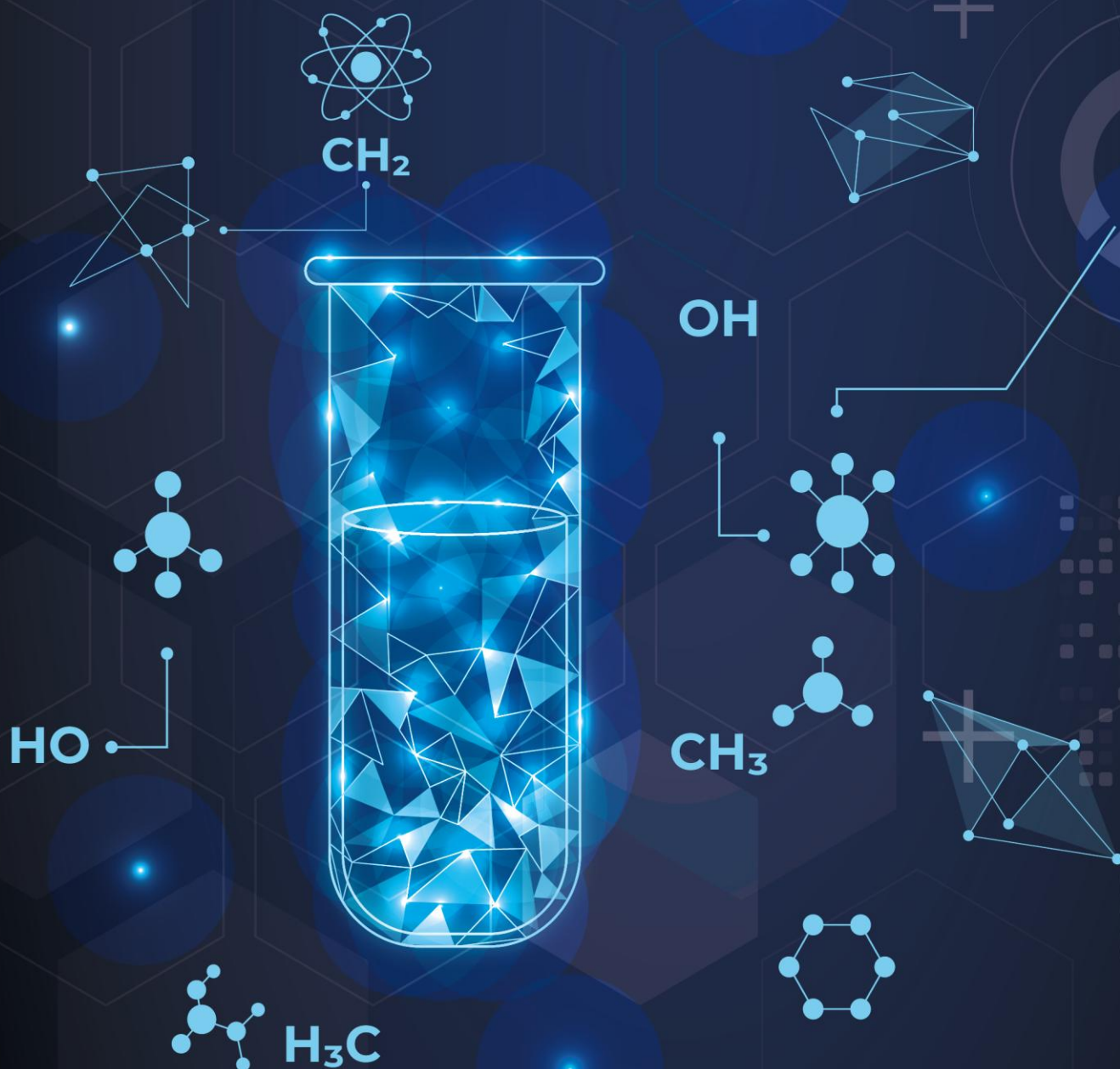


Química Analítica e Instrumental

Herramientas críticas para la sostenibilidad marina



Mgs. Sonia Romina Granja Banchón

*QUÍMICA ANALÍTICA E
INSTRUMENTAL:*

Herramientas críticas para la
sostenibilidad marina

Autora:

Mgs. Sonia Romina Granja Banchón
Universidad de Guayaquil
<https://orcid.org/0009-0004-4705-2964>

Editorial de Educación, Investigación y Cultura Académica

Abril 2026



EDUINCA

Copyright © Editorial de Educación, Investigación y Cultura Académica
Copyright del texto © 2026 de Autora

International Publication Technical Data

Title: *QUÍMICA ANALÍTICA E INSTRUMENTAL: Herramientas críticas para la sostenibilidad marina*

Authors: Sonia Romina Granja Banchón.

Publisher: Editorial de Educación, Investigación y Cultura Académica

Cover Design: Editorial de Educación, Investigación y Cultura Académica

Format: PDF

Pages: 85

Size: A4 21x29.7cm

System Requirements: Adobe Acrobat Reader

Acces Mode: World Wide Web

Publication Date: 30/04/2026

ISBN: 978-9907-9519-5-0

DOI: 10.5281/zenodo.19682263

Primera edición, año 2026. Publicado por Editorial de Educación, Investigación y Cultura Académica.

Esta obra ha sido sometida a un proceso de revisión por pares ciegos, cumpliendo con estándares académicos y editoriales de calidad bajo la supervisión de la editorial, la cual asume la responsabilidad de garantizar la integridad de dicho proceso; sin embargo, el contenido, la veracidad y la precisión de los datos presentados son responsabilidad exclusiva de sus autores. Se permite la descarga y distribución libre del libro siempre.

que se reconozca la autoría y no se modifique ni se utilice con fines comerciales. Queda prohibida su reproducción total o parcial sin autorización previa. Uso exclusivo para fines educativos y de divulgación académica.

® **QUÍMICA ANALÍTICA E INSTRUMENTAL: Herramientas críticas para la sostenibilidad marina.**

© 2026. Sonia Romina Granja Banchón.

Licencia y derechos de uso


QUÍMICA ANALÍTICA E INSTRUMENTAL: Herramientas críticas para la sostenibilidad marina, está licenciada bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0). Para ver una copia de esta licencia, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>. Queda prohibida su reproducción total o parcial sin autorización previa. Uso exclusivo para fines educativos y de divulgación académica.

Editorial de Educación, Investigación y Cultura Académica
Primera edición

ISBN 978-9907-9519-5-0

ÍNDICE DE CONTENIDO

PRÓLOGO.....	VI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PRINCIPIOS ANALÍTICOS PARA EL DIAGNÓSTICO AMBIENTAL.....	4
Chapter I: Analytical principles for environmental assessment	4
Fundamentos de Química Analítica en Sistemas Acuáticos	7
Dinámica ambiental y bioacumulación de contaminantes en sistemas marinos y estuarinos	10
Métodos analíticos para el diagnóstico ambiental.....	15
Biomarcadores y evaluación del impacto ambiental.....	21
Discusión crítica.....	25
CAPÍTULO II: AVANCES EN INSTRUMENTACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES.....	33
Chapter II: Advances in instrumentation for the detection of emerging contaminants.....	33
Contaminantes emergentes y nuevas exigencias del análisis ambiental	34
Preparación de muestra y estrategias de preconcentración selectiva.....	39
Instrumentación avanzada para la identificación y cuantificación.....	42
Aplicación analítica en matrices marinas, costeras y de aguas residuales.....	45
Discusión crítica.....	48
CAPÍTULO III: GOBERNANZA Y GESTIÓN DE DATOS EN INVESTIGACIONES QUÍMICAS.....	55
Chapter III: Governance and data management in chemical research.....	55
Gobernanza de datos en sistemas científicos digitalizados	57
Transformación digital y laboratorios inteligentes: hacia la automatización del conocimiento científico	60



Gestión de riesgos en sistemas científicos y laboratorios digitalizados.....	62
Desarrollo de competencias y modelo integrador en sistemas científicos digitalizados.....	66
Discusión crítica.....	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

PRÓLOGO

La evolución de la ciencia contemporánea ha estado marcada por una creciente interdependencia entre el conocimiento químico, la tecnología analítica y los desafíos ambientales globales. En este contexto, la química analítica ha dejado de ser una disciplina exclusivamente instrumental para convertirse en un eje estratégico en la comprensión, monitoreo y mitigación de problemáticas complejas que afectan la sostenibilidad del planeta, especialmente en los sistemas acuáticos.

La aparición y expansión de los llamados contaminantes emergentes ha transformado radicalmente el enfoque tradicional del análisis químico. Estas sustancias, presentes en concentraciones extremadamente bajas pero con un alto potencial de impacto ecológico y sanitario, han evidenciado las limitaciones de los métodos convencionales y han impulsado el desarrollo de tecnologías analíticas más sensibles, selectivas y robustas. Como se evidencia en los estudios sobre efluentes acuosos urbanos, su detección y tratamiento requieren no solo instrumentación avanzada, sino también una comprensión integral de su comportamiento en el medio ambiente.

Paralelamente, la revolución digital ha introducido una nueva dimensión en la práctica científica. Los laboratorios han evolucionado hacia entornos inteligentes donde la generación de datos es continua, masiva y multidimensional, lo que exige sistemas capaces de gestionar, organizar y garantizar la trazabilidad de la información científica. En este escenario, herramientas como los sistemas ELN/LIMS y plataformas como openBIS han permitido estructurar los procesos experimentales, optimizando la calidad y reproducibilidad de los resultados.

Este libro surge como una respuesta a la necesidad de integrar estos tres pilares fundamentales: el conocimiento analítico, la innovación instrumental y la gobernanza de datos científicos. A lo largo de sus capítulos, se construye una visión articulada que va desde los principios del diagnóstico ambiental hasta las tendencias más avanzadas en digitalización de laboratorios y gestión del conocimiento.

Más que una obra descriptiva, este texto propone una reflexión crítica sobre el papel de la química analítica en la sostenibilidad y la transformación de la ciencia en la era digital. Está dirigido a estudiantes, investigadores y profesionales que buscan comprender no solo el “cómo” del análisis químico, sino también el “por qué” y el “para qué” de su evolución en un mundo cada vez más interconectado y exigente.

INTRODUCCIÓN

El análisis químico de los sistemas ambientales ha experimentado una transformación profunda en las últimas décadas, impulsada tanto por la evolución de las tecnologías analíticas como por la creciente complejidad de los problemas asociados a la contaminación global. En este escenario, la química analítica ha dejado de ser una disciplina centrada exclusivamente en la cuantificación de sustancias para posicionarse como una herramienta estratégica en la comprensión integral de los procesos ambientales. Esta transición ha implicado un cambio en la manera de interpretar los datos, pasando de una lógica descriptiva a una perspectiva analítica e interpretativa que permite establecer relaciones entre variables, identificar tendencias y comprender el comportamiento de los sistemas acuáticos en contextos cada vez más dinámicos e interdependientes.

Dentro de este marco, los ecosistemas acuáticos ocupan un lugar central debido a su papel como receptores finales de múltiples descargas de origen urbano, industrial y agrícola. La calidad del agua, entendida como el resultado de un equilibrio complejo entre factores físicos, químicos y biológicos, se ve constantemente alterada por la introducción de sustancias que no siempre son detectadas mediante los métodos tradicionales de análisis. Entre estas sustancias, los contaminantes emergentes han adquirido una relevancia particular, no solo por su diversidad y persistencia, sino también por su capacidad de generar efectos adversos incluso en concentraciones extremadamente bajas. Este fenómeno ha evidenciado la necesidad de replantear los enfoques analíticos convencionales y de incorporar metodologías más sensibles, selectivas y adaptadas a la complejidad de las matrices ambientales.

La detección de estos compuestos ha sido posible gracias al desarrollo de técnicas instrumentales avanzadas que permiten alcanzar niveles de sensibilidad sin precedentes. Herramientas como la cromatografía acoplada a espectrometría de masas han ampliado significativamente las capacidades analíticas, facilitando la identificación de compuestos en niveles traza y en matrices altamente complejas. Sin embargo, el avance de la instrumentación no ha eliminado los desafíos asociados al análisis químico, sino que los ha trasladado a nuevas dimensiones, particularmente en lo que respecta a la interpretación de los resultados y a la gestión de la información generada. La gran cantidad de datos producidos en los procesos analíticos ha transformado la práctica científica, obligando a desarrollar sistemas que permitan organizar, procesar y dar sentido a esta información de manera eficiente.

En este contexto, la digitalización de los laboratorios ha introducido una nueva lógica en la investigación científica. Los entornos tradicionales han evolucionado hacia sistemas interconectados donde la generación de datos es continua y donde la interacción entre instrumentos, plataformas digitales y usuarios define el flujo de la información. Este cambio ha dado lugar a la consolidación de los denominados laboratorios inteligentes, en los cuales la automatización y la integración de tecnologías permiten optimizar los procesos experimentales y mejorar la calidad de los resultados. No obstante, esta transformación también ha generado nuevas exigencias relacionadas con la gestión de datos, la seguridad de la información y la necesidad de garantizar la reproducibilidad de la investigación.

La gestión de datos científicos se ha convertido, por tanto, en un componente esencial de la práctica investigativa contemporánea. La implementación de sistemas que permitan estructurar la información, asegurar su trazabilidad y facilitar su acceso constituye una condición indispensable para el desarrollo de investigaciones de calidad. Este aspecto adquiere especial relevancia en un contexto donde la colaboración interdisciplinaria y la ciencia abierta demandan el intercambio constante de información entre diferentes actores. En este sentido, la gobernanza de datos emerge como un enfoque que integra aspectos técnicos, organizacionales y éticos, permitiendo establecer marcos de gestión que garanticen la integridad y utilidad de la información científica.

El presente libro se sitúa en la intersección de estos procesos de transformación, proponiendo una visión articulada que integra los fundamentos de la química analítica, los avances en instrumentación y las nuevas dinámicas de gestión del conocimiento en entornos digitalizados. Su estructura responde a una lógica progresiva que permite al lector comprender, en primer lugar, los principios que sustentan el diagnóstico ambiental; posteriormente, los desarrollos tecnológicos que han ampliado las capacidades analíticas; y finalmente, los modelos de gestión que permiten organizar y aprovechar la información generada en los procesos científicos.

En conjunto, esta obra no solo busca aportar conocimientos técnicos, sino también promover una comprensión crítica del papel de la química analítica en la sostenibilidad ambiental y en la transformación de la ciencia contemporánea. A través de la integración de teoría, tecnología y gestión, se propone una perspectiva que permite entender la investigación científica como un sistema complejo, en el que la generación de conocimiento depende de la interacción coherente entre múltiples dimensiones.

CAPÍTULO I: PRINCIPIOS ANALÍTICOS PARA EL DIAGNÓSTICO AMBIENTAL

*Chapter I: Analytical principles for environmental
assessment*



CAPÍTULO I: PRINCIPIOS ANALÍTICOS PARA EL DIAGNÓSTICO AMBIENTAL

Chapter I: Analytical principles for environmental assessment

I. INTRODUCCIÓN

En el escenario contemporáneo de la sostenibilidad marina, el diagnóstico ambiental ha dejado de ser una actividad meramente descriptiva para convertirse en un proceso estratégico de interpretación científica orientado a la prevención, el control y la toma de decisiones. Esta transformación responde a una realidad ampliamente documentada: los ecosistemas acuáticos reciben de forma continua presiones derivadas de actividades industriales, urbanas, agrícolas, portuarias y extractivas que modifican su equilibrio químico, alteran sus ciclos biogeoquímicos y comprometen tanto la salud de la biota como la seguridad de las poblaciones humanas que dependen de ellos. Dentro de ese marco, la química analítica ocupa un lugar central, porque aporta los fundamentos conceptuales, metodológicos e instrumentales que permiten reconocer, cuantificar e interpretar la presencia de sustancias potencialmente peligrosas en el agua, los sedimentos y los organismos vivos.

La importancia de este enfoque se vuelve aún más evidente cuando se considera que muchos procesos de deterioro ambiental no son perceptibles a simple vista. Un cuerpo de agua puede exhibir apariencia clara, baja turbidez o parámetros fisicoquímicos aparentemente aceptables y, sin embargo, contener contaminantes emergentes, microorganismos con rasgos de virulencia o metales tóxicos en concentraciones capaces de desencadenar efectos crónicos sobre los ecosistemas y la salud pública. Un estudio reciente sobre agua potable almacenada en houseboats dentro de un corredor petrolero del delta del Níger mostró precisamente esa disociación: aunque varios parámetros fisicoquímicos se mantuvieron dentro de límites recomendados, se detectaron bacterias con potencial patogénico, lo que llevó a concluir que la conformidad fisicoquímica no garantiza por sí sola la seguridad microbiológica. Ese hallazgo resulta especialmente valioso para el presente capítulo, porque refuerza la necesidad de entender el diagnóstico ambiental como una evaluación integral, donde la medición analítica debe trascender el cumplimiento normativo y avanzar hacia una lectura sistémica de los riesgos.

Desde esta perspectiva, la química analítica aplicada al ambiente marino no se limita a responder cuánto hay de un contaminante, sino también qué forma química presenta, cómo se distribuye, qué tan biodisponible resulta, qué rutas de ingreso sigue dentro del ecosistema

y qué consecuencias puede generar en distintas escalas. Este cambio de enfoque es crucial en el estudio de metales y metaloides tóxicos, cuya peligrosidad no depende únicamente de su concentración total, sino también de su especiación, solubilidad, persistencia y capacidad de bioacumulación. La literatura reciente muestra que elementos como arsénico, cromo, cadmio, plomo y mercurio representan una amenaza relevante para la vida acuática y para los consumidores humanos cuando superan ciertos umbrales, precisamente porque son no biodegradables, permanecen largo tiempo en el ambiente y pueden transferirse a través de la cadena trófica. Asimismo, se ha documentado que algunos de ellos presentan formas químicas con toxicidades diferenciadas, como ocurre con As(III) frente a As(V), o Cr(VI) frente a Cr(III), lo que obliga a un análisis más fino y técnicamente riguroso.

