cómo es que funcionan este tipo de organismos, pues debido a su carácter internacional, además de las bases sólidas y científicas que hay en su diseño, se han convertido como IPCC en referentes para la toma de decisiones, desde el ámbito legislativo hasta el judicial, en diferentes países.

Es precisamente el judicial el ámbito en el que profundizaremos. Un caso conocido resuelto en instancia internacional es el *Friends of the Earth vs. Shell*, llevado a cabo en un tribunal de distrito de La Haya en 2021. Este litigio fue llevado a cabo debido a una demanda donde siete organizaciones no gubernamentales, representantes de más de 17,000 personas, demandaron que Royal Dutch Shell era responsable de aproximadamente el 1% de las emisiones globales de dióxido de carbono y que, a pesar de saber del fenómeno desde mediados del siglo XX, no hizo nada para prevenir los riesgos asociados al cambio climático.

Como parte de la sentencia, el tribunal incluyó información acerca de los efectos del cambio climático tomada de los informes del IPCC, y señaló que los objetivos del Acuerdo de París derivan de la comunicación con este grupo de personas expertas.³³ Este caso adquirió especial relevancia debido a que la resolución implicaba que se delinearan algunas de las acciones que se podrían tomar en consideración cuando en casos de cambio climático se tratara de empresas transnacionales con subsidiarias y con impacto global, esto enmarcado en tratados internacionales.

³² Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC home page. IPCC. Disponible en: «<https://www.ipcc.ch/>».

³³ Carrillo, Jorge Alejandro, “El caso *Friends of the Earth v. Shell*: la relación entre empresas y cambio climático desde la justicia holandesa”, *Blog del Centro de Estudios Constitucionales*, 26 noviembre, 2021.

México no es la excepción, también se han consultado datos del IPCC para tratar temas relacionados con el litigio climático. Por ejemplo, en el Amparo en revisión 610/2019 la Segunda Sala de la Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN) declaró inconstitucional que la Comisión Reguladora de Energía hubiese modificado la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016 en la que se permitía incrementar el porcentaje máximo de etanol permitido en gasolinas. En este caso no solo se analizó el principio precautorio, sino que también se hizo hincapié en que decisiones, que puedan tener como consecuencia daños ambientales serios e irreversibles, deben de considerar la intervención y valoración de profesionales especializados, centros de investigación científica o tecnológica, así como la participación ciudadana previa. Como parte de esta sentencia se incluyó información del IPCC, pues se dijo que: “acorde al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, de la Organización de las Naciones Unidas, el ozono troposférico ‘es el tercer gas de invernadero más importante después del dióxido de carbono —CO₂— y el metano —CH₄—’.”³⁴

Estos casos ejemplifican la manera en cómo algunos de los tribunales se han allegado al conocimiento científico a través de la información producida y validada por organismos internacionales como el IPCC en sus decisiones. Sin embargo, habrá ocasiones en las cuales las personas juzgadoras podrán tener la necesidad de retomar otras fuentes del conocimiento científico como literatura científica, opiniones expertas y otros canales del conocimiento; ya sea que estas sean presentadas ante el tribunal por las partes como pruebas documentales o periciales, por el papel activo de la persona juzgadora para allegarse de los medios de prueba necesarios o por la actividad de terceros como *amicus curiae*. Es por ello, que deberían de poder tener criterios para evaluar de forma autónoma dicha información. Para ello se propone que la evaluación puede ser desde la validez y la fiabilidad del conocimiento.

D. La validez y la fiabilidad científicas aplicadas a la toma de decisiones judiciales

Desde la perspectiva de Susan Haack, la comunidad científica distingue entre validez y fiabilidad: la validez determina si una prueba respalda lo que pretende

³⁴ SCJN, Amparo en revisión 610/2019, Segunda Sala, Ministro Alberto Pérez Dayán, 15 de enero de 2020.

demostrar, mientras que la fiabilidad indica si la aplicación del principio produce resultados consistentes. Haack observa que, en el ámbito jurídico, el concepto de ‘fiabilidad probatoria’ se basa más en la validez científica que en la fiabilidad científica.³⁵ Esto significa que, para ser considerada confiable en un contexto legal, una prueba debe ser consistente, sólida y adecuada para apoyar el caso. Así, puede surgir confusión al intentar homologar los términos entre los contextos científico y jurídico.

I. El concepto de validez jurídica

Para comenzar a esclarecer el concepto de validez, primero hay que estudiar algunas propuestas desde el ámbito legal. Por ejemplo, Carmen Vázquez refiere que, según la Corte Suprema de los Estados Unidos, el término ‘validez’ refiere a si un método mide lo que pretende medir, mientras que el de ‘fiabilidad’ informa la eficacia de la medición. Adicionalmente, la autora menciona que la validez funciona como todo o nada, es decir, es una regla de decisión.³⁶

Otra de las definiciones que suelen ser retomadas desde el ámbito jurídico es la del Consejo Asesor del Presidente de los Estados Unidos (PCAST por sus siglas en inglés). En su informe, el PCAST considera que las decisiones judiciales sobre la admisibilidad de pruebas científicas requieren establecer su validez científica y que es la comunidad científica la que debe proporcionar una guía sobre los estándares claros para determinarla. Para ello, la distinguió en dos tipos: la validez de los fundamentos y la validez de la aplicación. La validez de los fundamentos, como su nombre lo señala, está relacionada con la manera en la cual se ha aceptado un concepto científico desde estudios empíricos y la capacidad de ser replicado con los mismos resultados (su reproducibilidad); es decir, que sus fundamentos, en términos del informe, se consideren fiables. Por otro lado, la validez de la aplicación significa que el método ha sido fiablemente aplicado en la práctica.³⁷

³⁵ Haack, Susan, “Of Truth, in Science and in Law”, *Brooklyn Law Review*, vol. 73, 2008.

³⁶ Vázquez-Rojas, Carmen, “Sobre la cientificidad de la prueba científica en el proceso judicial”, *Anuario de Psicología Jurídica*, vol. 24, núm. 1, 2014, pp. 65-73.

³⁷ Executive Office of the President President’s Council of Advisors on Science and Technology. “Report to the President. Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods”, 2016.

Al ofrecer estas definiciones, el PCAST pretende que cada concepto científico se corresponda con alguno de los requisitos jurídicos previstos en las Federal Rules of Evidence que alude a “principios y métodos fiables” y a que “haya aplicado fiablemente los principios y métodos a los hechos del caso”.

Así, parece que el concepto del PCAST sobre validez en la aplicación es más cercano al de validez científica de Susan Haack y al de Carmen Vázquez-Rojas. Por otro lado, el concepto de validez de los fundamentos corresponde a lo que Susan Haack identifica como fiabilidad científica.³⁸ Desde el ámbito jurídico se propone que la validez, entendida en las pruebas basadas en conocimiento científico, se refiere a la característica que tiene para probar lo que se supone que debería. En este mismo sentido, cabe señalar que la validez se mide únicamente como un criterio binario, es decir, algo es válido para el propósito específico que se persigue, o no lo es, no existen grados de validez.

II. El concepto de validez científica

Para la ciencia el concepto de validez es de suma importancia, pues tal como pasa en el derecho, de este término dependerá la aceptación de una teoría o un método. Desde la ciencia se proponen conceptos específicos que se relacionan con la validez en diferentes etapas del método científico. Así, la validez se descompone en distintos tipos, cada uno enfocado en una parte particular del proceso de investigación. Por ejemplo, la validez interna se refiere a la precisión con la que un estudio establece relaciones causales entre variables dentro del experimento, mientras que la validez externa se enfoca en la capacidad de generalizar los resultados a otros contextos o poblaciones.

III. Validez interna

Dentro de la ciencia, en el área de estudios experimentales se ha definido a la validez interna como el grado en el que un estudio puede establecer una relación

³⁸ Haack, Susan, *op. cit.*, 2008; y Haack, Susan, “What’s Wrong with Litigation-Driven Science? An Essay in Legal Epistemology”, *Seton Hall L. Rev.*, vol. 38, 2008, pp. 1053-1083.

causal entre un tratamiento (método aplicado) y un resultado.³⁹ Desde las ciencias sociales se establece que un experimento tiene validez interna si se encuentran diferencias significativas entre un grupo control y un grupo experimental, el cual indicará una relación de causalidad entre el tratamiento y el cambio observado. Además, desde este mismo enfoque, se refiere que la validez interna solo puede darse en aquellos métodos bien diseñados, cuidadosamente controlados y meticulosamente medidos.⁴⁰

Desde el punto de vista clínico, Patino y Carvalho han definido la validez interna como el atributo que tienen los estudios para que los resultados obtenidos representen la verdad de una población estudiada. Es decir, si un estudio presenta validez interna, se puede concluir que el tratamiento probado está relacionado con el atributo medido.⁴¹ Las mismas autoras advierten sobre los factores que pueden influir en la pérdida de validez como una deficiente selección de los participantes en el estudio y del método a emplear.

Desde estas disciplinas científicas, se reconoce la validez interna como el grado en que un diseño experimental permite establecer una relación causal entre variables, asegurando que los cambios observados en los resultados sean consecuencia directa de la manipulación de la variable independiente (tratamiento o método) y no de factores externos.

IV. Validez externa

Desde los estudios experimentales, se define la validez externa como la capacidad de generalización que tiene un método, es decir, qué tanto puede aplicarse a escenarios distintos al estudiado originalmente. Slack y Draugalis señalan que la validez externa depende de que el método haya tenido validez interna, pues sin

³⁹ Slack, Marion *et al.*, “Establishing the internal and external validity of experimental studies”, *American journal of health-system pharmacy*, vol. 58, núm. 22, 2001, pp. 2173-2181.

⁴⁰ McDermott, Rose, “Internal and External Validity”, *Cambridge Handbook of Experimental Political Science*, 2011, pp. 27-40.

⁴¹ Patino, C. *et al.*, “Validade interna e externa: você pode aplicar resultados de pesquisa para seus pacientes?”, *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, 2018, p. 183.

esta, el método no puede ser aceptado, por lo cual, hablar de validez externa no tiene sentido, pues no podrían hacerse generalizaciones acertadas.⁴²

Desde las ciencias sociales, se define la validez externa como la generalizabilidad de los resultados encontrados en un estudio o el alcance de la aplicación de las conclusiones obtenidas, en poblaciones o situaciones diferentes. Los autores mencionan que la validez externa surge de la replicación de los experimentos entre diferentes conjuntos de datos, utilizando métodos y métricas diversas. De igual manera, hacen énfasis en la importancia de la validez interna, pues dicen que, sin esta, no pueden surgir generalidades ni hacerse generalizaciones.⁴³

Desde el punto de vista clínico, Patino y Carvalho plantean que la validez externa se refiere a la capacidad de poder aplicar los resultados de un estudio a pacientes con condiciones semejantes en un escenario diferente. Señalan que la validez externa se refiere a la extensión de la aplicabilidad de los resultados para la práctica diaria.⁴⁴

La definición anterior resulta particularmente útil para explicar por qué se puede confiar en los métodos de prueba estandarizados, como las técnicas periciales basadas en conocimiento científico. Aunque al realizar estas pruebas se procura alcanzar una validez interna, la técnica ha demostrado en el ámbito empírico que la validez externa es precisamente la que permite su aplicación fiable.

Es importante reconocer las diferencias entre la validez interna y externa, pues dentro del proceso probatorio, estos dos conceptos pueden aplicarse en un mismo contexto. Pensemos en un caso de contaminación ambiental en el cual una empresa ha comenzado con la operación de una planta industrial y pretende descargar los desechos a un cuerpo de agua cercano. Supongamos que las personas de una comunidad cercana quieren detener el funcionamiento de esta planta industrial, bajo el argumento de que causará la pérdida de biodiversidad, además de afectar el cuerpo de agua del que satisfacen su necesidad de este líquido. Para esto

⁴² Slack, Marion y Draugalis, Jolaine, *op. cit.*, 2001.

⁴³ McDermott, Rose, *op. cit.*, 2011.

⁴⁴ Patino, C. *et al.*, *op. cit.*, 2018.

deciden comenzar un proceso legal argumentando que, de no detenerse la operación de esta fábrica, se estarían afectando múltiples derechos ante el riesgo de daño ambiental.

Supongamos que, como parte de las pruebas, se ofrece una prueba de toxicología del agua con la cual se pretende probar que los niveles de un contaminante específico son superiores al permitido. El resultado de esta prueba indica que efectivamente hay niveles altos del contaminante buscado. En este caso, se puede decir que la prueba al realizarse de la manera adecuada y al responder a la pregunta específica (¿hay presencia de un cierto contaminante?), tiene un alto nivel de validez interna.

Ahora bien, imaginemos que como prueba documental adicional se presenta una serie de artículos científicos con los cuales se pretende demostrar que, de no detenerse el funcionamiento de la planta industrial, podrían morir todos los organismos que habitan el cuerpo de agua. Los artículos presentados no son específicos para la localidad de la cual se trata el caso, por lo cual carecen de validez interna para el caso. Sin embargo, hablan de cuerpos de agua que, por sus características bióticas y abióticas, son equivalentes al del ecosistema en cuestión. Al describir el impacto de sustancias similares en ecosistemas con características comparables, refuerzan la posibilidad de un daño ambiental grave.

En este contexto, la validez externa de los artículos científicos aporta un sustento sólido a la hipótesis de que el funcionamiento continuo de la planta podría llevar a consecuencias graves en el ecosistema local. Aunque los estudios no pueden establecer una relación causal específica para este caso particular (validez interna), su aplicación a un contexto similar permite proyectar posibles resultados de manera razonada, agregando peso a la evidencia presentada en el proceso probatorio. Cabe señalar que el hecho de que esta prueba documental carezca de validez interna en el caso no implica que estos documentos carezcan de ella en su realización. Precisamente, una forma de evaluar la validez interna que tienen estos estudios puede ser evaluando el tipo de publicación (que se trate de una publicación científica arbitrada), así como a través de métricas que indiquen su aceptación en la comunidad científica (cienciometría).

Con el ejemplo anterior ya se pueden observar algunas de las herramientas a través de las cuales se puede evaluar la validez del conocimiento científico en contextos específicos.

Asimismo, y aunque no constituye el objeto central de este artículo, conviene señalar que la distinción entre validez interna y validez externa también puede resultar útil en otras etapas del proceso judicial. Un ejemplo de esto se encuentra en el establecimiento de las obligaciones derivadas de los daños ocasionados al ambiente, particularmente en materia de compensación ambiental prevista en el artículo 17 de la LFRA. Dicho precepto establece que, cuando la compensación del daño ambiental resulte materialmente imposible de realizar en el sitio donde se produjo el daño, esta deberá llevarse a cabo en un lugar alternativo que esté vinculado ecológica y geográficamente con el sitio afectado y que, además, beneficie a la comunidad impactada.

En este sentido, es poco probable que durante el proceso probatorio encaminado a atribuir la responsabilidad del daño a un agente específico se presenten pruebas directamente relacionadas con la eventual compensación, ya que para que esta obligación proceda es necesario, en primer lugar, acreditar la responsabilidad del daño. Sin embargo, puede ser útil examinar si algún artículo científico ofrecido como prueba para demostrar una relación causal específica en el caso concreto (validez interna) podría, a su vez, aportar información que permita identificar qué otros lugares mantienen una vinculación ecológica y geográfica con el sitio originalmente dañado, a fin de evaluar su pertinencia para la compensación ambiental. En este segundo aspecto, el análisis se centraría en la validez externa del estudio o evidencia científica.

La incorporación de este tipo de consideraciones en la valoración judicial de la prueba resulta especialmente relevante en contextos de alta incertidumbre ambiental. La capacidad de un tribunal para extraer de una misma fuente científica conclusiones aplicables más allá del caso específico, sin perder rigor metodológico, amplía las opciones para una reparación o compensación ambiental efectiva, además de que fortalece la calidad epistémica de la decisión judicial, asegurando que esta se fundamente en un conocimiento científicamente sólido y contextualizado.

De manera complementaria, para evaluar la validez del conocimiento científico se propone verificar la teoría o principio científico en cuestión y evaluar el método empleado en la investigación.

Es importante verificar la teoría o principio en que se sustenta el conocimiento científico que se desee usar ya que para que sea considerado apto para su uso, se espera que cuente con el respaldo de la comunidad científica. De lo contrario, no sería posible evaluar objetivamente su validez ni su fiabilidad, y no existiría una manera adecuada de asegurar que la prueba se realice correctamente ni que sus resultados sean replicables bajo las mismas condiciones. En este contexto, podemos hablar de la validez interna, pues para que un método se considere válido, debe ser capaz de demostrar lo que se propone y de explicar sus resultados mediante un respaldo sólido. Dentro del proceso jurisdiccional, una prueba se puede considerar válida si la teoría científica que la sustenta es correcta y fundamentada.

La teoría debe estar bien respaldada por la comunidad científica, y no debe basarse en hipótesis sin fundamento. Esto implica que haya un consenso científico suficiente en torno a su validez y a su adecuación para explicar el fenómeno o hecho específico que se evalúa. Este consenso se refleja tanto en la aceptación teórica, como en su aplicación práctica: cuando la comunidad científica utiliza una teoría o principio como base en sus investigaciones y publicaciones, valida su robustez. En otras palabras, el consenso científico se manifiesta a través del uso extendido y consistente de la teoría, evidenciando que más allá de ser un acuerdo teórico, se trata de un consenso que surge de su aplicación práctica y efectiva en el campo de la ciencia.

Adicionalmente, la teoría que respalda la prueba debe reflejar los avances recientes en la disciplina, es decir, debe de cumplir con un criterio de actualidad. Esto debido a que las teorías pueden cambiar con el tiempo y, una teoría que era adecuada hace años podría estar superada hoy en día por otros descubrimientos o desarrollos. Para contar con evidencia de que una teoría está actualizada es posible apoyarse en varios indicadores, entre ellos, las revisiones de la literatura científica con los últimos avances en torno a la teoría; el análisis de la frecuencia de citación en investigaciones actuales, lo cual sugiere su vigencia; así como su uso constante

en estudios recientes, que indica su relevancia continua. Además, la incorporación de la teoría en manuales y protocolos de organizaciones científicas reconocidas, como el Protocolo Homologado para la Búsqueda de Personas Desaparecidas (PHB),⁴⁵ el Protocolo de Minnesota sobre la Investigación de Muertes Potencialmente Ilícitas⁴⁶ y la Guía de Buenas Prácticas en Antropología Forense,⁴⁷ refuerza su validez y pertinencia en el contexto de los desarrollos contemporáneos de la disciplina.

Es esencial que la teoría sea aceptada dentro de la comunidad científica relevante. Esto implica que ha sido revisada, probada y, en general, no ha encontrado objeciones serias o sustanciales. Una persona juzgadora puede apoyarse en expertos independientes o consultar literatura especializada para determinar si la teoría cumple con estos requisitos. Para asegurar que una teoría es aceptada y está actualizada dentro de la comunidad científica, se pueden considerar varias fuentes de evidencia. La consulta de revisiones sistemáticas y metaanálisis permite evaluar la consistencia y aceptación de la teoría a lo largo del tiempo, ya que estos estudios suelen recoger una visión amplia del consenso existente. También, el análisis de citas en publicaciones recientes ofrece una perspectiva sobre su relevancia y vigencia, ya que una teoría frecuentemente citada en investigaciones actuales sugiere una aceptación continua. Además, la inclusión de la teoría en manuales de prestigio y protocolos oficiales de organizaciones científicas indica su reconocimiento y aplicación práctica en el contexto de los últimos avances de la disciplina.

E. Herramientas científicas y técnicas aplicables a peritajes en litigios ambientales

Existen herramientas técnicas y científicas que van más allá del conocimiento científico ya publicado, como podría ser la literatura científica, y que en el ejemplo anterior vimos algunos de los usos que podrían adquirir en el proceso.

⁴⁵ Diario Oficial de la Federación. “Protocolo Homologado para la Búsqueda de Personas Desaparecidas y No Localizadas”. México, 6 de octubre de 2020.

⁴⁶ Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos. “Protocolo de Minnesota sobre la Investigación de Muertes Potencialmente Ilícitas”. ONU. Nueva York y Ginebra, 2017.

⁴⁷ Asociación Latinoamericana de Antropología Forense. Guía latinoamericana de buenas prácticas para la aplicación en antropología forense. ALAF, Guatemala, 2016.

Existen otras herramientas comunes que adquieren relevancia principalmente en el contexto del litigio ambiental, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los sistemas de detección remota, la inteligencia artificial, la modelación ambiental, el manejo de bases de datos, entre otras herramientas tecnológicas. Kouziokas y Perakis sostienen que el avance en las tecnologías ha permitido que, desde diferentes áreas de la toma de decisiones, especialmente en materia ambiental, se hayan implementado en la construcción de diferentes sistemas de decisiones apoyados en ellas. Además, los autores señalan que sus aplicaciones además se sostienen por la calidad de los datos que producen y la objetividad de estos, al ser datos de creación continua y constante. Ahora, exploraremos un poco acerca de estas herramientas y cómo es que ayudan a entender o visibilizar el impacto sobre el medio ambiente y cómo se han aplicado a la toma de decisiones jurídicas.

F. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas digitales de procesamiento de datos espaciales que pueden ser relacionados con datos alfanuméricos. Sirven para la representación y análisis de objetos e información asociada que ocurre en el espacio físico.⁴⁸ Los Sistemas de Información Geográfica son herramientas que pueden procesar datos obtenidos de diferentes áreas del conocimiento con la finalidad de obtener productos de diversa naturaleza. Por ejemplo, en la industria, los SIG son utilizados para realizar inventarios de distribución de servicios públicos; en las ciencias naturales se utilizan para estudiar donde se encuentran los seres vivos, es decir, sus patrones de distribución, para el estudio de fenómenos naturales o para el monitoreo de la organización espacial; en el ámbito gubernamental se ha usado en la toma de decisiones, por ejemplo, en la gestión de servicios públicos.⁴⁹

⁴⁸ Parker, Dennison, "The Unique Qualities of a Geographic Information System: A Commentary", *Photogrammetric*, 1988, pp. 1547-1549.

⁴⁹ Goodchild, Michael F., "Geographic information systems and science: today and tomorrow", *Annals of GIS*, 2009, pp. 3-9.

Este tipo de herramientas han representado un cambio en cómo se conciben los datos geoespaciales, pues la generación masiva de datos ha permitido que el acceso a este tipo de información sea cada vez más sencillo, incluso ahora nuestros teléfonos celulares pueden generar datos. Con ello se han creado nuevas oportunidades como lo es, por ejemplo, el modelado en tiempo real. Si bien existen un sinnúmero de herramientas, el desarrollo de los SIG es tal, que ha llegado a considerarse como parte de un área conocida como ciencia de la información geoespacial.⁵⁰ Como ya vimos, tiene muy diversos usos y, en la toma de decisiones, es cada vez más frecuente. Por ejemplo, Kouziokas y Perakis⁵¹ propusieron el uso de un sistema de decisión basado en la aplicación de herramientas tecnológicas que incluyó SIG. Para ello, los autores estudiaron las etapas de la toma de decisión en las cuales cada una de las herramientas podrían colaborar. Señalaron que, en específico, los SIG permiten una contextualización espacial, la cual es particularmente útil en casos ambientales, de desarrollo urbano y de visualización de contextos delictivos.

I. Sistemas de Información Geográfica en el estudio del medio ambiente

El estudio del medio ambiente no es ajeno al uso de herramientas de SIG, pues permite el análisis espacial, el modelaje y la visualización de los componentes del medio ambiente. El desarrollo de estas herramientas de la mano con tecnologías de monitoreo remoto permite el seguimiento periódico de grandes extensiones geográficas hasta áreas remotas. Es importante señalar que en la actualidad es posible encontrar diversos recursos de información espacial relacionada con recursos naturales, ecosistemas, fuentes de contaminación, desarrollo urbano, entre otras. Este tipo de información proviene tanto de organizaciones internacionales, de instituciones académicas, como de terceros privados, cuya necesidad por conocer su contexto espacial los ha llevado a la generación de información de dicha naturaleza.

⁵⁰ Longley, Paul y Cheshire, James, "Geographical information systems", en *The Routledge Handbook of Mapping and Cartography*, 2017, pp. 251-258.

⁵¹ Kouziokas, Georgios y Konstantinos, Perakis, "Decision Support System Based on Artificial Intelligence, GIS and Remote Sensing for Sustainable Public and Judicial Management", *European Journal of Sustainable Development*, vol. 6, 2017, pp. 397-404.

Un ejemplo de ello son los repositorios de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA por sus siglas en inglés). Esta agencia gubernamental se encarga de generar datos globales acerca del clima y otros fenómenos meteorológicos, con la finalidad de poner a disposición del público esta información con fines científicos, económicos o comerciales.⁵² A través de su sitio web es posible descargar datos sobre geología marina, geofísica, batimetría, ecosistemas, recursos naturales, fenómenos naturales y climatología.⁵³

Con estos datos es posible estudiar el estado del medio ambiente. Por ejemplo, Singh y colaboradores estudiaron, a través de datos de la NOAA cómo es que se pueden reconocer los diferentes tipos de suelo a través de imágenes satelitales.⁵⁴ Esto es relevante ya que uno de los principales componentes de la naturaleza que se ven afectadas por la acción antropogénica es el suelo, por lo cual, su estudio es sumamente relevante en materia medioambiental.

El papel de este tipo de instituciones no es únicamente generar información sin contexto, ya que precisamente, debido al grado de infraestructura con la que cuentan, así como sus objetivos, pueden impulsar el estudio de nuevos fenómenos que, por falta de datos, habían sido difíciles de estudiar. Un ejemplo de ello es el mapa de microplásticos que generó NOAA, el cual contiene datos sobre el nivel de microplásticos en muestras de agua *in situ*. Este mapa fue generado debido a la creciente problemática que se ha detectado la cual, no solo genera un problema de contaminación de los océanos, sino también la pérdida de biodiversidad que afecta directamente la salud alimentaria de cerca de una quinta parte de la población, además, genera pérdidas económicas millonarias a los gobiernos y la industria.⁵⁵ La información generada por NOAA se presenta a manera de capas descargables

⁵² National Oceanic and Atmospheric Administration, “About our agency”, NOAA. Disponible en: «<https://www.noaa.gov/about-our-agency>».

⁵³ National Oceanic and Atmospheric Administration. “Maps and Geospatial Products”. NOAA. Disponible en: «<https://www.ncei.noaa.gov/maps-and-geospatial-products>».

⁵⁴ Singh, M. *et al.*, “Environmental degradation analysis using NOAA/AVHRR data”, *Advances in Space Research*, vol. 37, núm. 4, 2006, pp. 720-727.

⁵⁵ Nyadjro, Ebenezer *et al.*, “The NOAA NCEI marine microplastics database”, *Scientific Data*, 2023, pp. 1-12.

para su procesamiento a través de herramientas como los SIG.⁵⁶ Este es un claro ejemplo de cómo la información generada por instituciones, de la mano de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica, puede brindar información útil para monitorear y estudiar el medio ambiente.

Los ejemplos anteriores sobre NOAA son solo algunos de los casos de éxito de la producción de información por parte de instituciones y su procesamiento por las personas investigadoras o la sociedad; sin embargo, también hay instituciones nacionales de gran prestigio que generan este tipo de recursos como, por ejemplo, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), y a nivel internacional, la Agencia Europea del Medio Ambiente.

Desafortunadamente, no siempre la generación de conocimiento tiene el impacto que se requiere para que se tomen acciones necesarias contra la crisis ambiental actual. Como ya hemos visto, el papel de los tribunales es esencial en la protección del medio ambiente, no solo porque son el medio por el cual se protegen nuestros derechos, sino porque a través de sus decisiones se pueden prevenir, evitar o reparar afectaciones al medio ambiente. Además de los ejemplos de los tribunales haciendo uso del conocimiento científico en la defensa del medio ambiente, también podemos ver que han utilizado SIG para evidenciar de manera visual lo que podría no ser intuitivo. Es por lo anterior que veremos cómo es que este tipo de herramientas e información puede ser trasladada de un entorno académico a un entorno práctico en las decisiones judiciales.

II. Sistemas de Información Geográfica en decisiones judiciales

No es inusual encontrar decisiones judiciales que se apoyan de mapas generados a través de SIG para la visualización de información, el fortalecimiento de argumentaciones o la toma de decisiones, especialmente en temas relacionados con el medio

⁵⁶ National Oceanic and Atmospheric Administration. "Marine Microplastic Concentration". NOAA. Disponible en: «<https://experience.arcgis.com/experience/b296879cc1984fda833a8acc93e31476>».

ambiente. Existen ejemplos de este tipo de aplicaciones tanto en México y otros países de Latinoamérica, como a nivel internacional.

Un ejemplo es la Controversia constitucional 158/2021,⁵⁷ en la que el Poder Ejecutivo Federal reclamó en contra del Programa Municipal de Ordenamiento Territorial, Ecológico y Desarrollo Urbano de Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, y argumentó que el municipio en cuestión transgredió las competencias de la Federación al no considerarla en la formulación de dicho programa.

En esta sentencia se pueden observar dos mapas. Uno de ellos, con información del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), la General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) y la CONABIO, representando la zona marítima, la zona costera, así como la franja intermareal. La sentencia refiere que con este mapa se puede observar que, prácticamente, todo el municipio en cuestión se encuentra en la denominada zona costera, según el artículo 3, fracción XIII Bis de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).

Realizada la precisión anterior de manera visual, en la sentencia se incluyó además otro mapa que describe los cuerpos de agua dentro del municipio foco del caso. En este mapa, con información de varias instituciones públicas [INEGI y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)], se observa que dentro de la zona de estudio se encuentran diferentes tipos de ecosistemas marinos, los cuales son de jurisdicción exclusiva de la Federación en términos de la LGEEPA.

Así, la sentencia concluyó, entre otras cosas, que el municipio invadía atribuciones exclusivas de la Federación. Este argumento se reforzó con el mapa, pues en este se observa la presencia de ecosistemas que se incluyen como parte de la LGEEPA. Adicionalmente, se argumentó que, debido al principio precautorio y al desconocer las posibles afectaciones sobre dichos ecosistemas, se debían de privilegiar las facultades de la Federación.

⁵⁷ SCJN, Controversia Constitucional 158/2021, Segunda Sala, Ministro Ponente Javier Laynez Potisek, 11 de enero de 2023.

Si bien en este caso no se menciona en la sentencia, de manera explícita, la aplicación de un SIG, podemos inferir del análisis y la presentación de los mapas el uso de dicha herramienta. Sin embargo, hay ejemplos de sentencias internacionales en materia ambiental en las cuales sí se ha hecho explícito su uso.

Un ejemplo de lo anterior es el caso de la Corte Internacional de Justicia conocido como “Ciertas actividades realizadas por Nicaragua en la zona fronteriza (Costa Rica vs. Nicaragua)”. Dicho asunto abordaba la demanda del gobierno de Costa Rica hacia el gobierno de Nicaragua por un tema de ocupación de territorio por parte del Ejército de Nicaragua, así como por las posibles afectaciones al medio ambiente que generaría el dragado y la construcción de un canal en el río San Juan. Tras una serie de contestaciones, así como la presentación de diferentes instrumentos a lo largo del proceso, la Corte Internacional de Justicia resolvió que Nicaragua tendría que indemnizar al gobierno de Costa Rica debido al daño ambiental generado por sus acciones.⁵⁸

Forman parte de esta sentencia una serie de anexos, dentro de los cuales figura uno en el que se dice que se utilizaron “técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para cartografiar y visualizar la erosión del suelo y las fuentes de sedimentación laminar/de afluentes dentro de una cuenca”.⁵⁹ Además, se menciona que gracias a esto fue posible la realización de mapas. Si bien existieron más razones que llevaron al tribunal a emitir la sentencia, es importante señalar que el uso de SIG, cada vez más común, permite un análisis integral de información de diferentes fuentes y, sobre todo, la visualización de la información geoespacial para contextualizar los casos o argumentos.

G. Detección remota

Se entiende por detección remota la recopilación de datos a distancia, es decir, la lectura de datos de manera activa o pasiva de fenómenos detectables bajo ciertos

⁵⁸ International Court of Justice. *Certain Activities Carried Out by Nicaragua in the Border Area (Costa Rica v. Nicaragua)*. Disponible en: «<https://www.icj-cij.org/case/150>».

⁵⁹ *Ibidem*, volumen II- Anexos 1-10.

espectros. Debido a dicha característica de obtención de información a la distancia, es que se ha desarrollado ampliamente en áreas como, por ejemplo, la meteorología, el mapeo, la seguridad, la agricultura o el estudio del medio ambiente. Esta herramienta tuvo sus orígenes con la toma de fotografías aéreas a partir de las cuales era posible estudiar diferentes fenómenos. Actualmente, la detección remota ha diversificado el tipo de fenómenos que pueden ser cuantificados, así como los métodos a través de los cuales obtiene la información ya que, si bien aún se utilizan las fotografías, también existen sensores de infrarrojos, detectores de sonidos, de microondas, sensores LiDAR, estaciones meteorológicas, entre otros.⁶⁰

I. Detección remota en el estudio del medio ambiente

Si bien la detección remota se realiza con una gama amplia de herramientas —desde fotografías de diferente origen (cámaras trampas, drones o satelitales), hasta datos obtenidos con equipos específicos de detección (como ondas, sonidos, fuentes de calor u otros)—, estas han sido usuales en la investigación del medio ambiente, pues permiten conocer las características del entorno, así como monitorear los cambios de manera periódica, precisa y práctica.