En ambientes costeros y estuarinos, esta problemática adquiere una complejidad mayor. Las entradas continentales, los aportes urbanos, los vertidos industriales, la actividad naviera y los procesos hidrodinámicos propios de las zonas de mezcla convierten estos espacios en receptores y transformadores de contaminantes. En tales sistemas, el agua no actúa como un medio estático, sino como una matriz dinámica donde se producen fenómenos simultáneos de dilución, precipitación, complejación, adsorción en partículas, sedimentación y resuspensión. Por ello, un diagnóstico químico ambiental confiable exige considerar no solo la muestra puntual, sino también la variabilidad temporal, la frecuencia de monitoreo y la naturaleza de las fracciones analizadas. El estudio de monitoreo de fósforo en alta frecuencia en el río Itchen, en el Reino Unido, demostró que los muestreos regulatorios esporádicos pueden pasar por alto episodios prolongados de concentraciones elevadas que sí quedan evidenciados cuando se aplican estrategias de seguimiento diario. Aunque se trata de un sistema fluvial y no marino, su valor metodológico es notable, pues muestra que la precisión del diagnóstico ambiental depende tanto de la calidad analítica como del diseño temporal del monitoreo.

La evolución de las herramientas analíticas ha permitido responder a este desafío con mayor eficacia. Las técnicas instrumentales convencionales, como la espectrometría de absorción atómica, la ICP-OES y la ICP-MS, continúan siendo referentes para la determinación de metales por su sensibilidad y robustez; sin embargo, junto a ellas se han desarrollado plataformas más compactas, rápidas y adaptables al trabajo in situ. En el ámbito del monitoreo marino, la optofluídica ha abierto nuevas posibilidades para integrar microfluidos y detección óptica en sistemas miniaturizados capaces de medir nutrientes, pH, oxígeno disuelto y ciertos metales pesados con menor consumo de reactivos, menor tamaño y mejor

capacidad de operación autónoma en campo. Estas innovaciones no sustituyen automáticamente a los métodos de laboratorio, pero sí reconfiguran la lógica del diagnóstico ambiental al acercar la medición al espacio real donde ocurre la alteración ecológica.

De forma paralela, el análisis químico ha ampliado su campo de acción hacia enfoques epidemiológicos y de vigilancia poblacional. La epidemiología basada en aguas residuales ha demostrado que los biomarcadores presentes en estas matrices pueden utilizarse para reconstruir patrones de consumo, exposición y presión antrópica a escala comunitaria, ofreciendo información casi en tiempo real sobre fenómenos sociales y sanitarios. Aunque este enfoque se ha desarrollado con mayor fuerza para drogas, alcohol, tabaco y fármacos, su lógica metodológica resulta sumamente pertinente para la química ambiental: confirma que las aguas residuales son archivos químicos de la actividad humana y que su análisis permite construir indicadores territoriales de riesgo y comportamiento colectivo. Esta visión fortalece el argumento central del presente capítulo: el diagnóstico ambiental moderno ya no puede entenderse como una suma de mediciones aisladas, sino como un sistema de lectura analítica del territorio y de sus presiones.

En el caso de la sostenibilidad marina en la región, y particularmente en espacios de alta sensibilidad ecológica como el Golfo de Guayaquil, esta orientación adquiere plena pertinencia. Se trata de un entorno donde confluyen biodiversidad, actividad pesquera, transporte marítimo, asentamientos humanos y descargas de origen diverso, lo que obliga a desarrollar una mirada científica capaz de reconocer señales tempranas de deterioro y traducirlas en conocimiento aplicable. En ese sentido, los principios de la Química Analítica I constituyen mucho más que una base curricular: representan el lenguaje técnico con el que se define el estado químico del agua, se distinguen contaminaciones difusas y puntuales, se evalúa el riesgo ecológico y se sustenta la gestión sostenible del medio marino. Comprender dichos principios equivale, por tanto, a comprender cómo se produce la evidencia que luego orienta la intervención ambiental.

Sobre esa base, este capítulo se propone examinar los principios analíticos que permiten construir un diagnóstico ambiental riguroso en sistemas acuáticos, con especial énfasis en la detección e interpretación de contaminantes de interés prioritario. Para ello, se abordarán los fundamentos de la química analítica en matrices acuáticas, la dinámica ambiental de los contaminantes, las principales técnicas de análisis aplicables al monitoreo y el papel de los biomarcadores e indicadores integrados en la evaluación del impacto. El propósito no es ofrecer un inventario técnico de procedimientos, sino articular una comprensión científica

que vincule medición, interpretación y sostenibilidad. Desde esa lógica, el análisis químico deja de ser una operación instrumental aislada y se convierte en una herramienta crítica para pensar, proteger y gobernar los ecosistemas marinos contemporáneos.

II. DESARROLLO

Fundamentos de Química Analítica en Sistemas Acuáticos

El estudio de los sistemas acuáticos desde la química analítica exige comprender que el agua ambiental constituye una matriz compleja en la que convergen sustancias disueltas, partículas en suspensión, compuestos orgánicos e inorgánicos, así como organismos vivos que interactúan de manera dinámica. En este contexto, la química analítica no se limita a la identificación y cuantificación de sustancias, sino que se orienta a interpretar la composición química del agua en función de su origen, transformación y efectos sobre el ecosistema. Esta perspectiva ha sido ampliamente respaldada en la literatura científica, donde se destaca que la evaluación del estado químico de los cuerpos de agua requiere integrar múltiples variables fisicoquímicas y biológicas para lograr un diagnóstico ambiental confiable (Skoog et al., 2014; Harris, 2016).

Desde esta base, uno de los principios fundamentales radica en la diferenciación entre análisis cualitativo y cuantitativo. Mientras el análisis cualitativo permite identificar la naturaleza de las especies químicas presentes, el análisis cuantitativo determina su concentración, lo que resulta esencial para evaluar el cumplimiento de estándares ambientales y estimar riesgos ecológicos. Sin embargo, autores como Christian (2014) señalan que la utilidad real del análisis químico ambiental no depende únicamente de la precisión cuantitativa, sino de la capacidad de contextualizar los resultados en función de las condiciones del sistema, tales como la variabilidad temporal, la dinámica hidrológica y las fuentes de contaminación.

En los sistemas acuáticos, esta interpretación adquiere especial relevancia al abordar contaminantes persistentes como los metales pesados y metaloides. Diversos estudios han demostrado que elementos como el arsénico, cromo, cadmio, plomo y mercurio poseen características que los convierten en contaminantes prioritarios debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación en organismos acuáticos (Alloway, 2013; Tchounwou et al., 2012). Además, estos elementos pueden incorporarse a la cadena trófica y alcanzar niveles peligrosos para los seres humanos a través del consumo de peces y otros

organismos marinos, lo que refuerza la necesidad de su monitoreo constante (Burger & Gochfeld, 2011).

Un aspecto clave en la química analítica ambiental es la especiación química, entendida como la identificación de las diferentes formas en que un elemento puede presentarse en el medio. Este concepto es determinante, ya que la toxicidad y movilidad de un contaminante dependen de su estado químico y no únicamente de su concentración total. Por ejemplo, investigaciones previas han evidenciado que el arsénico en su forma trivalente (As III) presenta mayor toxicidad que su forma pentavalente (As V), mientras que el cromo hexavalente (Cr VI) es considerablemente más peligroso que el cromo trivalente (Cr III) (Smedley & Kinniburgh, 2002; Costa & Klein, 2006). Estas diferencias obligan a que el análisis químico en sistemas acuáticos incorpore técnicas capaces de distinguir entre especies químicas, lo que incrementa la complejidad del diagnóstico, pero también su precisión.

Relacionado con lo anterior, el concepto de biodisponibilidad constituye otro pilar fundamental. No todas las especies químicas presentes en el agua están disponibles para ser absorbidas por los organismos; su disponibilidad depende de factores como el pH, la salinidad, la temperatura y la presencia de materia orgánica. Según Förstner y Wittmann (2012), la interacción de los metales con sedimentos y partículas puede inmovilizarlos temporalmente o, por el contrario, favorecer su liberación bajo determinadas condiciones ambientales. Esta dinámica explica por qué dos cuerpos de agua con concentraciones similares de un contaminante pueden presentar efectos ecológicos distintos.

Asimismo, la diferenciación entre fases disueltas y particuladas es esencial en el análisis de sistemas acuáticos. En ambientes naturales, muchos contaminantes no se encuentran exclusivamente en solución, sino que pueden adsorberse a partículas o sedimentos, lo que influye en su transporte, distribución y persistencia. Estudios hidrológicos han demostrado que eventos como precipitaciones intensas o cambios en el caudal pueden provocar la resuspensión de sedimentos, incrementando temporalmente la concentración de contaminantes en la columna de agua (Jarvie et al., 2018). Este comportamiento evidencia que el análisis químico debe considerar tanto la fracción disuelta como la particulada para evitar interpretaciones incompletas del sistema.

Otro componente esencial de los fundamentos analíticos es la selección de los parámetros de estudio. Tradicionalmente, el diagnóstico de la calidad del agua se ha basado en indicadores fisicoquímicos como pH, conductividad, turbidez, sólidos suspendidos y

oxígeno disuelto. Estos parámetros permiten caracterizar el estado general del sistema y detectar alteraciones significativas. No obstante, investigaciones recientes han demostrado que el cumplimiento de estos indicadores no garantiza necesariamente la ausencia de riesgos, ya que pueden existir contaminantes químicos o biológicos no detectados mediante estos análisis convencionales (Chapman, 1996; WHO, 2017). Esta limitación ha impulsado la incorporación de enfoques más integrales que incluyan contaminantes emergentes y biomarcadores.

El análisis del estado químico de los sistemas acuáticos se fundamenta en la evaluación de una serie de parámetros fisicoquímicos que permiten caracterizar la calidad del agua y detectar posibles alteraciones derivadas de procesos naturales o antrópicos. Estos indicadores no solo ofrecen una visión general del sistema, sino que constituyen la base para la toma de decisiones en el ámbito ambiental. En este sentido, la sistematización de estos parámetros resulta fundamental para comprender su función dentro del diagnóstico químico del agua.

Tabla 1

Parámetros fisicoquímicos clave en la evaluación de la calidad del agua

Parámetro	Descripción	Importancia ambiental	Unidad de medida
pH	Nivel de acidez o alcalinidad del agua	Determina condiciones químicas del medio	Escala logarítmica
Conductividad	Capacidad del agua para conducir electricidad	Indica presencia de sales disueltas	μS/cm
Oxígeno disuelto	Cantidad de oxígeno disponible en el agua	Esencial para la vida acuática	mg/L
Turbidez	Grado de opacidad del agua	Indica presencia de partículas suspendidas	NTU
Sólidos suspendidos	Partículas no disueltas en el agua	Afectan la penetración de luz	mg/L
Temperatura	Nivel térmico del agua	Influye en reacciones químicas y biológicas	°C

Nota. Elaboración propia con base en Chapman (1996) y WHO (2017).

La sistematización de estos parámetros permite comprender que la calidad del agua no puede ser evaluada a partir de un único indicador, sino mediante la interacción de múltiples variables que reflejan el estado del sistema. Sin embargo, aunque estos parámetros constituyen la base del análisis convencional, estudios recientes han demostrado que su cumplimiento no garantiza la ausencia de contaminantes emergentes, lo que ha impulsado la evolución de la química analítica hacia enfoques más integrales y sensibles.

En este sentido, la química analítica moderna ha evolucionado hacia la integración de herramientas avanzadas de monitoreo que permiten obtener información más detallada y en tiempo real. Tecnologías como la espectrometría de masas acoplada a plasma inductivamente acoplado (ICP-MS) y los sistemas optofluídicos han demostrado una alta sensibilidad para la detección de contaminantes a niveles traza, lo que resulta fundamental en estudios ambientales donde pequeñas concentraciones pueden tener efectos significativos (Cui et al., 2018; Wang et al., 2019). Estas innovaciones no solo mejoran la precisión analítica, sino que también permiten acercar el proceso de medición al entorno natural, reduciendo el tiempo entre la toma de muestra y la obtención de resultados.

De igual manera, la selección del método analítico debe considerar la naturaleza de la muestra y los objetivos del estudio. La preparación de muestras, que incluye procesos como digestión ácida o extracción, es una etapa crítica que puede influir en la recuperación y precisión de los resultados. Según Welz y Sperling (1999), una adecuada preparación de la muestra es indispensable para eliminar interferencias y garantizar la confiabilidad del análisis, especialmente en matrices complejas como tejidos biológicos o sedimentos.

Un elemento transversal en los fundamentos de la química analítica en sistemas acuáticos es el diseño del muestreo. La representatividad de las muestras es determinante para la validez del diagnóstico ambiental. Autores como Keith (1991) destacan que un muestreo inadecuado puede generar errores significativos, independientemente de la precisión del método analítico utilizado. En sistemas dinámicos, como ríos o estuarios, es necesario considerar la variabilidad temporal y espacial mediante estrategias de muestreo que capturen adecuadamente los cambios en la composición química del agua.

En conjunto, estos fundamentos evidencian que la química analítica aplicada a sistemas acuáticos no es una disciplina aislada, sino un componente esencial en la comprensión de los procesos ambientales. Su correcta aplicación permite transformar datos químicos en información relevante para la gestión sostenible de los recursos hídricos y marinos, contribuyendo así a la protección de los ecosistemas y la salud humana.

Dinámica ambiental y bioacumulación de contaminantes en sistemas marinos y estuarinos

La dinámica ambiental de los contaminantes en sistemas marinos y estuarinos constituye uno de los ejes centrales para comprender el verdadero alcance del diagnóstico químico. No basta

con identificar la presencia de una sustancia en el agua o en los sedimentos; es indispensable analizar cómo ingresa al sistema, de qué manera se transforma, en qué compartimentos se distribuye y bajo qué condiciones puede ser transferida a los organismos vivos. Esta visión ha sido sostenida por diversos autores al señalar que los ecosistemas acuáticos funcionan como escenarios de interacción continua entre procesos físicos, químicos y biológicos, donde los contaminantes experimentan cambios de movilidad, reactividad y disponibilidad a lo largo del tiempo (Libes, 2009; Stumm & Morgan, 2012). En consecuencia, la química analítica aplicada al ambiente no puede desligarse de la dinámica ecológica del medio en el que actúan los analitos.

En ambientes marinos y estuarinos, esta complejidad se intensifica debido a la convergencia entre aguas continentales y marinas. Los estuarios, en particular, representan zonas de mezcla donde la salinidad, el pH, la turbidez, la carga orgánica y la hidrodinámica varían de forma considerable, generando condiciones que favorecen procesos simultáneos de disolución, precipitación, adsorción, desorción, sedimentación y resuspensión. Según Bianchi (2007), estos sistemas son especialmente sensibles a la acumulación de contaminantes porque combinan alta productividad biológica con intensa actividad humana, incluyendo descargas urbanas, industriales, agrícolas y portuarias. Desde esta perspectiva, el Golfo de Guayaquil puede entenderse como un espacio donde la lectura química del ambiente requiere necesariamente considerar la movilidad y transformación de los contaminantes dentro de una red dinámica de interacciones.

Uno de los primeros aspectos que debe abordarse en esta dinámica es el origen de los contaminantes. La literatura distingue, de forma general, entre fuentes naturales y fuentes antropogénicas. Las primeras comprenden procesos como meteorización de rocas, actividad volcánica, erosión y liberación natural de minerales al agua y al sedimento. Las segundas incluyen actividades industriales, combustión de combustibles fósiles, vertidos domésticos, explotación petrolera, uso de fertilizantes y plaguicidas, tráfico marítimo y descarga de aguas residuales. En el caso de los metales y metaloides tóxicos, se ha señalado que sus principales fuentes en el ambiente acuático incluyen la minería y fundición, los residuos industriales, el uso de preservantes de madera, los fertilizantes, los lodos de depuradora, los vertidos municipales y la quema de carbón, entre otros (Nriagu & Pacyna, 1988; Bradl, 2005). Esta distinción es importante porque permite interpretar si una concentración detectada responde a condiciones geológicas de fondo o a presiones antrópicas que alteran el equilibrio natural del sistema.

Sin embargo, el ingreso de un contaminante al ambiente no determina por sí solo su impacto. Una vez incorporado al sistema acuático, el contaminante inicia una trayectoria ambiental condicionada por sus propiedades químicas y por las características del medio receptor. Los estudios sobre metales en ecosistemas acuáticos han mostrado que factores como salinidad, alcalinidad, dureza, materia orgánica disuelta y potencial redox influyen decisivamente en su movilidad (Förstner & Salomons, 1980; Tessier & Turner, 1995). En estuarios, por ejemplo, el aumento de salinidad puede modificar la competencia iónica y favorecer la liberación de ciertos metales adsorbidos a partículas; al mismo tiempo, los cambios de pH pueden incrementar o disminuir su solubilidad. Esta interacción explica por qué la evaluación de un contaminante no puede hacerse como un dato fijo, sino como una expresión de equilibrio químico en transformación permanente.