Dentro de la literatura científica es posible encontrar una gran variedad de artículos cuyos resultados son producto de datos recabados mediante herramientas de detección remota. Estos no se limitan únicamente a imágenes satelitales o al estudio de ecosistemas terrestres, sino que abarcan una serie compleja de datos obtenidos mediante sensores u otros instrumentos de medición, y consideran ecosistemas tan complejos de estudiar como los marinos.

Por ejemplo, Mahrad y colaboradores publicaron un artículo de revisión en el que analizaron el uso de seis herramientas de detección remota en el estudio de zonas costeras y ecosistemas marinos. Recalaron la importancia de este tipo de tecnologías, pues han permitido un monitoreo constante y objetivo, así como la generación de información la cual, ya implica un costo muy alto en complejidad y en

⁶⁰ Blumenthal, R. “Remote sensing”, *Salem Press Encyclopedia of Science*, 2024.

recursos económicos y temporales. Los autores presentan información acerca de más de 15 aplicaciones de la detección remota para el estudio de los ecosistemas en cuestión, que van desde el estudio de captura de carbono a través de monitoreo satelital y monitoreo aéreo, hasta el estudio de la extracción de recursos vivos y no vivos a través del monitoreo de aeronaves y embarcaciones no tripuladas.⁶¹

Este tipo de herramientas no se limitan al monitoreo del clima o de factores físicos, también han sido utilizados para estudiar el comportamiento animal, así como los cambios en los ecosistemas. Un ejemplo de ello es el estudio del movimiento de la fauna a través del análisis del comportamiento del propio animal, en conjunto con el estudio del paisaje y las dinámicas temporales de ambos.⁶² Otro tipo de estudios de la fauna son los de migraciones de aves a partir de instrumentos como el monitoreo a través de GPS, radares o fotografías.⁶³

Si bien podemos encontrar una vasta cantidad de literatura donde se habla del papel de la detección remota en el monitoreo del medio ambiente, no hay que dejar de lado que, cada vez son más los estudios en los que se relaciona la actividad humana con fenómenos e impactos específicos sobre un ecosistema o el medio ambiente en general. Un ejemplo del uso de herramientas de detección remota en dicho contexto es el estudio del impacto de la minería que Zhang y colaboradores llevaron a cabo en China. En este estudio se buscó conocer los impactos que tiene la minería en los ecosistemas aledaños a partir del monitoreo de la vegetación mediante el análisis biogeoquímico, el uso de sensores hiperspectrales, sensores aéreos e imágenes satelitales.⁶⁴

⁶¹ Mahrads, Badr *et al.*, "Contribution of Remote Sensing Technologies to a Holistic Coastal and Marine Environmental Management Framework: a review", *Remote sensing*, vol. 12, 2020, pp. 2313.

⁶² Neumann, Wiebke *et al.*, "Opportunities for the application of advanced remotely-sensed data in ecological studies of terrestrial animal movement", *Movement Ecology*, núm. 8, 2015, pp. 1-13.

⁶³ Si, Yali *et al.*, "Improving the quantification of waterfowl migration with remote sensing and bird tracking", *Science Bulletin*, vol. 37, núm. 4, 2015, pp. 1984-1993; Bonter, David N., "Characteristics of Important Stopover Locations for Migrating Birds: Remote Sensing with Radar in the Great Lakes Basin", *Conservation Biology*, 2008, pp. 440-448; Sader, Steven A., *et al.*, "Migratory bird habitat monitoring through remote sensing", *International Journal of Remote Sensing*, 1991, pp. 363-372.

⁶⁴ Zhang, Bing, *et al.*, "Application of hyperspectral remote sensing for environment monitoring in mining areas", *Environmental Earth Sciences*, 2012, pp. 649-658.

Otra de las aplicaciones que ha tenido la detección remota es en la toma de decisiones para políticas públicas, fenómeno que también ha sido estudiado desde la academia. Por ejemplo, en un texto publicado en el 2017⁶⁵ se estudió el potencial e importancia del uso de la detección remota en la planificación de medidas de restauración y el manejo del paisaje. Los autores señalan que la detección remota permite la identificación de áreas del paisaje, lo que puede ser útil para la restauración de los ecosistemas —como podría ser la selección de lugares de siembra o plantación de especies vegetales donde el riesgo de incendio sea menor, la planeación de medidas de mitigación ante diferentes fenómenos de perturbación y la priorización de áreas de conservación—.

II. Detección remota en litigios ambientales

Si bien el término “detección remota” puede no ser tan recurrente, es posible encontrar que algunos tribunales se han apoyado de estas herramientas para la resolución de conflictos. Ejemplo de ello es el Amparo en revisión 213/2024, en el que se alegaba que una obra podría afectar el vaso de un lago, el Lago de Chapala, en Jalisco. La parte quejosa argumentaba que la construcción por parte de un tercero afectaría su derecho al medio ambiente sano, sin embargo, en una primera instancia, se había resuelto que la quejosa no tenía legitimación al respecto. La Segunda Sala de la Suprema Corte de Justicia de la Nación resolvió que, si bien la persona quejosa tenía legitimación, los actos reclamados no eran fundados, pues no se podía comprobar que la zona se encontrara en zona federal y que esta afectara al lago de Chapala. Como parte de esta sentencia se incluye una imagen satelital en donde se ubicó el lago. Adicionalmente se mencionan levantamientos topográficos que se hicieron en la zona de estudio. Esta imagen y otras pruebas son las que apoyaron la decisión al establecer que el sitio de la construcción controvertida no formaba parte de la zona federal, por lo tanto, no infringía la norma. Si bien no se menciona de manera explícita el uso de detección remota, las imágenes satelitales empleadas corresponden a esta familia de herramientas.

⁶⁵ Cordell, Susan *et al.*, “Remote sensing for restoration planning: how the big picture can inform stakeholders”, *Restoration Ecology*, vol. 25, 2017, pp. 147-154.

Un caso donde se puede encontrar el uso de la detección remota por tribunales internacionales es el dado en la sentencia D-9-2019 del Tercer Tribunal Ambiental de Chile, en el que la Municipalidad de Valdivia buscaba que un tercero cumpliera con la reparación del daño por contaminación ambiental derivada de actos de relleno y desecación efectuados sin autorización. El Tribunal resolvió que la persona demandada tenía que confeccionar un plan de reparación, debido a la alteración antrópica que generó.

Como parte de dicha sentencia, se incluyeron dos elementos de uso de detección remota. Por un lado, como parte de su sentencia, el Tribunal incluyó la comparativa de imágenes satelitales de dos periodos diferentes, en las que se podía visualizar el deterioro del ecosistema (humedal). Este es un ejemplo del uso de fotografías satelitales con fines de dar un contexto espacial, además de fortalecer visualmente un argumento, pues las fotografías fueron referidas por el demandante. Adicionalmente, como parte de dicho caso se presentó un informe que sirvió como antecedente para aproximar la línea base del sitio de estudio. En dicho informe del Departamento de Medio Ambiente de la Municipalidad de Valdivia, se presentó un estudio donde se describían las condiciones del humedal con datos de vegetación. Este estudio refiere haber utilizado como método el uso de imágenes de alta resolución tomadas con dron, es decir, un método de detección remota. De dicho informe, el tribunal concluyó que los antecedentes del caso permiten inferir que en el sitio referido había un humedal, el cual sufrió cambios como producto de la compactación y relleno del suelo.

En los dos ejemplos anteriores podemos ver cómo se utilizan herramientas de detección remota en las decisiones de diferentes tribunales. Cabe señalar que las aportaciones en ambas sentencias no provienen necesariamente de informes técnicos o periciales, sino de herramientas empleadas por los tribunales para visualizar el contexto espacial y sustentar su argumento.

H. Modelación de datos

Otra de las herramientas que más se han desarrollado para estudiar el medio ambiente, sus componentes y sus riesgos es la modelación. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) define un modelo como una simplificación

de la realidad que se construye para comprender ciertos atributos de un sistema físico, biológico, económico o social.⁶⁶ Así, tenemos que el objetivo de la modelación será, precisamente, la generación de estos modelos con fines predictivos.

Esta herramienta ha adquirido especial relevancia en las últimas décadas pues, ante un sistema tan complejo como lo es el medio ambiente, así como las perturbaciones que sufre por fenómenos como el cambio climático o la pérdida de biodiversidad, ha surgido la necesidad de realizar modelos que permitan predecir o acercarse a conocer las posibles consecuencias que podría sufrir ante diversos eventos como la pérdida de hábitat, el cambio climático u otras afectaciones sobre la naturaleza.

Sin embargo, el potencial de las modelaciones no se limita al ámbito prospectivo, sino que también puede hacerse modelación retrospectiva que es igualmente útil en el litigio ambiental. Este tipo de modelación adquiere especial relevancia para conocer el estado base de los ecosistemas, cuando no se cuenta con la certeza absoluta del estado que tenía un ecosistema previo a una perturbación puntual.

La modelación es un conjunto de herramientas complejo, pues no se refiere únicamente a un tipo de método o uso de datos específicos. Letcher y Jakeman⁶⁷ proponen tres tipos de modelos para sistemas medioambientales: los empíricos o estadísticos, los conceptuales y los basados en procesos o físicos.

Los modelos empíricos, como su nombre lo indica, se basan en las inferencias obtenidas a partir de observaciones. Este tipo de modelos en general son robustos, pues dependen de un cúmulo de información, pero son limitados en su poder explicativo o dependientes de muchos supuestos. Buscan representar fenómenos cíclicos o periódicos, sin embargo, suelen no considerar todos los factores involucrados ni las particularidades de cada evento. Es por lo anterior que suelen utilizarse en áreas específicas como la agricultura, la ecología o la ecotoxicología.⁶⁸

⁶⁶ Environmental Protection Agency. Training Module on the Development of Best Modeling Practices. EPA. s/f.

⁶⁷ Letcher, R. A. "Types of environmental models", *Water and Development*, 2005.

⁶⁸ *Ibidem*.

Por su parte, los modelos conceptuales, al ser en general teóricos, no requieren del análisis de datos empíricos, sino simplemente de algunos parámetros de calibración de observaciones. Esto genera que los modelos conceptuales sirvan como generalizaciones, en su mayoría de tipo descriptivo de los fenómenos, sin embargo, no suelen ser los mejores para la inferencia. Es importante que al realizar modelos de este tipo se revise que no haya una sobre parametrización o subestimación de los parámetros.⁶⁹ Estos suelen utilizarse en modelados de calidad del aire, conservación de la biodiversidad y de desastres.

Finalmente, los modelos basados en procesos se refieren a aquellos modelos cuya base es matemática, es decir, son aquellos cuyo objetivo es, a través de las leyes de la física conocidas, aplicarlos para estudiar una situación en particular. Un ejemplo es el estudio de la energía que se transfiere en las redes tróficas, en el cual, sabiendo que cada que hay un cambio en el nivel trófico, habrá energía que se transfiera y habrá energía que se pierda en forma de calor. Estos suelen ser difíciles de comprobar, están limitados por los datos y suelen ser aplicables únicamente a pequeñas escalas, por lo cual su alcance es limitado; sin embargo, son muy útiles para modelar fenómenos que son difíciles de medir.⁷⁰

En los últimos años se ha cuestionado su alcance porque, en general, en el pasado, debido a la cantidad limitada de información y de datos existentes, estos modelos solían ser muy simples.⁷¹ Esto no quiere decir que la modelación no sea una herramienta útil, sino que hay que tener precaución sobre lo que se modela, así como el alcance que puede tener.

Cabe señalar que el modelado no se refiere únicamente a características físicas del ambiente, como podría ser el nivel de alguna sustancia en la atmósfera, en el suelo o en el agua, sino que se ha desarrollado de tal manera que se pueden incluir factores sociales o económicos. A este tipo de modelación se le ha denominado modelado ambiental integrado, el cual representa una herramienta transdiscipli-

⁶⁹ *Ibidem.*

⁷⁰ *Idem.*

⁷¹ Clark, J. S., *et al.*, "A future for models and data in environmental science", *Trends in Ecology & evolution*, 2006, pp. 375-380.

naria que busca, a través del uso de datos obtenidos en campo, así como de los conocimientos en materias sociales, generar información para la toma de decisiones y el desarrollo de políticas públicas.⁷²

I. Modelado en litigios ambientales

Desde la academia también se ha analizado la manera en cómo los tribunales han integrado el conocimiento científico en litigios medioambientales, más específicamente, el modelado como una herramienta. Zannetti analiza el papel del modelado en litigios medioambientales.⁷³ A lo largo de su texto destaca diferentes retos que hay en la comunicación del conocimiento científico en un litigio, además enmarcado en procesos adversariales, menciona la manera en la cual, a pesar de que se esté generando conocimiento experto, la contraparte buscará la manera de desacreditar dicho conocimiento. Por lo anterior, el autor enfatiza la importancia de que las personas científicas o expertas conozcan no solo acerca del modelado, sino también de la naturaleza de los litigios, pues esto puede reducir que se descarte evidencia por cuestiones técnicas.

Por otro lado, Zannetti menciona que, a la fecha de la redacción de su artículo, ya era muy evidente la manera en la cual el uso de modelos en los litigios ambientales es clave, pues la modelación ayuda a entender diferentes fenómenos complejos, tanto en perspectiva como en retrospectiva. Además, señala que, aunque el conocimiento es muy técnico —no está en términos absolutos, sino en términos de probabilidades o rangos—, es necesario que las personas juzgadoras, si bien no tengan que aprender a realizar este tipo de tareas, sí tengan la noción de su existencia, utilidad y alcances.⁷⁴

Un ejemplo de lo anterior lo podemos encontrar en el Amparo en revisión 610/2019 en donde la Segunda Sala de la Suprema Corte de Justicia de la Nación resolvió

⁷² Laniak, G. F. *et al.*, “Integrated environmental modeling: A vision and roadmap for the future”, *Environmental modelling & software*, 2013, pp. 3-23.

⁷³ Zhang, Bing *et al.*, “Application of hyperspectral remote sensing for environment monitoring in mining areas”, *Environmental Earth Sciences*, 2012, pp. 649-658

⁷⁴ Zannetti, P. “Environmental litigation-air pollution models and modelers in court”. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2001, p. 47.

que la modificación de la NOM-016-CRE-2016 resultaba inconstitucional debido a que, al haber un debate en torno a la magnitud del daño en la calidad del aire que podría producir el empleo de etanol como oxigenante en gasolinas, se debía de aplicar el principio precautorio pues era necesaria una evaluación que permitiera discernir si el potencial de daño era permisible o no.⁷⁵

Como parte de esta sentencia se incluyen algunas de las opiniones emitidas por instituciones, colegios de profesionistas y expertos sobre las repercusiones negativas que podría tener la inclusión de los niveles de etanol señalados en la norma en cuestión. Entre estas opiniones se encuentra la de la Asociación Nacional de la Industria Química, la cual menciona que incluir etanol como componente de la gasolina en zonas metropolitanas empeoraría la crisis de calidad del aire. Adicionalmente, se presume que el aumento de ozono que ocasionaría sería al menos de 11,000 toneladas por año en el Valle de México.⁷⁶ Estos datos que demuestran el impacto del daño ambiental potencial, se basan en estimaciones o modelos a través de los cuales, con los datos conocidos, se hacen inferencias de índole estadística que, como se vio anteriormente, representa uno de los tres principales tipos de modelaje propuestos.

Otro caso sobre el uso de modelos en el litigio ambiental se observa en el Tribunal Superior de Pretoria en Sudáfrica, en donde organizaciones no gubernamentales alegaron las exenciones otorgadas por el Ministerio sudafricano de Silvicultura, Pesca y Medio Ambiente y por la Oficina Nacional de Calidad del Aire a una empresa estatal de electricidad, esto debido a que señalaban que ocho de sus centrales eléctricas emitían contaminantes por encima de los límites legales.⁷⁷

Como parte de la resolución de este caso se incluyen datos acerca de las emisiones de diferentes contaminantes atmosféricos y se señalan algunos casos de centrales

⁷⁵ SCJN, Amparo en revisión 610/2019, Segunda Sala, Ministro Ponente Alberto Pérez Dayán, 15 de enero de 2020.

⁷⁶ *Idem*.

⁷⁷ Department of Forestry, Fisheries and the Environment. Annexure A. Appeal pursuant to section 43(2) of the national environmental management act, 1998, against the national air quality officer's decisions regarding Eskom's applications for postponement and suspension of compliance timeframes, and/or alternative limits, relating to the national environmental management: air quality act 39 of 2004 minimum emission standards, 2024.

eléctricas que rebasan los límites permitidos y otros en los que no se rebasan. Como parte de este análisis de datos se menciona además el uso de modelado de dispersión de contaminantes, basado en emisiones de las centrales de manera individual y en conjunto. Así, con esta modelación se observó que, si bien las emisiones individuales podrían no representar un verdadero problema de contaminación de forma aislada, al combinarse en un área geográfica en particular, sí tienen un componente de contaminación significativa.⁷⁸

Así, observamos cómo los modelos son una herramienta sumamente versátil. Nos permiten desde estimar el riesgo potencial que podría presentarse por causa de una perturbación al medio ambiente, hasta conocer cómo es que pudo haber sido el estado base de un ecosistema, para tratar de inferir cuál debería ser el mínimo exigible en cuanto a reparación en caso de daño al medio ambiente.

Pese a la versatilidad y la utilidad que pueden tener los modelos o las demás herramientas técnicas o científicas que se han visto en el presente capítulo, hay que señalar que es importante saber cómo pasar del conocimiento a su aplicación en un contexto jurisdiccional. Si bien como hemos visto en los diferentes ejemplos, el conocimiento científico o las herramientas técnicas pueden ser utilizadas en diferentes momentos de un proceso judicial, es frecuente encontrarlas en la etapa probatoria, más específicamente en la rendición de peritajes. Por ello, vale la pena estudiar algunas de las características que puede tener este conocimiento al momento de solicitar una prueba pericial.

I. Integración del conocimiento científico en el peritaje ambiental

En los casos relacionados con temas ambientales suelen emplearse pruebas que incluyen un fuerte componente técnico o científico, como ya hemos visto a lo largo del presente capítulo. Sin embargo, es importante señalar que el estudio de los peritajes ambientales ha sido todo un tema de estudio, pues el nivel de tecnificación de este, de la mano de la falta de formación de personas especialistas tanto

⁷⁸ *Ibidem.*

en derecho como en conocimiento científico, hace que el proceso probatorio sea particularmente complejo.

Antes de pasar al peritaje, hay que ver cómo es que se ha definido la *expertise* (experiencia) o a una persona experta en este sentido. La literatura en general define a una persona experta en término de diferentes sentencias emitidas por la Corte Suprema de Justicia de los Estados Unidos, como lo son el caso *Daubert*, el caso *Joiner* y el caso *Kumho Tire* en donde se delinearon algunos parámetros acerca de la admisibilidad de las pruebas basadas en conocimiento científico o experto.^{79, 80 y 81} Si bien se trata de precedentes del sistema legal de los Estados Unidos, estos han tenido un gran impacto a nivel global, pues sentaron un punto de partida en una discusión que ha tomado mayor relevancia en las últimas décadas como respuesta a la complejidad creciente de los litigios.

Existen diferentes definiciones de persona experta. Según Kanner, en el diccionario jurídico de Black, una persona experta es aquella que tiene conocimientos superiores sobre un tema en específico respecto a personas que no tienen un entrenamiento o capacitación específicos, ya sea por sus estudios o su experiencia.⁸² Esta definición, si bien parece muy general, es un buen punto de partida para entender las bases sobre las que se sentaron los precedentes de la jurisdicción de los Estados Unidos. Por ejemplo, en la regla 702 de las Reglas Federales de Evidencia de los Estados Unidos se señalan las características del testimonio experto. En este sentido, mencionan que un testigo que sea calificado como experto por conocimientos, habilidad, experiencia, formación o educación puede declarar en forma de opinión si:

- a) el conocimiento científico, técnico u otro especializado del experto ayuda al juzgador a comprender la prueba o a determinar un hecho en cuestión;

⁷⁹ Gagen, Andrew B., "What Is an Environmental Expert? The Impact of *Daubert*, *Joiner* and *Kumho Tire* on the Admissibility of Scientific Expert Evidence", *UCLA J. Envl. L. & Pol'y*, 2000, p. 401.

⁸⁰ Kanner, Allan, "Expert Environmental Proof", SSRN, 2017.

⁸¹ Merini, Luciano J., "El informe pericial ambiental", *Manual de actuación ambiental integral en Argentina*, 2021, pp. 249-263.

⁸² Kanner, Allan, *op. cit.*, 2017.

- b) el testimonio se basa en hechos o datos suficientes;
- c) el testimonio es el producto de principios y métodos confiables; y
- d) el experto ha aplicado de manera fiable los principios y métodos a los hechos del caso.

Así, podemos ver cómo parece irse formando una definición consenso sobre qué puede entenderse por persona experta y el tipo de conocimiento que puede llevar a un litigio. Sin embargo, antes de seguir, vale la pena ver qué se ha dicho de este tema en la jurisprudencia mexicana. Si bien no existe una definición para persona experta, podemos encontrar un símil al ver las características que debe de tener una persona perita (a pesar de que su participación está acotada a los peritajes). Así, encontramos que un perito es aquella persona que cuente con un título en la ciencia o arte que pertenezca la cuestión que ha de oírse su parecer, o bien la persona que esté nombrada a juicio por un tribunal.

Ambos conceptos, el de persona experta y perito, tienen componentes en común cuando se habla de que quien se defina de esta manera será aquella persona que cuente con el conocimiento especializado y que, además, tenga idealmente un medio de acreditación, ya sea mediante algún título o alguna otra manera de comprobar la experticia (*expertise*) que se presume debe de tener. Aunque podría parecer lógico este punto, es importante señalarlo, pues en materia ambiental, en donde existe un alto grado de complejidad, es sumamente importante tener la certeza de que la persona a la que se está acudiendo tiene la capacidad de colaborar de la mejor manera posible.

En este sentido, la literatura refiere algunas de las recomendaciones que hay que seguir para poder tener el mejor desahogo de pruebas posibles, dando recomendaciones tanto para la persona juzgadora como para la persona experta. Por ejemplo, una manera en la cual se puede plantear un cuestionario para una prueba pericial es conociendo un poco sobre el tema o asesorándose con una persona más familiarizada con el campo de estudio de la prueba que se requiere realizar, pues de esta forma la persona juzgadora será capaz de formular por sí misma preguntas que sean relevantes. Otra recomendación es que el juez o la jueza considere que, si bien una persona puede ser experta en un área del conocimiento o técnica, esta pueda no tener familiaridad con el proceso judicial, por lo que al rendir

testimonio podría presentar dificultades (como que recuerde cada detalle de su trabajo de memoria). Por ello, debe de evaluar parámetros relacionados con el nivel de explicación y rigurosidad, como la pertinencia, la fiabilidad y la validez de los datos que presente en su informe.

Por otro lado, se sugiere que, para obtener resultados objetivos por parte de la persona experta, esta tenga únicamente la información esencial necesaria para el desahogo de la prueba, pues esto le permitirá evitar sesgos. Además, si bien se requiere de cierto conocimiento del proceso de presentación de pruebas, se debe de dejar en claro que la persona experta no tiene el papel de emitir opiniones jurídicas, por lo cual la inclusión de algún criterio de esta naturaleza podría ser motivo de descalificación de los resultados de las pruebas que realice.

Luciano Merini, al hablar del informe pericial ambiental, ofrece una serie de pistas o guías sobre los aspectos fundamentales a considerar en torno a este tipo de prueba, pues advierte que en el litigio ambiental las pruebas basadas en conocimiento científico suelen ser muy apreciadas, pero, en muchos casos, poco entendidas. Uno de los primeros puntos que propone el autor es la necesidad de la conformación de peritajes interdisciplinarios, pues el daño al medio ambiente suele presentarse como un fenómeno complejo, multifactorial y que requiere del conocimiento de múltiples disciplinas.⁸³

Con respecto al producto esperado, Merini señala que un informe pericial integral que pueda ser de utilidad en un litigio ambiental debe contemplar: la prueba de la existencia y naturaleza del daño, la extensión o magnitud de este, el tipo de recurso que se está afectando (que podría ser equivalente a los servicios ecosistémicos), la reversibilidad del daño, los criterios mínimos para regresar al ecosistema a su estado previo a la perturbación, los riesgos para la salud (humana y de la biodiversidad), así como una valuación económica del daño.

Sin embargo, a pesar de estas y otras recomendaciones existentes para una robusta incorporación de la evidencia y el conocimiento científico en los procesos

⁸³ Merini, Luciano J., *op. cit.*, 2021.

judiciales, el método estándar para su presentación y evaluación sigue siendo predominantemente el testimonio directo de personas expertas. Estas expertas actúan bajo las reglas de la prueba testimonial, que incluyen el principio de inmediación y los procedimientos de interrogatorio y contra interrogatorio propios del proceso judicial tradicional.

Este enfoque, aunque ampliamente utilizado, presenta limitaciones inherentes al trasladar un conocimiento científico complejo y especializado a un formato legal que privilegia la interacción verbal y la confrontación inmediata. La experticia científica, caracterizada por su carácter técnico, metodológico y frecuentemente probabilístico, puede verse simplificada o incluso distorsionada al ser sometida a un intercambio adversarial que no siempre facilita la comprensión profunda ni la valoración adecuada de la evidencia.

Además, la dependencia exclusiva del testimonio pericial puede dificultar la integración de evidencias más complejas como modelos matemáticos, simulaciones o conjuntos extensos de datos, que requieren un análisis contextual e interdisciplinario que va más allá de lo que puede capturar una intervención testimonial puntual. En este sentido, cuando dicha dependencia se da principalmente en sistemas adversariales, surge el problema de distinguir entre el intento genuino de encontrar la respuesta verdadera a alguna pregunta, sea cual sea esa verdad, y el intento de encontrar la evidencia más sólida posible para la verdad de alguna proposición determinada de antemano.⁸⁴

Por ello, se plantea la necesidad de complementar o incluso revisar los métodos tradicionales de valoración probatoria para adaptarlos a las particularidades del conocimiento científico, buscando así una mayor calidad epistemológica y justicia material en la resolución de litigios ambientales.

Con lo anterior, se observa que la prueba pericial en materia ambiental es un tema en desarrollo, el cual presenta grandes complejidades que se tienen que seguir desarrollando en los diferentes sistemas de justicia. Sin embargo, es importante

⁸⁴ Haack, Susan, *op. cit.*, 2008.

señalar que, desde la academia, así como desde las diferentes resoluciones de litigios alrededor del mundo, podemos distinguir algunos elementos en común que sugieren la manera en la cual se puede presentar y los puntos a observar para admitir informes periciales. Además, se ve en el trabajo conjunto de múltiples disciplinas una mejor alternativa para clarificar la situación de riesgo ambiental en contextos específicos que ayuden a orientar la resolución por parte de quien juzga en un caso.

J. La importancia del conocimiento científico en el litigio ambiental

Como hemos visto hasta ahora, el conocimiento científico resulta particularmente relevante cuando se trata de estudiar un fenómeno complejo como lo es el deterioro ambiental, la contaminación, el cambio climático y demás problemas ambientales. Por lo anterior, el presente capítulo pretende ser una breve mirada a algunas de las herramientas técnicas que pueden ser empleadas para la visualización en un contexto ambiental, así como herramientas cuyo uso es muy común en pruebas periciales en materia ambiental.

Además, es importante señalar que las herramientas revisadas en el presente capítulo no han limitado su uso a la academia, sino que pudimos ver ejemplos de cómo cortes tanto nacionales como internacionales se han valido de estos recursos de múltiples maneras. Desde el uso de Sistemas de Información Geográfica para la visualización de información o el análisis de datos, hasta herramientas de percepción remota como medios de prueba presentados en dictámenes periciales.

Es importante señalar que es fundamental el promover los diferentes tipos de trabajo en conjunto, así como la interacción de diferentes disciplinas, ya sea a través de la multi, la inter o, principalmente, la transdisciplina. Es de esta manera en la que se puede buscar que las decisiones tomadas, ya sea desde un ámbito judicial, o incluso en un ámbito legislativo, sean basadas en el mejor conocimiento disponible. Esto no únicamente aplicado al conocimiento científico o técnico, sino también a otros tipos de conocimiento que involucren a más sectores de la sociedad, como lo puede ser el uso de información obtenida a través de ciencia ciudadana, o de

conocimientos y saberes tradicionales, los cuales pueden impactar de gran manera en la contextualización y el entendimiento de las dinámicas de los sitios en donde el medio ambiente está siendo amenazado o perturbado.

K. La axiología como herramienta para la atribución de responsabilidad ambiental en contextos de incertidumbre científica

Cuando el conocimiento científico no proporciona respuestas concluyentes para la atribución de responsabilidad ambiental, resulta pertinente implementar una ontología centrada exclusivamente en hechos objetivos con una axiología que incorpore la valoración intersubjetiva, conforme al marco teórico propuesto por Gert de Roo. Frente a la incertidumbre intrínseca que caracteriza numerosos fenómenos ambientales, “la incertidumbre intrínseca se compensa con una definición de la situación que no se basa principalmente en hechos (porque estos no existen o no ofrecen la visión clara necesaria), sino que se fundamenta principalmente en acuerdos entre las partes involucradas.”⁸⁵ En este sentido, uno de dichos acuerdos es el derecho, que constituye el fundamento para la acción judicial.

En este contexto, el principio precautorio y el de prevención se erigen como herramientas axiológicas esenciales orientadas tanto a la atribución de responsabilidad como a la implementación de medidas correctivas, incluso cuando la evidencia científica resulte insuficiente o ambigua. Asimismo, la participación ciudadana y el diálogo interdisciplinario son indispensables para legitimar el proceso valorativo y ampliar la base de conocimientos incorporados en la toma de decisiones.

Un ejemplo concreto de esta dinámica es la valoración jurídica de los servicios ecosistémicos en cuencas hidrográficas adyacentes a zonas urbanas. En aquellos casos en que la evidencia científica no permite determinar con certeza el impacto específico de una actividad industrial sobre la calidad del agua, la teoría del entorno adyacente propone considerar los servicios ecosistémicos que se ubican

⁸⁵ Roo, Gert, *op. cit.*, 2021, p. 102.

en el área de influencia del ecosistema.⁸⁶ Bajo esta perspectiva, la integración axiológica posibilita establecer responsabilidades y medidas precautorias basadas en el acuerdo de que es ineludible actuar antes de contar con esa evidencia científica incuestionable.⁸⁷

En sede judicial, el caso de la Laguna del Carpintero ejemplifica claramente la aplicación de herramientas axiológicas en la argumentación jurídica ante la ausencia de certezas absolutas respecto al daño ambiental. La Sala consideró que el análisis de los servicios ambientales del manglar debía regirse por el principio de precaución, estableciendo que la carencia de pruebas científicas que demuestren los beneficios de la naturaleza no puede ser motivo para considerar que un ecosistema no presta un servicio ambiental para las personas que solicitan la protección judicial frente a un proyecto ecoturístico, ni que dichos beneficios carezcan de repercusión sobre una comunidad o individuo determinado.⁸⁸ Así, la integración de un enfoque axiológico robusto permite al derecho ambiental superar los límites de la ciencia en contextos de incertidumbre, facilitando una atribución de responsabilidad flexible.

Es importante subrayar que la incorporación de herramientas axiológicas en la atribución de responsabilidad ambiental no pretende sustituir ni desvalorizar la relevancia del conocimiento científico en el proceso judicial, la cual fue una idea central de este trabajo. Por el contrario, este último constituye la base fundamental para la comprensión y el análisis de los fenómenos ambientales, así como para la generación de evidencia que sustente las decisiones jurídicas. La axiología emerge, en este sentido, como un complemento indispensable cuando el conocimiento científico resulta insuficiente, incierto o ambiguo, permitiendo llenar vacíos mediante criterios valorativos que orientan la toma de decisiones en contextos complejos. Esta complementariedad entre ciencia y axiología ofrece un marco integral que fortalece la capacidad del derecho ambiental para responder de

⁸⁶ SCJN, Amparo en revisión 307/2016, párrs. 163-170, Primera Sala, sentencia del 14 de noviembre de 2018.

⁸⁷ De Cózar, José Manuel, “Principio de precaución y medio ambiente (parte a)”, *Revista española de salud pública*, vol. 79, núm. 2, 2005, pp. 133-144.