Dentro de esta dinámica, los sedimentos desempeñan un papel fundamental. Lejos de ser simples depósitos pasivos, funcionan como reservorios temporales o permanentes de contaminantes. Muchos metales pesados y nutrientes se asocian rápidamente a material particulado fino, arcillas, óxidos de hierro y manganeso o materia orgánica sedimentable, lo que reduce inicialmente su presencia en la fase disuelta, pero no elimina su potencial de riesgo. De hecho, investigaciones previas han mostrado que bajo determinadas condiciones —como disminución del oxígeno, cambios de pH, bioturbación o eventos hidrodinámicos intensos— estos sedimentos pueden liberar nuevamente contaminantes hacia la columna de agua (Burton, 2002; Eggleton & Thomas, 2004). Desde el punto de vista analítico, esto implica que una concentración baja en el agua no siempre refleja ausencia de contaminación, sino posible almacenamiento previo en fases sólidas.

La relación entre contaminantes y materia particulada también fue evidenciada en estudios de monitoreo de fósforo en sistemas fluviales, donde se observó que la fracción dominante correspondía al fósforo particulado total, asociado con procesos de arrastre, lavado de suelos y resuspensión sedimentaria. Aunque se trata de nutrientes y no de metales, el principio ambiental es transferible: los contaminantes pueden desplazarse entre fracciones disueltas y particuladas según cambien las condiciones del sistema, y esta variación altera su potencial ecológico (Fones et al., 2020). En consecuencia, la dinámica ambiental de los contaminantes exige que el análisis químico se diseñe para captar esa movilidad interfaccional y no solo una condición puntual de la muestra.

Otro concepto indispensable en esta parte es la persistencia ambiental. Algunos contaminantes son rápidamente transformados, degradados o removidos del sistema; otros,

en cambio, presentan alta estabilidad y permanecen durante largos periodos en agua, sedimentos y organismos. Los metales pesados y metaloides pertenecen al segundo grupo, ya que no son biodegradables y pueden mantenerse circulando entre distintos compartimentos ambientales durante años o décadas (Kabata-Pendias, 2011). Esta persistencia explica por qué incluso entradas intermitentes o de baja intensidad pueden producir acumulaciones significativas a mediano y largo plazo. En términos de sostenibilidad marina, este rasgo adquiere una relevancia crítica, porque los efectos del contaminante pueden extenderse más allá del episodio de vertido y consolidarse como una presión crónica sobre el ecosistema.

A ello se suma el fenómeno de bioacumulación, entendido como el proceso mediante el cual un organismo incorpora un contaminante desde el ambiente o desde el alimento a una velocidad mayor que la de su eliminación. Este proceso ha sido ampliamente documentado en peces y otros organismos acuáticos expuestos a metales tóxicos, especialmente cuando las concentraciones ambientales son persistentes o cuando existen formas químicas fácilmente absorbibles (Rainbow, 2002; Luoma & Rainbow, 2008). Los tejidos que suelen concentrar mayores cantidades son hígado, riñón, branquias y músculo, aunque la distribución depende del tipo de metal, la especie, la edad del organismo y sus hábitos tróficos. Esta variabilidad obliga a que el diagnóstico ambiental no se concentre exclusivamente en el agua, sino que incorpore biomonitoreo como estrategia para entender la transferencia real del contaminante dentro del ecosistema.

En la revisión reciente sobre peces de diferentes continentes, se documentó que arsénico, cromo, cadmio, plomo y mercurio presentan distintos patrones de acumulación en tejidos musculares y órganos internos, con casos en los que los valores superan límites permisibles para consumo humano. Ese estudio mostró, además, que la secuencia general de acumulación observada fue $As > Cr > Pb > Cd > Hg$, aunque la magnitud variaba según la especie, la región y el tipo de ambiente analizado (Tolkou, Toubanaki, & Kyzas, 2023). Tales resultados confirman que los organismos acuáticos funcionan como indicadores integrados de exposición ambiental, ya que reflejan no solo la presencia del contaminante, sino su incorporación efectiva a la biota.

Cuando la bioacumulación se proyecta a lo largo de la cadena alimentaria, aparece la biomagnificación. Este proceso ocurre cuando la concentración de una sustancia aumenta progresivamente en organismos de niveles tróficos superiores, de modo que depredadores y consumidores humanos pueden recibir cargas más elevadas que las presentes en el agua o en

organismos basales. El caso del mercurio, especialmente en su forma metilada, ha sido uno de los ejemplos más estudiados, porque se transfiere con gran eficacia a través de la red trófica y puede alcanzar concentraciones peligrosas en peces de consumo frecuente (Boening, 2000; Mason et al., 2012). Desde el enfoque del diagnóstico químico, esto obliga a abandonar cualquier interpretación simplista basada exclusivamente en la matriz acuosa y a incorporar el análisis de tejidos biológicos cuando se evalúa riesgo ecológico o sanitario.

La magnitud de estos procesos depende también de las características ecológicas de cada especie. Peces bentónicos, filtradores, omnívoros o depredadores pueden presentar perfiles de acumulación distintos porque exploran nichos diferentes y se exponen a rutas específicas de incorporación. Estudios sobre bioacumulación de metales en peces han señalado que la dieta, el metabolismo, la edad, la etapa de desarrollo y la tasa de crecimiento son variables que modulan la concentración final del contaminante en los tejidos (Jeziarska & Witeska, 2006; Burger et al., 2007). En términos prácticos, esto significa que un monitoreo químico bien diseñado debe seleccionar cuidadosamente las especies bioindicadoras, considerando no solo su disponibilidad, sino su relevancia ecológica y trófica dentro del sistema.

Además de los efectos sobre peces y consumidores humanos, la dinámica de los contaminantes influye de manera decisiva sobre el funcionamiento del ecosistema. Concentraciones elevadas de nutrientes, por ejemplo, pueden favorecer eutrofización, proliferación algal y reducción del oxígeno disuelto; concentraciones elevadas de metales, por su parte, pueden afectar procesos fisiológicos, reproductivos y enzimáticos de múltiples especies. La revisión sobre metales tóxicos en peces subraya que el arsénico puede alterar branquias, hígado y reproducción; el plomo afecta funciones fisiológicas y bioquímicas; y el mercurio, incluso en concentraciones bajas, presenta elevada peligrosidad para organismos acuáticos y humanos (Tolkou et al., 2023). Estos hallazgos muestran que la dinámica ambiental de los contaminantes no es un fenómeno abstracto, sino una secuencia de procesos con consecuencias ecológicas observables y acumulativas.

En sistemas sujetos a intensa intervención humana, como corredores petroleros, áreas portuarias o zonas con alta carga residencial y urbana, esta dinámica puede incluir además componentes microbiológicos. El estudio sobre agua almacenada en embarcaciones del delta del Níger evidenció que, incluso cuando varios parámetros fisicoquímicos permanecen dentro de rangos aceptables, pueden detectarse bacterias oportunistas con rasgos de virulencia, lo que indica que el sistema de almacenamiento y distribución también forma parte de la trayectoria ambiental del riesgo (Ogunkeyede, Urhibo, & Okorhi-Damisa, 2026). Esta

observación amplía la noción de dinámica contaminante, mostrando que no solo los compuestos químicos se desplazan y transforman, sino también los organismos y sus interacciones con superficies, biofilms y condiciones de almacenamiento.

En años recientes, el monitoreo en alta frecuencia y las plataformas miniaturizadas han permitido observar mejor esta movilidad. Los sistemas optofluídicos aplicados al monitoreo marino han mostrado potencial para medir nutrientes, pH, oxígeno disuelto y ciertos metales en forma autónoma y casi en tiempo real, facilitando el seguimiento de cambios rápidos en el sistema (Wang et al., 2020). Este avance es relevante porque muchos eventos de contaminación o movilización de analitos son pulsátiles y pueden pasar desapercibidos bajo esquemas de muestreo espaciados. La dinámica ambiental, por tanto, no solo se estudia conceptualmente; también exige tecnologías analíticas que acompañen la velocidad real con que cambian los ecosistemas.

En síntesis, la dinámica ambiental y la bioacumulación de contaminantes en sistemas marinos y estuarinos dependen de una red compleja de factores: origen del contaminante, propiedades químicas, interacción con agua y sedimentos, condiciones fisicoquímicas del medio, rutas biológicas de incorporación y posición trófica de los organismos. Comprender esta red es indispensable para que el diagnóstico químico tenga sentido ecológico. Sin esta comprensión, el análisis corre el riesgo de reducirse a un inventario estático de concentraciones. Con ella, en cambio, se convierte en una herramienta para reconstruir trayectorias de contaminación, anticipar riesgos y sustentar estrategias de sostenibilidad marina.

Métodos analíticos para el diagnóstico ambiental

El diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos depende en gran medida de la solidez metodológica con que se ejecuta el proceso analítico. En química ambiental, el valor científico de un resultado no proviene únicamente del instrumento utilizado, sino de la articulación coherente entre muestreo, preservación, preparación de muestra, separación, detección, cuantificación e interpretación. Diversos autores han insistido en que el método analítico debe seleccionarse de acuerdo con la naturaleza de la matriz, el analito de interés, el nivel de concentración esperado y el objetivo del estudio, ya sea vigilancia rutinaria, confirmación de contaminación, evaluación de riesgo o monitoreo de tendencias espaciales y temporales (Skoog et al., 2014; Harris, 2016). En consecuencia, los métodos analíticos para el diagnóstico ambiental no pueden concebirse como procedimientos neutros o

intercambiables, sino como decisiones técnicas que condicionan directamente la calidad de la evidencia producida.

En matrices acuáticas, el primer componente metodológico crítico es el muestreo. La representatividad de la muestra determina la validez de todo el proceso posterior, razón por la cual el diseño muestral debe responder a la heterogeneidad del sistema estudiado. Keith (1991) ya advertía que gran parte del error analítico en estudios ambientales no se origina en el laboratorio, sino en una toma de muestra deficiente. Esta observación conserva plena vigencia en cuerpos de agua sometidos a variabilidad hidrológica, aportes intermitentes de contaminantes y cambios físico-químicos rápidos. En el caso del monitoreo de fósforo en el río Itchen, el uso de muestreadores automáticos con recolección diaria permitió evidenciar episodios prolongados de concentraciones elevadas que no habían sido captados por el monitoreo regulatorio ocasional, lo cual demuestra que la frecuencia de muestreo puede alterar de manera sustancial la lectura del estado ambiental (Fones et al., 2020). Desde la química analítica aplicada, este hallazgo confirma que el método comienza en el campo y no en la etapa instrumental.

Además del diseño temporal, el muestreo ambiental requiere estrategias de preservación que minimicen la alteración de los analitos antes del análisis. Las aguas naturales y residuales constituyen matrices químicamente activas, donde los compuestos pueden degradarse, adsorberse a partículas, volatilizarse o transformarse microbiológicamente durante el transporte y almacenamiento. Por esta razón, se emplean prácticas como refrigeración, acidificación, uso de conservantes y filtración selectiva, según el tipo de analito y la fracción a determinar. En estudios de epidemiología basada en aguas residuales, por ejemplo, se ha destacado que la selección de biomarcadores estables en la matriz resulta decisiva, debido a que los compuestos deben resistir el tránsito por el sistema de alcantarillado y mantenerse detectables hasta su cuantificación (Pocurull et al., 2020). Esta exigencia técnica resulta igualmente aplicable al monitoreo ambiental general, donde la estabilidad del analito condiciona la confiabilidad de la inferencia retrospectiva.

Una vez obtenida y preservada la muestra, la preparación analítica ocupa un lugar decisivo. Las matrices acuáticas pueden contener sales, materia orgánica disuelta, partículas coloidales y microorganismos que interfieren con la determinación instrumental, especialmente cuando se trabaja con concentraciones traza. Por ello, la preparación de la muestra no puede considerarse una fase secundaria, sino una parte sustantiva del método. En el caso de metales y metaloides, se han reportado con frecuencia procedimientos de digestión con

combinaciones de peróxido de hidrógeno y ácidos minerales, así como digestión asistida por microondas, debido a su capacidad para liberar los analitos desde tejidos biológicos y otras matrices complejas con buenos porcentajes de recuperación (Resma et al., 2023; Tolkou et al., 2023). El objetivo de esta etapa es convertir la muestra en una forma compatible con la técnica de detección, eliminando interferencias sin comprometer la integridad del analito.

La separación entre fracciones disueltas y particuladas constituye otro componente metodológico indispensable. En química ambiental, una concentración total puede ocultar diferencias importantes de movilidad, biodisponibilidad o riesgo ecológico. Por ello, técnicas simples como la filtración adquieren gran relevancia, ya que permiten distinguir entre fracciones operacionales con distinto significado ambiental. Gimbert et al. (2007) y Worsfold et al. (2016) han explicado que la distinción entre fracción filtrable y fracción particulada resulta clave para interpretar la dinámica del fósforo y de otros analitos en aguas naturales. Esta misma lógica fue adoptada en el estudio del río Itchen, donde se analizaron fracciones como fósforo reactivo filtrable, fósforo total filtrable, fósforo total y fósforo particulado total, revelando perfiles temporales complejos imposibles de captar si solo se hubiera medido un valor global (Fones et al., 2020). En consecuencia, la elección de la fracción a medir forma parte del método tanto como el detector utilizado.

Dentro del conjunto de técnicas instrumentales convencionales, la espectrometría de absorción atómica ha ocupado históricamente un lugar destacado en la determinación de metales en matrices ambientales. Su robustez, sensibilidad y relativa accesibilidad la han convertido en un referente en estudios de vigilancia de plomo, cadmio, mercurio y otros elementos de interés toxicológico. Las variantes con horno de grafito y vapor frío han permitido ampliar su capacidad para el análisis de niveles bajos y especies específicas, especialmente en tejidos biológicos y muestras de agua con contaminación moderada (Welz & Sperling, 1999; Harris, 2016). En estudios recientes sobre contaminación metálica en peces, la absorción atómica siguió empleándose como técnica de referencia para Pb y otros metales, lo que confirma su vigencia dentro del repertorio analítico ambiental (Tolkou et al., 2023).

A la par de esta tradición metodológica, las técnicas basadas en plasma inductivamente acoplado han adquirido una importancia creciente por su capacidad multielemental y su elevada sensibilidad. La ICP-OES permite cuantificar simultáneamente varios metales con buena precisión en matrices acuosas y extractos, mientras que la ICP-MS amplía aún más el poder analítico al operar en niveles de traza y ultratrazas. En la literatura reciente sobre metales

en peces y otras matrices biológicas, estas técnicas aparecen asociadas al análisis de As, Cr, Cd y otros contaminantes de alta relevancia, precisamente porque facilitan la detección de concentraciones bajas con adecuada selectividad (Resma et al., 2023; Tolkou et al., 2023). Su ventaja no reside únicamente en la sensibilidad, sino en la posibilidad de abordar problemas analíticos complejos con mayor rapidez y cobertura multielemental que los métodos monoanalito tradicionales.

Cuando el objetivo no es solo cuantificar un elemento, sino diferenciar sus especies químicas, entran en juego técnicas separativas acopladas. La cromatografía líquida de alta resolución vinculada a detectores de plasma o espectrometría de masas permite distinguir especies químicas con diferente toxicidad, como ocurre con arsénico y cromo. Este tipo de aproximación resulta especialmente pertinente en estudios ambientales donde la concentración total no refleja adecuadamente el riesgo real. La propia revisión de Tolkou et al. (2023) subraya que la especiación es esencial para comprender los efectos de As y Cr, debido a las diferencias de toxicidad entre As(III) y As(V), o entre Cr(VI) y Cr(III). Desde la perspectiva metodológica, esto implica que el avance del diagnóstico ambiental no depende solo de mejorar límites de detección, sino también de perfeccionar la capacidad de discriminación química.

En el análisis de nutrientes y parámetros de respuesta rápida, las metodologías colorimétricas y espectrofotométricas continúan siendo fundamentales. Su valor reside en la estabilidad del principio químico, la relativa simplicidad operativa y la posibilidad de acoplarse a sistemas automatizados. Nagul et al. (2015) y Murphy y Riley (1962) ya habían consolidado la importancia del método del azul de molibdeno para ortofosfato, mientras que estudios más recientes han demostrado cómo estas bases clásicas pueden integrarse en plataformas miniaturizadas y sistemas automáticos de monitoreo. En el caso del monitoreo marino autónomo, Wang et al. (2020) describen múltiples aplicaciones de plataformas optofluídicas para nitrato, nitrito, fosfato, silicato, pH y oxígeno disuelto, a partir de reacciones colorimétricas y detección espectrofotométrica en chips de pequeño tamaño. El interés de estas soluciones no solo es técnico, sino estratégico, porque acercan la medición al lugar donde se produce la alteración ambiental.

Las plataformas optofluídicas, en particular, representan una línea de innovación con gran potencial para la sostenibilidad marina. Al integrar microfluidos y fotónica en un mismo dispositivo, permiten reducir el volumen de muestra y reactivos, mejorar la portabilidad y facilitar el monitoreo autónomo e in situ. Wang et al. (2020) reportan límites de detección

muy bajos para nutrientes y metales en sistemas miniaturizados, lo que demuestra que la miniaturización no necesariamente implica pérdida de desempeño analítico. Este aspecto es especialmente relevante en ambientes marinos y costeros, donde el análisis de laboratorio puede verse limitado por tiempos de transporte, costos logísticos y alteración de la muestra antes de llegar al detector. La posibilidad de medir en el propio sitio de interés transforma el enfoque del diagnóstico, haciéndolo más oportuno y compatible con la dinámica real del sistema.

En el caso de metales en agua de mar, los desafíos metodológicos son todavía mayores debido a la salinidad elevada y a los efectos de matriz asociados. El estudio desarrollado por Guijarro-Ramírez, Sánchez y Todolí (2024) sobre la cuantificación de Ag, Cd, Cu, Ni y Pb en agua de mar mediante extracción DLLAPE e ICP-OES muestra con claridad esta dificultad. Los autores señalan que la matriz salina induce interferencias espectrales y de emisión, lo que obliga a incorporar una etapa previa de preparación y separación del analito respecto del fondo inorgánico. La propuesta metodológica alcanzó límites de cuantificación del orden de 0.14 a 0.4 $\mu\text{g/L}$ y recuperaciones próximas al 100% para la mayoría de elementos, lo que evidencia que la combinación adecuada entre preparación de muestra e instrumentación puede resolver limitaciones inherentes a matrices marinas complejas. Este caso ilustra un principio metodológico crucial: la calidad del resultado depende de la compatibilidad entre matriz, pretratamiento e instrumento.