⁸⁸ SCJN, Amparo en revisión 307/2016, párr. 133, Primera Sala, sentencia del 14 de noviembre de 2018.

manera adecuada a la realidad multifacética y a las incertidumbres inherentes de los conflictos socioambientales.

Referencias

- Albright, Thomas, “A scientist’s take on scientific evidence in the courtroom”, *PNAS*, 2023. Disponible en: «<https://www.pnas.org/doi/epub/10.1073/pnas.2301839120>».
- Asociación Latinoamericana de Antropología Forense. Guía latinoamericana de buenas prácticas para la aplicación en antropología forense. ALAF, Guatemala, 2016.
- Blumenthal, R., “Remote sensing”, *Salem Press Encyclopedia of Science*, 2024.
- BMJ, “Air pollution from road traffic contributed to girl’s death from asthma, coroner concludes”, *The BMJ*, 17 diciembre 2020.
- Bonter, David N., “Characteristics of Important Stopover Locations for Migrating Birds: Remote Sensing with Radar in the Great Lakes Basin”, *Conservation Biology*, vol. 23, 2008, pp. 440-448.
- Carrillo, Jorge Alejandro, “El caso Friends of the Earth v. Shell: la relación entre empresas y cambio climático desde la justicia holandesa”, *Blog del Centro de Estudios Constitucionales*, 26 noviembre, 2021.
- Clark, James S. *et al.*, “A future for models and data in environmental science”, *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 21, núm. 7, 2006, pp. 375-380.
- Colby, Heather *et al.*, “Judging Climate Change: The Role of the Judiciary in the Fight Against Climate Change”, *Oslo Law Review*, vol. 7, 2020, pp. 168-185.
- Cordell, Susan *et al.*, “Remote sensing for restoration planning: how the big picture can inform stakeholders”, *Restoration Ecology*, vol. 25, 2017, pp. 147-154.

De Cózar, José Manuel, “Principio de precaución y medio ambiente (parte a)”, *Revista española de salud pública*, vol. 79, núm. 2, 2005, pp. 133-144.

Department of Forestry, Fisheries and the Environment. Annexure A. Appeal pursuant to section 43(2) of the national environmental management act, 1998, against the national air quality officer’s decisions regarding Eskom’s applications for postponement and suspension of compliance timeframes, and/or alternative limits, relating to the national environmental management: air quality act 39 of 2004 minimum emission standards. 2024.

Diario Oficial de la Federación. “Protocolo Homologado para la Búsqueda de Personas Desaparecidas y No Localizadas.” México, 6 de octubre de 2020.

Environmental Protection Agency. Training Module on the Development of Best Modeling Practices. EPA. s/f.

Executive Office of the President President’s Council of Advisors on Science and Technology. “Report to the President. Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods”, 2016.

Gagen, Andrew B., “What Is an Environmental Expert? The Impact of *Daubert*, *Joiner* and *Kumho Tire* on the Admissibility of Scientific Expert Evidence”, *UCLA J. Env’tl. L. & Pol’y*, vol. 19, 2000, pp. 401.

Goodchild, Michael F., “Geographic information systems and science: today and tomorrow”, *Annals of GIS*. 2009, pp. 3-9.

Haack, Susan, “Of Truth, in Science and in Law”, *Brooklyn Law Review*, vol. 73, 2008.

Haack, Susan, “What’s Wrong with Litigation-Driven Science? An Essay in Legal Epistemology”. *Seton Hall L. Rev*, vol. 38, 2008, pp. 1053-1083.

Hodge Jones & Allen, “Mother praised by government as she reaches settlement over daughter’s ‘air pollution’ death”, 31 octubre, 2024. Disponible en:

«<https://www.hja.net/news-and-insights/press-releases/civil-liberties-human-rights/mother-praised-by-government-as-she-reaches-settlement-over-daughters-air-pollution-death/>».

Houlahan, Jeff E., et al. "The priority of prediction in ecological understanding". *Oikos*, vol. 126, núm. 1, 2017, pp. 1-7.

Intergovernmental Panel on Climate Change. "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", *Cambridge University Press*, 2022.

Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC home page. *IPCC*. Disponible en: «<https://www.ipcc.ch/>».

International Union for Conservation of Nature, "Tackling the Twin Climate Change and Biodiversity Crises", IUCN, 19 de septiembre de 2023. Disponible en: «<https://iucn.org/events/iucn-event/tackling-twin-climate-change-and-biodiversity-crises>».

Kanner, Allan, "Expert Environmental Proof", *SSRN*, 2017.

Kouziokas, Georgios y Konstantinos, Perakis, "Decision Support System Based on Artificial Intelligence, GIS and Remote Sensing for Sustainable Public and Judicial Management", *European Journal of Sustainable Development*, vol. 6, 2017, pp. 397-404.

Laniak, Gerard F. et al., "Integrated environmental modeling: A vision and roadmap for the future", *Environmental modelling & software*, vol. 39, 2013, pp. 3-23.

Letcher, R. A., "Types of environmental models", *Water and Development*, 2005.

Longley, Paul y Cheshire, James, "Geographical information systems", en *The Routledge Handbook of Mapping and Cartography*, 2017, pp. 251-258.

- Mahrad, Badr *et al.*, “Contribution of Remote Sensing Technologies to a Holistic Coastal and Marine Environmental Management Framework: a review”, *Remote sensing*, vol. 12, 2020, pp. 2313.
- Mayor of London, “MD3183 Settlement relating to legal claim from the family and estate of Ella Adoo-Kissi-Debrah”, London Assembly, noviembre 2024. Disponible en: «<https://www.london.gov.uk/md3183-settlement-relating-legal-claim-family-and-estate-ella-adoo-kissi-debrah?ac-204023=204018>».
- McDermott, Rose, “Internal and External Validity”, *Cambridge Handbook of Experimental Political Science*, 2011, pp. 27-40.
- McMichael, Anthony *et al.*, “Climate change and human health: present and future risks”, *The Lancet*, vol. 367, núm. 9513, 2006, pp. 859-869. Disponible en: «[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(06\)68079-3/abstract](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(06)68079-3/abstract)».
- Merini, Luciano J., “El informe pericial ambiental”, *Manual de actuación ambiental integral en Argentina*, 2021, pp. 249-263.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. “About our agency”. NOAA. Disponible en: «<https://www.noaa.gov/about-our-agency>».
- National Oceanic and Atmospheric Administration. “Maps and Geospatial Products”. NOAA. Disponible en: «<https://www.ncei.noaa.gov/maps-and-geospatial-products>».
- National Oceanic and Atmospheric Administration. “Marine Microplastic Concentration”. NOAA. Disponible en: «<https://experience.arcgis.com/experience/b296879cc1984fda833a8acc93e31476>».
- Neumann, Wiebke *et al.*, “Opportunities for the application of advanced remotely-sensed data in ecological studies of terrestrial animal movement”, *Movement Ecology*, núm. 8, 2015, pp. 1-13.

Nyadjro, Ebenezer *et al.*, S. “The NOAA NCEI marine microplastics database”, *Scientific Data*, 2023, pp. 1-12.

Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos. “Protocolo de Minnesota sobre la Investigación de Muertes Potencialmente Ilícitas”. ONU. Nueva York y Ginebra, 2017.

Page, Edward, “Distributing the burdens of climate change”, *Environmental Politics*, vol. 17, 2008, pp. 556-575.

Parker, Dennison, “The Unique Qualities of a Geographic Information System: A Commentary”, *Photogrammetric*, 1988, pp. 1547-1549.

Patino, C. *et al.*, “Validade interna e externa: você pode aplicar resultados de pesquisa para seus pacientes?”, *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, 2018, p. 183.

Roo, Gert, “Knowing in Uncertainty: On Epistemic Conditions Differentiated for Situations in Varying Degrees of Uncertainty, the Distinction Between Hierarchical and Flat Ontology, and the Necessary Merger with the Axiological Domain of Values”, *DIPS*, vol. 57, núm. 2, 2021, pp. 90-111.

Sader, Steven A., *et al.*, “Migratory bird habitat monitoring through remote sensing”, *International Journal of Remote Sensing*, 1991, pp. 363-372.

Sarewitz, Daniel y Pielke, Roger, “Prediction in science and policy”, *Technology in Society*, vol. 21, núm. 2, abril 1999, pp. 121-133.

SCJN, *Jurisprudencia climática comparada*, México, SCJN, 2024.

SCJN, *Apuntes para la implementación del Acuerdo de Escazú: ¿quién y cómo puede acceder a la justicia en asuntos ambientales? Introducción a la legitimación procesal activa*, México, SCJN, 2024.

SCJN, *Protocolo para juzgar casos que involucren derechos de acceso en materia ambiental. Acuerdo de Escazú*, México, SCJN, 2024.

SCJN, *Consulta de literatura especializada: Herramientas y criterios para la consulta de literatura científica*, México, SCJN, 2024.

Slack, Marion K. y Draugalis, Jolaine, “Establishing the internal and external validity of experimental studies”, *American journal of health-system pharmacy*, vol. 58, núm. 22, 2001, pp. 2173-2181.

Si, Yali et al., “Improving the quantification of waterfowl migration with remote sensing and bird tracking”, *Science Bulletin*, vol. 60, núm. 23, 2015, pp. 1984-1993.

Singh, M. et al. “Environmental degradation analysis using NOAA/AVHRR data”, *Advances in Space Research*, vol. 37, núm. 4, 2006, pp. 720-727.

Spruijt, Pita et al., “Roles of scientists as policy advisers on complex issues: A literature review”, *Environmental Science & Policy*, vol. 40, 2014, pp. 16-25.

Thornton, Philip K. et al., “Climate variability and vulnerability to climate change: a review”, *Global change biology*, 2014, pp. 3313-3328.

Vázquez Rojas, Carmen, “Sobre la científicidad de la prueba científica en el proceso judicial”. *Anuario de Psicología Jurídica*, vol. 24, núm. 1, enero 2014, pp. 65-73.

Zannetti, Paolo, “Environmental litigation-Air pollution models and modelers in court”, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2001, pp. 47.

Zhang, Bing, et al., “Application of hyperspectral remote sensing for environment monitoring in mining areas”, *Environmental Earth Sciences*, 2012, pp. 649-658.

Leyes

- Ley Federal de Responsabilidad Ambiental.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

SCJN

Amparo en revisión 307/2016, Primera Sala, Ministra Ponente Norma Lucía Piña Hernández, 14 de noviembre de 2018.

Amparo en revisión 610/2019, Segunda Sala, Ministro Ponente Alberto Pérez Dayán, 15 de enero de 2020.

Controversia constitucional 158/2021, Segunda Sala, Ministro Ponente Javier Laynez Potisek, 11 de enero de 2023.

Resoluciones emitidas por otros tribunales

International Court of Justice. *Certain Activities Carried Out by Nicaragua in the Border Area (Costa Rica v. Nicaragua)*. Disponible en: «<https://www.icj-cij.org/case/150>».

International Court of Justice. *Certain Activities Carried Out by Nicaragua in the Border Area (Costa Rica v. Nicaragua)*, volumen II- Anexos 1-10.

Internacionales

Naciones Unidas, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Nueva York, 1992. Preámbulo. Disponible en: «<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>».

Naciones Unidas, Acuerdo de París. Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 21ª sesión, París, 30 de noviembre-13 de diciembre de 2015. Disponible en: «https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf».



Capítulo



Revisión de la literatura científica sobre peritajes ambientales: estándares científicos y valoración probatoria para la atribución de responsabilidad

Michael Peter Hantke-Domas

Revisión de la literatura científica sobre peritajes ambientales: estándares científicos y valoración probatoria para la atribución de responsabilidad. Introducción, A. Revisión de la literatura especializada, B. Fundamentos y metodologías del peritaje ambiental, C. Valoración probatoria en sede judicial, D. Peritaje y atribución de responsabilidad, E. Conclusiones y recomendaciones, Referencias.

Introducción

La evaluación de peritajes ambientales es crucial para determinar la responsabilidad en casos de daño ambiental, ya que establece un marco de referencia para la toma de decisiones judiciales.

Hoy en día, entendemos por peritaje:

[...] una actividad humana de carácter procesal, desarrollada en virtud de encargo judicial por personas distintas de las partes del proceso, especialmente calificadas por su experiencia o conocimientos técnicos, artísticos o científicos y mediante la cual se suministran al juez argumentos y razones para la formación de su convencimiento respecto de ciertos hechos, también especiales, cuya percepción o cuyo entendimiento escapa a las aptitudes del común de la gente y requieren esa capacidad particular para su adecuada percepción y la correcta verificación de sus relaciones con otros hechos, de sus causas y de sus efectos o, simplemente, para su apreciación e interpretación.¹

Teniendo presente la definición de la profesora Carmen Vázquez, podemos reconocer al peritaje ambiental como aquellos testimonios expertos presentados en

¹ Vázquez, Carmen, “El juez ante el perito. Una breve introducción a los temas tradicionales de prueba pericial”, SCJN, Manual de Prueba Pericial, SCJN, 2022, p. 26.

un procedimiento judicial, por personas que tienen conocimientos técnicos y científicos sobre materias ambientales y que permiten ilustrar a la persona juzgadora sobre cuestiones fácticas consideradas en los enunciados normativos de la legislación. De esta forma, la persona juzgadora adquiere una comprensión de los hechos controvertidos que le permite adjudicar una causa a componentes técnicos, como lo son los procesos judiciales ambientales. La complejidad para la persona juzgadora es la cantidad de conceptos elásticos que las normas jurídicas ambientales poseen, y que requieren de un conocimiento externo al derecho. De esta forma, la resolución de un conflicto se transforma en un esfuerzo transdisciplinario que integra diversas disciplinas para abordar adecuadamente las problemáticas ambientales y sus implicaciones legales. La colaboración entre personas expertas en derecho y científicas ambientales es esencial para garantizar decisiones informadas y justas en el ámbito judicial.

Pero el problema para la persona juzgadora no se acaba aquí, sino que se extiende a la cientificidad de los peritajes ambientales. Pues estos últimos no necesariamente son pruebas científicas, aunque sirvan de vehículo para que los resultados científicos puedan ser incorporados en el proceso. Para que una prueba sea científica, siguiendo a Francisco Verbic, nos debemos enfocar en el argumento presentado y en el resultado de la prueba. De aquí que la cientificidad es la cualidad del conocimiento o hallazgo, más no del vehículo procesal, el que debe basarse en el método científico.² De esta manera, una prueba documental o un testigo experto puede tener también el carácter científico.

El problema de los peritajes ambientales se centra hoy en su fiabilidad y rigurosidad científicas de la prueba producida en juicio para, de alguna manera, emular la rigurosidad científica con que se trabaja en las ciencias físicas y naturales.³ En el entendido de que este último estándar garantiza la validez y efectividad de las pruebas sobre la realidad física y natural de una controversia ambiental en el ámbito judicial. Otro problema detectado es la inconsistencia de estándares y procedimientos aplicados en distintas jurisdicciones, lo que conduce a la incertidumbre

² Verbic, Francisco, *La prueba científica en el proceso judicial*, ed. Rubinzal Culzoni, 2008.

³ Vázquez-Rojas, Carmen, "Sobre la cientificidad de la prueba científica en el proceso judicial", *Anuario de Psicología Jurídica*, vol. 24, núm. 1, pp. 65-73.

e interpretaciones discutidas sobre los hallazgos científicos.⁴ Otra complejidad aparece asociada a la admisibilidad de este tipo de pruebas y la gestión de la incertidumbre asociada a ella.⁵ Igualmente existen prácticas divergentes en los tribunales, donde algunos de ellos son deferentes con los peritos, mientras que otros favorecen las evaluaciones científicas independientes.⁶ Desde otra perspectiva, el peritaje ambiental pone en entredicho la capacidad de la justicia y de sus operadores —abogadas y abogados— para resolver contiendas de intereses (heterocomposición) referidas a fenómenos naturales que no comprende.⁷ Aun cuando este sea un problema central, también lo es el pensar que, desde la otra vereda, la ciencia es la llamada a dirimir este tipo de controversias, pues ella no persigue la paz social mediante la heterocomposición de conflictos de interés intersubjetivos. Aún más, la ciencia contemporánea es provisional y está sujeta a revisión constante, por lo que convive con la refutabilidad, la incertidumbre y el error. Esto contrasta con el interés del derecho de resolver definitivamente los conflictos con el fin de traer certeza jurídica y paz social. En materia ambiental este problema se profundiza, toda vez que la ciencia no tiene una comprensión acabada de los fenómenos naturales, puesto que son complejos, como el cambio climático, la contaminación atmosférica en las ciudades, el daño ambiental, entre muchos.

El objetivo general de este trabajo es hacer una revisión de la literatura científica sobre peritajes ambientales, de modo de comprender cómo la ciencia, mediante el peritaje ambiental, contribuye al esclarecimiento de los hechos controvertidos

⁴ Cf. Abbas, Amir y Lohani, Atika, “Established Principles for (non) Admissibility of Scientific Expert Evidence and their application in Pakistan”, *Journal of Law & Social Studies*, vol. 4, núm. 1, 2022, pp. 191-203 y Mnookin, Jennifer, “Science, justice, and evidence”, *Science*, vol. 382, 2023, pp. 741-741. Disponible en: «<https://doi.org/10.1126/science.adm8834>».

⁵ Erliyani, Rahmia *et al.*, “Existence of Scientific Evidence in Evidentiary Law”, *Economics & Law*, 3(1), 2021, pp. 64-76. Disponible en: «<https://doi.org/10.37708/el.swu.v3i1.5>»; Gómez-Priego, Paola *et al.*, “Navigating expert judgment uncertainty in post-event environmental impact assessments for human-made disasters litigation”, *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 106, 2024. Disponible en: «<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107511>».

⁶ Moncel, Remi, “Dangerous Experiments: Scientific Integrity in International Environmental Adjudications after the ICJ’s Decision in Whaling in the Antarctic”, *Ecology Law Quarterly*, vol. 42, 2015; Keller, Hellen y Ganesan, Pranav, “The Use of Scientific Experts in Environmental Cases Before The European Court of Human Rights”, *International and Comparative Law Quarterly*, 73(4), 2024, pp. 997-1021. Disponible en: «<https://doi.org/10.1017/s0020589324000356>».

⁷ Verbic, Francisco, *op. cit.*, 2008; Nieva Fenoll, Jordi, *La valoración de la prueba*, Marcial Pons, 2010.

en un conflicto intersubjetivo. Igualmente, el trabajo persigue comprender cómo se valora el peritaje ambiental en sede judicial y, a la vez, cómo este influye en la determinación de los hechos controvertidos que sirven de base para la atribución de responsabilidades legales.

En tanto, los objetivos específicos son realizar una revisión de la literatura especializada, comprender las metodologías utilizadas en los peritajes ambientales y analizar los criterios de valoración probatoria que se aplican en el ámbito judicial.

El análisis de los peritajes ambientales se hace a partir de la literatura de los últimos 15 a 20 años. Su alcance se extiende a la jurisdicción civil en América Latina, considerando también aspectos relevantes del sistema de *common law* que puedan influir en la práctica de los peritajes ambientales.

El artículo comienza con una revisión de la literatura especializada. A continuación, se presentarán los hallazgos clave sobre la interrelación entre la ciencia y el derecho en el contexto de los peritajes ambientales, destacando la necesidad de un enfoque transdisciplinario para abordar estos desafíos. Después, nos abocaremos a comprender los fundamentos y metodologías del peritaje ambiental y su aplicación en el sistema judicial. Luego, nos adentraremos en los estándares científicos y el aseguramiento de la calidad de este tipo de prueba. Seguidamente, expondremos cómo se valora esta prueba en sede judicial y las implicaciones que esto tiene para la responsabilidad legal en casos ambientales. La integración de criterios científicos en la valoración probatoria es esencial para garantizar decisiones justas y efectivas en el ámbito del derecho ambiental. De la misma forma, ahondaremos en cómo este tipo de prueba influye en la atribución de responsabilidad. Terminaremos con una conclusión.

A. Revisión de la literatura especializada

La revisión de la literatura especializada revela cómo los estándares científicos y la valoración probatoria se entrelazan en el contexto de los peritajes ambientales, promoviendo una mejor comprensión de su impacto en la justicia.

La revisión de la literatura especializada permite reconocer tres grandes preocupaciones sobre la interrelación entre el peritaje ambiental y la ciencia forense ambiental: la admisibilidad, la fiabilidad y el valor de la prueba en el contexto judicial. Estas preocupaciones son fundamentales para asegurar que el peritaje ambiental cumpla con los estándares necesarios para ser considerado válido y útil en la resolución de conflictos legales.

En lo que refiere a la admisibilidad, muchos estudios enfatizan el rol de las personas juzgadoras como filtros (*gatekeeping*) de lo que se admite en el foro como evidencia científica, valiéndose de diversos criterios, como Daubert.⁸ Sin embargo, la aplicación de estos criterios puede variar significativamente entre diferentes jurisdicciones, lo que genera disparidades en la admisión y valoración de los peritajes ambientales.⁹ Algunos autores critican los estándares de admisibilidad existentes, ya sea porque son muy estrictos o muy indulgentes, y proponen que las pruebas científicas sean valoradas caso por caso.¹⁰ Por otra parte, se critica que tribunales internacionales y tribunales no tengan reglas procesales sobre admisibilidad en estos casos, pues conducen a decisiones de admisibilidad discrecionales e inconsistentes.¹¹

En lo que respecta a la fiabilidad de la prueba científica, existen variados estudios que utilizan métodos como el peso de la evidencia o el peso probatorio (*weight of*

⁸ Este criterio fue utilizado por primera vez el año 1993 en la sentencia *Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals Inc.* en Estados Unidos, e introdujo cuatro criterios que toda persona juzgadora debería aplicar al evaluar las pruebas científicas: a) verificabilidad/falsabilidad de la teoría o técnica, b) publicación y revisión por pares, c) margen de error conocido o potencial y estándares de control y d) aceptación general en la comunidad científica relevante.

⁹ Ireland, Jane y Beaumont, John, "Admitting scientific expert evidence in the UK: Reliability challenges and the need for revised criteria—proposing an Abridged Daubert", *Journal of Forensic Practice*, vol. 17, núm. 1, 2015, pp. 3-12. Disponible en: «<https://doi.org/10.1108/jfp-03-2014-0008>». Y Ward, Tony, "An English Daubert? Law, Forensic Science and Epistemic Deference", *The Journal of Philosophy, Science & Law*, vol. 15, núm. 1, 2015, pp. 26-36. Disponible en: «<https://doi.org/10.5840/jpsl20151513>».

¹⁰ Baumeister, Michael y Capone, Dorothea, "Admissibility Standards as Politics: The Imperial Gate Closers Arrive!!!", *The Seton Hall Law Review*, vol. 33, núm. 5, 2003; Wilson, Adam, "Expert Opinion Evidence: The Middle Way", *The Journal of Criminal Law*, vol. 73, núm. 5, 2009, pp. 430-450. Disponible en: «<https://doi.org/10.1350/jcla.2009.73.5.592>».

¹¹ Lima, Lucas C., "O uso de experts em controvérsias ambientais perante a Corte Internacional de Justiça", *Revista de Direito Internacional*, vol. 13, núm. 2, 2016. Disponible en: «<https://doi.org/10.5102/rdi.v13i2.4056>»; Moncel, Remi, *op. cit.*, 2015.

evidence), el razonamiento abductivo y la teoría de decisión para evaluarla.¹² Algunos autores sugieren el uso de herramientas de colaboración multidisciplinaria y de evaluación cualitativa para mejorar la fiabilidad de los peritajes ambientales, promoviendo una mejor integración de la ciencia y el derecho en la valoración de la evidencia presentada en juicio.¹³ Por otra parte, la literatura revela que la verificación procesal y la examinación cruzada siguen siendo los mecanismos utilizados por los tribunales para asegurar la calidad y la integridad de los peritajes ambientales, aunque su efectividad es criticada en tanto no permiten hacerse cargo de la complejidad de la incertidumbre científica.¹⁴ Una sugerencia que se encuentra en la literatura para asegurar la competencia y objetividad de los peritos son reformas institucionales y códigos que los regulen en particular.¹⁵

En tanto, la manera en que se gestiona la incertidumbre científica es mediante el razonamiento abductivo, la formalización de hipótesis y el uso del principio precautorio.¹⁶ Además, la incertidumbre se ve acentuada en el proceso, debido a su naturaleza adversarial, donde las partes, en sus ejercicios argumentativos, persiguen convencer a la persona juzgadora de que su posición es la más razonable, en vez de ser un ejercicio científico de investigación.¹⁷ En el caso de la jurisdicción

¹² Johnson, Andrew *et al.*, “The Weight-of-Evidence Approach and the Need for Greater International Acceptance of Its Use in Tackling Questions of Chemical Harm to the Environment”, *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 40, núm. 11, 2021, pp. 2968-2977. Disponible en: «<https://doi.org/10.1002/etc.5184>»; Gómez-Priego, Paola, *op. cit.*, 2024.

¹³ Mupepele, Anne-Christine, “An evidence assessment tool for ecosystem services and conservation studies”, *Ecological Applications*, vol. 26, núm. 5, 2016, pp. 1295-1301. Disponible en: «<https://doi.org/10.1890/15-0595>»; Donzelli, Gabriele *et al.*, “A critical review on the toxicological and epidemiological evidence integration for assessing human health risks to environmental chemical exposures”, *Reviews on Environmental Health*, vol. 40, núm. 2, 2024, pp. 427-436. Disponible en: «<https://doi.org/10.1515/reveh-2024-0072>».

¹⁴ Saks, Michael y Spellman, Bárbara, “Scientific and Other Expert Evidence”, *The Psychological Foundations of Evidence Law*, New York University Press, 2016, pp. 202-231. Y Shcherbakovskyi, Mikhailo H. y Dementiev, M. V., “Verification of the expert’s opinion”, *Bulletin of Kharkiv National University of Internal Affairs*, vol. 98, núm. 3, 2022, pp. 206-216.

¹⁵ Ireland, Jane y Beaumont, John, *op. cit.*, 2015; Roberts, Paul y Zuckerman, Adrian, “11. Expert Evidence”, *Roberts & Zuckerman’s Criminal Evidence*, 3a ed, Oxford, Oxford University Press, 2022, pp. 527-C11.N306.

¹⁶ Jennings, Rhoda, “The Use of Scientific Evidence in Precautionary Decision-Making in EU Environmental Law”, *European Journal of Law Reform*, vol. 24, núm. 1, 2022, pp. 10-27; Gómez-Priego, Paola *et al.*, *op. cit.*, 2024.

¹⁷ Reynolds, Larry A. y Hrudey, Steve E., “Managing uncertainty in environmental decision-making: The risky business of establishing a relationship between science and law”, *International Journal of Risk*

internacional, los peritajes ambientales enfrentan desafíos adicionales debido a falta de reglas procesales claras y limitaciones epistémicas.¹⁸

En relación con los marcos de integración de las pruebas, existen cerca de 15 estudios que se centran en la integración multidisciplinaria de datos toxicológicos, epidemiológicos y ecológicos que utilizan enfoques como vías de resultados adversos (*Adverse Outcome Pathways*), peso de la evidencia o peso probatorio (*Weight of Evidence*) y ecoevidencia (*Eco Evidence*).¹⁹

La integración de estos enfoques puede facilitar una mejor comprensión de la relación entre la ciencia y el derecho, contribuyendo así a una mayor efectividad en la resolución de conflictos ambientales.

B. Fundamentos y metodologías del peritaje ambiental

El conocimiento de los fundamentos y metodologías del peritaje ambiental es esencial para comprender el alcance de este y poseer herramientas, aunque rudimentarias para una abogada o abogado, para entender la relevancia y confiabilidad de la prueba presentada. El resultado obtenido de esa prueba se basa en dos pilares fundamentales: los datos y la metodología. Así, la tríada datos-metodología-resultados le permite a la persona juzgadora observar el proceso lógico que garantiza que los resultados tengan validez y, por lo tanto, haya seguridad en su valoración. Pero su importancia no se acaba ahí, puesto que este tipo de prueba no solo permite tener certidumbre sobre algunos hechos del proceso, sino que

Assessment and Management, vol. 6, núm. 1/2/3, 2006; Albright, Thomas D., “A scientist’s take on scientific evidence in the courtroom”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 120, núm. 41, 2023. Disponible en: «<https://doi.org/10.1073/pnas.2301839120>».

¹⁸ Moncel, Remi, *op. cit.*, 2015; Villarreal, Julio F., “Equilibrios epistémicos frente a la crisis ambiental: Un estudio a partir del Caso del Atún Rojo del Sur del Tribunal del Mar en la antesala de sus cuarenta años de creación”, *Derecho PUCP*, vol. 88, 2022, pp. 265-301. Disponible en: «<https://doi.org/10.18800/derechopucp.202201.009>».

¹⁹ Nichols, Susan *et al.*, “Challenges for evidence-based environmental management: What is acceptable and sufficient evidence of causation?”, *Freshwater Science*, vol. 36, núm. 1, 2017, pp. 240-249. Disponible en: «<https://doi.org/10.1086/690106>»; Johnson, Andrew *et al.*, *op. cit.*, 2021; Donzelli, Gabriele *et al.*, *op. cit.*, 2025.

también legitima el trabajo judicial para resolver controversias, al basarse en métodos creíbles.

I. Disciplinas forenses implicadas

Las controversias ambientales suponen que cierta parte de su discusión se centre en hechos físicos, los cuales requieren la intervención de diversas disciplinas forenses para su adecuada evaluación. Estas disciplinas —que incluyen la biología, la química y la ingeniería ambiental— aportan un enfoque integral que enriquece el análisis judicial de los peritajes ambientales. Por regla general, la unidad de análisis se puede reducir a un ecosistema, pero ellos son sistemas complejos,²⁰ pues pueden soportar múltiples vías de transporte de contaminantes y diversidad de agentes químicos y biológicos involucrados. De aquí que se requiera un tratamiento y enfoque transdisciplinario para su investigación y evaluación en el contexto forense.²¹

A continuación, se detallan algunas de las principales disciplinas que contribuyen a las ciencias forenses ambientales:

- Química analítica y ambiental
 - ✦ Base de la dactiloscopia química y caracterización química: la química analítica es el pilar para la dactiloscopia química (*fingerprinting* químico)²² y la caracterización de la contaminación. Esto conlleva a analizar el tipo y la concentración de contaminantes en elementos del ambiente como el suelo, sedimento, agua, polvo, aire y biota.²³

²⁰ Miller, G. Tyler y Spoolman, Scot, *Essentials of ecology*, 5a. ed., Brooks/Cole Cengage Learning, 2009.

²¹ Simma, Bruno, “The International Court of Justice and Scientific Expertise”, *Proceedings of the ASIL Annual Meeting*, vol. 106, 2012, pp. 230-233. Disponible en: «<https://doi.org/10.5305/procanmeetasil.106.0230>».

²² Petrisor, Ioana Gloria, *Environmental Forensics Fundamentals: A Practical Guide*, Taylor & Francis Group, 2014.

²³ *Ibidem*; Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *Introduction to environmental forensics*, 3a. ed., Elsevier Academic Press, 2015.

- ♦ Técnicas analíticas clave: se emplea una variedad de instrumentos y métodos, incluyendo:
 - Cromatografía de gases (GC) con detectores de ionización de llama (FID) o espectrómetros de masas (MS).²⁴ Estas técnicas son fundamentales para caracterizar hidrocarburos volátiles y semivolátiles, y para *fingerprinting* de compuestos orgánicos.²⁵
 - Espectrometría de masas con ionización por electrospray (ESI MS) y tándem MS/MS para la caracterización de mezclas complejas de hidrocarburos.²⁶
 - Fluorescencia molecular, fosforescencia y quimioluminiscencia.²⁷
 - Espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y difracción de rayos X (XRD) para elementos inorgánicos.²⁸
- ♦ Dactiloscopia o *fingerprinting* isotópico: involucra el uso de la proporción entre isótopos de un elemento para rastrear la fuente de contaminación, diferenciar plumas o determinar la edad de las liberaciones.²⁹ Esto incluye el análisis isotópico de isótopos estables (CSIA para carbono, hidrógeno, cloro, nitrógeno, oxígeno y azufre) y radioisótopos (como cesio-137 y plomo-210).³⁰
- ♦ Dactiloscopia o *fingerprinting* de compuestos específicos: identificación de patrones o mezclas de contaminantes, como PCBs, dioxinas/furanos, HAPs, y disolventes clorados, utilizando sus

²⁴ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2009; Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014; Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

²⁵ Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014; Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

²⁶ *Ibidem*.

²⁷ Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014.