Otra línea metodológica relevante es la cromatografía iónica para el seguimiento de contaminantes específicos en medios acuosos, especialmente cuando se requiere diferenciar especies aniónicas o trabajar en presencia de alta salinidad. Clarke, Bui-Le y Hallett (2020) desarrollaron un método para monitorear aniones $[\text{NTf}_2]^-$ en aguas puras y salinas, mostrando que la cromatografía iónica puede reducir tiempos de análisis, mejorar la forma del pico cromatográfico y alcanzar bajos límites de detección incluso en muestras comparables al agua de mar. Aunque el analito estudiado no corresponde a un metal pesado clásico, el interés de esta metodología radica en que demuestra la adaptabilidad de la química analítica a contaminantes emergentes y matrices difíciles, una exigencia creciente en la vigilancia ambiental contemporánea.

Junto a los métodos instrumentales de laboratorio, las técnicas rápidas, portátiles y de menor costo han ganado relevancia para tareas de tamizaje, vigilancia comunitaria y evaluación preliminar. En este campo destacan los desarrollos basados en teléfonos inteligentes, sensores colorimétricos y aproximaciones electroquímicas. Hernández Cruz y Santacruz

Ortega (2023) explican que los smartphones se han convertido en herramientas de apoyo para la detección colorimétrica de metales en agua, permitiendo cuantificar cambios de color asociados a sensores moleculares o películas sensoras. Aunque estos métodos no igualan la precisión de equipos como AAS o ICP-MS, su valor reside en la accesibilidad, portabilidad y potencial para ampliar la cobertura del monitoreo en contextos con infraestructura limitada. La química analítica ambiental encuentra aquí una dimensión democratizadora, en la medida en que acerca ciertas formas de detección a usuarios no especializados.

En esa misma dirección, las técnicas electroquímicas han sido reconocidas como una alternativa prometedora para el diagnóstico ambiental por su rapidez, bajo costo y posibilidad de trabajo in situ. Diversas revisiones recientes destacan que ofrecen ventajas para la detección de metales en agua frente a técnicas instrumentales más costosas y menos transferibles al campo (Gumpu et al., 2015; Tolkou et al., 2023). Su valor metodológico es notable cuando se busca vigilancia continua, alerta temprana o evaluación preliminar antes de aplicar técnicas confirmatorias de mayor complejidad. Así, el repertorio analítico actual no debe pensarse como una competencia entre métodos, sino como una arquitectura de niveles donde técnicas portátiles, miniaturizadas y de alta resolución pueden complementarse según la finalidad del estudio.

Otro elemento metodológico indispensable es el uso de biomarcadores. En epidemiología basada en aguas residuales, la validez del cálculo retrospectivo depende de que el biomarcador seleccionado sea estable, específico y excretado en proporciones conocidas. Pocurull et al. (2020) subrayan que la metodología WBE se apoya en biomarcadores medibles en aguas de entrada a estaciones depuradoras, cuantificados mediante cromatografía y espectrometría de masas tras una etapa de preconcentración y limpieza, generalmente por extracción en fase sólida. Aunque este enfoque se ha desarrollado con fuerza para drogas y fármacos, su lógica metodológica es muy valiosa para la química ambiental general, porque muestra cómo una señal química en el agua puede emplearse para reconstruir procesos de presión antrópica o exposición colectiva. Lo importante aquí es que el método no se define solo por el instrumento, sino por la pertinencia del biomarcador escogido.

La dimensión de control de calidad atraviesa todas estas metodologías. Un método analítico solo adquiere valor diagnóstico cuando su desempeño ha sido validado a través de linealidad, precisión, exactitud, recuperación, límites de detección y cuantificación, además de controles internos y externos adecuados. En la validación del método DLLAPE-ICP-OES para agua de mar, por ejemplo, se reportaron incertidumbres expandidas menores al 6% para la mayoría

de los elementos, con la excepción de Ag, lo que permitió confirmar la idoneidad del procedimiento para muestras reales de zonas costeras de Alicante y San Juan (Guijarro-Ramírez et al., 2024). Este tipo de información no es un complemento estadístico secundario, sino la base que permite confiar en el dato como evidencia científica útil para la gestión ambiental.

También resulta indispensable recordar que ningún método analítico es universalmente suficiente. La complejidad de los sistemas marinos y estuarinos obliga a combinar enfoques de campo y laboratorio, técnicas clásicas y emergentes, análisis de agua y biomonitoreo, estrategias de alta frecuencia y campañas puntuales. La selección metodológica correcta depende del problema a resolver: una evaluación de bioacumulación requerirá análisis de tejidos; un evento de contaminación aguda puede demandar monitoreo in situ y respuestas rápidas; la vigilancia normativa puede apoyarse en esquemas periódicos con validación instrumental robusta. Esta diversidad metodológica no debilita el diagnóstico, sino que lo fortalece, siempre que exista una lógica integradora y científicamente justificada.

Por tanto, los métodos analíticos para el diagnóstico ambiental deben entenderse como un sistema articulado de decisiones técnicas orientadas a transformar una matriz compleja en información confiable, interpretable y útil para la sostenibilidad. Su éxito depende de la coherencia entre muestreo, preservación, preparación, separación, detección, validación y lectura ecológica del resultado. Bajo esa perspectiva, la química analítica deja de ser una simple operación instrumental y se convierte en una tecnología del conocimiento ambiental, capaz de traducir señales químicas del agua, los sedimentos y los organismos en evidencia para la protección de los ecosistemas marinos y costeros.

Biomarcadores y evaluación del impacto ambiental

o para comparar órganos, especies o sitios de muestreo según la intensidad de la respuesta biológica registrada. Beliaeff y Burgeot (2002) propusieron este enfoque para facilitar la interpretación conjunta de respuestas complejas, evitando lecturas fragmentadas de biomarcadores aislados. La revisión de Tolkou et al. (2023) alude igualmente al IBRv2 como una herramienta útil para distinguir órganos más afectados y asociar respuestas biológicas con niveles de acumulación de metales y metaloides. En términos diagnósticos, estos índices permiten pasar del dato individual al patrón de afectación, lo que resulta especialmente útil en estudios comparativos o de monitoreo longitudinal.

No obstante, la evaluación del impacto ambiental no se limita a metales pesados. Los sistemas acuáticos también pueden albergar contaminantes biológicos y microbiológicos capaces de generar respuestas funcionales y riesgos sanitarios. En el estudio realizado sobre agua almacenada en houseboats del delta del Níger, Ogunkeyede, Urhibo y Okorhi-Damisa (2026) identificaron aislamientos bacterianos con rasgos fenotípicos de virulencia, incluyendo actividad hemolítica, producción de lipasa, gelatinasa y DNasa. Aunque estos indicadores pertenecen al campo microbiológico, su lógica es comparable a la de los biomarcadores ecotoxicológicos: revelan que la sola presencia del organismo no agota la evaluación del riesgo, sino que es necesario examinar su potencial funcional. Esta perspectiva refuerza la idea de que la calidad ambiental debe ser interpretada desde una integración entre química, biología y salud pública.

Las enzimas extracelulares y rasgos de virulencia hallados en ese estudio son especialmente ilustrativos porque muestran cómo un sistema con parámetros fisicoquímicos aparentemente conformes puede seguir albergando amenazas de otro orden. La detección de beta-hemólisis, gelatinasa o DNasa en algunos aislamientos no indica simplemente presencia bacteriana, sino capacidad potencial de colonización, persistencia o daño biológico. Bajo esta lógica, la evaluación ambiental contemporánea no puede restringirse a medir contaminantes químicos o a verificar límites normativos. Debe avanzar hacia una interpretación funcional del ambiente, donde cada señal analítica se relacione con una posible respuesta de organismos y comunidades expuestas.

En los ecosistemas marinos y estuarinos, los biomarcadores adquieren además un valor preventivo. Diversos efectos contaminantes se manifiestan primero a nivel molecular o celular y solo más tarde alcanzan niveles de alteración poblacional, comunitaria o ecosistémica. Hook, Gallagher y Batley (2014) subrayan que la ventaja principal de los biomarcadores radica en esa capacidad de anticipación, ya que permiten detectar perturbaciones subletales antes de que se vuelvan irreversibles o visibles en la estructura del ecosistema. Desde el punto de vista de la sostenibilidad marina, este aspecto es decisivo: actuar sobre señales tempranas resulta mucho más eficaz y menos costoso que intervenir cuando el deterioro ya se ha consolidado.

A esto se suma la relación entre biomarcadores y seguridad alimentaria. Cuando los contaminantes se acumulan en peces y otros organismos de consumo, la evaluación del impacto deja de ser exclusivamente ecológica y se convierte también en una cuestión de salud humana. Burger y Gochfeld (2005) señalaron que los peces contaminados funcionan como

vectores de exposición para poblaciones humanas, sobre todo en comunidades con fuerte dependencia del recurso pesquero. La revisión de Tolkou et al. (2023) confirma esta preocupación al documentar numerosos casos en que concentraciones de As, Cr, Pb o Cd superan límites permisibles en especies de consumo. Bajo este marco, los biomarcadores no solo permiten reconocer daño en organismos acuáticos, sino también estimar implicaciones más amplias para la cadena alimentaria y el bienestar humano.

La integración entre química analítica y biomarcadores requiere, sin embargo, una lectura metodológica cuidadosa. Ningún biomarcador es suficiente por sí mismo, ya que las respuestas biológicas pueden estar influenciadas por edad, sexo, temperatura, salinidad, estado nutricional o estrés no químico. Por ello, autores como van Gestel y van Brummelen (1996) recomiendan interpretar biomarcadores dentro de baterías combinadas y en relación con datos químicos y contextuales del ambiente. Este criterio es especialmente pertinente en zonas estuarinas, donde las condiciones varían de manera marcada y podrían modificar la respuesta fisiológica incluso sin cambios significativos en la carga contaminante. El valor del biomarcador no reside en su aislamiento, sino en su integración dentro de un diseño analítico y ecológico coherente.

La evolución de las técnicas analíticas ha favorecido también la expansión de este campo. Las plataformas modernas permiten cuantificar proteínas, enzimas, productos de peroxidación lipídica, expresión génica y otras respuestas biológicas con mayor sensibilidad y menor tiempo de análisis. Esta ampliación metodológica fortalece la evaluación del impacto porque aproxima la química ambiental a la biología molecular, la fisiología y la toxicología. El resultado es un diagnóstico más completo, donde la contaminación deja de ser entendida como un dato químico aislado y pasa a ser interpretada como una presión que genera respuestas multiescales en los organismos y en el sistema.

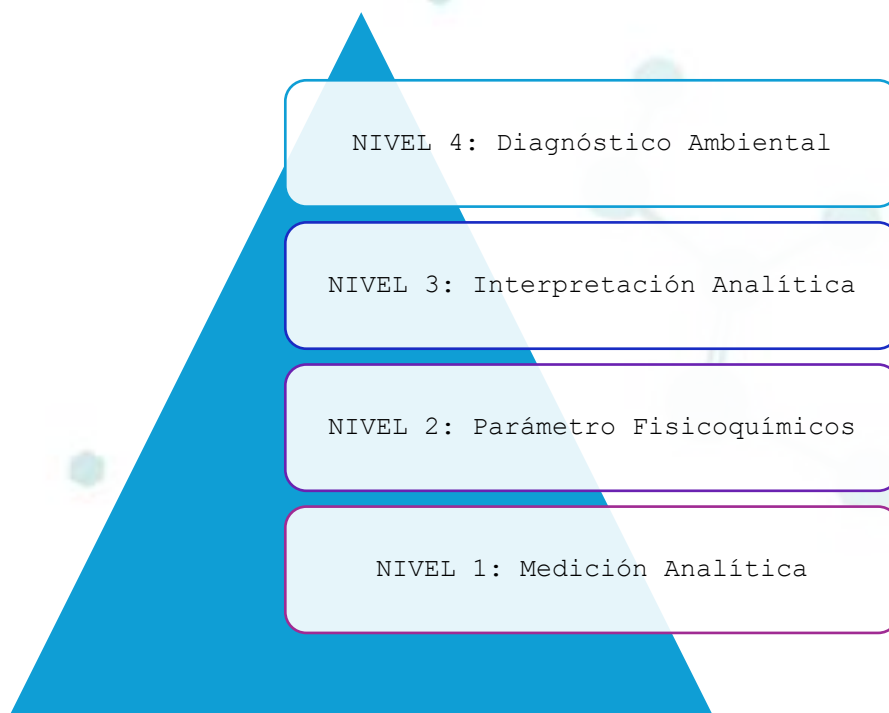
De este modo, la incorporación de biomarcadores e indicadores integrados en la evaluación del impacto ambiental permite completar el ciclo interpretativo del diagnóstico químico. El análisis del agua, de los sedimentos y de los tejidos aporta información sobre presencia, concentración y distribución de contaminantes; los biomarcadores añaden evidencia sobre exposición efectiva, respuesta fisiológica y riesgo biológico. Esta complementariedad resulta esencial para los ecosistemas marinos y estuarinos, donde la sostenibilidad depende no solo de reducir cargas contaminantes, sino también de comprender cómo esas cargas alteran la integridad funcional de la biota. Bajo esta perspectiva, la química analítica se consolida como

una disciplina que no solo mide el ambiente, sino que ayuda a interpretar el modo en que ese ambiente está siendo vivido por los organismos que lo habitan.

El análisis químico de sistemas acuáticos no debe ser entendido como un conjunto de procedimientos aislados, sino como un proceso estructurado en el que cada etapa contribuye a la obtención de resultados confiables y representativos. Desde la toma de muestra hasta la interpretación de los datos, la química analítica sigue una secuencia lógica que permite transformar una muestra ambiental en información científica útil. En este contexto, la representación gráfica del proceso analítico facilita la comprensión de su carácter integral y sistemático.

Figura 1

Proceso analítico en la evaluación química de sistemas acuáticos



Nota. Elaboración propia con base en Chapman (1996), Harris (2016) y Skoog et al. (2014), integrando el enfoque analítico en niveles para la evaluación de sistemas acuáticos.

La estructura presentada permite comprender que el diagnóstico de la calidad del agua es un proceso escalonado en el que cada nivel depende del anterior. La medición analítica proporciona los datos, los parámetros físicoquímicos organizan la información, la interpretación establece relaciones y el diagnóstico final sintetiza el estado del sistema. Esta visión jerárquica refuerza la idea de que la química analítica no se limita a la obtención de

valores, sino que implica un proceso de construcción de conocimiento que culmina en la comprensión integral del ambiente acuático.

Discusión crítica

El examen conjunto del corpus documental permite sostener que el diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos ya no puede organizarse bajo una lógica lineal, limitada a la medición aislada de parámetros fisicoquímicos o a la verificación puntual de cumplimiento normativo. La evidencia revisada muestra, más bien, que la calidad del agua debe interpretarse como el resultado de interacciones complejas entre contaminantes, matrices, organismos, procesos de transporte y condiciones de uso humano. Esta lectura exige un desplazamiento epistemológico importante: pasar de una química analítica centrada exclusivamente en la determinación de concentraciones hacia una química ambiental interpretativa, capaz de explicar trayectorias de contaminación, respuestas biológicas y posibles consecuencias sobre la sostenibilidad marina.

Uno de los aspectos más consistentes del corpus es la tensión entre conformidad analítica y seguridad ambiental real. El estudio de Ogunkeyede, Urhibo y Okorhi-Damisa (2026) resulta especialmente revelador en este punto, porque muestra que la aparente estabilidad fisicoquímica del agua almacenada en houseboats no impidió la detección de bacterias con rasgos de virulencia. Esta situación obliga a cuestionar la suficiencia de los parámetros tradicionales como criterio exclusivo de evaluación. Si bien variables como pH, turbidez, conductividad o sólidos suspendidos siguen siendo indispensables para caracterizar la matriz, la evidencia indica que su cumplimiento no garantiza por sí solo ausencia de riesgo microbiológico ni ecológico. Desde una perspectiva crítica, esto implica que muchos esquemas de monitoreo continúan operando con una visión reduccionista del ambiente acuático, donde lo medible de forma rutinaria se confunde con lo ambientalmente decisivo.

Esa misma limitación se advierte en el plano temporal del monitoreo. El trabajo de Fones et al. (2020) en el río Itchen puso en evidencia que los programas regulatorios basados en muestreos ocasionales pueden omitir episodios prolongados de concentraciones elevadas de fósforo biológicamente disponible. El problema no es menor, porque dichos episodios pueden producir impactos ecológicos significativos aun cuando no aparezcan reflejados en los promedios o registros oficiales. Esta observación tiene una implicación metodológica profunda para contextos marinos y estuarinos: no solo importa qué se mide, sino cuándo y con qué frecuencia se mide. Si el muestreo no acompaña la dinámica real del sistema, el

diagnóstico puede resultar técnicamente correcto, pero ecológicamente insuficiente. En consecuencia, la validez de la evidencia ambiental depende tanto de la calidad instrumental como de la arquitectura temporal del monitoreo.