²⁸ Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

²⁹ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2009; Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014; Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

³⁰ *Ibidem*.

congéneres y proporciones.³¹ Esto incluye el estudio de biomarcadores (terpanos, esteranos) y aditivos (como MTBE o estabilizadores de disolventes) para determinar el origen y el grado de alteración del contaminante.³²

- Biología y ecología
 - ✦ Microbiología molecular forense: aplica para rastrear el origen de un contaminante mediante el uso de marcadores microbianos, como la dactiloscopia de ADN (*DNA fingerprinting*) de comunidades bacterianas y fúngicas.³³ Esto permite identificar la fuente de contaminación (por ejemplo, fecal mediante coliformes fecales o coprostanol) y estudiar los efectos de la contaminación en las comunidades microbianas.³⁴
 - ✦ Ecología de comunidades biológicas: utilizada para evaluar el daño biológico causado a las comunidades y ecosistemas.³⁵ Las comunidades bentónicas en ambientes marinos son indicadores ampliamente utilizados del cambio ambiental, empleando índices univariados y multimétricos (como el AMBI) para evaluar la calidad ecológica.³⁶
 - ✦ Dendroecología (dactiloscopia de anillos de árboles): técnica que examina los anillos de crecimiento de los árboles para fechar y rastrear la contaminación (por ejemplo, metales pesados, compuestos orgánicos volátiles).³⁷

³¹ Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014; Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

³² Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2009; Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014; Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

³³ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2009 y Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014.

³⁴ *Ibidem*.

³⁵ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2009.

³⁶ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2009; y Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014.

³⁷ Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014; y Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

- Geociencias (Geología, hidrogeología y geoquímica)
 - ✦ Revisión de documentos históricos: esta es la primera herramienta forense en cualquier investigación. Supone la recopilación y revisión de información histórica del sitio, incluyendo datos ambientales, registros públicos, mapas, literatura publicada y datos climáticos.³⁸
 - ✦ Hidrogeología y geoquímica: la comprensión de las condiciones geológicas e hidrológicas es central para interpretar los datos de contaminantes y reconstruir los escenarios de destino y transporte.³⁹ La dactiloscopia geoquímica asocia los datos de contaminantes en suelos o sedimentos con la litología y la hidrogeología, lo que permite evaluaciones más profundas del destino y transporte.⁴⁰
 - ✦ Normalización de datos en sedimentos: técnica esencial para reducir los efectos de la variabilidad del tamaño de grano en las concentraciones de contaminantes, mejorando la interpretación de los datos químicos.⁴¹
 - ✦ Microscopía ambiental: incluye la dactiloscopia mineralógica que investiga los contaminantes dentro de su matriz ambiental (como el suelo) para identificar fuentes, así como el análisis de partículas en aire y superficies.⁴²
- Estadística y Modelamiento
 - ✦ Análisis estadístico: se utilizan técnicas estadísticas [como el Análisis de Componentes Principales (PCA), y Mínimos Cuadrados

³⁸ *Ibidem.*

³⁹ *Id.*

⁴⁰ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2009; y Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014 y Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

⁴¹ *Ibidem.*

⁴² Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014; y Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

Modelado de transporte de contaminantes: utiliza datos del contaminante y del sitio para calcular y reconstruir el transporte de contaminantes en el tiempo y el espacio. Esto incluye modelos de transporte de líquidos y vapores, y modelos de dispersión aérea, que pueden ayudar a “indicar la edad de la contaminación” y “confirmar la fuente”.⁴⁴

- Otras disciplinas y técnicas especializadas
 - ♦ Análisis forense de mercado (*market forensics*): una técnica emergente que utiliza datos de formulación de productos y ventas para estimar las contribuciones antropogénicas de contaminantes de productos de consumo a las instalaciones de tratamiento de aguas residuales.⁴⁵
 - ♦ Teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y fotogrametría/imágenes aéreas: Herramientas para revisar el historial del sitio y visualizar la distribución de contaminantes.⁴⁶
 - ♦ Ingeniería: Desempeña un papel en el diseño de remediación y forma parte de los equipos técnicos en disputas ambientales.⁴⁷

La resolución efectiva de casos complejos de contaminación ambiental requiere no solo de la pericia individual en cada una de estas áreas, sino que también de la

⁴⁷ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2009; Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014; y Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

capacidad de integrar los hallazgos de manera coherente y comunicarlos de forma efectiva, especialmente a los actores del sistema legal.⁴⁸ Pero el desafío no se acaba en la comunicación desde la ciencia hacia el derecho, sino que requiere una comprensión desde el derecho hacia la ciencia, en lo que se denomina transdisciplinariedad, lo que supone un desafío práctico importante.

II. Técnicas analíticas

La práctica del peritaje ambiental se apoya en un arsenal de técnicas analíticas y enfoques metodológicos diseñados para detectar, cuantificar e interpretar la presencia de contaminantes y sus efectos. La selección de la técnica adecuada depende de la naturaleza del contaminante, la matriz ambiental o elemento de la naturaleza (agua, suelo, aire, biota), los objetivos de la investigación (identificación, cuantificación, origen, edad) y los requisitos legales o regulatorios.

Las técnicas analíticas instrumentales más relevantes incluyen:

- 1) Cromatografía: es una técnica central para la mayoría de los métodos de dactiloscopias químicas utilizados en la caracterización de hidrocarburos en el medioambiente.⁴⁹ Su importancia se encuentra en su extraordinaria capacidad para separar mezclas complejas de compuestos orgánicos y medir analitos (sustancias químicas) aislados utilizando una amplia gama de detectores especializados.⁵⁰ Los hallazgos de cromatografía, especialmente con GC/MS/SIM, proporcionan evidencia defendible para resolver disputas ambientales y asignar responsabilidades.
- 2) Espectrometría: es una técnica analítica indispensable en la ciencia forense ambiental. Se utiliza principalmente para generar pruebas al identificar, caracterizar y rastrear contaminantes y sus fuentes. Es el núcleo de la mayoría de los métodos de “huellas dactilares químicas”

⁴⁸ Tribunal Agroambiental, *Guía de peritaje ambiental para la jurisdicción agroambiental boliviana*, Tribunal Agroambiental, Órgano Judicial de Bolivia, 2022.

⁴⁹ Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

⁵⁰ *Ibidem*.

debido a su capacidad para separar mezclas complejas y medir analitos individuales.⁵¹

- 3) **Análisis isotópico:** la medición de las relaciones de isótopos estables (ej., $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$) mediante Espectrometría de Masas de Relación Isotópica (IRMS), a menudo acoplada a GC (GC-IRMS o CSIA), es una herramienta poderosa para el rastreo de fuentes (*fingerprinting*) y el fechamiento de contaminantes orgánicos e inorgánicos, así como para entender procesos biogeoquímicos.⁵²

Por su parte, los enfoques metodológicos generales incluyen:

- 1) **Teledetección y SIG:** son herramientas esenciales en la ciencia forense ambiental, ofreciendo capacidades fundamentales para el análisis de la contaminación.⁵³ El uso de imágenes satelitales (ej., ASTER), fotografía aérea (histórica y actual) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite el análisis espacial de la contaminación, la caracterización de sitios, la monitorización de cambios a lo largo del tiempo y la integración de diversas capas de información.⁵⁴
- 2) **Técnicas de muestreo:** un muestreo adecuado es la base de cualquier investigación forense ambiental. Esto implica un diseño de muestreo estratégico basado en objetivos claros (DQOs), el uso de técnicas apropiadas para cada matriz (muestreo de suelos con barrena o testigos),⁵⁵ muestreo de agua puntual o integrado en profundidad, muestreo de aire

⁵¹ Mudge, Stephen, "Environmental Forensics and the Importance of Source Identification", *Issues in Environmental Science and Technology*, vol. 26, 2008, pp. 1-16. Disponible en: «<https://doi.org/10.1039/9781847558343-00001>».

⁵² Abode (s. f.). "Environmental forensics", *SlideShare*. Recuperado 12 de julio de 2025 de «<https://www.slideshare.net/Abode7/environmental-forensicspptx>».

⁵³ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2009; Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014; y Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2015.

⁵⁴ *Ibidem*.

⁵⁵ The Interstate Technology Regulatory Council, Soil Background and Risk Team, *Soil Background and Risk Assessment*, 2021, Disponible en: «<https://is.gd/3GyYmD>».

pasivo o activo,⁵⁶ y la obtención de muestras representativas.⁵⁷ La correcta preservación y manejo de las muestras es crucial.⁵⁸

- 3) Modelización de transporte y destino: los modelos matemáticos simulan cómo los contaminantes se mueven y transforman en el agua subterránea, aguas superficiales o el aire, ayudando a comprender cómo se extiende la pluma de contaminación, a identificar posibles fuentes y predecir escenarios futuros.⁵⁹

Categoría	Técnicas principales	Aplicaciones y descripción
Cromatografía	GC, LC, GC-MS, LC-MS, GCxGC, IC	Métodos fundamentales para la separación e identificación de compuestos orgánicos como hidrocarburos, pesticidas y solventes. El uso acoplado con espectrometría de masas (MS) mejora la especificidad. GCxGC permite separar mezclas complejas. IC es útil para aniones inorgánicos.
Espectrometría / Espectroscopía	ICP-MS, ICP-OES, LA-ICP-MS, AAS, AES, Raman (SERS, PIERS), XRF, XRD, FTIR	Análisis elemental y estructural. ICP-MS permite detectar metales traza; LA-ICP-MS analiza sólidos con resolución espacial. FTIR, XRF y XRD se aplican a identificación de fases y composición mineralógica. Raman es eficaz para compuestos orgánicos y mezclas complejas.

⁵⁶ Fiveable, "Environmental Sampling Strategies and Quality Assurance. Environmental Chemistry II Class Notes", Fiveable, 2024. Disponible en: «<https://library.fiveable.me/environmental-chemistry-ii/unit-12/environmental-sampling-strategies-quality-assurance/study-guide/0dBc3LTlg0MTtzGV>».

⁵⁷ Toranzos, Gary A. y Cano, Raúl J., "Definitions and Historical Perspectives in Environmental Forensics", *Microbiology Spectrum*, vol. 6, núm. 2, 2018. Disponible en: «<https://doi.org/10.1128/microbiolspec.emf-0016-2018>».

⁵⁸ Fiveable, *op. cit.*, 2024.

⁵⁹ Toranzos, Gary A. y Cano, Raúl J., *op. cit.*, 2018.

Categoría	Técnicas principales	Aplicaciones y descripción
Análisis isotópico	IRMS, GC-IRMS, CSIA	Determinación de firmas isotópicas ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, etc.) para rastreo de fuentes y diferenciación de compuestos. Es clave en identificación de hidrocarburos y fuentes múltiples.
Teledetección y SIG	Imágenes satelitales (ej., ASTER). Fotografía aérea. Sistemas de Información Geográfica (SIG)	Permiten detectar patrones de contaminación, evaluar cambios temporales y apoyar la selección de sitios de muestreo. Útiles en estudios históricos y modelización espacial.
Técnicas de muestreo	Suelo (barrena, testigos). Agua (puntual, integrado). Aire (pasivo, activo)	Fundamento de todo estudio forense. El diseño debe ser estratégico, adaptado a la matriz y respaldado por control de calidad. Relevante para establecer líneas de base, trayectorias y fuentes.
Modelización ambiental	Modelos de transporte y destino	Simulan la migración de contaminantes en agua, aire y suelos. Útiles para cuantificar extensión de la pluma, inferir rutas de exposición y predecir escenarios futuros.
Fuente: Elaboración propia con base en Mudge, Stephen, <i>Methods in environmental forensics</i> , CRC Press, 2009.		

Como se puede observar, estas técnicas son fundamentales para el análisis y comprensión de la contaminación ambiental, permitiendo una evaluación precisa de los riesgos asociados y contribuyendo a la justicia ambiental en el ámbito judicial. Estas técnicas se encuentran en permanente desarrollo y mejora, por lo que permiten ir desarrollando confianza en su poder predictor. Una de las cuestiones relevantes de tener en cuenta es que estas técnicas se hacen cargo de una multiplicidad de causas de los fenómenos estudiados y, en todo caso, siempre hay que considerar que el factor humano está presente, ya sea para interpretar los datos

de la cromatografía, por ejemplo, o para presentarlos en estrados. De aquí que una ponderación adecuada de estas pruebas implica estar conscientes de todos los pasos que se esconden a los ojos del simple observador: diseño de la prueba, instrumentos utilizados, condiciones al momento de la prueba, calibración y desempeño de los instrumentos, interpretación de los resultados, capacidad profesional de quien realiza e interpreta los datos, confiabilidad de la prueba y la necesidad de un enfoque crítico en la evaluación de las pruebas periciales. La colaboración entre expertos en distintas disciplinas es esencial para asegurar que los peritajes ambientales sean robustos y útiles en el contexto judicial.

1. Identificación de la fuente y reconstrucción de eventos

Un objetivo central en investigaciones forenses ambientales es identificar la causa o las causas de la contaminación detectada.⁶⁰ La forma en que este objetivo se puede lograr es mediante técnicas de dactiloscopia o *fingerprinting* o caracterización de huellas distintivas, que buscan correlacionar la composición química, isotópica, microbiana o física del contaminante encontrado en el ambiente con las características de los materiales liberados por las posibles fuentes.⁶¹ Este proceso requiere una colaboración interdisciplinaria efectiva, donde los expertos en ciencia forense ambiental y los profesionales del derecho trabajen juntos para asegurar que las conclusiones sean válidas y aplicables en un contexto judicial.

Las principales técnicas de dactiloscopia o *fingerprinting* incluyen:

- 1) Dactiloscopia química o *fingerprinting* químico: Esta técnica se centra en reconocer la composición química única de las mezclas liberadas al ambiente. Esto puede implicar:
 - a. Análisis de ratios: compara las proporciones relativas de compuestos específicos (ej., isómeros de PAH, compuestos BTEX en

⁶⁰ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2008.

⁶¹ Abode, *op. cit.*

gasolinas, congéneres de PCB, biomarcadores de petróleo).⁶² Las ratios entre isómeros son particularmente útiles porque tienden a ser más estables frente a la degradación ambiental.⁶³

- b. Reconocimiento de patrones: compara visual o estadísticamente patrones cromatográficos (ej., de GC-FID o GC-MS) de las muestras ambientales con los de las fuentes potenciales.⁶⁴
 - c. Analitos específicos: identifica la presencia o ausencia de compuestos marcadores asociados a procesos industriales específicos o a formulaciones particulares (ej., aditivos en combustibles como plomo tetraetilo o MTBE, impurezas específicas de un proceso de fabricación).⁶⁵ A menudo es necesario analizar un conjunto expandido de analitos más allá de las listas regulatorias estándar (ej., >30 PAHs en lugar de los 16 prioritarios, análisis de congéneres de PCB en lugar de Aroclors) para obtener una huella más detallada y discriminante.⁶⁶
- 2) Dactiloscopía isotópica o *fingerprinting* isotópico: utiliza las variaciones naturales en las relaciones de isótopos estables como trazadores del origen. El análisis de isótopos de plomo ha sido útil para rastrear fuentes de plomo industrial y gasolinas antiguas.⁶⁷ Los isótopos de carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno se usan para rastrear fuentes de materia orgánica, nitratos, agua y gases como el metano.⁶⁸ El Análisis Isotópico

⁶² Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2007.

⁶³ The Interstate Technology Regulatory Council, Soil Background and Risk Team, *op. cit.*, 2021.

⁶⁴ The American Academy of Forensic Sciences, "Environmental forensics", Environmental Protection, 1999. Disponible en: «<https://eponline.com/articles/1999/09/01/environmental-forensics.aspx>».

⁶⁵ Yang, Chun *et al.*, "Fingerprinting Analysis and Source Differentiation of Petroleum-Contaminated Environmental Samples", en S. Stouty Z. Wang (eds.), *Oil Spill Environmental Forensics Case Studies*, Elsevier, 2018, pp. 49-65. Disponible en: «<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804434-6.00003-3>».

⁶⁶ Saba, Tarek, "Using Environmental Forensics to Determine Liability for Environmental Contamination", Exponent, 3 octubre de 2019. Disponible en: «<https://www.exponent.com/article/using-environmental-forensics-determine-liability-environmental-contamination>».

⁶⁷ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2008.

⁶⁸ *Ibidem*.

Específico de Compuesto (CSIA) permite determinar la firma isotópica de compuestos orgánicos individuales, ofreciendo alta especificidad.⁶⁹

- 3) Dactiloscopia microbiana o *fingerprinting* microbiano: esta técnica aprovecha la especificidad de las comunidades microbianas asociadas a diferentes ambientes o fuentes de contaminación. El análisis de la estructura de la comunidad microbiana (ej., mediante secuenciación de ARNr 16S o metagenómica) puede servir como una “firma microbiana” para vincular muestras ambientales a localizaciones⁷⁰ o para identificar el origen de la contaminación fecal [rastreo de fuentes microbianas (MST)], distinguiendo entre fuentes humanas y animales.⁷¹
- 4) Dactiloscopia física-mineralógica o *fingerprinting* físico/mineralógico: examina características físicas como la morfología de partículas [usando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)] o la composición mineralógica (usando Difracción de Rayos X - XRD) para identificar materiales específicos (ej., cenizas, polvos industriales, asbesto).⁷²

Un desafío importante es que los procesos ambientales (degradación biótica y abiótica, volatilización, disolución, adsorción) alteran la composición química original de la mezcla (*weathering*), lo que puede dificultar la comparación directa con la fuente.⁷³ Sin embargo, el análisis de compuestos más resistentes o el uso de ratios de compuestos con propiedades similares puede mitigar este problema.⁷⁴

Dada la complejidad propia de muchos escenarios de contaminación (ej., múltiples fuentes potenciales, mezcla de contaminantes, procesos de degradación), rara vez una única técnica de dactiloscopia o *fingerprinting* es suficiente para establecer

⁶⁹ Id.

⁷⁰ Toranzos, Gary A. y Cano, Raúl J., *op. cit.*, 2018.

⁷¹ *Ibidem*.

⁷² Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2008.

⁷³ *Ibidem*.

⁷⁴ The American Academy of Forensic Sciences, *op. cit.*, 1999.

el origen de forma inequívoca y legalmente defendible.⁷⁵ Por ello, la práctica forense ambiental aboga por un enfoque de “múltiples líneas de evidencia”.⁷⁶ La convergencia de múltiples líneas de evidencia independientes hacia una misma conclusión sobre la fuente fortalece significativamente la solidez científica y la resistencia a cuestionamientos en el proceso judicial.⁷⁷

2. Reconstrucción de eventos: establecimiento de cronologías y vías de contaminación

Una vez que se ha identificado la fuente de la contaminación, la ciencia forense debe reconstruir cómo y cuándo sucedieron los hechos que terminaron con la afectación al medioambiente. Para ellos existen diversos métodos que permiten establecer cronologías y vías de contaminación. Estos métodos incluyen el análisis de datos históricos, el fechamiento isotópico y la evaluación de patrones de dispersión de contaminantes.⁷⁸ Es esencial que las personas expertas colaboren para garantizar que las conclusiones sean claras y fundamentadas, facilitando así la comprensión de los eventos por parte del sistema judicial.

i. Métodos de fechamiento (*Age Dating*)

- 1) Marcadores químicos históricos: la presencia o ausencia de sustancias cuya introducción o prohibición en el mercado ocurrió en fechas conocidas actúa como marcador temporal.⁷⁹ Ejemplos clásicos son el plomo tetraetilo en gasolinas (introducido en 1923, eliminado progresivamente), el MTBE como aditivo oxigenante (uso extendido en ciertas épocas), PCBs (prohibición de fabricación en muchos países en las décadas de 1970 y 1980) o pesticidas específicos como el DDT.⁸⁰ Conocer las fechas de disponibilidad comercial de solventes como CCl₄, TCE, PCE también puede ayudar a determinar períodos.⁸¹

⁷⁵ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2008.

⁷⁶ *Ibidem*.

⁷⁷ Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2007.

⁷⁸ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2008.

⁷⁹ Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014.

⁸⁰ Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2007.

⁸¹ The American Academy of Forensic Sciences, *op. cit.*, 1999.

- 2) Degradación y envejecimiento (*weathering*): el grado de degradación o “envejecimiento” (*weathering*) de una mezcla química puede indicar el tiempo transcurrido desde su liberación.⁸² Se analizan los cambios en las proporciones de compuestos más volátiles/degradables frente a los más resistentes. Esto se aplica a hidrocarburos del petróleo (ej., pérdida de BTEX, cambio en ratios de alcanos/isoprenoides), PAHs 24 y solventes clorados (analizando la proporción de productos de degradación como DCE o cloruro de vinilo a partir de PCE o TCE). Sin embargo, la precisión de este fechamiento está limitada por la variabilidad de las condiciones ambientales (temperatura, oxígeno, actividad microbiana) que afectan las tasas de degradación.⁸³
- 3) Fechado isotópico: se pueden usar isótopos radiactivos con vidas medias conocidas, como el tritio (3H) para datar aguas subterráneas recientes o el Cesio-137 (137Cs) (proveniente de pruebas nucleares atmosféricas) para datar capas de sedimento.⁸⁴ Cambios históricos documentados en las relaciones de isótopos estables, como los del plomo en aditivos de gasolina entre 1923 y 1990 (modelo ALAS), también permiten estimar la fecha de liberación de combustibles.⁸⁵
- 4) Modelos de corrosión: para fugas de tanques de almacenamiento subterráneo (UST), se pueden aplicar modelos que estiman la tasa de corrosión del tanque en función de sus características y las condiciones del suelo para estimar cuándo pudo haberse iniciado la fuga.⁸⁶
- 5) Dendrocronología/dendroquímica: el análisis de los anillos de crecimiento de los árboles (dendrocronología) permite fechar eventos ambientales pasados. La dendroquímica, por su parte, analiza la com-

⁸² Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014.

⁸³ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2008.

⁸⁴ The American Academy of Forensic Sciences, *op. cit.*, 1999.

⁸⁵ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2008.

⁸⁶ Morrison, R. D., y Hone, J. R. “Introduction to Environmental Economics”, en S. Kubota y Y. Magara (eds.), *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, 2010. Disponible en: «<https://eolss.net/sample-chapters/c09/e6-38a-17.pdf>».

posición química de esos anillos para detectar la absorción de contaminantes en momentos específicos, ofreciendo una cronología de la exposición.⁸⁷ No obstante, la fiabilidad y admisibilidad legal de la dendroquímica como herramienta forense ha sido objeto de debate.⁸⁸

ii. Análisis de vías de transporte

- a) Investigación hidrogeológica: esencial para comprender cómo los contaminantes se mueven en el subsuelo a través de las aguas subterráneas. Implica mapear la geología (capas de suelo, acuíferos), determinar las direcciones y velocidades del flujo de agua subterránea, e identificar vías preferenciales de flujo, como fracturas en rocas o depósitos de canales fluviales enterrados (identificables mediante Environmental Sequence Stratigraphy, ESS por sus siglas en inglés).⁸⁹
- b) Modelización de destino y transporte: modelos computacionales simulan la migración de contaminantes a través del agua subterránea, aguas superficiales o aire, considerando procesos como advección, dispersión, adsorción, degradación y volatilización.⁹⁰ Ayudan a evaluar si una fuente potencial pudo haber causado la contaminación observada en un receptor específico.
- c) Análisis espacial: el mapeo de la distribución de concentraciones de contaminantes permite visualizar la geometría de la pluma de contaminación e inferir direcciones de flujo y posibles localizaciones de la fuente.⁹¹

⁸⁷ Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014.

⁸⁸ Balouet, Jean C. *et al.*, “Use of Dendrochronology and Dendrochemistry in Environmental Forensics: Does It Meet the Daubert Criteria?”, *Environmental Forensics*, vol. 10, núm. 4, 2009, pp. 268-276. Disponible en: «<https://doi.org/10.1080/15275920903347545>».

⁸⁹ Brčeski, Ilija y Vaseashta, Ashok, “Environmental Forensic Tools for Water Resources”, A. Vaseashta (ed.), *Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*, Springer International Publishing, 2021, pp. 333-370. Disponible en: «https://doi.org/10.1007/978-3-030-76008-3_15».

⁹⁰ Toranzos, Gary A. y Cano, Raúl J., *op. cit.*, 2018.

⁹¹ Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2007.

- a. Reconstrucción histórica (“paleontología industrial”): la revisión de documentos históricos (mapas antiguos como los de la compañía Sanborn, fotografías aéreas de diferentes épocas, registros de operaciones industriales, planos de instalaciones, testimonios) es crucial para entender cómo era el sitio en el pasado, dónde se efectuaban actividades potencialmente contaminantes, cómo se manejaban los residuos y cuáles eran las posibles vías de liberación al ambiente.⁹²

La reconstrucción de la contaminación histórica es compleja.⁹³ Los datos suelen ser limitados o inexistentes, las condiciones ambientales cambian con el tiempo (alterando las vías de transporte), los contaminantes se degradan o transforman (modificando las huellas químicas), y puede ser difícil desenredar los efectos de múltiples eventos o fuentes a lo largo de décadas.⁹⁴ Por ello, es fundamental integrar múltiples líneas de evidencia (histórica, química, isotópica, modelización), reconociendo las incertidumbres asociadas a cada pieza de información y a la reconstrucción global.⁹⁵ La colaboración entre disciplinas científicas y legales es esencial para abordar eficazmente los desafíos que surgen en los peritajes ambientales y asegurar la justicia en casos de contaminación.

3. Objetividad y reproducibilidad del peritaje ambiental

La cuestión central, al menos desde la perspectiva del derecho procesal, es la fiabilidad y racionalidad de los peritajes ambientales, puesto que estas servirán de base para poner término definitivo a un conflicto intersubjetivo. En alguna medida, la discusión, al menos desde el derecho, es si estas pruebas dan garantía de certeza para adoptar decisiones judiciales. Y es como si desde el derecho existiera la idealización de la ciencia como algo exacto y confiable. Es como el perfeccionista exigiendo perfección. Pero, como veremos, la ciencia, esa disciplina que

⁹² Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2007, Petrisor, I. Gloria, *op. cit.*, 2014.

⁹³ Mudge, Stephen, *op. cit.*, 2008.

⁹⁴ *Ibidem*.

⁹⁵ Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *op. cit.*, 2007.

admiramos, por todos los avances grandiosos que nos ha legado a la humanidad, también sufre de problemas internos. Ya Karl Popper, el eminente filósofo austriaco-británico, sostuvo que la ciencia avanza a través de conjeturas y refutaciones, lo que implica que la certeza absoluta es inalcanzable en cualquier campo —con excepción de algunas leyes de la matemática—, incluyendo el peritaje ambiental. Popper sostuvo que la científicidad era un problema de falsabilidad —o la posibilidad de refutar una teoría— y no de verificabilidad, pues lo relevante es corroborar la solidez de lo propuesto.⁹⁶

Pero lo anterior es paradójico para el derecho. Si la científicidad se basa en la corroboración del método utilizado, entonces las respuestas de la ciencia son siempre provisionales y sujetas a revisión. Esta incertidumbre inherente plantea un desafío significativo para la justicia, ya que las decisiones deben basarse en evidencias que, aunque científicas, no son infalibles. A esto se le debe sumar la pretensión de objetividad, que constituye el ideal de imparcialidad y de carencia de subjetividades.⁹⁷

Como vimos, la ciencia, tanto como conocimiento y como en su aplicación, es inherentemente falible.⁹⁸ Esta circunstancia no es una buena nueva para aquellos que desde el derecho ven a la ciencia como decidora, por lo que la ciencia no es sagrada, ni perfecta, mucho menos completa, y, a veces, incluso corrupta. Por otro lado, los seres humanos estamos sometidos, muchas veces inadvertidamente, a sesgos,⁹⁹ por lo que la cadena de intervinientes en la elaboración y producción en juicio del peritaje ambiental, incluidas las abogadas y abogados y la persona juzgadora son susceptibles de tenerlos.¹⁰⁰ Estos sesgos pueden llevar a

⁹⁶ Popper, Karl, *La lógica de la investigación científica*, V. Sánchez de Zavala (trad.), Epublibre, 1934.

⁹⁷ Nieva Fenoll, Jordi, *op. cit.*, 2010.

⁹⁸ Luna, Fernando, “El mito del cientificismo en la valoración de la prueba científica”, *JURÍDICAS CUC*, vol. 14, núm. 1, 2018, pp. 119-144; Taruffo, Michele, *La prueba de los hechos*, Trotta, Editorial, 2002; Vázquez, Carmen, “Las comunidades expertas y los sesgos cognitivos de los peritos”, en SCJN, *Manual de Prueba Pericial*, SCJN, 2022, pp. 43-94; Vázquez-Rojas, Carmen, *op. cit.*, 2014; Vera, Juan Sebastián, “Valoración probatoria: Exigencias legales, jurisprudenciales y doctrinales”, *Academia Judicial de Chile*, vol. 51, 2022. Disponible en: «https://academiajudicial.cl/wp-content/uploads/2023/02/MD51-Valoracion-probatoria_-Exigencias-legales-jurisprudenciales-y-doctrinales.pdf».

⁹⁹ Vera, Juan Sebastián, *op. cit.*, 2022.

¹⁰⁰ Nieva Fenoll, Jordi, *op. cit.*, 2010.

los intervinientes a tener fallas en sus razonamientos, que pueden influir sustancialmente en la resolución de la controversia, ya sea por un error de apreciación o por subestimar las pruebas o parte de ellas.¹⁰¹

Volviendo al problema de la fiabilidad de la ciencia, esta característica aparece del mero hecho de basarse en el método científico, como si este fuese infalible. Sin embargo, se debate esta supuesta certidumbre para conocer de los hechos con certeza e incluso se sostiene que científicidad no es garantía de acierto.¹⁰² Es más, lo no científico puede, también, brindar la certidumbre que lo científico no puede proporcionar.¹⁰³ Estas aclaraciones nos permiten comprender que es un error de quien argumenta o valora la prueba pericial darle un valor decisorio exorbitante y que, en consecuencia, es fundamental mantener un enfoque crítico y reflexivo sobre la evidencia presentada, considerando sus limitaciones y el contexto en el que se desarrolla el peritaje ambiental.

Pero los problemas no se acaban aquí, sino que se profundizan, pues el peritaje ambiental y, en general, la prueba científica, puede basarse en lo que se denomina “ciencia basura” e incluso en pseudociencia. Una de las principales dificultades que enfrentan los jueces es distinguir la buena de la mala ciencia.¹⁰⁴ Paul Gianelli, en su obra *Forensic Science: Daubert’s Failure*,¹⁰⁵ identifica campos forenses donde existe poca o ninguna evidencia científica de su validez, incluyendo la comparación de marcas de mordidas, análisis de incendios provocados, análisis microscópico de cabello, análisis de marcas de armas de fuego y herramientas, análisis de huellas dactilares y análisis comparativo de balas de plomo.¹⁰⁶

¹⁰¹ Nieva Fenoll, Jordi, *op. cit.*, 2010; Vázquez, Carmen y Fernández, Mercedes, “La conformación del conjunto de elementos de juicio: Admisión de pruebas”, en Jordi Ferrer (coord.), *Manual de Razonamiento Probatorio*, SCJN, reimp. 2023, pp. 137-222.

¹⁰² Vázquez-Rojas, Carmen, *op. cit.*, 2014; Luna, Fernando, *op. cit.*, 2018.

¹⁰³ Vázquez-Rojas, Carmen, *op. cit.*, 2014; Vázquez, Carmen, “El juez ante el perito...”, *op. cit.*, 2022.

¹⁰⁴ Hantke-Domas, Michael, “La Prueba en el Derecho Ambiental (perspectivas generales y del derecho comparado)”. Diapositivas presentadas en el “Diplomado sobre protección de la naturaleza, cambio climático y derechos humanos”, Unidad General de Conocimiento Científico y Derechos Humanos y la Dirección General de Casas de la Cultura Jurídica, SCJN, Ciudad de México, 2024.

¹⁰⁵ Gianelli, Paul, “Forensic Science: Daubert’s Failure”, Faculty Publications (2006), 2017. Disponible en: «https://scholarlycommons.law.case.edu/faculty_publications/2006/».

¹⁰⁶ Ibidem.

El caso Willingham ilustra dramáticamente estos problemas. En 1992, la Asociación Nacional para la Protección del Fuego publicó su Guía para las Investigaciones de Fuego y Explosiones, semanas después de que Cameron Todd Willingham fuera condenado por el incendio intencional que mató a sus hijos pequeños. Durante el juicio, el Comisionado de Incendios Vásquez declaró que “el fuego cuenta una historia. Yo soy solo su intérprete... Y el fuego no miente. Me dice la verdad”.¹⁰⁷ Sin embargo, los métodos utilizados en esa época carecían del rigor científico posteriormente desarrollado. Willingham fue ejecutado 12 años después.¹⁰⁸

El problema de los “expertos a sueldo” (*hired gun*) es bien conocido. Existen expertos que se asocian con ciertas posiciones y son presentados por las partes para establecer esas posiciones específicas.¹⁰⁹ La disparidad de opiniones entre personas expertas es notoria y beneficia las posiciones partisanas de las partes.¹¹⁰ La independencia del perito es central y se extiende a su personal.¹¹¹ Por estas razones, las personas juzgadoras a veces sugieren tomar distancia de este tipo de pruebas y ponderarlas con un “saludable escepticismo” o “con reserva y escepticismo”.¹¹²

Por último, respecto de la reproducibilidad, debemos anotar que el peritaje ambiental debe ser reproducible por cualquier persona, mediante la repetición del experimento o utilizando las mismas técnicas en las mismas condiciones, de modo de que esta pueda obtener los mismos resultados de manera consistente y confiable.¹¹³ Para esto, se requiere de transparencia en la documentación utilizada por el perito, así como también que cada decisión se encuentre debidamente justificada.¹¹⁴

¹⁰⁷ *Id.*

¹⁰⁸ *Id.*

¹⁰⁹ *Id.*

¹¹⁰ *Id.*

¹¹¹ Vázquez, Carmen, “El juez ante el perito...”, *op. cit.*, 2022.

¹¹² Bell, Evan, “Judicial Assessment of Expert Evidence”, *Judicial Studies Institute Journal*, vol. 2, 2010, pp. 55-96.

¹¹³ González-Rodríguez, Joaquín, “Las ciencias forenses a la luz del ADN”, en Carmen Vázquez (coord.), *Manual de Prueba Pericial*, SCJN, 2022, pp. 247-294; Nieva Fenoll, Jordi, *op. cit.*, 2010; Vázquez-Rojas, Carmen, *op. cit.*, 2014; Verbic, Francisco, *op. cit.*, 2008.

¹¹⁴ González-Rodríguez, Joaquín, *op. cit.*, 2022.

C. Valoración probatoria en sede judicial

La valoración probatoria de los peritajes ambientales en el ámbito judicial es fundamental para garantizar que las decisiones se basen en evidencia científica sólida y rigurosa. Pero ya hemos visto que su admisibilidad, su fiabilidad y el valor de la prueba no son aspectos que se puedan dar por sentado, ya que varían significativamente entre jurisdicciones y dependen de la correcta aplicación de criterios científicos y legales. Asimismo, hemos visto que los peritajes ambientales, como pruebas científicas, pueden estar sujetas a una serie de problemas de información, metodológicos y de interpretación, que hacen que las personas juzgadoras adopten aquella distancia escéptica de la que nos hablaba el juez irlandés Evan Bell.¹¹⁵

La comprensión de estos desafíos es crucial para mejorar la calidad y efectividad de los peritajes ambientales en el sistema judicial, asegurando así una justicia más equitativa y fundamentada.

La experiencia práctica y las reflexiones académicas en torno a la prueba en el derecho ambiental revelan algunos principios fundamentales que es necesario establecer desde el inicio. En primer lugar, debe destacarse que la prueba en el derecho ambiental no posee particularidad teórica alguna que la distinga de otros ámbitos jurídicos.¹¹⁶ Las reglas generales de la prueba se aplican sin modificaciones sustanciales, aunque su aplicación práctica pueda presentar complejidades específicas.¹¹⁷

Un aspecto crucial es que la prueba no debe valorarse aisladamente, prueba por prueba, sino que, dentro del contexto de la valoración del conjunto de ellas, de modo de establecer los hechos en la adjudicación de una causa. La actividad probatoria forma parte integral del proceso de toma de decisiones judiciales y debe analizarse en conjunto con todos los elementos que componen el caso. En este contexto, se debe tener presente que los casos varían no solo en sus hechos, que en algunos casos pueden ser alambicados y en otros más simples, sino que

¹¹⁵ Bell, Evan, *op. cit.*, 2010.

¹¹⁶ Hantke-Domas, Michael, *op. cit.*, 2024.

¹¹⁷ *Ibidem*.

también en relación con el derecho; y es por esto que se debe siempre distinguir si estamos en presencia de un caso complejo o simple, pues cada categoría presenta desafíos probatorios diferenciados.¹¹⁸ En materia ambiental siempre estaremos frente a casos complejos, ya sea porque el tribunal no comprende a cabalidad la naturaleza de los fenómenos ecológicos —para ser justos, tampoco lo alcanzan las personas expertas en ciencias naturales— y el derecho ambiental, por ser de factura o desarrollo relativamente reciente —comparado, por ejemplo, con el derecho civil— presenta dificultades interpretativas e incluso integrativas en el marco de los procesos judiciales.¹¹⁹

Es importante recordar que la aplicación del derecho al caso concreto constituye un acto interpretativo.¹²⁰ La persona juzgadora no se limita a aplicar mecánicamente las normas, sino que, al operar en el lenguaje, debe interpretar tanto los hechos como el derecho aplicable en un proceso que requiere valoración y criterio judicial.¹²¹ Luego de establecer la verdad jurídica de los hechos, la persona juzgadora debe dictar su sentencia y comunicarla mediante el lenguaje a las partes, para que estas comprendan el ejercicio jurisdiccional que el tribunal hizo al poner término a la controversia de naturaleza jurídica llevada ante estrados.¹²² Antiguamente, se decía que quien juzgaba era la boca muerta de la ley, o, dicho de otra manera, se debía limitar a aplicar el texto de la ley, asumiendo que esta última era siempre clara.¹²³

I. Finalidad del procedimiento probatorio

El procedimiento tiene como fin primordial la averiguación de la verdad fáctica. Esta búsqueda de la verdad no es un objetivo absoluto, sino que debe entenderse dentro de los límites y posibilidades que ofrece el sistema procesal. Cada parte en el proceso debe aportar pruebas que sustenten sus alegaciones, conforme a las reglas reguladoras establecidas en la legislación. Estas reglas determinan aspectos

¹¹⁸ *Id.*

¹¹⁹ *Id.*

¹²⁰ *Id.*

¹²¹ *Id.*

¹²² *Id.*

¹²³ Solan, Lawrence, *The language of judges*, University of Chicago Press, 1993.

fundamentales como: cuáles son los medios de prueba admisibles, los requisitos de admisibilidad, la forma de rendirlas y la distribución de la carga probatoria entre las partes.

A lo anterior se le debe agregar que el proceso se encuentra bajo múltiples presiones para que termine lo antes posible. La idea de que “justicia que tarda, no es justicia”, sumada a los esfuerzos por acortar los plazos de los procedimientos judiciales, debido a las presiones públicas, en el contexto de personas juzgadoras con una alta carga laboral, hace que esta persona se vea compelida a priorizar la rapidez sobre la exhaustividad, lo que puede comprometer la calidad de las decisiones judiciales en casos ambientales.

Es en este contexto en que el procedimiento contempla un término probatorio o lapso donde las partes en disputa deben producir sus medios de prueba. Pero esta producción de evidencia es guiada por el mismo tribunal, quien define previamente, al menos en los sistemas de tradición continental europea, cuáles son los hechos que las partes disputan y que se deben probar. En efecto, las partes pueden disentir en los hechos, pero habrá otros que no disputan o que simplemente existe coincidencia en su percepción. La prueba trata sobre los hechos controvertidos, sustanciales y pertinentes que sostienen las partes, y se debe presentar o producir en el término probatorio.

Una vez declarados como admisibles los medios de prueba, la persona juzgadora deberá evaluarlos y determinar qué hechos dará por probados y cuáles no aceptará.¹²⁴ La valoración probatoria de los peritajes ambientales, por tanto, debe ser meticulosa y considerar la naturaleza compleja de los casos, así como las limitaciones inherentes a la ciencia y el derecho.

II. Los momentos de la actividad probatoria

La actividad probatoria se desarrolla en tres momentos diferenciados que permiten comprender su estructura y funcionamiento. El primer momento corresponde

¹²⁴ Cerda, Rodrigo, *Valoración de la prueba*. Sana Crítica, Librotecnia, 2008.

al ofrecimiento, admisibilidad y producción de la prueba, etapa en la cual se determina la carga o peso de la prueba. Este momento inicial es crucial, pues establece qué parte debe probar qué hechos y mediante qué medios.¹²⁵

El segundo momento se refiere a la valoración de la prueba, que puede desarrollarse bajo diferentes sistemas: prueba tasada, sana crítica, libertad de convencimiento, entre otros.¹²⁶ Esta etapa requiere el análisis de la evidencia combinada de las pruebas, no de cada elemento probatorio de forma aislada.¹²⁷

Finalmente, el tercer momento consiste en el establecimiento de los hechos, proceso que se rige por el estándar de prueba aplicable. Este estándar determina el grado de certeza o probabilidad requerido para considerar probado un hecho.¹²⁸

III. Estrategia probatoria

Las partes, enfrentadas entre sí, persiguen sus propios intereses. Estos intereses definen los objetivos de cada una de ellas en el proceso, los que, a la vista de los hechos a probar, deberán adoptar una estrategia probatoria de esos hechos, los que deben coincidir con su teoría del caso y línea argumental. El desarrollo de una estrategia probatoria efectiva requiere responder a varias preguntas fundamentales.¹²⁹

En primer lugar, debe identificarse claramente cuál es el hecho a probar. Esta identificación precisa es esencial para orientar toda la actividad probatoria posterior. Después, es necesario determinar qué medios de prueba franquea la ley y cuál resulta más idóneo para acreditar el hecho específico.¹³⁰ Esta evaluación debe considerar no solo la disponibilidad legal de los medios probatorios, sino también su eficacia práctica para el caso concreto.

¹²⁵ Càtedra de Cultura Jurídica, "Jordi Ferrer: Prueba y proceso judicial", Video recuperado de: «<https://www.youtube.com/watch?v=M6dQxcIkKi0>», 2015.

¹²⁶ *Ibidem*.

¹²⁷ *Id.*

¹²⁸ *Id.*

¹²⁹ Hantke-Domas, Michael, *op. cit.*, 2024.

¹³⁰ *Ibidem*.

En torno al peritaje ambiental, un aspecto particularmente relevante en el derecho ambiental es verificar si la prueba se basa en metodologías y conocimiento avalado por publicaciones en revistas sujetas a revisión de pares.¹³¹ Esta verificación se conecta directamente con los estándares de validez científica desarrollados en el derecho comparado.¹³²

Otro aspecto por considerar previamente es el potencial de error y la probabilidad efectiva del peritaje ambiental, puesto que esta circunstancia puede disminuir el valor probatorio ante la persona juzgadora. Lo interesante de este problema es que la capacidad argumentativa de las abogadas y abogados puede suplir la falta de certeza. Esto puede resultar paradójico, pero el proceso se basa también en persuasión.¹³³

IV. Estándares de admisibilidad de los peritajes ambientales

Para que una prueba pueda ser presentada en el procedimiento, debe cumplir con ciertas reglas o criterios jurídicos que permitan su admisibilidad legal.¹³⁴

El desarrollo de estándares para la admisibilidad de la prueba científica tiene sus antecedentes en el estándar *Frye* de 1923 y su posterior evolución en los factores *Daubert* de 1993. El caso *Daubert v. Merrell Dow Pharms, Inc.*, 509 U.S. 579 (1993), estableció cuatro factores fundamentales para evaluar la admisibilidad de la prueba científica.

El primer factor se refiere a la publicación en revistas sujetas a revisión de pares, mecanismo que garantiza un primer filtro de calidad científica. El segundo factor exige conocimiento de la probabilidad efectiva o potencial de error, elemento que permite evaluar la confiabilidad de los resultados. El tercer factor establece

¹³¹ *Id.*

¹³² *Id.*

¹³³ Anderson, Terence *et al.*, *Analysis of Evidence*, 2a. ed., Cambridge University Press, 2005. Disponible en: «<https://doi.org/10.1017/cbo9780511610585>».

¹³⁴ Taruffo, Michele, *op. cit.*, 2002.

la necesidad de que toda tesis científica sea sometida a la posibilidad de falsificación y refutación, principio fundamental del método científico. Finalmente, el cuarto factor requiere la aceptación de la ciencia y de la técnica en la comunidad científica de referencia.¹³⁵

El estándar *Daubert* fue clarificado y expandido posteriormente por otras dos sentencias de la Corte Suprema de los Estados Unidos de Norteamérica. La sentencia *General Electric Co. v. Joiner* (1997) aclaró que el ejercicio de admisibilidad no se acotaba a que la persona juzgadora estableciera la confiabilidad de la metodología utilizada en la prueba científica, sino que además debía analizar los resultados y ponderar si la metodología utilizada amparaba lógicamente esos resultados.¹³⁶ En tanto, la sentencia *Kumho Tire Co. v. Carmichael* (1999) amplió la aplicación del estándar *Daubert* a todas las pruebas científicas, no solo a las de carácter científico clásico, sino que, a todo tipo de peritaje, incluido los técnicos y otras especializaciones no científicas (ej. ingenieros o economistas), lo que subraya la importancia de la rigurosidad en la evaluación de la evidencia presentada en juicio.¹³⁷

En los países de derecho continental, la admisibilidad y todas las cuestiones relativas a la prueba se encuentran contemporáneamente cubiertas por el sistema de la sana crítica.¹³⁸ En este caso no existen estándares como en el caso estadounidense, pero la persona juzgadora sí puede recurrir a las máximas de la experiencia, las reglas de la lógica y el principio de razón suficiente.¹³⁹ Como se observa, la persona juzgadora cuenta con un margen racional de apreciación en la valoración de la prueba, lo que permite una mayor flexibilidad en la interpretación de los peritajes ambientales y su aplicación en el contexto judicial.

¹³⁵ Luna Salas, F., “Técnicas neurocientíficas como medio de prueba pericial”, *Prolegómenos*, vol. 22, núm. 44, 2020, pp. 143-154. Disponible en: «<https://doi.org/10.18359/prole.4160>».

¹³⁶ Gómez, Carina, “La prueba pericial médica: Criterios para su emisión, admisión y valoración”, *Revista CONAMED*, vol. 21, núm. 2, 2016, pp. 88-98.

¹³⁷ Robinson, J., “Daubert Standard. LII”, Legal Information Institute, Cornell Law School, 2023. Entrada de «https://www.law.cornell.edu/wex/daubert_standard».

¹³⁸ Duce, Mauricio, “Los errores. La aplicación al caso concreto y los sesgos cognitivos de los peritos”, en Vázquez, C (coord.), *Manual de prueba pericial*, SCJN, reimp. 2023, pp. 143-184.

¹³⁹ Vera, Juan Sebastián, *op. cit.*, 2022 y Verbic, Francisco, *op. cit.*, 2008.

V. Ponderación de la prueba

La ponderación de la prueba se rige por varios principios fundamentales. El principio de adquisición procesal establece que, una vez incorporada al proceso, la prueba beneficia a quien mejor se ajuste a ella, independientemente de quién la haya aportado. La ponderación debe abarcar diferentes tipos de prueba: testigos simples y expertos, prueba científica, documental, y debe realizarse una ponderación conjunta de toda la evidencia.¹⁴⁰ La valoración probatoria en el contexto de los peritajes ambientales requiere una comprensión profunda de la interrelación entre la ciencia y el derecho, así como de los estándares que rigen la admisibilidad y la fiabilidad de estas pruebas.¹⁴¹

VI. Estándares de prueba

Los estándares de prueba establecen el grado de suficiencia probatoria necesaria para aceptar un hecho como probado.¹⁴² Estos estándares se organizan jerárquicamente desde los más exigentes hasta los menos rigurosos.

El estándar más alto es “más allá de toda duda razonable”, que requiere la eliminación de toda duda razonable y se aplica típicamente en el derecho penal.¹⁴³ Este estándar es el más exigente, y produce los que se denominan falsos negativos, esto es que su nivel de convicción es tan alto, que frente a una duda razonable prefiere no dar por probado un hecho, aun cuando pudiese ser verdadero. Le sigue la “prueba clara y convincente”, que representa una creencia o convicción firme, y en términos porcentuales, refleja un convencimiento del 75%. El estándar de “preponderancia de la prueba o balance de probabilidades” establece que algo es más probable que no y se aproxima al concepto de plausibilidad.¹⁴⁴ Este es el estándar ocupado en el derecho civil usualmente, y equivale a una convicción de la

¹⁴⁰ Hunter, Iván Seminario “Prueba y Daño Ambiental”, Universidad Diego Portales, Santiago de Chile, 28 de junio 2019.

¹⁴¹ Nieva Fenoll, Jordi, *op. cit.*, 2010.

¹⁴² Vera, Juan Sebastián, 2022.

¹⁴³ Hantke-Domas, Michael, *op. cit.*, 2024.

¹⁴⁴ *Ibidem*.

persona juzgadora de un 50+1% (regla $P>50\%$), en lo que el derecho estadounidense denomina la *but for rule*. A diferencia del estándar “más allá de toda duda razonable”, el del balance de probabilidades produce más falsos positivos, o sea que, para resolver un asunto de carácter civil, acepta que un porcentaje de los hechos que dará por probados puedan no ser verdaderos. Finalmente, los estándares menos exigentes incluyen la “prueba sustancial”, la “causa probable” y la “sospecha razonable”.¹⁴⁵

VII. La prueba científica

Como ya lo señalamos en la Introducción, la prueba científica comprende el peritaje, la opinión experta prestada en juicio y alguna documentación científica. Existe un sesgo frecuente respecto de este tipo de prueba, pues se la observa como una “bala de plata” para resolver casos complejos.¹⁴⁶ Sin embargo, la realidad es que la ciencia solo entrega una respuesta provisional, que puede ser superada por nueva evidencia empírica, tal como ya lo sostuvo Karl Popper.¹⁴⁷

La prueba científica debe ser analizada en combinación con las demás pruebas para dilucidar si los hechos pueden ser subsumidos en la premisa mayor. Su valor no es absoluto ni superior al de otros medios probatorios, sino que forma parte del conjunto probatorio que debe evaluarse integralmente.

El juez Evan Bell,¹⁴⁸ de Irlanda del Norte, propone criterios específicos para la evaluación de la prueba científica. Sin este tipo de evidencia, las y los jueces no pueden determinar dónde radica la verdad, pero esta prueba presenta problemas significativos.

Evan Bell propone diez criterios específicos para la ponderación de la prueba científica. El primer criterio se refiere al contexto de toda la otra prueba, reconociendo que la prueba científica no es superior a las demás pruebas. Un juez no

¹⁴⁵ *Id.*

¹⁴⁶ *Id.*

¹⁴⁷ Popper, Karl, *op. cit.*, 1934.

¹⁴⁸ Bell, Evan, *op. cit.*, 2010.

debe ponderar la prueba científica de forma aislada, y cuando existan opiniones discordantes entre expertos, debe evaluarlas contrastándolas con las demás pruebas para decidir cuál debe prevalecer. La persona juzgadora debe ponderar todas las pruebas antes de fijar los hechos probados.

El segundo criterio evalúa la calidad del razonamiento del perito.¹⁴⁹ El tercero examina la corrección de las premisas de hecho y los supuestos subyacentes, considerando que la función del experto consiste en expresar una opinión basada en hechos asumidos, no para expresar una opinión sobre si las hipótesis están justificadas.¹⁵⁰

El cuarto criterio se refiere a la validez científica. Los tribunales confían en el profesionalismo y rigor de los expertos que comparecen ante ellos, quienes deben llamar la atención del tribunal sobre investigaciones que contradicen su propio punto de vista y ser rigurosos en el uso que hacen de los artículos de investigación.¹⁵¹

Los criterios restantes incluyen la solidez de la metodología utilizada, la calidad de la investigación del experto, la calificación y reputación del experto, la objetividad del experto, el desempeño durante el interrogatorio y los cambios de opinión del experto.¹⁵²

D. Peritaje y atribución de responsabilidad

En materia de justicia ambiental, la cuestión controvertida posee connotaciones materiales de difícil ponderación y posterior subsunción en el enunciado normativo. Una controversia ambiental supone varias posibles discusiones en el proceso, que pueden clasificarse en dos grandes categorías fundamentales.

¹⁴⁹ *Ibidem.*

¹⁵⁰ *Id.*

¹⁵¹ *Id.*

¹⁵² *Id.*

Las controversias contencioso-administrativas constituyen el primer tipo de discusiones, las cuales se centran en la vulneración de la normativa ambiental, usualmente asociada a permisos, licencias y, en general, actos administrativos. Aunque estas controversias tienen una connotación desde el derecho administrativo, en lo sustancial, impactan al medioambiente; entendido el problema como sustantivo que afecta al colectivo y no solo como una relación asimétrica de poder entre un individuo y el Estado.

El segundo grupo de controversias se refiere al daño provocado al medioambiente, el cual puede abordarse desde dos perspectivas de responsabilidad. La primera es la responsabilidad objetiva, en la cual se basa la mayoría de los sistemas de responsabilidad ambiental; mientras que la segunda corresponde a la responsabilidad subjetiva o culpa, donde se requiere demostrar la negligencia o el incumplimiento de deberes por parte de la persona.

I. La importancia del peritaje ambiental

En todos los casos de responsabilidad ambiental o contencioso administrativo, establecer qué fue lo que sucedió constituye una cuestión crítica y compleja. Es crítica porque sin su prueba no existe antijuridicidad, y es compleja ya que dilucidar lo que sucedió y cuáles son sus consecuencias requiere de un análisis exhaustivo de múltiples factores, incluyendo la interacción de elementos científicos y legales.

El peritaje ambiental se convierte en un instrumento esencial para esclarecer hechos y atribuir responsabilidades en estos casos. La interrelación entre ciencia y derecho es clave para asegurar que las decisiones judiciales se basen en evidencia sólida y rigurosa. El conocimiento especializado es fundamental para aclarar las controversias, máxime en aquellos casos en que los tribunales de justicia no tienen el conocimiento especializado ni el apoyo técnico para comprender a cabalidad por sí mismos los argumentos científicos de las partes. Esto representa un peligro para la justicia, pues la persona juzgadora que hace fe del testimonio del perito está expuesta a decisiones que pueden carecer de fundamento si la prueba no se presenta con la rigurosidad necesaria. La adecuada valoración de los peri-

tajes ambientales es, por lo tanto, crucial para garantizar la justicia en la resolución de disputas ambientales.

II. La responsabilidad ambiental

El derecho considera que tras cualquier acción que produzca un daño debe existir una indemnización que repare ese daño, principio general del derecho que se remonta al derecho romano. Esta forma de entender la responsabilidad es común en los países cuyo derecho se inspira en el derecho continental europeo. Para que exista responsabilidad extracontractual —esto es, fuera de una relación contractual—, se deben verificar cuatro condiciones fundamentales.

La primera condición requiere que haya una acción u omisión por parte de alguna persona. La segunda exige que se produzca un daño, el que usualmente será patrimonial, pero en el caso del medio ambiente, el daño afecta a la colectividad completa, puesto que la protección al medio ambiente se predica respecto de todos los que conformamos la sociedad, y no solamente respecto de una persona individual o un grupo. El objeto de nuestro interés se centra exclusivamente en el daño ecológico, buscando la declaración de su existencia y la condena a restaurar el medioambiente a su condición original, conocida como reparación *in natura*.

La tercera condición es la imputación o el juicio de reproche que el ordenamiento jurídico hace a quien produce el daño. Tradicionalmente en el derecho civil, para determinar el estándar de comportamiento esperado se utilizaban conceptos como el buen padre de familia o la persona que diligentemente lleva sus propios negocios. Estos criterios son relativamente anticuados, ya que hoy día en el derecho ambiental ha aparecido una serie de nuevas conductas o formas de conductas esperadas de las personas. Entre estos nuevos estándares encontramos los principios: “el que contamina paga”, “la responsabilidad ambiental de la propiedad”, *in dubio pro natura*, *in dubio pro aqua*, entre otros variados estándares de comportamiento que se han ido creando a partir del derecho ambiental. Estos estándares son solamente un ejemplo, pues usualmente es el ordenamiento jurídico nacional el que define cuáles de estos son los que se van a utilizar para hacer este juicio de reproche a la persona que ha infligido un daño a otra.

Por último, y cuarta condición, es necesario que exista un nexo de causalidad entre la acción u omisión y el daño provocado, de modo que si se puede vincular como causa y resultado, entonces tendremos que la parte que ha sido denunciada por una acción es la que causó el daño.

III. El proceso judicial

El proceso se inicia con la presentación de una demanda usualmente. En este caso, la persona afectada o el grupo de personas afectadas demandará a otra persona o a otro grupo de personas su responsabilidad por el daño ambiental producido. Una cuestión central en este tipo de casos, que se vincula esencialmente con el peritaje ambiental y las pruebas científicas, es precisamente dilucidar primero qué daño se produjo, cómo se produjo, y subyacente a lo anterior están los hechos que constituyen el daño, cuáles fueron los hechos que provocaron el daño y cómo se produjeron.

Un aspecto fundamental para la determinación de los hechos es que el demandante, usualmente, tiene la carga de la prueba, esto es, es la persona que debe presentar pruebas —pericias ambientales— de los hechos que constituyen daño ambiental, los hechos que lo produjeron, los hechos que vinculan causalmente a la acción y el daño y quién es el autor de los hechos o quién los omitió y que dieron origen al daño ambiental. El principio contaminador-pagador del derecho ambiental establece que el demandado vencido carga con el peso de la restauración.

La ambiental primera cuestión que se debe aclarar es qué se entiende en la legislación por daño. Esto variará de país en país, pero no se puede pasar por alto que es un menoscabo que se inflige al medioambiente, el que está constituido por una serie de elementos naturales, artificiales y socioculturales que conforman un sistema complejo. Como se observa, esta definición simple de daño ambiental resulta relativamente compleja de dilucidar para una persona que no tiene la formación en materias ambientales, y de aquí que sea relevante en materia de peritajes ambientales definir si existe o no existe daño. Pero el problema no termina ahí, también es necesario determinar si el daño es significativo.

Aquí es donde los peritajes cobran especial relevancia. Como señalan las profesoras Pilar Moraga y Verónica Delgado,¹⁵³ la reparación del daño ambiental procede cuando se acredita que el daño es significativo. Sin embargo, el legislador usualmente no proporciona criterios específicos para determinar esta significancia, dejando este vacío legal para ser llenado por los tribunales y espacio para que el peritaje ambiental entregue luces al tribunal sobre lo sucedido.

Los tribunales han desarrollado criterios específicos para evaluar la significancia del daño ambiental, utilizando principalmente elementos tanto cuantitativos como cualitativos. Entre los criterios cuantitativos se encuentra la magnitud del daño y su duración en el tiempo, la extensión territorial, el grado de alteración o contaminación del agua, y el déficit hídrico provocado en una cuenca. Los elementos cualitativos incluyen el valor e interdependencia de los diferentes elementos de los ecosistemas, la representatividad de las especies afectadas, el tiempo necesario para la regeneración del ecosistema, y la capacidad de regeneración de especies.

Un método particularmente relevante para los peritajes es el método comparativo, donde los tribunales evalúan el elemento afectado en comparación con otro similar en un entorno no afectado. Este enfoque permite establecer una línea base objetiva para evaluar la magnitud del daño causado.

IV. El desafío de la causalidad

La causalidad representa uno de los mayores desafíos donde los peritajes son fundamentales. Los tribunales distinguen entre dos tipos de causalidad que deben ser establecidos mediante evidencia pericial. La causalidad general busca determinar si el tipo de acción o emisión puede causar el daño alegado, mientras que la causalidad específica pretende determinar si la acción del demandado fue la causante más probable del daño específico, basándose en un balance de probabilidades.

¹⁵³ Moraga Sariego, Pilar y Delgado Schneider, Verónica, “El aporte jurisprudencial de los Tribunales Ambientales chilenos en materia de reparación del daño ambiental”, *Ius et Praxis*, vol. 28, núm. 2, 2022, pp. 286-301. Disponible en: «<https://doi.org/10.4067/S0718-00122022000200286>».

Establecer el nexo causal en casos ambientales es particularmente difícil porque el entendimiento del medioambiente cambia rápidamente. La profesora Sanne Knudsen¹⁵⁴ propone un test mitigado del factor sustancial, también conocido como test del factor contribuyente, como teoría de causalidad más apropiada para estos casos, reconociendo la complejidad inherente de los sistemas ambientales.

El proceso culmina con la restauración de ecosistemas, definida por la Sociedad Internacional de Restauración Ecológica (SER) como “el proceso de asistir la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido”.¹⁵⁵

En cada uno de estos pasos, los peritajes ambientales son fundamentales para establecer la situación basal previa al daño, las alteraciones producidas por la acción u omisión, la capacidad de regeneración natural del ecosistema y las medidas específicas de restauración necesarias para devolver el sistema a su estado original o funcionalmente equivalente.

V. Inteligencia artificial en el peritaje ambiental

A todo lo anterior se le debe sumar la irrupción de la inteligencia artificial como soporte para la decisión judicial. Por una parte, la inteligencia artificial puede suplir las carencias técnicas de la persona juzgadora, pues en un simple ejercicio de alimentar datos, puede ofrecer análisis y predicciones que faciliten la comprensión de los fenómenos ambientales en disputa.

Sin embargo, hay una serie de cuestiones éticas y prácticas por resolver previamente. Por una parte, estos modelos de lenguaje son programados sin que se conozcan las instrucciones que han recibido de sus desarrolladores. Por ejemplo, si un peritaje indica que hubo daño ambiental y la persona juzgadora sube el peritaje al chat del proveedor de inteligencia artificial, y este le indica que existen

¹⁵⁴ Knudsen, Sanne, “The Long-Term Tort: In Search of a New Causation Framework for Natural Resource Damages”, *Northwestern University Law Review*, vol. 108, núm. 2, 2014, pp. 475-542.

¹⁵⁵ SER, *Principios de SER International sobre Restauración Ecológica*, Society for Ecological Restoration International, 2004, p. 5. Disponible en: «ser-primer-spanish.pdf».

problemas metodológicos con el peritaje, la pregunta es ¿qué debe hacer la persona juzgadora?

Aquí, surgen muchas dudas fundamentales: ¿por qué se le debe dar más crédito a la inteligencia artificial que al perito? De ser así, ¿no se estaría cayendo en la misma paradoja de entregar el poder de decisión a una máquina, quedando la persona juzgadora relegada a un mero rol de escriba? ¿La inteligencia artificial ha sido entrenada con los criterios de ponderación de la prueba aceptados por el derecho procesal? ¿La inteligencia artificial tendrá un sesgo? ¿El uso de la inteligencia artificial por la persona juzgadora debe ser considerado como conocimiento privado o público? Todas estas preguntas retóricas requieren de un proceso de investigación en el campo del derecho procesal de modo de asegurar de que la justicia es imparcial.

Es fundamental que su uso se realice con criterios de transparencia y ética para evitar sesgos en la toma de decisiones, asegurando que la tecnología complementa y no reemplace el juicio humano especializado.

F. Conclusiones y recomendaciones

El peritaje ambiental constituye un elemento fundamental en la atribución de responsabilidad ambiental, donde la intersección entre ciencia y derecho requiere especial cuidado para garantizar decisiones judiciales basadas en evidencia sólida. La complejidad técnica de estos casos hace indispensable contar con peritajes rigurosos que permitan a los tribunales evaluar adecuadamente la existencia, significancia y causalidad del daño ambiental. La evolución hacia la incorporación de nuevas tecnologías como la inteligencia artificial plantea desafíos adicionales que la comunidad jurídica debe abordar con criterios claros de transparencia y ética profesional.

I. Resumen ejecutivo de aportes

Este trabajo ofrece una revisión sistemática y profunda de la literatura científica y jurídica sobre los peritajes ambientales, destacando su rol fundamental en la

determinación de hechos y atribución de responsabilidades en controversias ambientales judicializadas. El artículo muestra cómo el peritaje ambiental y, más general, la prueba científica, constituye una prueba compleja que articula conocimientos transdisciplinarios entre el derecho, la ciencia y la técnica, y que, si bien puede ofrecer insumos relevantes para el esclarecimiento de los hechos, está atravesado por limitaciones epistémicas propias de la ciencia (provisionalidad, refutabilidad, incertidumbre). Asimismo, se identifican los desafíos asociados a la admisibilidad, fiabilidad y valoración de este tipo de pruebas, junto con los riesgos de sesgos, pseudociencia y dependencia excesiva de la experticia. Finalmente, se aborda someramente el impacto de la inteligencia artificial en la labor pericial y judicial, advirtiendo sobre los riesgos de opacidad, sesgo algorítmico y desplazamiento del juicio humano.

II. Recomendaciones

1. Práctica pericial

- **Aseguramiento metodológico y trazabilidad:** los informes periciales deben documentar de forma rigurosa los métodos empleados, los datos utilizados, la cadena de custodia y las decisiones técnicas adoptadas, asegurando su reproducibilidad y la posibilidad de revisión crítica por parte de otros expertos o del tribunal.
- **Evaluación *ex ante* (antes del hecho) y *ex post* (después el hecho) del perito:** es necesario establecer criterios transparentes para la admisión de peritos ambientales, así como mecanismos institucionales para evaluar su idoneidad, independencia y objetividad, evitando la figura del *hired gun* (expertos a sueldo).
- **Uso de múltiples líneas de evidencia:** dada la complejidad de los fenómenos ambientales, se recomienda que los peritajes integren distintas técnicas y fuentes de información (químicas, biológicas, isotópicas, históricas) a fin de robustecer sus conclusiones y enfrentar la incertidumbre con mayor solidez argumentativa.