Otro eje crítico del corpus se relaciona con la naturaleza de los contaminantes prioritarios. La revisión de Tolkou, Toubanaki y Kyzas (2023) confirma que arsénico, cromo, cadmio, plomo y mercurio continúan representando una amenaza estructural para los ecosistemas acuáticos y para la salud humana debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación. Sin embargo, lo más relevante no es solo esa constatación, sino el hecho de que la peligrosidad de estos elementos no puede interpretarse a partir de la concentración total. La importancia de la especiación, la biodisponibilidad y la transferencia trófica obliga a admitir que el análisis químico convencional, cuando no distingue formas químicas ni rutas ecológicas de exposición, ofrece una imagen incompleta del problema. En otras palabras, un diagnóstico centrado exclusivamente en niveles totales corre el riesgo de simplificar en exceso fenómenos que, en realidad, dependen de equilibrios químicos y ecológicos mucho más delicados.

A partir de ello, el corpus sugiere que la química analítica ambiental enfrenta hoy una exigencia doble. Por una parte, debe conservar el rigor metrológico que caracteriza a las técnicas instrumentales de alta sensibilidad, como ICP-MS, ICP-OES, AAS o cromatografía acoplada. Por otra, debe ampliar su horizonte interpretativo para incluir fracciones, especies químicas, biomarcadores y contextos de uso. Esta tensión entre precisión analítica e interpretación ecológica aparece de forma recurrente en los documentos revisados. Los avances instrumentales descritos por Wang et al. (2020), por Guijarro-Ramírez, Sánchez y Todolí (2024), y por Clarke, Bui-Le y Hallett (2020) muestran que existe una importante capacidad técnica para detectar analitos a niveles traza, incluso en matrices salinas complejas. No obstante, el valor real de ese avance depende de que la medición se inserte en preguntas ambientalmente pertinentes. Medir con extrema sensibilidad un analito de baja relevancia ecológica tiene menos sentido que seleccionar con precisión un indicador con verdadera capacidad diagnóstica.

En este punto emerge con fuerza otra contribución del corpus: la necesidad de superar la frontera rígida entre química ambiental y salud pública. El enfoque de epidemiología basada en aguas residuales presentado por Pocurull et al. (2020) abre una vía conceptual particularmente sugerente, porque muestra que las aguas residuales funcionan como archivos químicos de la actividad humana. Aunque el desarrollo de esta metodología ha estado

vinculado sobre todo al estudio de drogas, alcohol y fármacos, su lógica tiene una resonancia más amplia para la sostenibilidad acuática. Lo que esta línea de trabajo pone en evidencia es que el agua no solo transporta compuestos, sino también señales colectivas sobre modos de vida, presión antropogénica y exposición comunitaria. Desde una lectura crítica, ello obliga a pensar el diagnóstico ambiental como una práctica de interpretación territorial, no únicamente como una serie de determinaciones químicas desligadas del contexto social.

La revisión de los métodos analíticos también deja ver una tensión entre sofisticación tecnológica y accesibilidad operativa. Técnicas de muy alto desempeño ofrecen límites de detección sobresalientes y una enorme robustez analítica, pero suelen requerir infraestructura costosa, personal especializado y condiciones de laboratorio difíciles de sostener en muchos territorios. Frente a ello, los desarrollos portátiles, electroquímicos, colorimétricos y basados en teléfonos inteligentes, como los descritos por Hernández Cruz y Santacruz Ortega (2023), amplían la posibilidad de monitoreo en escenarios con recursos limitados. El problema crítico no está en optar por unos u otros, sino en construir estrategias escalonadas donde métodos rápidos, miniaturizados o comunitarios puedan complementar análisis confirmatorios de mayor complejidad. El corpus sugiere que la sostenibilidad del monitoreo no depende solo de la exactitud, sino también de la posibilidad real de sostenerlo en el tiempo y de extenderlo territorialmente.

En el plano biológico, los documentos analizados permiten afirmar que los biomarcadores representan uno de los campos más prometedores para enriquecer el diagnóstico ambiental. La incorporación de metalotioneínas, estrés oxidativo, proteínas HSP70, alteraciones hematológicas e índices integrados de respuesta biológica introduce una capa de evidencia que conecta contaminación con efecto. Desde una lectura crítica, esto modifica sustancialmente el lugar de la química analítica dentro de las ciencias ambientales. La química ya no aparece solo como disciplina encargada de medir contaminantes, sino como fuente de señales que deben ser interpretadas junto con la fisiología, la toxicología y la ecología. Esta articulación interdisciplinaria resulta particularmente importante en sistemas marinos y estuarinos, donde los efectos rara vez se manifiestan de manera lineal o inmediata.

No obstante, conviene reconocer que el uso de biomarcadores también presenta desafíos interpretativos. Las respuestas biológicas pueden verse moduladas por edad, sexo, salinidad, temperatura, ciclo reproductivo o estrés no químico. Esto significa que el biomarcador, tomado de forma aislada, no siempre permite atribuir con certeza una alteración a un contaminante específico. A partir del corpus, puede sostenerse que la fortaleza de los

biomarcadores no radica en reemplazar al análisis químico, sino en complementarlo. Su potencia reside en la convergencia de líneas de evidencia: concentración del contaminante, distribución en matrices, exposición efectiva en organismos y respuesta fisiológica asociada. Cuando estas dimensiones se interpretan juntas, el diagnóstico ambiental gana profundidad y capacidad predictiva.

Otro aspecto crítico que emerge del corpus es la relación entre monitoreo y toma de decisiones. Varios de los documentos revisados muestran que la evidencia analítica puede tener una calidad técnica elevada y, aun así, no traducirse automáticamente en medidas de gestión. Esto ocurre cuando los esquemas regulatorios operan con parámetros demasiado restringidos, frecuencias de monitoreo insuficientes o una separación excesiva entre producción científica y gobernanza ambiental. Desde este ángulo, el desafío no es solo perfeccionar los métodos, sino conseguir que la información producida sea legible, útil y accionable para quienes diseñan políticas, regulan descargas, administran recursos o protegen ecosistemas. En regiones como el Golfo de Guayaquil, donde confluyen biodiversidad, pesca, puertos, actividades urbanas y presión industrial, esta traducción entre evidencia y gestión resulta decisiva.

La lectura conjunta de los documentos también permite advertir que los sistemas acuáticos deben analizarse como espacios de acumulación histórica. Muchos contaminantes no expresan su impacto en el mismo momento de su descarga, sino tras procesos de almacenamiento sedimentario, bioacumulación o transferencia trófica. Esto implica que el diagnóstico ambiental no puede reducirse a una fotografía instantánea del agua superficial. Debe incluir, cuando el problema lo requiera, sedimentos, organismos, frecuencias temporales adecuadas y una reconstrucción de trayectorias de contaminación. En este sentido, los estudios revisados coinciden en que el ambiente acuático opera como una memoria química y biológica del territorio. Ignorar esa memoria conduce a diagnósticos parciales; incorporarla permite aproximarse con mayor realismo a los procesos de deterioro o resiliencia del ecosistema.

Desde una perspectiva de sostenibilidad marina, el principal aprendizaje crítico del corpus es que la protección del ambiente depende de la calidad de las preguntas que guían el análisis tanto como de la calidad de los instrumentos. Cuando la pregunta es estrecha, el dato puede ser exacto y, sin embargo, insuficiente. Cuando la pregunta integra movilidad, especiación, frecuencia temporal, respuesta biológica y exposición humana, la química analítica se convierte en una herramienta mucho más poderosa para comprender y gobernar el sistema.

Por eso, el desafío actual no consiste simplemente en medir más, sino en medir mejor, con mayor pertinencia ecológica, mejor diseño metodológico y una comprensión más amplia del vínculo entre contaminación, biota y sociedad.

Bajo esta lectura, el corpus documental no solo aporta información para construir el capítulo, sino que también deja planteada una posición conceptual clara: el diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos requiere una química analítica expandida, interdisciplinaria y territorialmente situada. Esa química debe ser capaz de dialogar con la ecología, la microbiología, la epidemiología, la toxicología y la gestión pública. Solo así podrá sostener diagnósticos robustos que no se agoten en la descripción del problema, sino que contribuyan a anticiparlo, interpretarlo y enfrentarlo con fundamento científico.

III. Conclusiones

El desarrollo del presente capítulo permitió establecer que la química analítica constituye uno de los pilares más sólidos para el diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos, no solo por su capacidad para identificar y cuantificar contaminantes, sino por su potencial para interpretar procesos de transformación, movilidad, persistencia y transferencia dentro del ecosistema. A lo largo del análisis se evidenció que el valor del dato químico no reside únicamente en su exactitud instrumental, sino en su articulación con el contexto ecológico, la dinámica del sistema y las posibles implicaciones sobre la salud humana y la sostenibilidad marina.

Asimismo, se reconoció que los sistemas marinos y estuarinos presentan una complejidad físico-química que impide abordar su evaluación mediante esquemas simplificados o exclusivamente normativos. La interacción entre agua, sedimentos, materia orgánica, salinidad, organismos y actividades antrópicas configura un entorno donde los contaminantes no permanecen estáticos, sino que cambian de forma química, de compartimento y de nivel de riesgo. Esto obliga a que el diagnóstico ambiental contemple la especiación, la biodisponibilidad, la distribución entre fases y la variabilidad temporal como componentes indispensables para comprender el verdadero estado químico del medio acuático.


Del mismo modo, el estudio puso de relieve que los metales y metaloides tóxicos continúan siendo contaminantes de alta prioridad en la evaluación ambiental, debido a su persistencia, su capacidad de bioacumulación y su potencial de biomagnificación en la cadena trófica. Este

comportamiento confirma que la presencia de un contaminante en el agua no representa el final del problema, sino el inicio de una trayectoria ecológica que puede culminar en peces, organismos bentónicos y consumidores humanos. Bajo esta lógica, la química analítica ambiental debe proyectarse más allá de la columna de agua e incorporar sedimentos, tejidos biológicos y biomarcadores de respuesta para construir una lectura más completa del riesgo.

También quedó demostrado que los métodos analíticos actuales ofrecen un repertorio suficientemente robusto para abordar matrices complejas y contaminantes presentes a niveles traza. Las técnicas clásicas, como la absorción atómica y las plataformas basadas en plasma inductivamente acoplado, conservan plena relevancia por su precisión y sensibilidad, mientras que los avances en optofluídica, detección electroquímica, cromatografía especializada y herramientas portátiles amplían las posibilidades de vigilancia in situ y respuesta rápida. Esta coexistencia metodológica confirma que el futuro del monitoreo ambiental no depende de una sola técnica, sino de la construcción estratégica de metodologías complementarias, ajustadas a la naturaleza del problema y a las condiciones reales del territorio.

Otro hallazgo importante del capítulo radica en la necesidad de interpretar la calidad del agua desde una visión integral. Los parámetros fisicoquímicos convencionales, aunque imprescindibles, no siempre reflejan por sí solos la magnitud del riesgo ambiental. La incorporación de biomarcadores, indicadores microbiológicos y respuestas fisiológicas de organismos acuáticos permite reconocer que un sistema aparentemente estable puede albergar alteraciones funcionales, procesos de exposición crónica o señales tempranas de deterioro. En este sentido, la evaluación del impacto ambiental exige una integración progresiva entre química analítica, ecotoxicología, microbiología y salud pública.

A partir de este recorrido, se sostiene que los principios analíticos para el diagnóstico ambiental no deben entenderse como un conjunto de operaciones de laboratorio aisladas, sino como una estructura de razonamiento científico aplicada a la comprensión del medio acuático. Su alcance es mayor cuando los datos producidos se traducen en evidencia útil para la prevención, la gestión sostenible y la protección de ecosistemas estratégicos. En territorios de alta sensibilidad ecológica y fuerte presión antrópica, como el Golfo de Guayaquil, este tipo de enfoque se vuelve especialmente necesario, pues ofrece herramientas para anticipar procesos de deterioro, orientar decisiones y fortalecer una gobernanza ambiental sustentada en conocimiento verificable.

The background features a light teal color with various abstract geometric and molecular motifs. On the left, there are several overlapping hexagons of varying opacities. Scattered throughout are thin lines connecting small teal dots, resembling a network or molecular structure. Some of these structures are more complex, with multiple nodes and connecting lines. Small teal plus signs are also interspersed across the background.

En consecuencia, el capítulo permite afirmar que la sostenibilidad marina requiere una química analítica expandida, rigurosa y territorialmente situada. No se trata solo de medir contaminantes, sino de comprender cómo circulan, cómo se transforman, cómo ingresan en los organismos y cómo afectan la integridad ecológica del sistema. Desde esta perspectiva, la química analítica deja de ser una disciplina auxiliar y se consolida como un instrumento central para interpretar, proteger y proyectar el futuro de los ambientes marinos y costeros.

CAPÍTULO II: AVANCES EN INSTRUMENTACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES

*Chapter II: Advances in instrumentation for the
detection of emerging contaminants*



CAPÍTULO II: AVANCES EN INSTRUMENTACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES

Chapter II: Advances in instrumentation for the detection of emerging contaminants

I. Introducción

El estudio de los sistemas acuáticos ha experimentado una transformación significativa en las últimas décadas debido a la creciente presencia de contaminantes emergentes, los cuales han superado las capacidades tradicionales de análisis ambiental. A diferencia de los contaminantes clásicos, estos compuestos presentan una elevada diversidad estructural y suelen encontrarse en concentraciones extremadamente bajas, lo que dificulta su detección mediante metodologías convencionales. Investigaciones recientes han evidenciado la presencia de fármacos, productos de cuidado personal, plastificantes y compuestos industriales en aguas residuales, matrices marinas y organismos bioindicadores, lo que pone en evidencia la necesidad de replantear los enfoques analíticos utilizados en el diagnóstico ambiental (Pocurull et al., 2020; Picó et al., 2019).

En este contexto, la instrumentación analítica ha evolucionado como una respuesta directa a los desafíos impuestos por estos nuevos contaminantes. La integración de técnicas de alta resolución, sistemas de separación avanzados y herramientas de detección más sensibles ha permitido ampliar la capacidad de identificación y cuantificación de compuestos en matrices complejas. No obstante, el desarrollo instrumental no puede entenderse de forma aislada, ya que su eficacia depende de la correcta articulación con procesos de preparación de muestra, eliminación de interferencias y selección adecuada de los analitos de interés. Estudios desarrollados en matrices como mejillones, sedimentos marinos y aguas residuales han demostrado que la complejidad de estas muestras exige estrategias analíticas específicas que garanticen resultados confiables y reproducibles (Albergamo et al., 2018; Pedrouzo et al., 2011).

Desde esta perspectiva, la química analítica contemporánea se orienta hacia la construcción de sistemas integrados de análisis, donde cada etapa del proceso, desde el muestreo hasta la interpretación de resultados, contribuye a la generación de evidencia ambiental sólida. Esta evolución responde no solo a un avance tecnológico, sino a una necesidad científica vinculada a la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos, especialmente en entornos costeros

donde confluyen múltiples fuentes de contaminación. En estos escenarios, la detección de contaminantes emergentes no representa únicamente un desafío técnico, sino una herramienta clave para comprender la dinámica de la contaminación y orientar estrategias de gestión ambiental.

El presente capítulo aborda los avances en instrumentación analítica aplicados a la detección de contaminantes emergentes, destacando el papel de las técnicas modernas en la mejora del diagnóstico ambiental. A lo largo del desarrollo se analizarán las exigencias analíticas derivadas de estos compuestos, las estrategias de preparación de muestra, las plataformas instrumentales utilizadas y su aplicación en matrices marinas y costeras, con el propósito de evidenciar cómo la innovación analítica contribuye a la comprensión y sostenibilidad de los sistemas acuáticos.

II. Desarrollo

Contaminantes emergentes y nuevas exigencias del análisis ambiental

La expansión de los contaminantes emergentes en los sistemas acuáticos ha modificado de manera profunda el horizonte de la química analítica ambiental, porque ya no se trata únicamente de identificar sustancias tradicionalmente reguladas, sino de reconocer mezclas complejas de compuestos cuya presencia, comportamiento e impacto todavía están en proceso de comprensión científica. En este escenario, la categoría de contaminantes emergentes no alude tanto a la novedad absoluta de las sustancias como a la novedad de su visibilidad analítica y de su reconocimiento como problema ambiental. En efecto, muchos de estos compuestos han estado presentes durante años o décadas en el ambiente, pero solo el desarrollo de métodos más sensibles y selectivos ha permitido advertir su frecuencia, distribución y capacidad de afectar ecosistemas y salud humana, tal como se ha señalado en revisiones recientes sobre aguas residuales y contaminación acuática (EPA, 2020; Noguera-Oviedo & Aga, 2016; Pocurull et al., 2020).

Esta precisión conceptual resulta importante porque evita una lectura simplista del problema. Un contaminante emergente no es necesariamente una molécula nueva, sino una sustancia cuyo riesgo ambiental adquiere relevancia a partir de tres condiciones convergentes: su uso extendido, su liberación continua y la mejora de las tecnologías capaces de detectarla. En ese sentido, compuestos farmacéuticos, productos de cuidado personal, filtro ultravioleta, plastificantes, tensioactivos, perfluorados, drogas ilícitas, retardantes de llama, nanopartículas

y microplásticos forman parte de una familia analítica amplia, heterogénea y metodológicamente desafiante (Sauvé & Desrosiers, 2014; Richardson & Kimura, 2016; Zeballos, 2019). La dificultad no reside solo en su diversidad química, sino en el hecho de que muchos aparecen simultáneamente en una misma muestra, a concentraciones traza y dentro de matrices cuya complejidad compromete la recuperación, la separación y la cuantificación.

Desde la perspectiva ambiental, uno de los rasgos que vuelve particularmente problemática a esta clase de sustancias es su pseudo-persistencia. Aunque no todos estos compuestos poseen la estabilidad extrema de los contaminantes orgánicos persistentes clásicos, su descarga continua desde hogares, industrias, hospitales, actividades agrícolas, embarcaciones, estaciones depuradoras y sistemas productivos hace que permanezcan de forma casi constante en el ambiente acuático. Guillermo López (2020) subraya precisamente que la emisión reiterada convierte a muchos de estos compuestos en pseudo-persistentes, de modo que no necesitan una permanencia prolongada en el medio para producir efectos negativos. Esa observación es analíticamente decisiva, porque implica que el monitoreo no puede basarse únicamente en episodios puntuales o eventos extraordinarios, sino que debe captar flujos continuos de contaminación de baja intensidad, pero de gran recurrencia.

La vulnerabilidad del medio acuático frente a este fenómeno se explica porque el agua opera como sumidero, vía de transporte y espacio de interacción entre múltiples presiones contaminantes. Morin-Crini et al. (2021) destacan que los contaminantes emergentes se encuentran hoy en aguas superficiales, subterráneas, residuales, sedimentos, biota, productos de consumo e incluso en regiones remotas, lo cual confirma que la dinámica de dispersión supera ampliamente los límites locales de emisión. A esta circulación se añade el hecho de que las estaciones de tratamiento convencionales no fueron diseñadas para remover gran parte de estas sustancias, circunstancia que ha sido reiteradamente documentada en el campo de la química ambiental (Petrie et al., 2015; Ebele et al., 2017; Pocurull et al., 2020). De este modo, los efluentes tratados no constituyen necesariamente el cierre del problema, sino con frecuencia una de sus principales rutas de reintroducción hacia ríos, estuarios y zonas marinas receptoras.

La complejidad del fenómeno aumenta cuando se observan ambientes de transición o de elevada interacción antrópica, como puertos, estuarios, zonas costeras, áreas de acuicultura y aguas grises procedentes de embarcaciones. En estos espacios, la contaminación no proviene de una única fuente, sino de la superposición de aportes domésticos, actividades

turísticas, uso de productos químicos a bordo, residuos urbanos, escorrentía y descargas de infraestructuras de saneamiento. El estudio de García-Gómez et al. (2025) resulta ilustrativo en este punto, pues muestra que las aguas grises emitidas por barcos contienen una mezcla compleja de productos farmacéuticos, estimulantes, compuestos relacionados con tabaco y alimentos, productos de cuidado personal, filtros UV, surfactantes, perfluoroalquilados, plastificantes y retardantes de llama, muchos de los cuales apenas aparecen en los programas de monitoreo rutinario. El hallazgo de 86 compuestos mediante análisis dirigido y 11 adicionales mediante cribado sospechado no solo evidencia la riqueza química de esa matriz, sino también la insuficiencia de enfoques analíticos restringidos cuando se busca comprender el verdadero alcance de la presión contaminante marina.

En rigor, la primera gran exigencia del análisis ambiental contemporáneo es reconocer que los contaminantes emergentes no se presentan como analitos aislados, sino como ensamblajes químicos dentro de mezclas dinámicas. Esta realidad obliga a abandonar modelos analíticos centrados en pocos compuestos diana y a avanzar hacia estrategias multiresiduo, screening amplio y análisis de sospecha. Robles-Molina et al. (2012) ya advertían el valor creciente de los métodos multianalito para estudiar presencia y destino de microcontaminantes en aguas residuales y matrices asociadas, y esa tendencia se ha fortalecido con el desarrollo de LC-MS/MS, LC-HRMS y herramientas computacionales para apoyo a la identificación. El problema analítico, por tanto, ya no consiste solo en medir con exactitud un compuesto conocido, sino en ser capaz de rastrear familias enteras de sustancias con distinta polaridad, masa, comportamiento cromatográfico y potencial ecotoxicológico.

A esta dificultad se suma una segunda exigencia: la ultra traza. Los contaminantes emergentes suelen encontrarse en niveles de ng/L o µg/L, y precisamente esa baja concentración ha sido una de las razones por las cuales pasaron inadvertidos durante largo tiempo. Guillermo López (2020) y Zeballos (2019) coinciden en señalar que la cuantificación de estos compuestos requiere metodologías de elevada sensibilidad y selectividad, dado que se encuentran en niveles muy bajos y en matrices complejas. Esta condición transforma el análisis en una operación de equilibrio delicado: si el método no concentra adecuadamente el analito, la señal puede perderse; si la limpieza de muestra es insuficiente, el efecto matriz puede distorsionar la cuantificación; si la técnica instrumental no posee resolución suficiente, la separación de compuestos cercanos se vuelve incierta. Dicho de otro modo, la dificultad

no radica solo en encontrar el contaminante, sino en distinguirlo con certeza dentro de un entorno químico que tiende a ocultarlo.

La tercera gran exigencia surge de la diversidad fisicoquímica de los analitos. No todos los contaminantes emergentes responden del mismo modo a un procedimiento de extracción o a una plataforma instrumental. Algunos presentan alta polaridad, otros muestran sensibilidad térmica, varios tienen baja volatilidad, muchos coexisten con materia orgánica soluble, sales, lípidos o proteínas, y algunos requieren incluso ser tratados como clases poliméricas más que como moléculas individuales. El trabajo de Gambetta Vianna et al. (2026) sobre mejillones marinos demuestra claramente esta situación: la alta carga lipídica y proteica del tejido biológico introduce retos analíticos específicos que obligan a reforzar la limpieza de muestra y a trabajar con procedimientos optimizados para evitar supresión o realce de señal. Así, la composición de la matriz deja de ser un telón de fondo y se convierte en un actor central del método.

Este punto merece especial atención, porque uno de los errores más frecuentes en la comprensión del análisis ambiental consiste en imaginar que la complejidad depende exclusivamente del instrumento. En realidad, la complejidad nace en la muestra. Un agua residual, un sedimento marino, un efluente portuario, un molusco filtrador o una mezcla de aguas grises no son simplemente soportes donde flotan contaminantes; son sistemas químicos activos, cargados de sales, materia orgánica, sólidos suspendidos, compuestos naturales y sustancias interferentes que condicionan la extracción, la separación y la detección. Carmona y Picó (2018), citados por Morin-Crini et al. (2021), insisten en que la mayor parte de los estudios en agua requieren preconcentración y preparación previa antes del análisis, precisamente porque la muestra real no permite en la mayoría de los casos un análisis directo fiable. La exigencia analítica, entonces, es inseparable de la exigencia matricial.

En sistemas marinos y costeros, esta condición se intensifica aún más por la naturaleza biológica y ecológica de las matrices. Los mejillones, por ejemplo, constituyen bioindicadores particularmente relevantes porque su comportamiento filtrador favorece la acumulación de xenobióticos y permite inferir exposición ambiental y riesgo potencial para el consumo humano. Gambetta Vianna et al. (2026) muestran que esta capacidad de bioacumulación convierte a los moluscos en matrices estratégicas para el monitoreo, pero al mismo tiempo complica el proceso analítico por la presencia de proteínas y lípidos. Algo semejante ocurre con *Adamussium colbecki* en ambientes antárticos, donde la condición de bioindicador se combina con dificultades de extracción y limpieza derivadas de la naturaleza del tejido

(Gambetta Vianna et al., 2025). Estas evidencias confirman que la expansión de los contaminantes emergentes obliga a ampliar la mirada analítica hacia matrices biológicas complejas, y no solo hacia el agua como matriz exclusiva.

Otro aspecto que define las nuevas exigencias del análisis ambiental es la necesidad de pasar de la detección puntual a la caracterización integral. Ya no basta con afirmar que un compuesto está presente; resulta necesario establecer su clase química, su frecuencia de aparición, su posible riesgo ecológico, su persistencia estimada, su comportamiento en el tratamiento y su relevancia para la exposición humana. El estudio de García-Gómez et al. (2025) es especialmente valioso en este sentido, porque no se limita a identificar sustancias en aguas grises de barcos, sino que desarrolla una estrategia de priorización para destacar 25 compuestos con especial relevancia ecológica. Esta forma de proceder señala un giro importante en la analítica ambiental: la medición deja de ser un fin en sí mismo y pasa a integrarse en procesos de jerarquización del riesgo y apoyo a la gestión.

A la vez, los contaminantes emergentes han obligado a revisar la relación entre monitoreo, regulación y conocimiento científico. Muchos de estos compuestos no forman parte de los programas rutinarios de control, no porque carezcan de importancia, sino porque las herramientas metodológicas para detectarlos de manera confiable tardaron en consolidarse. En este punto, la mejora instrumental no solo amplió la sensibilidad de los equipos, sino que también amplió la visibilidad del problema. Como señala el documento técnico sobre efluentes urbanos y contaminantes emergentes, la apertura de nuevos métodos permitió descubrir compuestos antes no detectados en agua, suelo, sangre, tejidos, alimentos y leche materna, transformando por completo el campo de observación ambiental (Guillermo López, 2020). En términos científicos, esto significa que la historia reciente de los contaminantes emergentes está profundamente ligada a la historia de los avances analíticos que hicieron posible su reconocimiento.

Esa dependencia entre avance metodológico y conocimiento ambiental se observa también en el caso de los microplásticos. Durante años, buena parte de los estudios se apoyó en microscopía y técnicas espectroscópicas útiles, pero limitadas en ciertos rangos de tamaño y comparabilidad. Los trabajos más recientes han comenzado a incorporar herramientas como la pirólisis acoplada a cromatografía de gases y espectrometría de masas para obtener una caracterización química más robusta de los polímeros presentes en matrices marinas, fluviales y de aguas residuales (Castelvetto et al., 2021; Ainali et al., 2026). Esta evolución no es marginal. Indica que los contaminantes emergentes exigen no solo detectar “partículas” o

“rastros”, sino traducirlos en perfiles químicos con mayor precisión, de modo que el análisis sea ambientalmente significativo y regulatoriamente útil.

Desde esta perspectiva, puede afirmarse que los contaminantes emergentes no solo amplían el catálogo de sustancias bajo vigilancia, sino que redefinen la propia noción de exigencia analítica. Esa exigencia incluye sensibilidad para niveles traza, capacidad multianalito, adaptación a matrices complejas, procedimientos de preconcentración y limpieza, estrategias de identificación ampliada, herramientas de priorización del riesgo y posibilidad de transferencia a programas de monitoreo sostenidos. La química analítica deja así de operar como un repertorio de técnicas aisladas y se convierte en una arquitectura metodológica orientada a reconstruir la presencia, circulación y relevancia de contaminantes en sistemas acuáticos cada vez más complejos.

En consecuencia, el problema de los contaminantes emergentes no puede ser leído solo como un nuevo tema dentro de la agenda ambiental, sino como un punto de inflexión para la práctica analítica misma. Obliga a reconocer que la contaminación actual es más diversa, más difusa, más interconectada y más difícil de capturar con esquemas clásicos de laboratorio. También obliga a asumir que la sostenibilidad marina depende, en buena medida, de la capacidad de los sistemas analíticos para responder a esa nueva complejidad. Sobre esta base se entiende la lógica del siguiente apartado del capítulo: si la exigencia analítica ha cambiado, entonces la preparación de muestra ya no puede verse como una fase auxiliar, sino como el verdadero núcleo que permite a la instrumentación avanzada desplegar todo su potencial.

Preparación de muestra y estrategias de preconcentración selectiva

El desarrollo de metodologías analíticas para contaminantes emergentes ha puesto en evidencia que la calidad del resultado no depende exclusivamente del desempeño instrumental, sino de la eficiencia con que se logra aislar, concentrar y limpiar el analito desde matrices complejas. En este sentido, la preparación de muestra ha dejado de ser una etapa previa de carácter operativo para convertirse en el núcleo del proceso analítico, especialmente cuando se trabaja con concentraciones traza y con mezclas químicas altamente heterogéneas. Diversos autores coinciden en que gran parte de los errores analíticos en estudios ambientales se originan en una preparación inadecuada de la muestra, más que en la limitación de los equipos de detección (Petrie et al., 2015; Morin-Crini et al., 2021). Esta afirmación adquiere especial relevancia en el contexto de los contaminantes emergentes, donde la señal analítica

puede ser fácilmente enmascarada por interferencias de la matriz si no se aplican estrategias de limpieza y preconcentración adecuadas.

Uno de los métodos más ampliamente utilizados en este campo es la extracción en fase sólida, conocida como SPE, debido a su versatilidad, reproducibilidad y capacidad para concentrar analitos a partir de grandes volúmenes de muestra. Este procedimiento se basa en la retención selectiva de compuestos sobre un sorbente, seguido de su elución en un volumen reducido de solvente, lo que permite aumentar significativamente la concentración del analito antes de su análisis instrumental. Morin-Crini et al. (2021) destacan que SPE se ha consolidado como una de las técnicas más utilizadas en el tratamiento de aguas contaminadas, precisamente por su capacidad de adaptarse a distintos tipos de compuestos y matrices. No obstante, su eficiencia depende de la correcta selección del sorbente, del control del pH y de la optimización de las condiciones de carga y elución, aspectos que requieren un diseño metodológico cuidadoso.

A partir de esta base, se han desarrollado variantes más selectivas, como la extracción en fase sólida con polímeros de impronta molecular, conocida como MISPE. Estos materiales sintéticos están diseñados para reconocer de manera específica una molécula objetivo, mediante cavidades estructurales que reproducen la forma y las interacciones químicas del analito. Soledad-Rodríguez et al. (2021) señalan que los polímeros de impronta molecular han ganado relevancia en la química analítica moderna debido a su alta selectividad y capacidad para mejorar la limpieza de muestras complejas. Su aplicación en el análisis de contaminantes emergentes permite reducir interferencias y aumentar la precisión de la cuantificación, especialmente en matrices donde coexisten múltiples compuestos con propiedades similares.

Otra estrategia ampliamente utilizada es el método QuEChERS, cuyo nombre proviene de sus características principales: rápido, fácil, económico, efectivo, robusto y seguro. Este enfoque ha sido especialmente útil en el análisis de matrices biológicas y alimentos, pero su aplicación se ha extendido al estudio de contaminantes emergentes en organismos acuáticos. Zeballos (2019) destaca que QuEChERS permite una extracción eficiente de compuestos orgánicos en matrices complejas, combinando etapas de partición con sales y limpieza mediante dispersión en fase sólida. Su principal ventaja radica en la reducción del tiempo de análisis y del consumo de solventes, lo que lo convierte en una alternativa alineada con los principios de la química verde. Sin embargo, su implementación requiere ajustes específicos

según la naturaleza del analito y de la matriz, lo que refuerza la idea de que no existen protocolos universales en el análisis ambiental.

La importancia de la preparación de muestra se hace aún más evidente cuando se analizan matrices biológicas marinas, como los mejillones o bivalvos. Estos organismos, utilizados como bioindicadores, presentan un alto contenido de lípidos y proteínas que pueden interferir significativamente en la detección de contaminantes. Gambetta Vianna et al. (2026) muestran que la complejidad de estas matrices exige procedimientos de limpieza más rigurosos para evitar efectos de supresión o realce de señal en técnicas como LC-MS/MS. De manera similar, en estudios realizados en especies antárticas, se ha observado que la eficiencia del análisis depende en gran medida de la capacidad de eliminar interferencias antes de la etapa instrumental (Gambetta Vianna et al., 2025). Estos casos confirman que la preparación de muestra no es una fase estándar, sino un proceso adaptativo que debe ajustarse a cada tipo de matriz.

Además de las técnicas mencionadas, la tendencia actual en química analítica ambiental se orienta hacia la miniaturización de los métodos y la reducción del impacto ambiental del análisis. El uso de menores volúmenes de solventes, la automatización de procesos y la incorporación de materiales más selectivos forman parte de una estrategia que busca mejorar la eficiencia sin incrementar la carga ambiental del propio análisis. En este sentido, la preparación de muestra se alinea con los principios de la química verde, promoviendo métodos más sostenibles sin comprometer la calidad de los resultados (Plotka-Wasyłka et al., 2018).

Otro aspecto crítico en esta etapa es el control del efecto matriz, entendido como la influencia de los componentes de la muestra sobre la señal analítica. En técnicas acopladas como LC-MS/MS, este fenómeno puede provocar errores significativos en la cuantificación si no se corrige adecuadamente. La implementación de estándares internos, curvas de calibración en matriz y procedimientos de limpieza adecuados son estrategias fundamentales para mitigar este problema. En este contexto, la preparación de muestra no solo permite concentrar el analito, sino también garantizar la confiabilidad del resultado final.

En conjunto, las estrategias de preparación de muestra constituyen el puente entre la complejidad del ambiente real y la precisión del análisis instrumental. Sin una adecuada extracción, limpieza y preconcentración, incluso los equipos más avanzados pueden producir resultados poco fiables. Por esta razón, la evolución de la química analítica en el estudio de

contaminantes emergentes ha estado profundamente vinculada al desarrollo de nuevas metodologías de tratamiento de muestra, capaces de responder a las exigencias de matrices cada vez más complejas y analitos cada vez más diversos.

Tabla 2

Comparación de técnicas de preparación de muestra en el análisis de contaminantes emergentes

Técnica	Principio	Ventaja principal	Limitación	Aplicación típica
Extracción en fase sólida (SPE)	Retención selectiva en un sorbente sólido	Alta reproducibilidad y versatilidad	Requiere optimización de condiciones	Aguas residuales y superficiales
MISPE (polímeros de impronta molecular)	Reconocimiento molecular específico del analito	Alta selectividad	Mayor costo y desarrollo complejo	Contaminantes específicos en matrices complejas
QuEChERS	Extracción con sales y limpieza dispersiva	Rápido, económico y bajo uso de solventes	Necesita ajuste según matriz	Matrices biológicas (tejidos, alimentos, bivalvos)
Extracción líquido-líquido (LLE)	Partición entre dos fases inmiscibles	Técnica simple y ampliamente conocida	Baja selectividad y alto consumo de solvente	Análisis preliminar de agua

Nota. Elaboración propia a partir de Morin-Crini et al. (2021), Soledad-Rodríguez et al. (2021) y Zeballos (2019).