- **Enfoque escéptico informado por parte del tribunal:** la persona juzgadora debe desempeñar un rol activo en la valoración del peritaje, ponderándolo críticamente y contrastándolo con el resto del acervo probatorio. No debe otorgársele valor automático ni superior al de otras pruebas, siguiendo criterios como los propuestos por el juez Bell.

2. Formación

- **Capacitación transversal en ciencia forense ambiental para operadores jurídicos:** se requiere diseñar programas de formación básica en fundamentos científicos, métodos de análisis ambiental y lectura crítica de evidencia técnica dirigidos a personas juzgadoras, abogadas, abogados y fiscales. El objetivo es reducir la asimetría cognitiva frente a los peritos y mejorar la calidad de la argumentación y la resolución judiciales.
- **Incorporación de epistemología de la ciencia en la enseñanza jurídica:** la formación jurídica debe incluir contenidos sobre la naturaleza provisional, falible y contextual del conocimiento científico, de modo que los futuros operadores jurídicos comprendan sus alcances y límites en la toma de decisiones.
- **Formación ética y técnica de peritos:** es central el desarrollo de programas de formación continua y certificación para peritos ambientales, que incluyan no solo competencias técnicas, sino también principios éticos, criterios de imparcialidad y formación en derecho procesal probatorio.

Referencias

Abbas, Amir y Lohani, Atika, “Established Principles for (non) Admissibility of Scientific Expert Evidence and their application in Pakistan”, *Journal of Law & Social Studies*, vol. 4, núm. 1, 2022, pp. 191-203.

Abode. (s. f.). “Environmental forensics”, *SlideShare*. Recuperado 12 de julio de 2025 de «<https://www.slideshare.net/Abode7/environmental-forensicspptx>».

Albright, Thomas D., “A scientist’s take on scientific evidence in the courtroom”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 120, núm. 41, 2023. Disponible en: «<https://doi.org/10.1073/pnas.2301839120>».

Anderson, Terence *et al.*, *Analysis of Evidence*, 2a. ed., Cambridge University Press, 2005. Disponible en: «<https://doi.org/10.1017/cbo9780511610585>».

Balouet, Jean C. *et al.*, “Use of Dendrochronology and Dendrochemistry in Environmental Forensics: Does It Meet the *Daubert* Criteria?”, *Environmental Forensics*, vol. 10, núm. 4, 2009, pp. 268-276. Disponible en: «<https://doi.org/10.1080/15275920903347545>».

Baumeister, Michael y Capone, Dorothea, “Admissibility Standards as Politics: The Imperial Gate Closers Arrive!!!”, *The Seton Hall Law Review*, vol. 33, núm. 5, 2003.

Bell, Evan, “Judicial Assessment of Expert Evidence”, *Judicial Studies Institute Journal*, vol. 2, 2010, pp. 55-96.

Brčeski, Ilija y Vaseashta, Ashok, “Environmental Forensic Tools for Water Resources”, A. Vaseashta (ed.), *Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*, Springer International Publishing, 2021, pp. 333-370. Disponible en: «https://doi.org/10.1007/978-3-030-76008-3_15».

Càtedra de Cultura Jurídica, “Jordi Ferrer: Prueba y proceso judicial” Video recuperado de: «<https://www.youtube.com/watch?v=M6dQxcIkKi0>», 2015.

Cerda, Rodrigo, *Valoración de la prueba*. Sana Crítica, Librotecnia, 2008.

Donzelli, Gabriele *et al.*, “A critical review on the toxicological and epidemiological evidence integration for assessing human health risks to environmental

chemical exposures”, *Reviews on Environmental Health*, vol. 40, num. 2, 2024, pp. 427-436. Disponible en: «<https://doi.org/10.1515/reveh-2024-0072>».

Duce, Mauricio, “Los errores. La aplicación al caso concreto y los sesgos cognitivos de los peritos”, en Carmen Vázquez (coord.), *Manual de prueba pericial*, SCJN, reimp. 2023, pp. 143-184.

Erliyani, Rahmia *et al.*, “Existence of Scientific Evidence in Evidentiary Law”, *Economics & Law*, 3(1), 2021, pp. 64-76. Disponible en: «<https://doi.org/10.37708/el.swu.v3i1.5>».

Fiveable, “Environmental Sampling Strategies and Quality Assurance. Environmental Chemistry II Class Notes”, Fiveable, 2024. Disponible en: «<https://library.fiveable.me/environmental-chemistry-ii/unit-12/environmental-sampling-strategies-quality-assurance/study-guide/0dBc3LTlg0MTtzGV>».

Gianelli, Paul, “Forensic Science: Daubert’s Failure”, Faculty Publications (2006), 2017. Disponible en: «https://scholarlycommons.law.case.edu/faculty_publications/2006/».

Gómez, Carina, “La prueba pericial médica: Criterios para su emisión, admisión y valoración”, *Revista CONAMED*, vol. 21, núm. 2, 2016, pp. 88-98.

Gómez-Priego, Paola *et al.*, “Navigating expert judgment uncertainty in post-event environmental impact assessments for human-made disasters litigation”, *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 106, 2024. Disponible en: «<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107511>».

González-Rodríguez, Joaquín, “Las ciencias forenses a la luz del ADN”, en Carmen Vázquez (coord.), *Manual de Prueba Pericial*, SCJN, 2022, pp. 247-294.

Hantke-Domas, Michael, “La Prueba en el Derecho Ambiental (perspectivas generales y del derecho comparado)”. Diapositivas presentadas en el “Diplomado sobre protección de la naturaleza, cambio climático y derechos

humanos”, Unidad General de Conocimiento Científico y Derechos Humanos y la Dirección General de Casas de la Cultura Jurídica, SCJN, Ciudad de México, 2024.

Hunter, Iván Seminario “Prueba y Daño Ambiental”, Universidad Diego Portales, Santiago de Chile, 28 de junio 2019.

Ireland, Jane y Beaumont, John, “Admitting scientific expert evidence in the UK: Reliability challenges and the need for revised criteria-proposing an Abridged Daubert”, *Journal of Forensic Practice*, vol. 17, núm. 1, 2015, pp. 3-12. Disponible en: «<https://doi.org/10.1108/jfp-03-2014-0008>».

Jennings, Rhoda, “The Use of Scientific Evidence in Precautionary Decision-Making in EU Environmental Law”, *European Journal of Law Reform*, vol. 24, núm. 1, 2022, pp. 10-27.

Johnson, Andrew *et al.*, “The Weight-of-Evidence Approach and the Need for Greater International Acceptance of Its Use in Tackling Questions of Chemical Harm to the Environment”, *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 40, núm. 11, 2021, pp. 2968-2977. Disponible en: «<https://doi.org/10.1002/etc.5184>».

Keller, Hellen y Ganesan, Pranav, “The Use of Scientific Experts in Environmental Cases Before The European Court of Human Rights”, *International and Comparative Law Quarterly*, 73(4), 2024, pp. 997-1021. Disponible en: «<https://doi.org/10.1017/s0020589324000356>».

Knudsen, Sanne, “The Long-Term Tort: In Search of a New Causation Framework for Natural Resource Damages”, *Northwestern University Law Review*, vol. 108, núm. 2, 2014, pp. 475-542. Disponible en: «<https://scholarlycommons.law.northwestern.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1023&context=nulr>».

Lima, Lucas C., “O uso de experts em controvérsias ambientais perante a Corte Internacional de Justiça”, *Revista de Direito Internacional*, vol. 13, núm. 2, 2016. Disponible en: «<https://doi.org/10.5102/rdi.v13i2.4056>».

Luna, Fernando, “El mito del cientificismo en la valoración de la prueba científica”, *JURÍDICAS CUC*, vol. 14, núm. 1, 2018, pp. 119-144.

Luna Salas, F., “Técnicas neurocientíficas como medio de prueba pericial”, *Prolegómenos*, vol. 22, núm. 44, 2020, pp. 143-154. Disponible en: «<https://doi.org/10.18359/prole.4160>».

Miller, G. Tyler y Spoolman, Scot, *Essentials of ecology*, 5a. ed., Brooks/Cole Cengage Learning, 2009.

Mnookin, Jennifer, “Science, justice, and evidence”, *Science*, vol. 382, 2023, pp. 741-741. Disponible en: «<https://doi.org/10.1126/science.adm8834>»

Moncel, Remi, “Dangerous Experiments: Scientific Integrity in International Environmental Adjudications after the ICJ’s Decision in Whaling in the Antarctic”, *Ecology Law Quarterly*, vol. 42, 2015.

Moraga Sariego, Pilar y Delgado Schneider, Verónica, “El aporte jurisprudencial de los Tribunales Ambientales chilenos en materia de reparación del daño ambiental”, *Ius et Praxis*, vol. 28, núm. 2, 2022, pp. 286-301. Disponible en: «<https://doi.org/10.4067/S0718-00122022000200286>».

Morrison, R. D., y Hone, J. R. “Introduction to Environmental Economics”, en S. Kubota y Y. Magara (eds.), *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Developed under the Auspices of the UNESCO*, Eolss Publishers, 2010. Disponible en: «<https://eolss.net/sample-chapters/c09/e6-38a-17.pdf>».

Mudge, Stephen, “Environmental Forensics and the Importance of Source Identification”, *Issues in Environmental Science and Technology*, vol. 26, 2008, pp. 1-16. Disponible en: «<https://doi.org/10.1039/9781847558343-00001>».

Mudge, Stephen, *Methods in environmental forensics*, CRC Press, 2009.

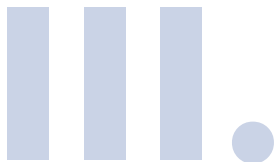
- Mupepele, Anne-Christine, “An evidence assessment tool for ecosystem services and conservation studies”, *Ecological Applications*, vol. 26, núm. 5, 2016, pp. 1295-1301. Disponible en: «<https://doi.org/10.1890/15-0595>».
- Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *Introduction to environmental forensics*, 2a. ed., Academic Press, 2007.
- Murphy, Brian L. y Morrison, Robert D., *Introduction to environmental forensics*, 3a. ed., Elsevier Academic Press, 2015.
- Nichols, Susan *et al.*, “Challenges for evidence-based environmental management: What is acceptable and sufficient evidence of causation?”, *Freshwater Science*, vol. 36, núm. 1, 2015, pp. 240-249. Disponible en: «<https://doi.org/10.1086/690106>».
- Nieva Fenoll, Jordi, *La valoración de la prueba*, Marcial Pons, 2010.
- Petrisor, Ioana Gloria, *Environmental Forensics Fundamentals: A Practical Guide*, Taylor & Francis Group, 2014.
- Popper, Karl, *La lógica de la investigación científica*, V. Sánchez de Zavala (trad.), Epublibre, 1934.
- Reynolds, Larry A. y Hrudey, Steve E., “Managing uncertainty in environmental decision-making: The risky business of establishing a relationship between science and law”, *International Journal of Risk Assessment and Management*, vol. 6, núm. 1/2/3, 2006. Disponible en: «<https://doi.org/10.1504/ijram.2006.007889>».
- Roberts, Paul y Zuckerman, Adrian, “11. Expert Evidence”, *Roberts & Zuckerman's Criminal Evidence*, 3a ed, Oxford, Oxford University Press, 2022, pp. 527-C11.N306.
- Robinson, J., “Daubert Standard. LII”, Legal Information Institute, Cornell Law School, 2023. Entrada de «https://www.law.cornell.edu/wex/daubert_standard»

- Saba, Tarek, "Using Environmental Forensics to Determine Liability for Environmental Contamination", Exponent, 3 octubre de 2019. Disponible en: «<https://www.exponent.com/article/using-environmental-forensics-determine-liability-environmental-contamination>».
- Saks, Michael y Spellman, Bárbara, "Scientific and Other Expert Evidence", *The Psychological Foundations of Evidence Law*, New York University Press, 2016, pp. 202-231.
- Shcherbakovskyi, Mikhailo H. y Dementiev, M. V., "Verification of the expert's opinión", *Bulletin of Kharkiv National University of Internal Affairs*, vol. 98, núm. 3, 2022, pp. 206-216.
- Siddik A., Muhammed, "Environmental Forensic: Need for comprehensive guidelines for environmental forensic investigations", *Detritus*, vol. 27, 2024. Disponible en: «<https://doi.org/10.31025/2611-4135/2024.19388>».
- Simma, Bruno, "The International Court of Justice and Scientific Expertise", *Proceedings of the ASIL Annual Meeting*, vol. 106, 2012, pp. 230-233. Disponible en: «<https://doi.org/10.5305/procannmeetasil.106.0230>».
- SER, *Principios de SER International sobre Restauración Ecológica*, Society for Ecological Restoration International, 2004.
- Solan, Lawrence, *The language of judges*, University of Chicago Press, 1993.
- Taruffo, Michele, *La prueba de los hechos*, Trotta, Editorial, 2002.
- The American Academy of Forensic Sciences, "Environmental forensics", Environmental Protection, 1999. Disponible en: «<https://eponline.com/articles/1999/09/01/environmental-forensics.aspx>».
- The Interstate Technology Regulatory Council, Soil Background and Risk Team, *Soil Background and Risk Assessment*, 2021. Disponible en: «<https://is.gd/3GyYmD>».

- Toranzos, Gary A. y Cano, Raúl J., “Definitions and Historical Perspectives in Environmental Forensics”, *Microbiology Spectrum*, vol. 6, núm. 2, 2018. Disponible en: «<https://doi.org/10.1128/microbiolspec.emf-0016-2018>».
- Tribunal Agroambiental, *Guía de peritaje ambiental para la jurisdicción agroambiental boliviana*, Tribunal Agroambiental, Órgano Judicial de Bolivia, 2022, Disponible en: «<https://www.tribunalagroambiental.bo/wp-content/uploads/2023/02/GuiadePeritajeAmbiental.pdf>».
- Vázquez, Carmen, “El juez ante el perito. Una breve introducción a los temas tradicionales de prueba pericial”, SCJN, *Manual de Prueba Pericial*, SCJN, 2022.
- Vázquez, Carmen, “Las comunidades expertas y los sesgos cognitivos de los peritos, en SCJN, *Manual de Prueba Pericial*, SCJN, 2022, pp. 43-94.
- Vázquez, Carmen y Fernández, Mercedes, “La conformación del conjunto de elementos de juicio: Admisión de pruebas”, en Jordi Ferrer (coord.), *Manual de Razonamiento Probatorio*, SCJN, reimp. 2023, pp. 137-222.
- Vázquez-Rojas, Carmen, “Sobre la cientificidad de la prueba científica en el proceso judicial”, *Anuario de Psicología Jurídica*, vol. 24, núm. 1, 2014, pp. 65-73.
- Vera, Juan Sebastián, “Valoración probatoria: Exigencias legales, jurisprudenciales y doctrinales”, *Academia Judicial de Chile*, vol. 51, 2022. Disponible en: «https://academiajudicial.cl/wp-content/uploads/2023/02/MD51-Valoracion-probatoria_-Exigencias-legales-jurisprudenciales-y-doctrinales.pdf».
- Verbic, Francisco, *La prueba científica en el proceso judicial*, ed. Rubinzal Culzoni, 2008.
- Villarreal, Julio F., “Equilibrios epistémicos frente a la crisis ambiental: Un estudio a partir del Caso del Atún Rojo del Sur del Tribunal del Mar en la antesala de sus cuarenta años de creación”, *Derecho PUCP*, vol. 88, 2022, pp. 265-301. Disponible en: «<https://doi.org/10.18800/derechopucp.202201.009>».

- Ward, Tony, “An English Daubert? Law, Forensic Science and Epistemic Deference”, *The Journal of Philosophy, Science & Law*, vol. 15, núm. 1, 2015, pp. 26-36. Disponible en: «<https://doi.org/10.5840/jpsl20151513>».
- Wilson, Adam, “Expert Opinion Evidence: The Middle Way. The Journal of Criminal Law”, vol. 73, núm. 5, 2009, pp. 430-450. Disponible en: «<https://doi.org/10.1350/jcla.2009.73.5.592>».
- Yang, Chun *et al.*, “Fingerprinting Analysis and Source Differentiation of Petroleum-Contaminated Environmental Samples”, en S. Stouty Z. Wang (eds.), *Oil Spill Environmental Forensics Case Studies*, Elsevier, 2018, pp. 49-65. Disponible en: «<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804434-6.00003-3>».

Capítulo



Transdisciplina en la argumentación jurídica. Integrando ciencia y derecho en la atribución de responsabilidad ambiental

Sibel Alejandra Villalobos Volpi

Transdisciplina en la argumentación jurídica. Integrando ciencia y derecho en la atribución de responsabilidad ambiental. Introducción, A. Transdisciplina: ante problemas complejos, soluciones integrativas, B. La transdisciplina como marco conceptual, C. La transdisciplina como herramienta, D. *¿Homo transdisciplinensis?*, Referencias.

Introducción

La disciplina, la multidisciplina, la interdisciplina y la transdisciplina son las cuatro flechas de un solo y mismo arco: el del conocimiento.

Basarab Nicolescu

Antes de comenzar con el ejercicio de plasmar lo que para mí ha sido un viaje por la integración disciplinar, me parece oportuno, y quizás necesario, compartir el inicio del proceso reflexivo que da vida a este texto.

El año 2016, siendo ministra suplente en ciencias de un tribunal especializado en medioambiente, cayó en mis manos un artículo sobre fundamentos de la transdisciplina,¹ en el cual, Manfred Max-Neef —economista, filósofo y académico chileno— termina con una cita del libro del Tao Te Ching (“Camino de la Virtud”), en los siguientes términos:

Treinta rayos convergen hacia el centro de una rueda;
pero es el vacío en el medio el que hace marchar el carro.

¹ Max-Neef, Manfred A., “Foundations of transdisciplinarity”, *Ecological Economics*, 2005, pp. 5-16.

Con arcilla se moldea un recipiente;
pero se lo utiliza por su espacio vacío.
Se hacen puertas y ventanas en las casas
y es el vacío lo que permite contemplar a través de ellas.
Por eso, el beneficio proviene de lo que está;
y la utilidad, de lo que no está.²

Cuando comencé a reflexionar en torno a las dificultades —y por ende en las oportunidades— que subyacen en torno a la aplicación del conocimiento científico en el ámbito de las decisiones judiciales, durante mucho tiempo tuve la sensación de encontrarme frente a un espacio vacío que necesitaba ser llenado (de contenido, de compromiso, de teoría, de prácticas, de códigos, de protocolos, de un largo etcétera); sin embargo, tras una década de intentar definir y poblar de conceptos la idea de la integración disciplinar, creo con sinceridad que en poder usar un recipiente vacío o en disfrutar de una ventana abierta de forma permanente, es donde se encuentra la verdadera oportunidad.

Esto no significa que vamos a filosofar en torno a la nada o el vacío. La invitación de este capítulo es a expandir nuestro conocimiento y nuestro pensamiento hacia lo que es —o podría llegar a ser— la integración disciplinar y a cuestionarnos cómo podemos promover formas de trabajo y comunicación para potenciar la toma de decisiones en un tema tan complejo como el daño al medio ambiente y la calidad de vida de las personas, tomando en nuestro beneficio lo que sí está: el conflicto, la evidencia, el conocimiento y las personas; buscando el mejor uso de lo que aún no está: la forma en que integramos la información y el saber, ya sea individual o colectivamente.

A. Transdisciplina: ante problemas complejos, soluciones integrativas

El término transdisciplina habría sido acuñado en la década de los setenta y se le atribuye al psicólogo Jean Piaget, quien plantea un sistema de relaciones interdis-

² Traducción libre del texto en inglés.

ciplinarias sin fronteras entre las disciplinas en el contexto del análisis de la formación académica en las universidades; lo que fue reformulado por el astrofísico Erich Jantsch, en el mismo contexto. En forma sorprendentemente paralela, Jack Lee Mahan, en su tesis doctoral, plantea el cuestionamiento transdisciplinario como un mecanismo para trascender los límites del conocimiento compartimentalizado en disciplinas, para el beneficio del ser humano y la sociedad.³

Dos décadas más tarde, tras el fin de la Guerra Fría, el inicio de la Globalización y un notorio aumento en la toma de conciencia de los problemas ambientales globales, el escenario mundial fue propicio para trascender el marco académico en el que se forjó el término *transdisciplina*. En el año 1994, tras el Primer Congreso Mundial de Transdisciplina los participantes —liderados por un físico, Basarab Nicolescu; un pintor y escritor, Lima de Freitas, y un sociólogo, Edgar Morin— elaboraron la Carta de la Transdisciplinariedad. Esta se define como un contrato moral en donde se afirma, entre otros paradigmas, que existe un crecimiento exponencial del saber que hace necesaria una nueva inteligencia, esto es: “La visión transdisciplinaria es decididamente abierta en la medida que ella trasciende el dominio de las ciencias exactas por su diálogo y su reconciliación, no solamente con las ciencias humanas sino también con el arte, la literatura, la poesía y la experiencia interior.”⁴

En este contexto de apertura, globalización y preocupación por el medioambiente, también en el año 1994, Michael Gibbons publica su libro *La nueva producción de conocimiento*, con una propuesta similar: reconoce que el aumento de complejidad en los problemas de la sociedad requiere de un nuevo modo de producción de conocimiento, en todas aquellas materias que no se encuentran cubiertas por solo una disciplina.⁵ Este enfoque, más práctico que el contenido en la Carta de la Transdisciplinariedad, propone que la producción de conocimiento se realice por expertos no solo de la academia, sino que también del Estado y la Industria;

³ Bernstein, Jay, “Transdisciplinarity: A Review of Its Origins, Development, and Current Issues”, *Journal of Research Practice*, 2015.

⁴ Nicolescu, Basarab, *La transdisciplinariedad*, trad. Norma Núñez-Dentin y Gérard Dentin, Ediciones Du Rocher, 1994.

⁵ Gibbons, M. et al, *The new production of knowledge*, SAGE Publications, 1994.

agregándose posteriormente las organizaciones no gubernamentales. Esta asociación de diversas fuentes de conocimiento experto sustenta fuertemente las bases de la transdisciplina como una forma de organización socio-económico-política para producir conocimiento aplicado; la cual se mantiene hasta hoy en órganos como el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) y la Plataforma Intergubernamental de Ciencia y Política para la Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES por sus siglas en inglés).

La aparición de dos corrientes contemporáneas de transdisciplina activó el interés académico en el concepto y su práctica, lo que llevó a distinguir distintos niveles de integración y a intentar definir con claridad de qué se habla cuando se habla de transdisciplina. De esta forma, a principios del nuevo siglo, los especialistas en la materia reconocieron dos vertientes, identificadas con Nicolescu y Gibbons, respectivamente. La primera escuela se caracteriza por un fuerte enfoque filosófico, que invita a la apertura en ámbitos que pueden resultar lejanos para la investigación, tales como la ética y la metafísica; en cambio la segunda, también conocida como escuela de Zúrich, priorizó la interfase entre ciencia, sociedad y tecnología para implementar soluciones tangibles para los problemas “reales” del mundo contemporáneo. Así se comienza a distinguir la transdisciplina teórica de la transdisciplina fenomenológica, tal como lo describe el propio Nicolescu en 2008.⁶ Pese a la intensidad del debate, existe consenso en que la transdisciplina va más allá de la clasificación tradicional de los saberes y las prácticas, desafiando y complementando el marco tradicional del pensamiento monodisciplinar, buscando ensamblar nuevas soluciones desde cero, aplicando los elementos de las disciplinas existentes para un propósito nuevo, lo que requiere salir del pensamiento lineal para razonar de forma creativa e imaginativa; no solo respecto de la solución al problema concreto, sino que también en torno a los factores o combinaciones de ellos que necesitan ser considerados para encontrar tal solución.⁷

⁶ Nicolescu, Basarab, “Transdisciplinarity: History, methodology, hermeneutics”, *Economy, Transdisciplinarity, Cognition*, vol. 11, núm. 2, 2008, pp. 13-23.

⁷ Bernstein, Jay, *op. cit.*, 2015.

Este enfoque integrativo parece ser indispensable para una sociedad en constante evolución, en la cual las personas enfrentan problemas y desafíos para los que no existen soluciones prefabricadas, y que compromete a múltiples actores relevantes, cada uno aferrado a sus propios intereses y a su particular forma de ver el mundo. Los especialistas han identificado tres elementos concretos de nuestro mundo contemporáneo que requieren un nivel de integración del conocimiento que va más allá de la coordinación entre disciplinas: la economía, la sustentabilidad y la demanda social por una participación significativa en los procesos de toma de decisiones. De esta forma, la investigación transdisciplinaria se ha desarrollado fuertemente en las últimas décadas con la intención explícita de resolver problemas complejos y multidimensionales que se relacionan con la interfase entre los sistemas humanos y naturales.⁸ Esto último sin duda ha fortalecido a las ciencias, ya que la demanda por investigación robusta, y a la vez embebida en las perspectivas políticas y expectativas locales, ha tenido una creciente demanda; sin embargo, el cuestionamiento de fidelidad a las prácticas provenientes de cada disciplina sigue vigente.⁹

Por otro lado, esta creciente sofisticación de la investigación, sumada a la alta complejidad de los problemas que enfrenta el mundo actualmente, hacen que la producción de soluciones sea más lenta, lo que dificulta la aplicación de modelos integrados cuando los tiempos para resolver son acotados. Ante esta realidad cabe cuestionarse si, efectivamente, un enfoque transdisciplinario es necesario en la toma de decisiones jurisdiccionales, cuya tardanza puede afectar a los incumbentes tanto o más que la propia decisión final.

En este contexto (simplificado) se intentará entregar los elementos de la transdisciplina, ya sea como un marco conceptual estratégico o bien como sistema de herramientas concretas, que pueden enriquecer los espacios de integración entre las ciencias sociales y las ciencias naturales para la producción de decisiones jurídicas en materia ambiental.

⁸ Mullally, Gerard *et al.*, “Contexts of Transdisciplinarity: Drivers, Discourses & Process”, en Byrne, Edmond *et al.*, (eds.) *Transdisciplinary Perspectives on Transitions to Sustainability*, Londres, Inglaterra, Routledge, 2016.

⁹ Lang, Daniel J. *et al.*, “Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges”, *Sustain Sci*, 2012.

B. La transdisciplina como marco conceptual

Como se ha visto hasta ahora, la integración disciplinar busca establecer un sistema de conocimiento enriquecido con las interacciones y reciprocidades de distintas fuentes de conocimiento o “monodisciplinas”. De esta forma se pueden establecer distintos niveles de complementariedad en una meta-estructura que favorecen la integración del conocimiento monodisciplinar en una nueva unidad consistente y abierta a la vez.¹⁰ De ello se desprende con claridad que no se trata de un fenómeno pasivo, sino que depende de acciones de preparación, integración, coordinación, articulación, etcétera. Además, la diversidad existente de aproximaciones al concepto de transdisciplina propiamente como tal (al menos la filosófica y la práctica), permite un tratamiento no dogmático de la teoría y el avance hacia un enfoque más bien metodológico; sin embargo, para llegar al desarrollo o aplicación de aspectos metodológicos, es necesario establecer un marco conceptual general que aporte las bases del futuro desarrollo metodológico.

Entonces, ¿de qué se trata esto de la transdisciplina?

Una forma sencilla de aproximarse al concepto, pero que no distingue entre los niveles posibles de integración, es entender la transdisciplina como:

un marco conceptual y conductual que se instala ante la necesidad de romper el monismo disciplinario al enfrentar problemáticas complejas, promoviendo que el resultado final sea superior a la suma de las partes que lo producen; o bien, a la suma de las distintas fuentes de conocimiento que lo constituyen.¹¹

Con ello se incorporan diferentes aspectos que se encuentran profundamente asociados a la transdisciplina como la complejidad y la necesidad de ir más allá del conocimiento propio de una sola fuente.

¹⁰ Scholz, Roland W. y Steiner, Gerald, “The real type and ideal type of transdisciplinary processes: part I-theoretical foundations”, *Sustain Sci*, 2015.

¹¹ Definición propia. Ponencia II Congreso Interamericano sobre el estado de derecho en materia ambiental, Santiago, Chile.

Una de las definiciones más simples del término la aportan Lang y colegas,¹² postulando que la transdisciplina es “una metodología reflexiva e integradora para la solución de problemas complejos”. Pese a la sencillez de la definición, esta contiene claramente el concepto de práctica, la cual es fundamental para una integración virtuosa del conocimiento, ya que como se verá a continuación, la transdisciplina no se genera sola ante la presencia de dos o más disciplinas enfrentadas a un problema complejo, sino que requiere intención y trabajo.

Para definir y representar los diferentes niveles de integración disciplinar, se utilizará como base la síntesis formulada por Max-Neef,¹³ que sintetiza varias aproximaciones previas. De esta forma, la Monodisciplina —representada por la especialización en aislamiento—, produce conocimiento sin la necesidad de interactuar con otras disciplinas, formando un modelo horizontal no interconectado, tal como se representa a continuación:



Figura 1: Representación del monismo disciplinar, en donde cada disciplina genera conocimiento específico, sin interactuar con otras fuentes de conocimiento.

A su vez, la multidiscipliplina, implica la existencia de diversas disciplinas, sin que exista una relación entre ellas. Esto puede ocurrir cuando una persona se ha preparado en distintos ámbitos sin que estos se interrelacionen, por ejemplo, en derecho y canto lírico; o bien se puede encontrar, y muy frecuentemente, en equipos que construyen reportes conformado por la suma de informes individuales, sin que exista coordinación o comunicación entre ellos. Una forma de representación de la multidiscipliplina es la siguiente:

¹² Lang, Daniel J. *et al.*, *op. cit.*, 2012.

¹³ Max-Neef, Manfred A., *op. cit.*, 2005.



Figura 2: Multidisciplina representada como la suma de fuentes de conocimiento, sin interacción entre ellas.

En el caso de la pluridisciplina, aparece la cooperación o interacción entre distintas fuentes de conocimiento, sin que exista una coordinación, sino un interés recíproco en áreas de conocimiento compatibles, a un nivel jerárquico común, como puede ocurrir con la física, la química y la geología, o la historia, la sociología y el lenguaje. La representación de la pluridisciplina es la siguiente:

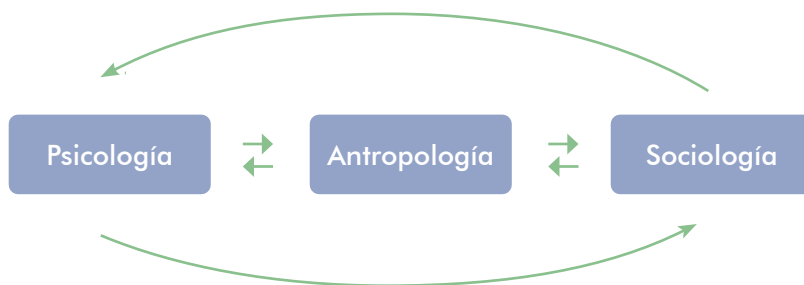


Figura 3: En la pluridisciplina, las fuentes de conocimiento interactúan unas con otras enriqueciéndose, sin que exista una coordinación entre ellas y sin que ninguna interactúe entre sí.

La interdisciplina, por su parte, se caracteriza por la aparición de un sentido de propósito común, y con ello, una coordinación desde un nivel jerárquico superior, el cual puede estar dado por un concepto, un ideal, un objetivo o meta que es compartido por las disciplinas que interactúan orientadas por este principio jerárquico. En la base, las fuentes del conocimiento describen el mundo tal como es percibido, respondiendo a la pregunta: *¿qué es lo que existe?*, a un nivel empírico. El siguiente nivel es el propositivo o pragmático, en donde aparecen las disciplinas tecnológicas, que responden a la pregunta: *¿qué es lo que se puede hacer con lo que existe?* En este contexto es posible identificar distintos niveles de interdisciplina, de acuerdo con el propósito u objetivo jerárquico superior. Ejemplos

de ello son la *interdisciplina pragmática*, en donde se incluyen prácticas como la medicina, la ingeniería y la agricultura, y se reúnen los saberes de diversas monodisciplinas como la edafología, la biología, la botánica, la climatología y la química, en el caso de la agricultura, cuyo propósito es la producción de alimentos (granos, frutas, hortalizas, etcétera). También es posible distinguir la *interdisciplina normativa*, en donde el objetivo jerárquico es planificar o bien, regular la forma en que se produce el hacer, de tal forma que la política o la planificación agrupa otras fuentes de conocimiento como la economía, la agricultura y la sociología. Otro ejemplo es la *interdisciplina valórica*, la que tiene como objetivo jerárquico una forma correcta o virtuosa de hacer las cosas.