Este panorama permite comprender que la preparación de muestra no es un paso previo al análisis, sino el fundamento que determina la calidad, sensibilidad y validez de todo el proceso analítico. Sobre esta base, el siguiente apartado abordará las plataformas instrumentales que, apoyadas en estas estrategias, permiten la identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en sistemas acuáticos complejos.

Instrumentación avanzada para la identificación y cuantificación

El avance en la detección de contaminantes emergentes ha estado estrechamente ligado al desarrollo de plataformas instrumentales capaces de operar en condiciones de alta complejidad analítica. Si en etapas previas del desarrollo de la química ambiental bastaba con identificar y cuantificar compuestos individuales, el escenario actual exige sistemas capaces de trabajar con múltiples analitos, en concentraciones traza y dentro de matrices con elevada interferencia química. Esta transformación ha impulsado una evolución progresiva desde técnicas convencionales hacia sistemas acoplados, de alta resolución y con capacidad de análisis ampliado, lo que ha redefinido la forma en que se construye el diagnóstico ambiental (Richardson & Kimura, 2016; Robles-Molina et al., 2012).

Las técnicas cromatográficas constituyen la base de esta evolución, ya que permiten la separación de compuestos presentes en una mezcla antes de su detección. La cromatografía

líquida de alta eficiencia (HPLC) y la cromatografía de gases (GC) han sido ampliamente utilizadas en el análisis ambiental debido a su capacidad para separar analitos con distintas propiedades fisicoquímicas. Sin embargo, la complejidad de los contaminantes emergentes ha hecho necesario acoplar estas técnicas a sistemas de detección más avanzados. En este contexto, la espectrometría de masas ha adquirido un papel central, ya que permite no solo cuantificar, sino también identificar compuestos a partir de su estructura molecular. El acoplamiento de cromatografía líquida con espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS) se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas para el análisis de contaminantes emergentes, debido a su alta sensibilidad, selectividad y capacidad para trabajar con múltiples compuestos simultáneamente (Petrie et al., 2015; Pocurull et al., 2020).

La evolución de estas técnicas ha dado lugar al uso de sistemas de alta resolución, como la espectrometría de masas de alta resolución (HRMS), que permiten realizar análisis no dirigidos. A diferencia de los enfoques tradicionales, donde se busca un conjunto específico de compuestos, el análisis no dirigido permite detectar sustancias desconocidas o no previamente consideradas, ampliando significativamente el alcance del monitoreo ambiental. Esta capacidad resulta especialmente valiosa en el estudio de contaminantes emergentes, donde la diversidad química y la constante aparición de nuevas sustancias hacen imposible depender únicamente de listas cerradas de analitos. Richardson y Kimura (2016) destacan que estas técnicas permiten identificar compuestos mediante estrategias de screening amplio y análisis de sospecha, lo que representa un cambio sustancial en la forma de abordar la contaminación ambiental.

En el caso de contaminantes particulados como los microplásticos, la instrumentación analítica ha seguido una trayectoria diferente. Técnicas como la pirólisis acoplada a cromatografía de gases y espectrometría de masas (Py-GC/MS) han demostrado ser eficaces para caracterizar la composición química de polímeros presentes en matrices ambientales. A diferencia de los métodos basados en microscopía, que permiten observar la morfología de las partículas, estas técnicas permiten identificar la composición química del material, lo que resulta fundamental para comprender su origen y comportamiento ambiental (Castelvetto et al., 2021; Ainali et al., 2026). Esta distinción es clave, ya que el análisis de microplásticos no puede limitarse a su identificación visual, sino que requiere una caracterización química precisa para evaluar su impacto.

Otro aspecto relevante en la evolución de la instrumentación analítica es la capacidad de integrar múltiples técnicas en un mismo flujo de trabajo. En estudios recientes, se ha

observado que la combinación de técnicas de separación, detección y análisis de datos permite obtener una visión más completa de la contaminación ambiental. Por ejemplo, el uso combinado de LC-MS/MS y HRMS permite realizar tanto análisis cuantitativos dirigidos como exploraciones no dirigidas, lo que amplía la capacidad de detección y mejora la interpretación de los resultados (Petrie et al., 2015). Esta integración metodológica responde a la necesidad de abordar problemas ambientales complejos con herramientas igualmente complejas.

La aplicación de estas tecnologías en matrices reales ha permitido evidenciar la magnitud del problema de los contaminantes emergentes. Estudios en aguas residuales, sedimentos marinos y organismos bioindicadores han demostrado que la combinación de técnicas avanzadas permite detectar una amplia variedad de compuestos que no serían identificables mediante métodos convencionales. García-Gómez et al. (2025) muestran que el uso de análisis dirigido y screening sospechado en aguas grises de embarcaciones permitió identificar decenas de compuestos pertenecientes a distintas categorías químicas, lo que evidencia la necesidad de utilizar enfoques analíticos integrados para comprender la complejidad de la contaminación en ambientes marinos.

La evolución de la instrumentación también ha estado acompañada por avances en el procesamiento de datos. El análisis de grandes volúmenes de información generados por técnicas como HRMS requiere herramientas computacionales capaces de procesar, filtrar e interpretar señales complejas. Este componente digital se ha convertido en un elemento clave del análisis ambiental moderno, ya que permite transformar datos instrumentales en información útil para la toma de decisiones. En este sentido, la química analítica contemporánea no se limita al laboratorio, sino que se extiende hacia el manejo de datos y la interpretación integrada de resultados.

En conjunto, la instrumentación avanzada ha ampliado significativamente las capacidades de la química analítica para el estudio de contaminantes emergentes. No se trata únicamente de una mejora en la sensibilidad o en la precisión, sino de un cambio en la forma de abordar el análisis ambiental, donde la identificación, la cuantificación y la interpretación se integran en un mismo proceso. Esta evolución permite construir diagnósticos más completos y ajustados a la realidad de los sistemas acuáticos, donde la diversidad de contaminantes y la complejidad de las matrices exigen respuestas analíticas cada vez más sofisticadas.

Figura 2

Flujo del proceso analítico moderno en la detección de contaminantes emergentes



Nota. *Elaboración propia a partir de Petrie et al. (2015), Richardson y Kimura (2016) y Pocurull et al. (2020).*

Este esquema sintetiza la lógica del análisis contemporáneo, donde cada etapa contribuye a la construcción de un resultado confiable y ambientalmente significativo. A partir de esta base, el siguiente apartado abordará la aplicación de estas herramientas en matrices marinas y costeras, donde la complejidad del sistema exige una integración aún mayor entre metodología e interpretación.

Aplicación analítica en matrices marinas, costeras y de aguas residuales

La aplicación de técnicas analíticas avanzadas en matrices reales constituye el punto donde la instrumentación deja de ser una posibilidad técnica y se convierte en una herramienta efectiva para la comprensión ambiental. En sistemas marinos y costeros, esta aplicación adquiere una relevancia particular debido a la convergencia de múltiples fuentes de contaminación, la complejidad de las matrices y la dinámica propia de estos ecosistemas. A diferencia de los análisis en condiciones controladas, el trabajo con muestras ambientales implica enfrentarse a variabilidad espacial, temporal y composicional, lo que exige una

integración rigurosa entre metodología analítica y conocimiento del sistema. En este contexto, la selección de la matriz de estudio no es un aspecto secundario, sino un componente clave del diseño analítico.

Entre las matrices más utilizadas para el monitoreo de contaminantes emergentes se encuentran los organismos filtradores, especialmente los mejillones y otros bivalvos. Estos organismos presentan una elevada capacidad de bioacumulación, lo que los convierte en indicadores integrados de la calidad del agua. Su comportamiento filtrador permite concentrar contaminantes presentes en el medio, facilitando su detección incluso cuando las concentraciones en el agua son bajas. Gambetta Vianna et al. (2026) señalan que el uso de mejillones como bioindicadores permite evaluar la exposición ambiental a xenobióticos, aunque también introduce desafíos analíticos asociados a la complejidad del tejido biológico. La presencia de lípidos, proteínas y otros compuestos orgánicos requiere procedimientos de extracción y limpieza más rigurosos, lo que refuerza la importancia de la preparación de muestra como etapa crítica del análisis.

De manera similar, los sedimentos marinos constituyen otra matriz fundamental en el estudio de contaminantes emergentes. Estos materiales actúan como reservorios de sustancias químicas, acumulando compuestos que pueden ser liberados nuevamente a la columna de agua bajo determinadas condiciones ambientales. Estudios realizados en zonas costeras han demostrado que los sedimentos pueden contener microplásticos y otros contaminantes orgánicos, lo que evidencia su papel en la dinámica de la contaminación marina (Ainali et al., 2026). Desde el punto de vista analítico, el tratamiento de sedimentos implica desafíos específicos, como la necesidad de separar partículas finas, eliminar materia orgánica y trabajar con muestras heterogéneas. Estas condiciones exigen la aplicación de técnicas combinadas que permitan obtener resultados representativos y reproducibles.

Las aguas residuales representan otra fuente clave de información sobre la presencia de contaminantes emergentes. Estas matrices contienen una mezcla compleja de sustancias provenientes de actividades domésticas, industriales y farmacéuticas, lo que las convierte en un punto estratégico para el monitoreo ambiental. Pocurull et al. (2020) destacan que el análisis de aguas residuales permite reconstruir patrones de consumo y exposición a nivel poblacional, utilizando biomarcadores químicos como indicadores de actividad humana. Este enfoque, conocido como epidemiología basada en aguas residuales, amplía el alcance de la química analítica más allá del diagnóstico ambiental, integrándola en el estudio de fenómenos sociales y de salud pública.

En el ámbito marino, un caso particularmente relevante es el de las aguas grises generadas por embarcaciones. Estas aguas, provenientes de actividades como limpieza, cocina y uso personal, contienen una amplia variedad de contaminantes emergentes que pueden ser descargados directamente en el entorno marino. García-Gómez et al. (2025) evidencian que estas matrices contienen compuestos pertenecientes a múltiples categorías, incluyendo productos de cuidado personal, fármacos, plastificantes y retardantes de llama. La detección de estos compuestos mediante técnicas avanzadas como LC-MS/MS y HRMS demuestra que la contaminación marina no se limita a fuentes terrestres, sino que también incluye aportes directos desde actividades marítimas. Este hallazgo resulta especialmente relevante en zonas con alta actividad portuaria y turística, donde la presión sobre los ecosistemas marinos puede ser considerable.

La integración de estas matrices en el análisis ambiental permite construir una visión más completa de la contaminación. Mientras el agua ofrece una imagen inmediata del estado del sistema, los sedimentos reflejan procesos de acumulación a largo plazo y los organismos vivos evidencian la transferencia de contaminantes a la biota. Esta combinación de enfoques permite superar las limitaciones de los análisis aislados y avanzar hacia una comprensión más profunda de la dinámica ambiental. En este sentido, la química analítica se convierte en una herramienta de integración, capaz de relacionar datos provenientes de distintas matrices para construir un diagnóstico coherente.

Otro aspecto relevante en la aplicación analítica es la necesidad de adaptar los métodos a las condiciones específicas de cada entorno. En sistemas marinos, factores como la salinidad, la temperatura y la presencia de materia orgánica pueden influir en el comportamiento de los contaminantes y en la eficiencia de las técnicas analíticas. Por ejemplo, la alta salinidad del agua de mar puede interferir en ciertos procesos de detección, lo que obliga a implementar etapas adicionales de limpieza o dilución. De igual manera, la variabilidad de las condiciones ambientales puede afectar la representatividad de las muestras, lo que requiere diseños de muestreo más complejos y estrategias de monitoreo continuo.

La aplicación de técnicas analíticas avanzadas en matrices reales también ha permitido identificar patrones de contaminación que no serían evidentes mediante análisis convencionales. Estudios recientes han demostrado que la combinación de análisis dirigido y screening amplio permite detectar compuestos previamente no considerados, ampliando el conocimiento sobre la composición química del ambiente. Este enfoque ha sido especialmente útil en el estudio de contaminantes emergentes, donde la diversidad de

sustancias y la falta de regulación dificultan su monitoreo. La capacidad de identificar nuevos compuestos no solo mejora el diagnóstico ambiental, sino que también contribuye al desarrollo de políticas más efectivas para la gestión de la contaminación.

En el contexto de la sostenibilidad marina, la aplicación de estas herramientas adquiere una dimensión estratégica. Los ecosistemas costeros, como el Golfo de Guayaquil, están sujetos a múltiples presiones derivadas de actividades humanas, incluyendo descargas urbanas, industriales, portuarias y turísticas. Aunque los datos específicos pueden variar según el contexto, la evidencia científica indica que este tipo de entornos requiere sistemas de monitoreo capaces de detectar contaminantes emergentes de manera temprana. La implementación de técnicas analíticas avanzadas en estos escenarios permite anticipar problemas ambientales y diseñar estrategias de gestión basadas en evidencia científica.

La evolución de la química analítica en este ámbito no solo ha permitido mejorar la detección de contaminantes, sino también redefinir la forma en que se interpreta la información ambiental. El análisis de matrices múltiples, la integración de datos y la aplicación de técnicas avanzadas han transformado el diagnóstico ambiental en un proceso más complejo y completo. En lugar de limitarse a medir concentraciones, la química analítica contemporánea permite comprender la dinámica de los contaminantes, su interacción con el entorno y su impacto sobre los ecosistemas.

Este enfoque integrado resulta fundamental para abordar los desafíos actuales de la contaminación marina, donde la diversidad de sustancias y la complejidad de los sistemas exigen respuestas analíticas igualmente complejas. A partir de esta base, la siguiente sección desarrollará la discusión crítica del capítulo, donde se analizarán las implicaciones de estos avances y los desafíos que aún enfrenta la química analítica en el estudio de contaminantes emergentes.

Discusión crítica

El análisis desarrollado a lo largo del capítulo permite advertir que la evolución de la instrumentación analítica no ha sido un proceso lineal orientado únicamente al perfeccionamiento técnico, sino una respuesta directa a la creciente complejidad del problema ambiental asociado a los contaminantes emergentes. La evidencia revisada sugiere que los enfoques tradicionales, basados en la determinación de compuestos individuales mediante métodos convencionales, resultan insuficientes frente a la diversidad química, la

baja concentración y la dinámica multifactorial que caracteriza a estos contaminantes. En este sentido, la incorporación de técnicas avanzadas como LC-MS/MS, HRMS y metodologías de screening ampliado no representa una simple mejora instrumental, sino un cambio en la lógica del análisis ambiental.

Uno de los elementos más relevantes que emerge del corpus es la necesidad de superar la fragmentación del proceso analítico. En muchos casos, la química ambiental ha sido concebida como una secuencia de etapas independientes, donde el muestreo, la preparación de muestra, la detección y la interpretación operan de manera desconectada. Sin embargo, los estudios recientes muestran que la validez del resultado depende de la coherencia entre todas estas fases. Petrie et al. (2015) y Morin-Crini et al. (2021) coinciden en señalar que los errores analíticos suelen originarse en la preparación de muestra y en el efecto matriz, lo que evidencia que incluso los sistemas instrumentales más avanzados pueden producir resultados poco fiables si no se integran adecuadamente con las etapas previas. Esta observación obliga a replantear la jerarquía tradicional del análisis, situando la preparación de muestra en un nivel estratégico dentro del proceso.

Otro aspecto crítico se relaciona con la tensión entre análisis dirigido y análisis no dirigido. Los métodos dirigidos, basados en la cuantificación de compuestos previamente seleccionados, ofrecen alta precisión y confiabilidad, pero limitan el alcance del diagnóstico al conjunto de analitos considerados. Por el contrario, las técnicas de screening amplio y análisis de sospecha permiten detectar una mayor variedad de compuestos, incluyendo aquellos no contemplados inicialmente, pero introducen desafíos en términos de interpretación y validación de resultados. Richardson y Kimura (2016) destacan que el análisis no dirigido ha ampliado significativamente la capacidad de detección de contaminantes emergentes, aunque también ha incrementado la complejidad del tratamiento de datos. Esta dualidad plantea un desafío metodológico importante: encontrar un equilibrio entre precisión cuantitativa y amplitud exploratoria.

En el plano de las matrices ambientales, el corpus evidencia que la selección de la muestra condiciona de manera directa la interpretación del fenómeno contaminante. Mientras el análisis de agua proporciona una visión inmediata del estado del sistema, los sedimentos y organismos vivos permiten reconstruir procesos de acumulación y transferencia a lo largo del tiempo. Gambetta Vianna et al. (2026) y Ainali et al. (2026) muestran que los organismos filtradores y los sedimentos marinos funcionan como registros integrados de contaminación, aunque su análisis implica desafíos metodológicos adicionales. Esta situación refuerza la idea

de que el diagnóstico ambiental no puede basarse en una única matriz, sino en la integración de múltiples fuentes de información.

La revisión de los métodos analíticos también pone en evidencia una tensión entre sofisticación tecnológica y aplicabilidad práctica. Las técnicas de alta resolución ofrecen una capacidad sin precedentes para detectar y caracterizar contaminantes emergentes, pero su implementación requiere infraestructura especializada, altos costos y personal altamente capacitado. En contraste, métodos más simples pueden ser más accesibles, pero presentan limitaciones en términos de sensibilidad y selectividad. Este escenario plantea un dilema importante para la gestión ambiental, especialmente en regiones donde los recursos técnicos son limitados. La solución no radica en sustituir unas técnicas por otras, sino en diseñar estrategias analíticas escalonadas que combinen métodos de distinta complejidad según el objetivo del estudio.