Independientemente del objetivo jerárquico que oriente las fuentes de conocimiento que lo nutren y le proporcionan contexto, la representación de esta organización verticalizada, de forma conceptual y a través de un ejemplo, es la siguiente:

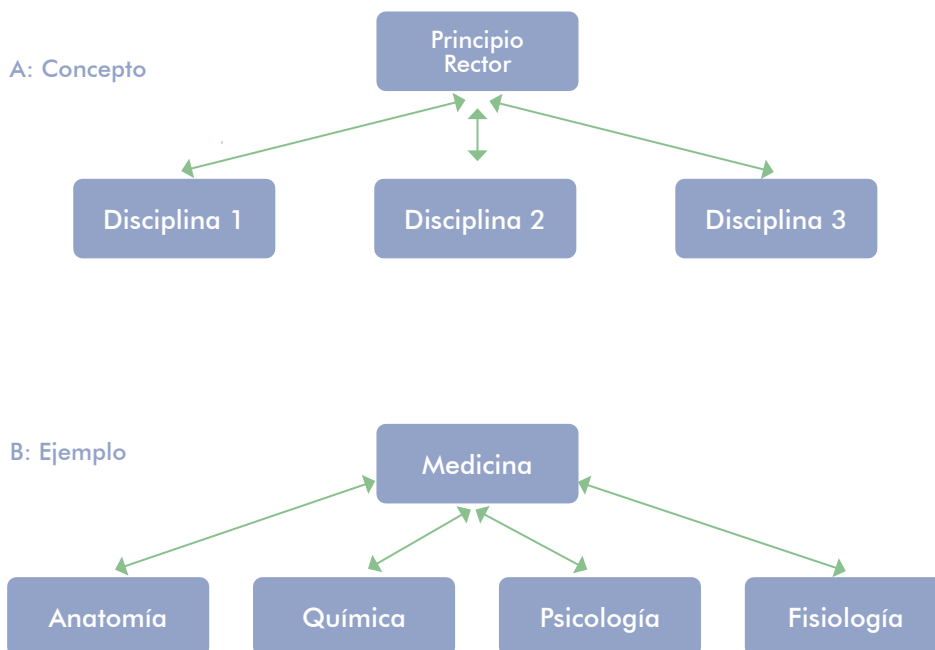


Figura 4: Representación de un esquema interdisciplinario, en donde aparece un nivel jerárquico coordinador que representa un principio rector al cual todas las disciplinas obedecen.

Finalmente, la transdisciplina puede representarse como la coordinación de todos los niveles jerárquicos que pueden surgir en procesos de toma de decisiones complejas,¹⁴ en donde la base del conocimiento estará dado por las disciplinas empíricas que indican qué es lo que existe; el siguiente nivel jerárquico representará lo que es posible hacer con lo que existe; el tercero se representa con lo que está o no permitido hacer dentro de todo lo posible y un último nivel representará la ética del hacer, o cómo hacer —correcta o virtuosamente— aquello que se permite hacer. La forma en que se representa la transdisciplina, conforme a este sistema de integración es la siguiente:

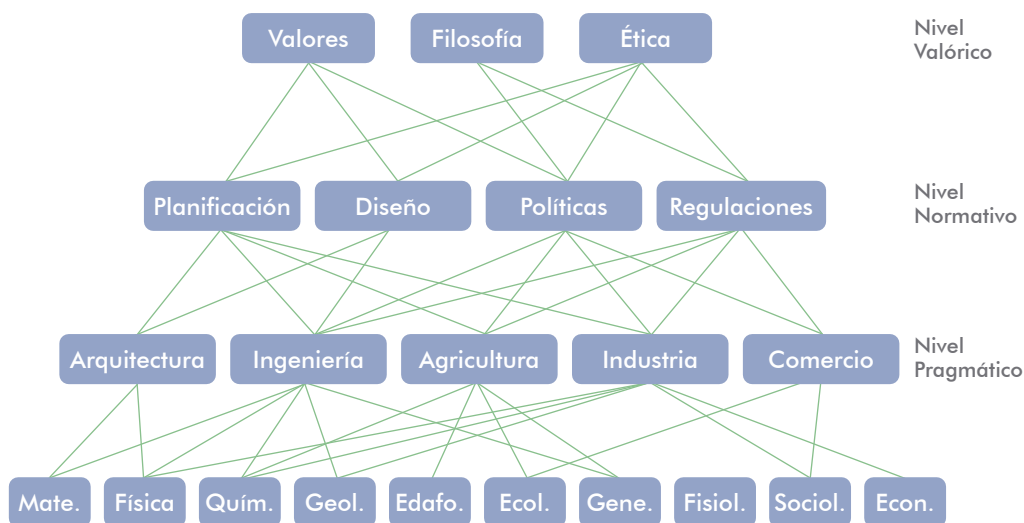


Figura 5: Transdisciplina representada con ejemplos de integración y coordinación entre distintos niveles jerárquicos, en base al objetivo de la coordinación: en el nivel pragmático se encuentra lo que es posible hacer con el conocimiento base, luego en el nivel normativo se establece lo que está o no permitido hacer, y el tercer nivel jerárquico que es el nivel valórico, es en donde se determinan las maneras correctas o virtuosas de hacer aquello que se puede y se permite. Las abreviaturas en la base corresponden a matemáticas, química, geología, edafología, ecología, genética, fisiología, sociología y economía, respectivamente.

¹⁴ *Id.*

Esta forma de representar los distintos niveles o formas de integración permite visualizar con claridad que los conflictos socioambientales y sus soluciones jurisdiccionales no pueden provenir de enfoques monodisciplinarios ni multidisciplinarios, sino que requieren de coordinación, lo que nos lleva de forma lógica a la aplicación de los modelos de la interdisciplina y la transdisciplina. Un argumento simple a favor del enfoque transdisciplinario es que los problemas y conflictos socioambientales se encuentran enmarcados en el paradigma del desarrollo sustentable, el cual contiene directrices normativas, políticas y valóricas. Sin perjuicio de ello, existen más elementos propios de la transdisciplina que llevan a visualizar este enfoque como una herramienta o metodología, cuyo uso resulta favorable al momento de adjudicar materias ambientales.

Basarab Nicolescu, uno de los padres de la transdisciplina, definió el término de la forma más absoluta y sencilla posible: “más allá de las disciplinas”,¹⁵ no solo ajustándose y rescatando la etimología de la palabra, sino también buscando representar que, en un mundo crecientemente complejo, el conocimiento monodisciplinar ha alcanzado sus limitaciones, por lo que se requiere ir más allá de ellas. Para explicar las bases de la transdisciplina, Nicolescu¹⁶ eligió tres axiomas para representar la metodología de la transdisciplina, afirmando que la formalización matemática de la transdisciplina es un sueño o más bien un fantasma, el cual existe inducido por siglos de conocimiento monodisciplinar, postulando una teoría que unifica distintos niveles de realidad, la que estima necesaria para eliminar el reduccionismo y el pensamiento binario y construir futuros sustentables. En este punto, cabe tener presente que Nicolescu enuncia, como ejemplo, los axiomas del conocimiento científico postulados por Galileo Galilei en sus *Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo*, los que permanecen inalterados en la actualidad: i) hay leyes universales de carácter matemático, ii) estas leyes pueden ser descubiertas mediante experimentación científica, y iii) estos experimentos pueden ser replicados perfectamente.

¹⁵ Nicolescu, Basarab, *op. cit.*, 2008.

¹⁶ Nicolescu, Basarab, “Methodology of transdisciplinarity—levels of reality, logic of the included middle and complexity”, *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science*, 2010.

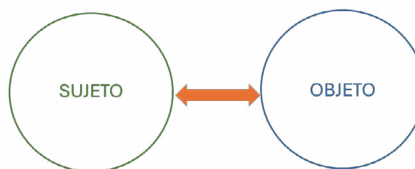
Tras analizar los tres axiomas propuestos, tal vez por las propias limitaciones del nivel de realidad-conocimiento con que me he aproximado al estudio de la transdisciplina, estimo que, tal como ha sido desde un inicio, la corriente Nicolesciana es más bien filosófica y poco pragmática, sin embargo, se revisará a continuación, dado el valor que puede alcanzar este enfoque al sugerir formas de aproximarse a problemas complejos, y por la orientación que proporciona en la búsqueda de soluciones alternativas a los conflictos judiciales, tales como la mediación y la conciliación.

En forma previa, se debe tener presente que para Nicolescu, el punto crucial para comprender su propuesta axiomática es el estatus del sujeto (u observador), mencionando que la era moderna trae un profundo quiebre de la visión ancestral del mundo, en que el sujeto se encontraba embebido en el objeto, por lo que las explicaciones del mundo solían ser mágicas (Figura 6, inc. 1). En la modernidad, el sujeto se separa del objeto para explicarlo, asumiendo que este último es invariable, con independencia del observador (Figura 6, inc. 2), permitiendo así que el conocimiento científico evolucionara de forma independiente a la teología, la filosofía y la cultura; sin embargo, con la llegada de la física cuántica, en donde se hace necesario aceptar que el objeto puede ser indeterminado e inconstante, más bien teórico, como si fuese una emanación del sujeto observador (Figura 6, inc. 3). La aproximación transdisciplinaria debe aceptar un tercero oculto (en contraste con el tercero excluido de la lógica binaria), lo que permite unificar al sujeto y al objeto en un radio de acción infinito (Figura 6, inc. 4).

1) ENFOQUE ANCESTRAL O PRE-MODERNO



2) ENFOQUE MODERNO



3) ENFOQUE POST-MODERNO



4) ENFOQUE TRANSDISCIPLINARIO

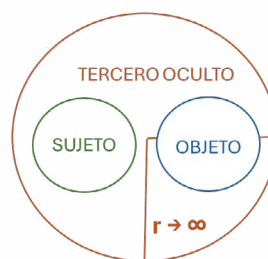


Figura 6: Formas de representación de la relación sujeto (observador) y objeto (realidad) y sus evoluciones. Lo más relevante en la transformación es la concepción del objeto como algo indeterminado, dependiente del observador, lo que rompe con la dualidad de que las cosas son, o no son, quedando siempre excluida una tercera posibilidad (lógica binaria o del tercero excluido). Cuando se aplican los Axiomas Nicolescianos de la Transdisciplina, se reconoce la existencia de un tercero oculto que permite reunir al sujeto y al objeto.

Los axiomas de la metodología transdisciplinaria propuestos por Nicolescu son tres,¹⁷ un axioma ontológico, un axioma lógico y un axioma de complejidad:

- a) Axioma ontológico: Existen en la naturaleza y en la sociedad, y en nuestro conocimiento de la naturaleza y la sociedad, distintos niveles de realidad del objeto y de forma correspondiente, distintos niveles de realidad del sujeto.
- b) Axioma lógico: El paso de un nivel de realidad hacia otro se asegura mediante la lógica del tercero incluido.

¹⁷ Nicolescu, Basarab, *op. cit.*, 2010.

- c) Axioma de complejidad: La estructura de la totalidad de los niveles de realidad, o de la percepción de ellos, es una estructura compleja: cada nivel es lo que es porque todos los niveles existen al mismo tiempo.

El axioma ontológico propone el concepto de ‘niveles de realidad’, en el entendido que ‘realidad’ es aquello que resiste nuestras experiencias, representaciones, descripciones, imágenes o formulaciones. La realidad se distingue de lo real en el sentido que esto último designa lo que es, pura e intrínsecamente; en tanto que la realidad está definida por nuestra resistencia o aceptación en base a nuestras capacidades humanas. Así, lo real puede estar velado para siempre y la realidad es accesible a nuestro conocimiento.

Por su parte, los “niveles de realidad” son grupos de sistemas que, bajo ciertas leyes, son invariables. A modo de ejemplo, se podría considerar que el mundo natural es un nivel de realidad, el cual obedece a diversas leyes de entropía y equilibrio dinámico; en tanto que la sociedad es otro nivel de realidad que responde a otras leyes adicionales, explicables a través de la sociología, la psicología y el derecho. Ejemplos más complejos se encuentran al comparar, como niveles de realidad diferentes, la física mecánica y la física cuántica. Los niveles de realidad no son jerárquicos y están caracterizados todos ellos por su incompletitud, en el sentido que cada nivel se gobierna por sus propias leyes, pero no por la totalidad de estas. Entre cada nivel existe una zona de no-resistencia a nuestras capacidades de experimentar y representar, cuya dimensión es finita, pero acepta infinitas representaciones (y experimentos, formulaciones, imágenes, descripciones, etc.), pudiendo generar conocimiento infinito. Así un sistema de niveles de realidad es abierto, al igual que el conocimiento.¹⁸ En este contexto, el objeto es una unidad abierta de niveles de realidad y su zona de no resistencia. Fenomenológicamente, los diferentes niveles de realidad del objeto son accesibles a nuestro conocimiento mediante los diferentes niveles de realidad del (los) sujeto(s). La interrelación entre este ‘objeto transdisciplinario’ y el ‘sujeto transdisciplinario’ surge de las zonas de no resistencia que hay en común, las que se convierten en un tercero, el cual se denomina el ‘tercero oculto’ (Figuras 6, inc. 4, y 7).

¹⁸ Nicolescu, Basarab, *op. cit.*, 2008 e *Id.*

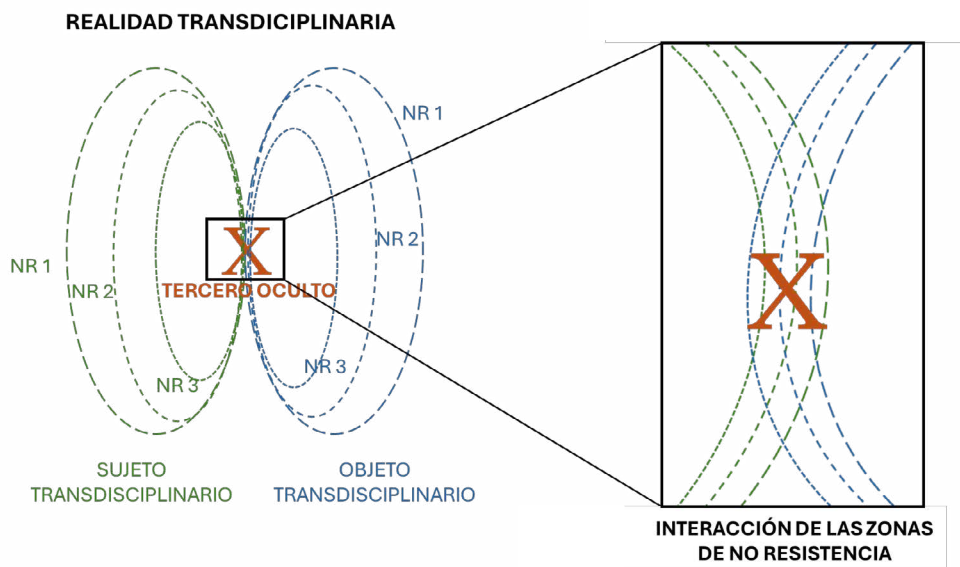


Figura 7: Representación de la forma en que se construye la realidad transdisciplinaria: los niveles de realidad (NR) del objeto transdisciplinario y del sujeto transdisciplinario interactúan en sus zonas de no resistencia, originando un nuevo agente, concepto, solución (o incluso nivel de realidad), llamado el tercero oculto, el cual solo surge desde la interacción.¹⁹

De esta forma, para que exista interacción, se requiere un flujo bidireccional de conciencia que unifique coherentemente los niveles de percepción a través de los niveles de realidad del objeto y del sujeto, el cual se produce en las mismas zonas de no resistencia. La zona de no resistencia, entonces, desempeña el rol de un tercero oculto que surge con la interacción.

Los niveles de realidad, tanto del objeto como del sujeto, pueden agruparse en grupos de tres, de modo de facilitar la contextualización del problema y facilitar la apreciación de las zonas de no resistencia. Ejemplos de ello se presentan en la siguiente tabla:

¹⁹ Figura adaptada de Nicolescu, Basarab, *op. cit.*, 2008 y McGregor, Sue L. T., “Demystifying Transdisciplinary Ontology: Multiple Levels of Reality and the Hidden Third”, *Integral Leadership Review*, 2011.

Tabla 1

Formas de organización de diferentes niveles de realidad en estructuras ternarias para la contextualización de análisis de casos concretos²⁰

Tipo de Sistema	Ejemplos de niveles de realidad
Natural	Macroscópico – Microscópico – Espacio/tiempo
Social	Individuo – Nación – Planeta
Natural/Social	Estructura – Organización – Sistema
Social	Lenguaje – Interpretación – Comunicación
Cognitivo	Información – Conocimiento – Comprensión
Natural	Físico – Químico – Biológico
Cognitivo	Realidad objetiva – Realidad subjetiva – Realidad intersubjetiva

Nicolescu propone que este flujo de conciencia es de forma simultánea interior y exterior, de modo que, sin espiritualidad el conocimiento es vacío, proponiendo que las experiencias artísticas, creativas, espirituales e intuitivas corresponden al cruce de las zonas de no resistencia entre niveles de realidad.²¹ Esta propuesta apela, indudablemente, a la necesidad de nuestras capacidades humanas internas para producir la conexión entre los distintos niveles de realidad, explorando esta zona de no resistencia, que es donde hay un espacio vacío entre los niveles de realidad.

El axioma del tercero incluido se basa en la incompletitud o estructura abierta de los niveles de realidad y desafía la lógica clásica, intolerante a la contradicción. En la lógica clásica, existe el axioma de identidad que expresa que “A” es “A”, el axioma de no contradicción que indica que “A” no es “no-A” y el axioma del tercero excluido, en el sentido que no existe “T” que pueda ser simultáneamente “A” y “no-A”. Sin embargo, este axioma ha sido desafiado por disciplinas como la

²⁰ Nicolescu, Basarab, *op. cit.*, 2010.

²¹ *Id.*

física cuántica, que necesita la existencia de pares excluyentes como la partícula y la onda, la continuidad y la discontinuidad o la reversibilidad e irreversibilidad del tiempo. Para lograr el avance de los teoremas de la física cuántica solo fue necesario abandonar el tercer axioma de la lógica clásica, e incluyendo el tercer concepto; de ahí el término del tercero incluido.

Este fenómeno de inclusión de algo que puede ser y no ser al mismo tiempo. Se puede explicar con facilidad mediante el experimento teórico del gato de Schrödinger, postulado en 1935. Este experimento consiste en colocar a un gato dentro de una caja en donde existe un mecanismo que se activa por el paso de un electrón, liberando un veneno mortal para el gato. Una vez disparado un electrón, el cual puede o no haber activado el mecanismo, la única forma de obtener un resultado acorde con la lógica clásica, es abrir la caja (A: el gato vive; no-A: el gato muere). Sin embargo, mientras la caja permanezca cerrada, el gato puede estar vivo y muerto al mismo tiempo. Este estado no contradictorio es “T” y solo “T” existe mientras la caja teórica en que se encuentra nuestro teórico gato permanece cerrada (Figura 8, inc. A).

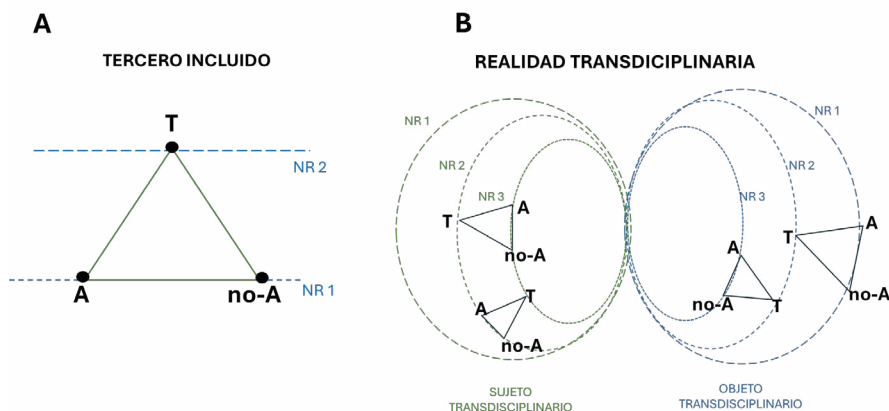


Figura 8: Diagrama del tercero incluido, el cual puede existir en un nivel de realidad distinto al del par antagónico, surgiendo de la unificación temporal de las contradicciones y antagonismos entre puntos de vista.²²

²² Figura adaptada de Nicolescu, Basarab, *op. cit.*, 2008 y McGregor, Sue L. T, *op. cit.*, 2011.

En la realidad transdisciplinaria, no es posible proyectar un estado “T” cuando un nivel de realidad contiene los pares antagónicos de “A” y “no-A”; es más, la ambivalencia puede ser peligrosa cuando se trata de situaciones relativamente simples, como el cumplimiento de las normas del tránsito, ya que el caos derivado de múltiples resultados posibles de una misma señal es lo que se pretende evitar con estas. Sin embargo, ante situaciones complejas (el bien y el mal, blanco o negro, rico o pobre, moral o inmoral), posicionar un tercer término en un nivel de realidad distinto, e incluso acotado en el tiempo, induce al reconocimiento de una estructura abierta entre los conceptos, reforzando la idea de que el saber es abierto (Figura 8, inc. B) y que los contrarios son complementarios. Así, la lógica del tercero incluido es una herramienta para procesos integrativos, permitiendo cruzar niveles de realidad. Su uso es un proceso transformativo, muchas veces no solo del conocer, sino también del ser. Cuando esto ocurre, “T” deja de ser una herramienta abstracta y se transforma en una vivencia real.

El axioma de la complejidad contempla la existencia de una complejidad horizontal, que afecta a un solo nivel de realidad en sus diferentes niveles de organización y de una complejidad vertical, que incluye varios niveles de realidad. La complejidad vertical puede asociarse al principio ancestral de la interdependencia universal, lo que permite distinguir la complejidad de la complicación. El principio de la interdependencia universal apela a la máxima simplicidad que la mente humana puede concebir, lo que no puede expresarse en un lenguaje matemático, sino que en un lenguaje simbólico. Un ejemplo de esto son los memes y emoticones que actualmente se utilizan para expresar diversos contextos, permitiendo su interpretación con la totalidad del ser, a diferencia del lenguaje matemático, que es solo comprensible por la mente racional. Este axioma aporta el concepto de valor al combinarse con los axiomas previos, lo que evita la creación de un cuarto axioma valorativo. Si bien el concepto de ‘espiritualidad’ está devaluado en nuestra sociedad moderna, debemos recordar que su etimología lo conecta con el vocablo ‘respirar’. Nicolescu plantea que la tecnociencia es el principal forzante de una nueva “espiritualidad” ya que promueve la eficiencia por la eficiencia, en donde todo lo que se puede hacer se hará, ya sea para bien o para mal.²³ Para

²³ Nicolescu, Basarab, *op. cit.*, 2010.

evitar el uso de la tecnociencia para fines reprochables, es necesaria una visión valórica que vaya más allá de la cultura y de la religión. De esta forma, obtenemos una realidad plástica que depende de nosotros, de nuestra resistencia o capacidad de fluir con lo real.

Estos tres axiomas juntos permiten una aproximación conceptual a los elementos a considerar en la práctica de la transdisciplina, o bien en el uso del enfoque transdisciplinario como herramienta para trabajar en la solución de problemas complejos.

Del análisis de los axiomas de la transdisciplina, junto con otras teorías de la realidad, Max-Neef enuncia sus tres primeras leyes de la transdisciplina. La primera ley establece que “Las leyes de un determinado nivel de realidad no son autosuficientes para describir la totalidad de los fenómenos que ocurren en ese determinado nivel de realidad.”²⁴ Esta es una reformulación del axioma ontológico de Nicolescu. La segunda ley postula que “Cada teoría en un nivel determinado de realidad es una teoría transitoria, ya que conduce al descubrimiento de nuevas contradicciones en nuevos niveles de realidad”. En este precepto se ve reflejada la relevancia del tercero oculto como un elemento suficientemente concreto y cierto como para abrir la exploración de los correspondientes pares lógicos en otros niveles de realidad, desbordando el concepto Nicolesciano del tercero oculto como algo que surge desde la lógica binaria, sino que ofrece el descubrimiento en el sentido inverso. La tercera ley está enunciada, muy probablemente, para representar el axioma de la complejidad derivada del infinito conocimiento que puede generarse en el espacio que separa a los distintos niveles de realidad, e indudablemente, aporta el elemento espiritual o invisible a la mente racional. Para ello plantea el problema de la economía como disciplina enraizada en el pensamiento lineal, la cual tiene una enorme influencia en la toma de decisiones que afectan a la naturaleza y a la sociedad, cuyos impactos han sido —y pueden seguir siendo— devastadores e irreversibles; evidencia de que la forma en que dicha disciplina se enseña y se practica actualmente no es capaz de resolver los problemas

²⁴ Max-Neef, Manfred A., *op. cit.*, 2005.

que requieren de su existencia.²⁵ Así su tercera ley de la transdisciplina, ofrecida alegóricamente, plantea que “Solo debido a lo que no está ahí, es posible ahí esté lo que está; y solo debido a lo que está ahí, es posible que ahí no esté lo que no está.”

Si bien el enunciado es complicado en sí mismo, es una inmensa fuente de inspiración al momento de abordar e intentar resolver problemas complejos. Un ejemplo de ello es la revisión y/o propuesta de bases para la resolución alternativa de conflictos judicializados, buscando una salida no adversarial. La invitación formulada se relaciona con la capacidad de comprender que los contrarios se complementan, y que son puntos divergentes de un mismo origen. De esta forma, aplicando esta óptica a la resolución alternativa de conflictos, se entiende que, no porque no haya una solución contenida en los argumentos de las partes contrarias vamos a cesar de buscarla; y, por el contrario, cuando las partes de común acuerdo presentan una conciliación, no significa que todos los elementos necesarios de proteger se encuentren debidamente incorporados, de modo que la labor de velar por la indemnidad del medio ambiente no ha concluido aún y le corresponde a los tomadores de decisiones jurisdiccionales.

C. La transdisciplina como herramienta

Ahora que nos hemos aproximado contextualmente a la transdisciplina, es momento de explorar la forma en que podemos distinguirla como un método facilitador de la comprensión entre las personas que intervienen en la búsqueda de una solución a un problema complejo. Para ello se revisará la forma en que los procesos de toma de decisiones jurisdiccionales satisfacen los requisitos y fases atribuidos a la investigación transdisciplinaria.

Diversos autores coinciden en que existen al menos tres requisitos y tres fases que son propias del trabajo transdisciplinario,²⁶ por lo que, si resulta posible establecer

²⁵ *Id.*

²⁶ Bergmann, Matthias *et al.*, *Quality Criteria of Transdisciplinary Research*, 2005; Scholz, Roland W. *et al.*, “Transdisciplinary case studies as a means of sustainability learning: historical framework and theory”, *Int J Sustain Higher Educ*, 2006; Bunders, Joske F.G. *et al.*, *How can transdisciplinary research contribute to knowledge democracy?*, 2010; Lang, Daniel J. *et al.*, *op. cit.*, 2012.

coincidencias entre elementos propios de la transdisciplina y el proceso de adjudicación ambiental, es posible determinar con mayor solidez que la de la simple opinión, si este proceso constituye un espacio para la práctica del trabajo transdisciplinario en procesos complejos de toma de decisiones.

La especialización en transdisciplina ha comenzado a establecer como acuerdo básico que los desafíos de la sustentabilidad requieren nuevas formas de producir conocimiento y de tomar decisiones; sin embargo, pese a la creciente aparición de estudios transdisciplinarios, no es sencillo delimitar los componentes básicos y los principios orientadores de la forma en que se practica la investigación transdisciplinaria.²⁷ Con todo, la aproximación transdisciplinaria es relevante para construir nuevas relaciones entre la ciencia y la sociedad, de modo de poder abordar problemas complejos que trascienden a cada disciplina en sí misma, por lo que comprender los métodos apropiados para integrar el conocimiento es una necesidad.²⁸ Esto hace necesario contextualizar el concepto de transdisciplina en las formas de llevar a cabo los procesos integrativos, para lo cual, podemos tomar la propuesta de Scholz y Steiner, quienes conciben la transdisciplina como

un proceso facilitado de aprendizaje mutuo entre la ciencia y la sociedad, relacionado con procesos de análisis o investigación a través de diversas disciplinas y a través de distintos discursos, para desarrollar orientaciones robustas para un caso o problema concreto. Este proceso puede servir para crear capacidades entre los participantes mediante el consenso y la búsqueda de estrategias para evitar conflictos emergentes en el proceso.²⁹

Para estos autores, el principal valor agregado de la transdisciplina es la integración o relacionamiento entre diferentes formas de conocimiento; ya que mientras cada disciplina es capaz de explicar aspectos específicos de forma teórica, la solución transdisciplinaria relaciona, fusiona y transforma distintos tipos de percepción, conocimiento y valoración de un modo integrado. Así, los procesos transdisciplinarios abarcan el saber, el pensar y el ser.

²⁷ Lang, Daniel J. *et al.*, *op. cit.*, 2012.

²⁸ Bergmann, Matthias *et al.*, *op. cit.*, 2005.

²⁹ Scholz, Roland W. y Steiner, Gerald, *op. cit.*, 2015.

Entonces, ¿existe un modelo para llevar adelante procesos integrativos del conocimiento para producir soluciones a problemas complejos? La verdad es que sí; sin embargo, estos modelos corresponden a representaciones idealizadas de procesos integrativos, que no necesariamente representan a todos los procesos, pero ofrecen la ventaja de que pueden adaptarse a cada caso en concreto, dada su simplicidad. Para aproximarnos a los procesos transdisciplinarios, exploraremos los requisitos que estos tienen y las fases en que pueden organizarse, aspectos que levantan uno de los modelos más sencillos y totalmente aplicable a la labor jurisdiccional en materias ambientales.

En el área de la investigación transdisciplinaria, se ha propuesto la existencia de tres requisitos inherentes a esta que deben cumplirse siempre.³⁰ Estos requisitos son:

- 1) Enfoque en problemas socialmente relevantes.
- 2) Promoción del aprendizaje mutuo entre distintas disciplinas.
- 3) Generación de conocimiento nuevo, orientado a la solución de problemas, el cual puede ser transferido a la práctica social o científica.

Estos requisitos se van cumpliendo en la medida en que se realiza la práctica de la transdisciplina, entendida como un trabajo en las interfases (entre diferentes niveles de realidad, si recordamos a Nicolescu). El inicio de la práctica transdisciplinaria se produce con un problema relevante para la sociedad (o múltiples problemas) que gatille la necesidad de aplicar conocimiento científico para buscar la solución. Para que el problema surja en un contexto transdisciplinario es necesario que este pueda ser demarcado en conjunto, desde las componentes sociales y las componentes científicas. La demarcación del problema de manera dialogada, reflexiva y deliberativa³¹ abre la comprensión de su dificultad a todos los actores y permite ubicarlo dentro de los ámbitos del conocimiento o prácticas disciplinarias comprometidas en su solución, con la menor pérdida de complejidad

³⁰ Lang, Daniel J. *et al.*, *op. cit.*, 2012 y Gibbons, Michael, "Science's new social contract with society", *Nature*, 1999.

³¹ Zierhofer, Wolfgang y Burger, Paul, "Disentangling Transdisciplinarity: An Analysis of Knowledge Integration in Problem-Oriented Research", *Science Studies*, 2007.

posible. En la propuesta de Bergmann y colegas,³² esta práctica permite determinar objetivos comunes de la investigación e iniciar el intercambio de apreciaciones desde las distintas disciplinas que abordarán el problema, de modo de definir el objeto de análisis y sus límites.

El aprendizaje mutuo se produce al realizar la investigación requerida para analizar el problema. Indudablemente esto pasa por asignar los roles adecuados a los operarios e investigadores involucrados en la búsqueda de la solución y a las personas mentoras o responsables de los equipos. De esta forma, habrá responsables de analizar desde su propia disciplina cómo abordar la o las partes del problema que en ella se enmarcan, y también habrá responsables de asegurar que los descubrimientos en cada disciplina sean compartidos por todo el equipo, permitiendo que los miembros de distintas disciplinas puedan revisar y comentar recíprocamente los avances y descubrimientos producidos por la investigación, así como la comprensión de la información extra disciplinaria,³³ que suele estar contenida en el ámbito social del problema.³⁴

La generación de nuevo conocimiento se produce al revisar los hallazgos producidos por el análisis o investigación, recogiendo los insumos que surgen de la interacción entre los especialistas, evaluando la credibilidad, calidad y aplicabilidad de los hallazgos. Con esta información compartida, el equipo puede comenzar a diseñar las soluciones o productos apropiados para cada uno de los problemas enmarcados en el inicio, e incluso a predecir los efectos que estos productos pueden tener tanto en el discurso o práctica social como en el ámbito de las ciencias.³⁵

En perspectiva, la labor de resolver controversias ambientales satisface ampliamente estos requisitos. Los problemas llevados a tribunales en materia ambiental,

³² Bergmann, Matthias *et al.*, *op. cit.*, 2005.

³³ Información que no está conectada con alguna disciplina o práctica formal o académica, tales como las ideologías, convicciones, motivaciones, los intereses, etc.

³⁴ Lang, Daniel J. *et al.*, *op. cit.*, 2012.

³⁵ Lang, Daniel J. *et al.*, *op. cit.*, 2012 y Jahn, Thomas, "Transdisciplinarity in the Practice of Research", *Transdisziplinäre Forschung. Integrative Forschungsprozesse verstehen und bewerten*. Verlag, 2008.

más allá de los intereses individuales o colectivos que se representan, están relacionados con la sustentabilidad de uno o más socio-ecosistemas, cuya alteración o falta de cuidado afecta la calidad de vida de las personas; esto transforma a las controversias jurídico-ambientales en problemas socialmente relevantes.

Además, al estar la problemática enmarcada, como se indicó, en uno o más socio-ecosistemas, no es posible avanzar en el análisis y solución de las controversias desde solo una perspectiva legal, o solo una perspectiva científica, ya que ambas tienen límites muchas veces incompatibles. Esto hace que las personas operadoras de justicia deban comprender la complejidad asociada a la problemática ambiental, a la vez que los operarios del área técnico-científica deben comprender la aplicación de los principios legales como el de la inexcusabilidad y el de la oportunidad. La forma de allanar estas diferencias está relacionada con la conformación de los equipos de trabajo y las instancias que se generan (o no) para compartir conocimiento y cuestionar de forma sana, constructiva y recíproca los hallazgos de cada uno de los participantes. Con ello, además, se promueve el aprendizaje mutuo, el cual entrega herramientas que favorecen el avance en el siguiente caso.

Por último, las decisiones jurisdiccionales, incluso si se producen como una salida alternativa al conflicto, establecen precedentes, o, dependiendo del sistema legal, incluso jurisprudencia. Las decisiones legales constituyen una suerte de aprendizaje social, ya que según el peso del razonamiento que contienen, se utilizan como ejemplo (a seguir o a evitar) en casos siguientes. Con ello, se produce nuevo conocimiento al interior de los tribunales e igualmente en los interesados en la doctrina.

Como se ha evidenciado, los requisitos del trabajo transdisciplinario pueden organizarse en distintas fases, las cuales han sido analizadas y conceptualizadas por diversos autores.³⁶ Estas fases, cada una relacionada con los requisitos del trabajo transdisciplinario son:

³⁶ Bergmann, Matthias *et al.*, *op. cit.*, 2005; Pohl, Christian, "What is progress in transdisciplinary research?", *Futures*, 2011; Lang, Daniel J. *et al.*, *op. cit.*, 2012 y Brandt, Patric *et al.*, "A review of transdisciplinary research in sustainability science", *Ecological Economics*, 2013.

- 1) La demarcación del problema.
- 2) La co-creación de una solución.
- 3) La aplicación del nuevo conocimiento.

Un marco conceptual simplificado de las fases del trabajo transdisciplinario puede ser mejor representado a través de un esquema del modelo ideal de proceso transdisciplinario, incorporando la secuencia de estas fases, así como los insumos que estas necesitan para completarse (Figura 9).

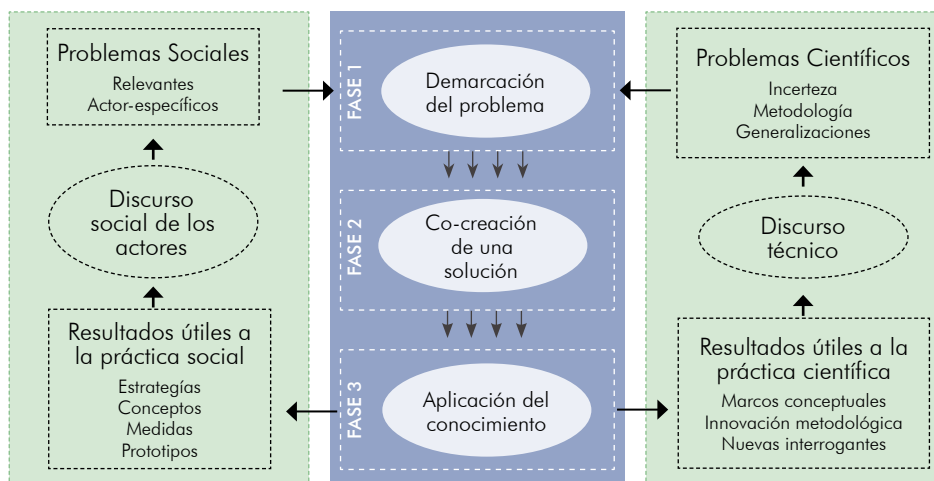


Figura 9: Marco conceptual de las fases del proceso transdisciplinario. El esquema representa cómo la visión de los actores sociales y técnicos delimita la problemática y cómo, a su vez, la creación de soluciones aporta respuestas o resultados útiles, al tiempo que puede contribuir al planteamiento de nuevos problemas.³⁷

Al igual que ocurre con los requisitos del trabajo transdisciplinario, el proceso de construcción de una sentencia ambiental puede enmarcarse en las fases del trabajo transdisciplinario propuesto en la Figura 9. Como ya se ha mencionado, las partes en sus alegaciones plantean problemas complejos y de diversa índole: socioeconómicos, técnicos ambientales, socioculturales, entre otros.

³⁷ Adaptado de Lang, Daniel J. *et al.*, *op. cit.*, 2012.

La fase de demarcación del problema puede ser homologada al proceso de identificación de las controversias sustanciales entre las partes litigantes. En esta etapa, especialistas de los ámbitos legal, económico y ambiental pueden interactuar para reconstruir la problemática a partir del discurso de las partes, con lo que se produciría la definición, en conjunto, de los problemas centrales sobre los cuales deberá recaer la decisión. La demarcación en conjunto del problema permite a los especialistas técnicos entender la controversia legal que se debe resolver, al mismo tiempo que los operadores legales se informan y conocen los elementos probatorios que deben ser analizados para abordar cada controversia.

La fase de cocreación de la solución corresponde al proceso mismo de construcción de la sentencia, en el cual se presentan los argumentos de cada una de las partes y el tribunal expone las razones por las que decide resolver, de una determinada manera, cada una de las controversias previamente identificadas. Esto se produce aplicando diversas fuentes de conocimiento, cada una enfocada a la problemática a resolver, ofreciendo, idealmente un resultado o conceptualización propia para cada controversia, surgida del proceso interactivo entre los participantes en la construcción de la decisión.

Finalmente, la fase de aplicación del conocimiento creado entre personas abogadas y científicas (esto es, la solución al conflicto) se produce cuando la sentencia es acatada, reclamada, o cuando es aplicada como precedente en la solución de casos similares. Aun cuando la sentencia sea revisada con posterioridad, se produce aplicación de la solución creada, ya sea por su confirmación, o por los ajustes que la corte revisora estime pertinentes aplicar. De esta forma, podría proponerse el mismo marco conceptual para el proceso jurisdiccional en donde se analiza el daño inferido al medio ambiente, los efectos que esto tiene sobre los derechos y la calidad de vida de las personas y las medidas necesarias para revertir la situación para el beneficio de la sociedad (Figura 10).

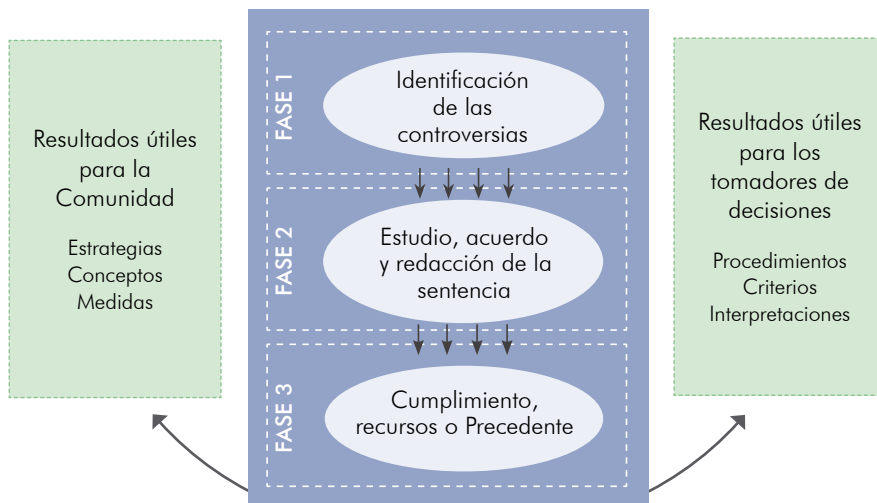


Figura 10: Marco conceptual de las fases del proceso jurisdiccional, homologado al proceso transdisciplinario. El diagrama representa cómo el proceso de redacción de sentencia contribuye a la construcción de soluciones desde diversas fuentes de conocimiento.

Una forma de traducir estas fases en acciones concretas que se pueden implementar en el contexto de una decisión jurisdiccional es a través del ajuste del “procedimiento paradigmático” propuesto por Bergmann y otros,³⁸ en el contexto de la investigación transdisciplinaria, en donde se formulan recomendaciones para avanzar en cada una de las tres fases indicadas previamente. Al traducir esta propuesta a la labor jurisdiccional, los principales elementos a recoger para cada fase serían los siguientes:

- 1) Para la identificación de las controversias, es necesario que el problema sea analizado por un equipo de personas que englobe la mayor cantidad de disciplinas vinculadas con el problema. Si bien esto último se encuentra extremadamente restringido en un tribunal o corte de justicia, es necesario contar con los aportes de distintas fuentes de conocimiento. En conjunto se deben demarcar los problemas, de modo de

³⁸ Bergmann, Matthias *et al.*, *op. cit.*, 2005.

evitar análisis innecesarios o redundantes, e idealmente cada actor debería indicar cómo traduce a su disciplina los problemas que le corresponde abordar, en un proceso de diferenciación compartida. Una vez completada esta fase, el proceso volverá a pasar por fases alternas de integración, diferenciación e intervención hasta obtener el resultado.

- 2) Para el estudio de la causa, la proposición de un acuerdo y la propia redacción de una sentencia (o en su defecto la proposición o análisis de bases de conciliación), una vez diferenciados los módulos en los que se analizarán las controversias, en el proceso de investigación es necesario requerir instancias en las que se puedan combinar o integrar los avances en cada módulo y la forma en que esta combinación aporta al problema que se debe resolver. En estas instancias se debe forjar y mantener un mecanismo que permita un alto grado de comprensión por parte de cada miembro del equipo, así como buscar acuerdos en torno a las necesidades de cooperación que van surgiendo con los avances y analizar la compatibilidad e integrabilidad de los resultados o contenidos parciales de cada módulo.
- 3) La integración del conocimiento adquirido en el análisis en el resultado final, no puede ser un conjunto de resúmenes obtenidos de forma independiente por cada módulo, ya que cada uno de ellos, en la fase previa, ha trabajado en una problemática común que es la resolución de las controversias en conjunto y en base a la retroalimentación (integración). Además, se pueden recolectar e incentivar aquellas prácticas que resultan adecuadas para el tipo de caso bajo análisis, al mismo tiempo que se pueden descartar o modificar aquellas que no resultaron idóneas (intervención). Por último, si la sentencia producida es revisada por la vía de un recurso, nuevo aprendizaje puede ser recogido y aplicado en un nuevo caso asimilable (innovación).

De las prácticas propuestas se puede deducir fácilmente que los procesos integrativos requieren tiempo y dedicación, factores que parecen distantes de la labor

jurisdiccional, la cual debe ejercerse de forma inexcusable, muchas veces en plazos acotados, incompatibles con la escala temporal en la que se produce el conocimiento necesario para resolver. Entonces cabe cuestionar el impulso de promover un enfoque transdisciplinario en este tipo de procesos. Sin embargo, existen aproximaciones que permiten rescatar el principio del aprendizaje mutuo³⁹ que promueve la transdisciplina para una mejor labor jurisdiccional. En primer lugar, así como la transdisciplina pretende cambiar la investigación *para* la sociedad por investigación *con* la sociedad, se puede entender que la incorporación de un enfoque integrador y recíprocamente deliberativo puede transformar la adjudicación en un proceso realizado *por* el tribunal en un proceso realizado también *para* el tribunal. Adicionalmente, se crea un enorme potencial para una mejor comunicación y para la búsqueda de soluciones innovadoras mediante la comunicación y la comprensión de los roles y necesidades de quienes intervienen en el proceso. Así, la transdisciplina se transforma en una herramienta que produce, integra y maneja el conocimiento, especialmente en ámbitos en los que para llegar a un resultado se requiere no solo del conocimiento científico, sino también de los valores de la sociedad.

Entonces, si existen ventajas y valores al implementar un marco de trabajo transdisciplinario, ¿es necesario convertirse en un especialista en transdisciplina? La verdad es que conocer qué es y qué no es la transdisciplina es un valor agregado, pero no indispensable para avanzar. Lo que sí es indispensable, como se verá más adelante, es tener la iniciativa suficiente para romper con la inercia de la multidisciplina, donde las fuentes del saber coexisten, pero no interactúan, muchas veces solo para evitar conflictos interpersonales derivados de una visión totalitaria de las ideologías y/o del conocimiento.

Es más, ha sido tal el avance y el estudio de la transdisciplina en las últimas décadas, que actualmente existen espacios de libre acceso dedicados exclusivamente a orientar y proponer herramientas para el trabajo transdisciplinario, principalmente en la investigación. El más completo y atractivo es el sitio de la Academia

³⁹ Scholz, Roland W., "Mutual learning as a basic principle of transdisciplinarity", *Transdisciplinarity: joint problem-solving among science, technology and society. Workbook II: mutual learning sessions*, 2000.

Suiza de Ciencias (SCNAT), cuya organización está pensada para orientar a usuarios desde las diferentes fases y las problemáticas propias del trabajo transdisciplinario, ofreciendo una amplia variedad de métodos y herramientas para la coproducción de conocimiento,⁴⁰ abordando materias como la identificación de actores y sus expectativas para la construcción de equipos de trabajo, el manejo de diferencias y tensiones en grupos transdisciplinarios, la navegación en entornos normados, la integración entre expertos, la revisión de procesos y sus impactos, la delimitación de un problema, la integración como práctica y el trabajo conjunto. Muchas de estas técnicas y herramientas se pueden aplicar sin necesidad de encontrarse en la resolución de un caso, sino que se pueden replicar en los equipos de trabajo a modo de preparación para abordar un enfoque integrativo en el quehacer. Para esto es necesario que exista un liderazgo motivador y con una definición clara de los objetivos a lograr, con un enfoque orientado a descubrir la idoneidad de las metodologías ofrecidas, según las características de las personas involucradas. No se puede ignorar que los grupos de trabajo quedan definidos no solo por sus objetivos, sino también por una serie de aspectos tales como las relaciones jerárquicas y la definición social, demográfica y política de sus miembros, entre muchos otros factores. Manejar estos factores sutil y efectivamente, es la labor de quien(es) ejerce(n) el liderazgo.

Otro espacio de aprendizaje se encuentra en el sitio de la Universidad de Basilea, que ofrece cursos autoguiados de sustentabilidad, manejo e innovación, aprendizaje y memoria y sobre investigación para el cambio social.⁴¹

D. *¿Homo transdisciplinensis?*

En casi la totalidad de la literatura consultada para la elaboración del presente capítulo, se encuentran diversas advertencias y recomendaciones relacionadas con los vínculos y habilidades interpersonales, para el logro de un espacio de trabajo transdisciplinario, muchas de las cuales se revisarán a continuación. Esto

⁴⁰ SCNAT Knowledge. Swiss Academy of Sciences, “Methods and tools for co-producing knowledge”, Sitio disponible en: «<https://naturalsciences.ch/co-producing-knowledge-explained>».

⁴¹ Este último curso está centrado en la Transdisciplina y puede revisarse en: <https://tales.nmc.unibas.ch/de/partnering-for-change-link-research-to-societal-challenges-46/>.

es necesario, ya que, si bien “saber hacer transdisciplina” es importante, ello no se compara con la relevancia de “querer hacer transdisciplina”; y lamentablemente, como muchos de los autores relatan, los profesionales formados entre las décadas de los cincuenta y fines de los noventa, si bien somos contemporáneos con la aparición del término transdisciplina, estamos formados por un fuerte componente monodisciplinar, con tendencia a la hiperespecialización en forma aislada, inmersos en un entorno poco favorable para la divulgación científica, dominado por la convicción de que “saber es poder”, razón por la que no estamos acostumbrados a compartirlo. Esta huella cognitiva no favorece la creación de entornos integrativos, por lo que aprender a reconocer los factores que pueden entorpecer y también los que pueden promover el trabajo transdisciplinario, es algo que debe estar presente en este capítulo.

Nicolescu⁴² ya visualizó la importancia del ser humano como el sujeto transdisciplinario y propone al *Homo sui transcendentalis* como una suerte de tercero oculto entre el *Homo religiosus*, inmerso en la realidad que conoce a través de la espiritualidad y el *Homo economicus*, que se concibe totalmente separado de la realidad, la que está allí para ser conocida, descifrada, dominada y transformada. Para Nicolescu, somos parte del movimiento ordenado de la realidad y nuestra libertad consiste en entrar en él o perturbarlo, haciendo que la realidad dependa de nosotros.

Para Daniels y Walker,⁴³ especialistas en aprendizaje, existen formas de aportar conocimiento que enriquecen el aprendizaje más allá de lo cognitivo, con base al “aprendizaje colaborativo”. La propuesta considera el pensamiento sistémico, en donde los contenidos se presentan como componentes y flujos, dándole sentido y contexto al todo que se pretende explicar; el establecimiento de valores y conductas estratégicas, base del éxito en las soluciones alternativas de conflictos. El aprendizaje colaborativo implica una discusión constructiva de ideas, argumentos y espacios de interacción, lo que a su vez requiere de una serie de competencias como la escucha activa, el cuestionamiento y la aclaración, la retroalimentación,

⁴² Nicolescu, Basarab, “Methodology of ...”, *op. cit.*, 2010.

⁴³ Daniels, Steven E. y Walker, Gregg B. “Collaborative learning: improving public deliberation in ecosystem-based management”, *Environ. Impact Assess Rev*, 1996.

la modelación de escenarios, el diálogo y la argumentación colaborativa. Los aspectos claves del aprendizaje colaborativo son: enfoque en la mejora más que en el resultado, énfasis en la situación más que en el conflicto, priorización en las expectativas e intereses más que en las posturas e ideologías, apuntar al logro de cambios necesarios, deseables y realizables más que a metas futuras, promover el pensamiento sistémico más que el pensamiento lineal, reconocer y aceptar que no todo el conocimiento necesario estará disponible para llegar a una solución o resultado, abriendo la posibilidad de consensuar hasta dónde es posible avanzar.

Para Max-Neef,⁴⁴ la transdisciplina es una manera diferente de ver el mundo, más sistémica y holística, que requiere de una práctica sistemática para su establecimiento, lo que permitiría esclarecer una serie de cuestionamientos relevantes para la humanidad, proponiendo que es necesario descubrir el nivel de realidad en el cual se encuentra el tercero oculto entre el crecimiento económico (A) y la protección del medio ambiente (*no-A*), conocido par antagónico en los conflictos socioambientales.

Para Brandt y colaboradores,⁴⁵ los principales desafíos del trabajo transdisciplinario, que son también los aspectos que requieren mayor atención son: 1) la delimitación coherente, suficiente y acotada del problema, sin que exista una metodología validada para ello, ya que se requiere una aproximación abierta para ello. Una inadecuada delimitación del problema (o identificación de las controversias en un caso dado), puede afectar no solo el resultado, sino también el proceso integrativo en sí mismo. 2) La integración de métodos, ya que muchas veces las metodologías de análisis son parte del repertorio de aplicación de una determinada disciplina que no son compartidas por quienes practican una disciplina diferente. 3) Falta de compilación de experiencias exitosas de donde extraer las mejores prácticas para realizar el proceso investigativo y la producción de nuevo conocimiento, así como la falta de consenso en torno a qué es, efectivamente, nuevo conocimiento. 4) Compromiso de los involucrados en el proceso, ya que muchas veces ocurre intercambio de conocimiento, pero no un aprendizaje mutuo.

⁴⁴ Max-Neef, Manfred A., *op. cit.*, 2005.

⁴⁵ Brandt, Patric *et al.*, *op. cit.*, 2013.

Por su parte, Lang y colegas,⁴⁶ preocupados de los principios del diseño de la ciencia transdisciplinaria, enmarcan los desafíos o problemáticas asociadas a esta práctica de la siguiente forma: 1) Falta de conciencia respecto del problema o delimitación insuficiente. Cuando los actores no se sienten vinculados al problema, no se comprometen con su enmarque, dejando en manos de terceros esta delimitación. En otros casos puede haber intransigencia en torno a la delimitación del problema de las partes con más (o menos) poder o jerarquía, aspectos que deben ser evitados. 2) Desbalance en la apropiación del problema. Esto puede ocurrir cuando no hay claridad en los roles de los miembros de los equipos, cuando la conducción está dividida, o bien no hay interés legítimo en alguno(s) de los participantes. 3) Insuficiente legitimación de los actores involucrados. Esto se relaciona con la problemática anterior, en el sentido que no existe confianza en el aprendizaje mutuo o en las capacidades de los miembros del equipo, ya sean estos operadores o líderes. Este problema también puede surgir cuando se excluyen participantes estratégicos o se incluye en los equipos a personas que no van a aportar al trabajo conjunto. 4) Conflicto entre estándares metodológicos. Esto ocurre cuando la investigación requiere adaptar metodologías a la problemática bajo análisis y existen prácticas estandarizadas para obtener resultados en una determinada disciplina. Muchos de estos conflictos surgen en el transcurso de la fase de cocreación de la solución y frecuentemente requieren mediación y negociación interna. 5) Participación discontinua. Mantener el interés de un equipo multidisciplinario no es sencillo, ya que no todos están interesados con la misma intensidad en las diferentes materias que se tratan. Manejar adecuadamente el tiempo de los participantes, así como las instancias de reporte recíproco es fundamental para mantener el foco en el problema común y la forma en que la solución se va creando.

Desde un enfoque más filosófico, Rigolot⁴⁷ propone que la diferenciación entre la transdisciplina teórica y práctica es una limitante a la integración cognitiva, ya que la transdisciplina es una forma de ser, lo que la vuelve algo inseparable de la

⁴⁶ Lang, Daniel J. *et al.*, *op. cit.*, 2012.

⁴⁷ Rigolot, Cyrille, "Transdisciplinarity as a discipline and a way of being complementarities and creative tensions", *Humanities and Social Sciences Communications*, 2020.

vida personal, extendiéndose mucho más allá de las actividades académicas y profesionales.

Schäpke y colegas⁴⁸ hacen énfasis en la intensidad del involucramiento durante el avance de un proceso transdisciplinario, señalando que, durante la mayor parte, las relaciones entre las personas, desde la definición del problema, hasta la implementación de la solución son de carácter cooperativo y colaborativo, quedando la entrega de información restringida a las etapas iniciales (Figura 11).

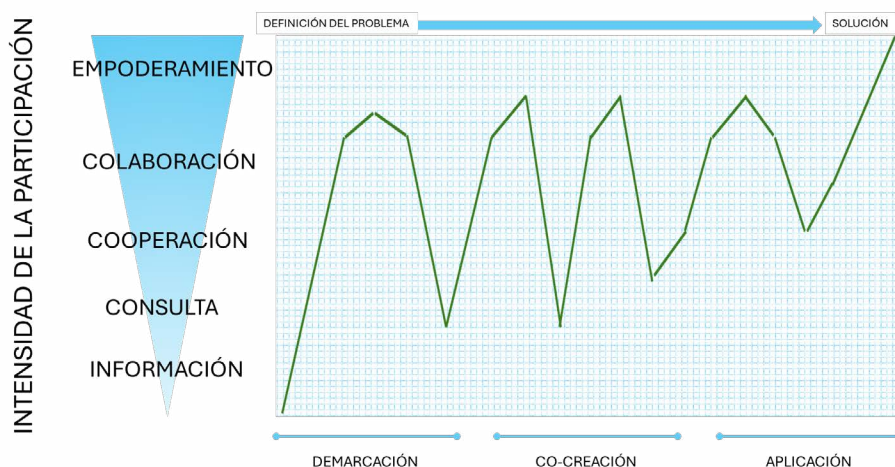


Figura 11: Formas en que se produce e intensifica el involucramiento de los participantes de un proceso integrativo de carácter transdisciplinario.⁴⁹

De ello se desprende que el trabajo integrativo requiere de un alto nivel de involucramiento. Llegar a empoderar a los demás participantes es un logro relevante que podría contribuir a que la “conducta transdisciplinaria” o la transdisciplina como forma de ser vaya surgiendo de modo cada vez más espontáneo.

⁴⁸ Schäpke, Niko *et al.*, “Reallabore im kontext transformativer forschung. Ansatzpunkte zur konzeption und einbettung in den internationalen forschungsstand”, *Leuphana Universität Lüneburg*, 2017.

⁴⁹ Adaptado de *id.*

Ross y Mitchel⁵⁰ plantean un nuevo concepto: el de transdisciplina transformativa, enfatizando cómo el paradigma del pensamiento lineal es el que provoca los problemas complejos y dificulta su comprensión. Para trascender esta cuestión, la transdisciplina transformativa es una práctica que no solo incluye los ámbitos axiológico, ontológico y epistemológico que implican las teorías de Jantsch, Nicolescu y Max-Neef, sino que un aprendizaje de tercer orden en que se desafíen todos los sistemas de significados de los paradigmas actuales. Este aprendizaje de tercer orden requiere nuevas estrategias para cuestionar nuestras actitudes, procesos cognitivos, formas de pensamiento, valores, juicios, etc. De modo de lograr una mejor comprensión de nuestro complejo rol en relación con otros. Esta actitud nos hace susceptibles a comprender los límites de nuestro conocimiento, descubriendo, a través de la reflexión crítica, los límites de las estructuras que modelan nuestras formas de ser y de actuar.

A modo de corolario, me permito expresar que, para mí, no cabe duda de que el desafío transdisciplinario está ahí (aquí), en una de las tantas dimensiones de nuestra mente, de nuestra conciencia y de nuestro ser. Así un nuevo modo de hacer las cosas requiere de la intención, de la práctica y del aprendizaje que dicha práctica lleva implícito. No es tarea de titanes, pero ciertamente que no es cosa sencilla derribar las limitaciones propias y las ajenas para adentrarse en la aventura de descubrir nuevas formas de hacer y de pensar. Afortunadamente, podemos pensar que nuestra mente, al igual que nuestro cuerpo, es plástica, flexible y susceptible de perfeccionarse con el estímulo adecuado y el entrenamiento constante.

Referencias

Bergmann, Matthias *et al.*, *Quality criteria of transdisciplinary research. A guide for the formative evaluation of research projects*, Frankfurt, Alemania, ISOE-Studientexte, 2005.

Bernstein, Jay, “Transdisciplinarity: A Review of its origins, Development and Current Issues”, *Journal of Research Practice*, vol. 11, núm. 1, 2015.

⁵⁰ Ross, Katie y Mitchel, Cynthia, “Transforming Transdisciplinarity: An Expansion of Strong Transdisciplinarity and Its centrality in Enabling Effective Collaboration”, 2018.

- Brandt, Patric *et al.*, "A review of transdisciplinary research in sustainability science", *Ecological Economics*, núm. 92, 2013, pp. 1-15.
- Bunders Joske F.G. *et al.*, "How can transdisciplinary research contribute to knowledge democracy?", en Veld, Roeland J. (ed.), *Knowledge Democracy: Consequences for Science, Politics and Media*, Heidelberg, Alemania Springer, 2010.
- Daniels, Steven E. y Walker, Gregg B., "Collaborative learning: Improving Public Deliberation in Ecosystem-Based Management", *Environ. Impact Assess. Rev.*, núm.16, 1996, pp. 71-102.
- Gibbons, Michael *et al.*, *The New Production of Knowledge. The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*, Londres, Inglaterra, SAGE Publications, 1994.
- Gibbons, Michael, "Science's new social contract with society", *Nature*, vol. 402, 6761 Suppl, 1999, pp. C81-C84.
- Jahn, Thomas, "Transdisciplinarity in the Practice of Research", en Bergmann, Matthias y Schramm, Engelbert (eds.), *Transdisziplinäre Forschung. Integrative Forschungsprozesse verstehen und bewerten*, Frankfurt, Alemania, Verlag, 2008.
- Lang, Daniel *et al.*, "Transdisciplinary Research in Sustainability Science: Practice, Principles and Challenges", *Sustain. Sci.*, vol. 7, núm. 1, 2012, pp. 25-43.
- Max-Neef, Manfred A., "Foundations of transdisciplinarity", *Ecological Economics*, vol. 53, 2005, pp. 5-16.
- McGreggor, Suel L.T., "Demystifying Transdisciplinary Ontology: Multiple Levels of Reality and the Hidden Third", *Integral Leadership Review*, marzo de 2011. Disponible en: «<https://integralleadershipreview.com/1746-demystifying-transdisciplinary-ontology-multiple-levels-of-reality-and-the-hidden-third/>».

- Mullaly Gerard M. *et al.*, “Context of Transdisciplinarity: Drivers, Discourses and Process”, en Byrne, Edmond *et al.* (eds.) *Transdisciplinary Perspectives on Transitions to Sustainability*, Londres, Inglaterra, Routledge, 2016.
- Niculescu, Basarab, *La transdisciplinariedad*, trad. Norma Núñez-Dentin y Gérard Dentin, Ediciones Du Rocher, 1994.
- Niculescu, Basarab, “Transdisciplinarity: History, methodology, hermeneutics”, *Economy, Transdisciplinarity, Cognition*, vol.11, núm.2, 2008, pp. 13-23.
- Niculescu, Basarab, “Methodology of Transdisciplinarity- Levels of Reality, Logic of the Included Middle and Complexity”, *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science*, vol. 1, núm.1, 2010, pp. 19-38.
- Pohl, Christian, “What is progress in transdisciplinary research?”, *Futures*, vol. 43, núm.6, 2011, pp. 618-626.
- Rigolot, Cyrille, “Transdisciplinarity as a discipline and a way of being: complementarities and creative tensions”, *Humanities and Social Sciences Communications*, 2020. Disponible en: «<https://doi.org/10.1057/s41599-020-00598-5>».
- Ross, Katie y Mitchell, Cynthia, “Transforming Transdisciplinarity: An Expansion of Strong Transdisciplinarity and Its centrality in Enabling Effective Collaboration”, en D. Fam *et al.* (eds.), *Transdisciplinarity Theory, Practice and Education*, Springer International Publishing AG, 2018.
- Schäpke, Niko *et al.*, *Reallabore im Kontext transformativer Forschung. Ansatzpunkte zur Konzeption und Einbettung in den internationalen Forschungsstand*, Alemania, Leuphana Universität Lüneburg, 2017.
- Scholz, Roland W., “Mutual learning as a basic principle of transdisciplinarity”, en Scholz Roland W. *et al.* (eds.), *Transdisciplinarity: joint problem-solving among science, technology, and society. Workbook II: mutual learning sessions*, Zurich, Suiza, Haffmans Sachbuch, 2000.

- Scholz, Roland W., Lang D. J., Wiek A., Walter A. I., Stauffacher M., “Transdisciplinary case studies as a means of sustainability learning: historical framework and theory”, *Int J Sustain Higher Educ*, 7, 2006, pp. 226-251.
- Scholz Roland W, Steiner G (2015), “The real type and ideal type of transdisciplinary processes: part I-theoretical foundations”, *Sustain Sci*, vol.10, 2015, pp. 527-544.
- SCNAT Knowledge. Swiss Academy of Sciences, “Methods and tools for co-producing knowledge”, Sitio disponible en: «<https://naturalsciences.ch/co-producing-knowledge-explained>».
- Zierhofer, Wolfgang y Burger, Paul, “Disentangling Transdisciplinarity: An Analysis of Knowledge Integration in Problem-Oriented Research”, *Sciences Studies*, vol. 20, núm.1, 2007, pp. 51-74.

La formación editorial de esta obra fue elaborada por la Dirección General de la Coordinación de Compilación y Sistematización de Tesis. Se utilizaron tipos ITC Berkeley de 10 y 11 puntos, Futura 12, 13 y 19 puntos. Diciembre de 2025.

Uno de los grandes retos del litigio ambiental y climático en el marco de la triple crisis planetaria –cambio climático, pérdida de biodiversidad y contaminación– es la atribución de responsabilidad.

Esta obra, *Elementos y criterios científicos para la atribución de responsabilidad ambiental*, parte de la premisa de que estos desafíos son fenómenos complejos que exigen respuestas integrales. A lo largo de tres capítulos, se repasan los fundamentos conceptuales y las herramientas aplicadas –desde la admisión y valoración de la prueba pericial, hasta el uso de metodologías y recursos técnicos– para enfrentar la dificultad procesal de probar la responsabilidad.

Aquí se combinan el análisis doctrinal y la práctica, para mostrar cómo el conocimiento científico puede integrarse a la argumentación jurídica, a partir de un enfoque transdisciplinario. Se realizó pensando en las personas operadoras de justicia y profesionales del litigio que se van adentrando en la materia, por lo que se incluyen conceptos claros y herramientas útiles para apoyar las decisiones cada vez más complejas en casos sobre contaminación, cambio climático y pérdida de biodiversidad.