Otro punto de reflexión surge en relación con la función del análisis químico dentro del sistema de gestión ambiental. Tradicionalmente, la química analítica ha sido utilizada como una herramienta de verificación, orientada a comprobar el cumplimiento de normas y estándares. Sin embargo, el estudio de los contaminantes emergentes sugiere que su papel debe ampliarse hacia una función predictiva y exploratoria. Pocerull et al. (2020) muestran que el análisis de aguas residuales puede utilizarse para reconstruir patrones de consumo y exposición, lo que abre nuevas posibilidades para la integración entre química ambiental y salud pública. Este enfoque implica que la analítica no solo describe el estado del sistema, sino que también contribuye a anticipar tendencias y a orientar decisiones.

En el ámbito marino, la discusión adquiere una dimensión adicional debido a la interacción entre múltiples fuentes de contaminación. Los estudios sobre aguas grises de embarcaciones y matrices costeras evidencian que la contaminación no proviene exclusivamente de fuentes terrestres, sino también de actividades marítimas que contribuyen de manera significativa a la carga de contaminantes emergentes (García-Gómez et al., 2025). Esta situación obliga a ampliar el enfoque del monitoreo ambiental, incorporando nuevas fuentes y considerando la movilidad de los contaminantes entre distintos compartimentos del ecosistema.

La revisión también pone de manifiesto que el avance instrumental ha ido acompañado de un incremento en la complejidad del análisis de datos. Las técnicas modernas generan grandes volúmenes de información que requieren herramientas computacionales para su procesamiento e interpretación. Este componente digital se ha convertido en un elemento

central del análisis ambiental, ya que permite identificar patrones, correlaciones y tendencias que no serían evidentes a partir de la observación directa. En este sentido, la química analítica contemporánea se sitúa en la intersección entre la experimentación de laboratorio y el análisis de datos, lo que amplía su alcance y su impacto en la comprensión de los sistemas ambientales.

A partir de estos elementos, se puede afirmar que el estudio de los contaminantes emergentes ha transformado la práctica de la química analítica ambiental en múltiples niveles. Ha modificado la forma en que se seleccionan los analitos, ha redefinido la importancia de la preparación de muestra, ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías instrumentales y ha ampliado el papel del análisis en la gestión ambiental. Esta transformación no está exenta de desafíos, pero ofrece también oportunidades para construir sistemas de monitoreo más integrados, sensibles y orientados a la sostenibilidad.

El análisis crítico de estos avances permite comprender que la instrumentación no debe ser vista como un fin en sí mismo, sino como un medio para generar conocimiento relevante sobre la dinámica de la contaminación. La verdadera contribución de la química analítica radica en su capacidad para traducir señales químicas en información útil para la protección de los ecosistemas y la salud humana. Desde esta perspectiva, el desafío no consiste únicamente en desarrollar nuevas técnicas, sino en integrarlas de manera coherente dentro de un enfoque que combine precisión, aplicabilidad y relevancia ambiental.

III. Conclusiones

El desarrollo del presente capítulo ha permitido evidenciar que la detección de contaminantes emergentes en sistemas acuáticos no puede abordarse desde una lógica analítica convencional, sino que requiere la integración de enfoques metodológicos avanzados que respondan a la complejidad química, biológica y ambiental de estos compuestos. A lo largo del análisis se ha establecido que la principal transformación en la química analítica contemporánea no radica únicamente en la incorporación de nuevas tecnologías, sino en la reorganización del proceso analítico como un sistema integrado donde cada etapa, desde el muestreo hasta la interpretación, resulta determinante para la validez del resultado.

En este contexto, se ha demostrado que la preparación de muestra constituye uno de los elementos más críticos del análisis, debido a su capacidad para concentrar los analitos y minimizar las interferencias de la matriz. Técnicas como la extracción en fase sólida, los

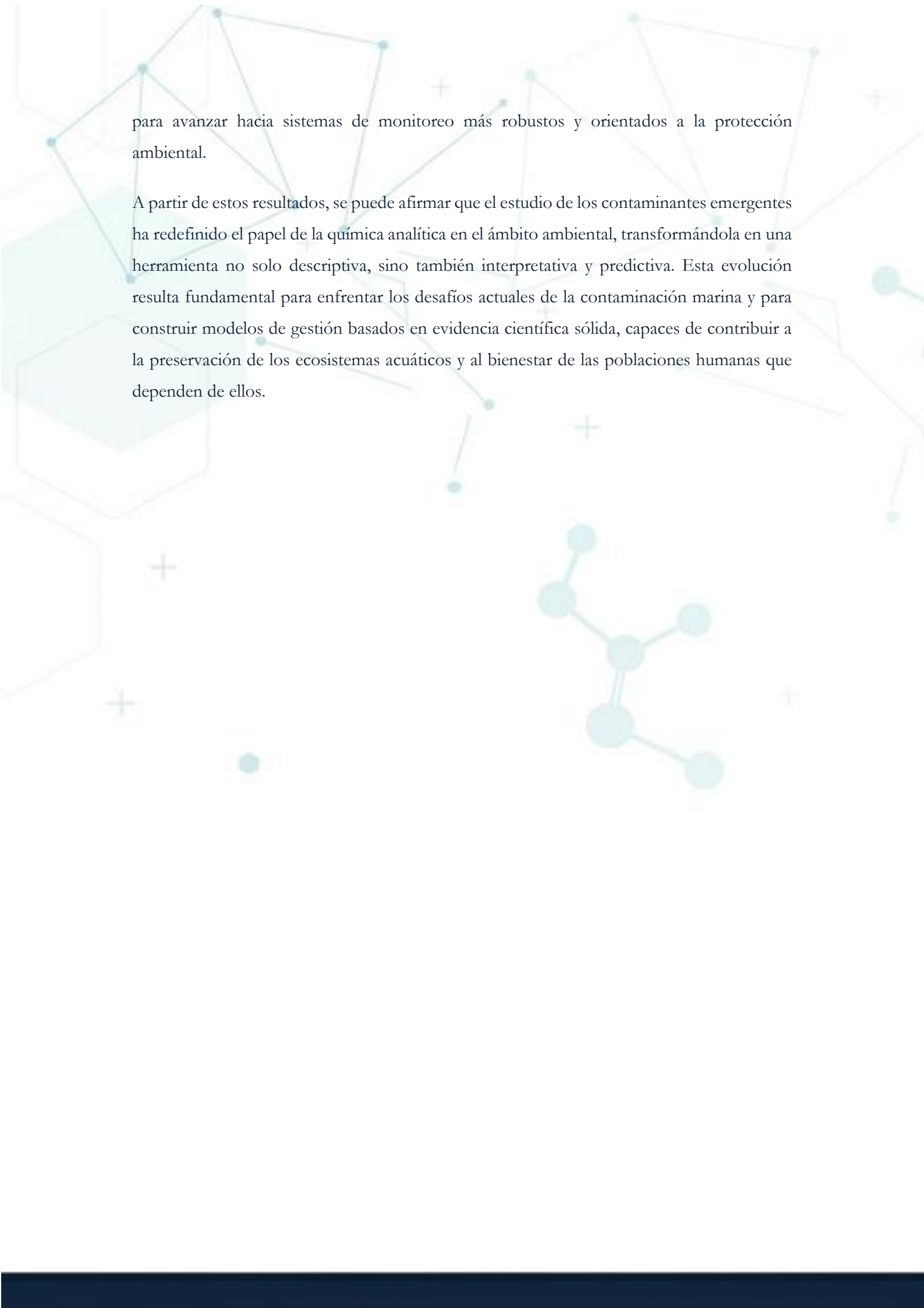
polímeros de impronta molecular y el método QuEChERS han mostrado ser herramientas fundamentales para el tratamiento de matrices complejas, permitiendo mejorar la sensibilidad y selectividad del análisis. Esta etapa no puede ser considerada como un procedimiento auxiliar, sino como el fundamento sobre el cual se construye la confiabilidad del resultado analítico.

De manera complementaria, la evolución de la instrumentación ha ampliado significativamente las capacidades de detección y caracterización de contaminantes emergentes. El uso de técnicas acopladas como LC-MS/MS y sistemas de alta resolución ha permitido no solo cuantificar compuestos a niveles traza, sino también identificar sustancias previamente no consideradas mediante enfoques de análisis no dirigido. Esta capacidad de exploración representa un avance sustancial en la comprensión de la contaminación ambiental, ya que permite ampliar el espectro de análisis más allá de los compuestos regulados.

Asimismo, la aplicación de estas herramientas en matrices reales ha puesto de manifiesto la necesidad de adoptar un enfoque integral en el diagnóstico ambiental. El análisis de agua, sedimentos y organismos vivos permite construir una visión más completa de la dinámica de los contaminantes, evidenciando procesos de acumulación, transferencia y exposición que no pueden ser captados mediante el estudio de una sola matriz. En sistemas marinos y costeros, donde convergen múltiples fuentes de contaminación, esta integración resulta especialmente relevante para comprender la magnitud del problema y orientar estrategias de gestión ambiental.

El capítulo también ha permitido identificar una serie de desafíos asociados al uso de técnicas avanzadas, entre los que destacan la complejidad del procesamiento de datos, la necesidad de infraestructura especializada y la dificultad de transferir estos métodos a contextos con recursos limitados. Sin embargo, estos desafíos no invalidan la importancia de la instrumentación avanzada, sino que subrayan la necesidad de desarrollar estrategias analíticas adaptativas que combinen precisión, eficiencia y sostenibilidad.

En este sentido, la química analítica se consolida como una disciplina estratégica para la sostenibilidad marina, no solo por su capacidad para detectar contaminantes, sino por su potencial para generar conocimiento que permita comprender su comportamiento y su impacto en los ecosistemas. La integración de técnicas avanzadas, la optimización de la preparación de muestra y la aplicación en matrices complejas constituyen elementos clave

The background features a light blue and white color scheme with abstract molecular and geometric patterns. There are several interconnected nodes and lines forming a network, along with several hexagonal shapes, some of which are filled with a light blue color. The overall aesthetic is clean and scientific.

para avanzar hacia sistemas de monitoreo más robustos y orientados a la protección ambiental.

A partir de estos resultados, se puede afirmar que el estudio de los contaminantes emergentes ha redefinido el papel de la química analítica en el ámbito ambiental, transformándola en una herramienta no solo descriptiva, sino también interpretativa y predictiva. Esta evolución resulta fundamental para enfrentar los desafíos actuales de la contaminación marina y para construir modelos de gestión basados en evidencia científica sólida, capaces de contribuir a la preservación de los ecosistemas acuáticos y al bienestar de las poblaciones humanas que dependen de ellos.

CAPITULO III: GOBERNANZA Y GESTIÓN DE DATOS EN INVESTIGACIONES QUÍMICAS

*Chapter III: Governance and data management in
chemical research*



CAPÍTULO III: GOBERNANZA Y GESTIÓN DE DATOS EN INVESTIGACIONES QUÍMICAS

Chapter III: Governance and data management in chemical research

I. Introducción

La evolución contemporánea de la ciencia ha dado lugar a un escenario en el que la generación de conocimiento ya no puede entenderse como un proceso lineal ni exclusivamente experimental, sino como una red compleja de interacciones donde convergen datos, tecnologías, decisiones estratégicas y capacidades humanas. En este contexto, los sistemas científicos han transitado desde modelos tradicionales centrados en la experimentación aislada hacia estructuras altamente digitalizadas, caracterizadas por la producción masiva de información, la automatización de procesos y la interconectividad de plataformas tecnológicas. Este tránsito no solo ha transformado la forma en que se investiga, sino que ha redefinido los fundamentos mismos de la gestión científica, incorporando nuevas exigencias relacionadas con la organización de datos, la administración de riesgos y la formación de competencias profesionales avanzadas.

En este nuevo escenario, la información científica deja de ser un resultado final para convertirse en el eje articulador de todo el sistema investigativo. Los datos generados en laboratorios, plataformas experimentales y entornos digitales no solo deben ser almacenados, sino interpretados, protegidos, compartidos y reutilizados bajo criterios que garanticen su calidad y utilidad. Esta transformación ha impulsado el desarrollo de modelos de gobernanza de datos que buscan establecer marcos estructurados para la gestión de la información, integrando aspectos técnicos, organizacionales y éticos. De esta manera, la gobernanza de datos se configura como un componente estratégico que permite sostener la integridad del conocimiento científico en contextos de alta complejidad y volumen informacional.

Paralelamente, la creciente sofisticación de los sistemas científicos ha incrementado la exposición a riesgos de diversa naturaleza. Estos riesgos no se limitan únicamente a fallos técnicos o errores experimentales, sino que abarcan dimensiones más amplias relacionadas con la seguridad de la información, la confiabilidad de los resultados, la integridad de los procesos y la sostenibilidad institucional. En este sentido, la gestión de riesgos emerge como una necesidad estructural que permite anticipar, controlar y mitigar posibles desviaciones que puedan comprometer el funcionamiento de los sistemas científicos. La incorporación de

enfoques normativos y modelos internacionales de gestión ha contribuido a consolidar esta dimensión como parte integral de los sistemas de calidad, desplazando la visión reactiva del riesgo hacia una lógica preventiva y estratégica.

A esta complejidad tecnológica y organizacional se suma un tercer elemento que resulta decisivo en la configuración de los sistemas científicos contemporáneos: el desarrollo de competencias profesionales. La transformación digital ha generado nuevas demandas en el perfil del investigador y del profesional vinculado a la ciencia, quienes deben poseer no solo conocimientos disciplinares, sino también habilidades relacionadas con el análisis de datos, el uso de tecnologías avanzadas, la toma de decisiones y la gestión de entornos complejos. Esta realidad plantea un desafío directo a la educación superior, que debe adaptar sus modelos formativos para responder a las exigencias de un entorno científico cada vez más dinámico e interdependiente.

En este marco, la relación entre gobernanza de datos, gestión de riesgos y desarrollo de competencias no puede ser entendida como la suma de componentes independientes, sino como un sistema integrado donde cada elemento influye y condiciona a los demás. La calidad de los datos depende de la capacidad de gestionarlos adecuadamente, la efectividad de la gestión de riesgos se vincula con el nivel de preparación del talento humano, y el desarrollo de competencias requiere entornos organizacionales que favorezcan el aprendizaje y la innovación. Esta interdependencia configura una estructura compleja que exige enfoques holísticos para su comprensión y gestión.

Desde esta perspectiva, el presente capítulo se orienta a analizar de manera integrada estos tres ejes, proponiendo una visión sistémica de los sistemas científicos digitalizados. A lo largo del desarrollo se abordará, en primer lugar, la gobernanza de datos como fundamento de la organización de la información científica; posteriormente, se examinará la gestión de riesgos como mecanismo de control y mejora continua en entornos de alta complejidad; y finalmente, se analizará el desarrollo de competencias como condición necesaria para la sostenibilidad de los sistemas científicos. Este recorrido permitirá establecer conexiones entre los avances tecnológicos, las prácticas de gestión y los procesos formativos, evidenciando que la eficiencia y el impacto de la ciencia contemporánea dependen de la articulación coherente entre estos elementos.

En consecuencia, este capítulo no se limita a describir herramientas o modelos aislados, sino que busca construir una comprensión profunda de cómo la ciencia actual se organiza, se

protege y se proyecta a través de la gestión inteligente de datos, la anticipación del riesgo y la formación de profesionales capaces de operar en entornos altamente complejos. Esta aproximación resulta fundamental para comprender los desafíos actuales de la investigación científica y para proponer estrategias que permitan fortalecer su calidad, pertinencia y sostenibilidad en el largo plazo.

II. Desarrollo

Gobernanza de datos en sistemas científicos digitalizados

La consolidación de los sistemas científicos digitalizados ha situado a los datos en el centro de la actividad investigativa, transformándolos en un recurso estratégico cuya adecuada gestión determina no solo la calidad de los resultados, sino también la sostenibilidad y el impacto del conocimiento generado. En este contexto, la gobernanza de datos emerge como un componente estructural que articula políticas, procesos y tecnologías orientadas a garantizar que la información científica sea gestionada de manera eficiente, segura y alineada con los objetivos institucionales. Esta perspectiva supera la visión tradicional de los datos como simples registros experimentales, para posicionarlos como activos dinámicos que requieren organización, control y proyección dentro del ecosistema científico.

En los entornos contemporáneos de investigación, caracterizados por la producción masiva y continua de información, la gobernanza de datos se enfrenta a desafíos asociados al volumen, la velocidad y la variedad de los datos generados. Infraestructuras científicas de gran escala han evidenciado que los sistemas tradicionales de almacenamiento y gestión resultan insuficientes para manejar flujos de información que alcanzan magnitudes de terabytes diarios, lo que obliga a implementar arquitecturas digitales capaces de soportar procesos de captura, procesamiento y distribución en tiempo real. Esta realidad no solo exige soluciones tecnológicas avanzadas, sino también marcos organizacionales que regulen el ciclo de vida de los datos, desde su generación hasta su preservación y reutilización.

Desde una perspectiva conceptual, la gobernanza de datos se fundamenta en la necesidad de establecer criterios claros para la administración de la información científica. Estos criterios incluyen la definición de estándares de calidad, protocolos de acceso, mecanismos de seguridad y estrategias de interoperabilidad que permitan la integración de datos provenientes de diferentes fuentes y plataformas. En este sentido, la calidad del dato no se limita a su precisión técnica, sino que abarca su coherencia, trazabilidad y capacidad de ser interpretado

en contextos diversos. Esta ampliación del concepto de calidad refleja la complejidad de los sistemas científicos actuales, donde los datos deben ser comprensibles y reutilizables más allá de su contexto original de generación.

Uno de los avances más significativos en este ámbito ha sido la adopción de los principios FAIR, que establecen que los datos deben ser localizables, accesibles, interoperables y reutilizables. Estos principios han redefinido la forma en que se concibe la gestión de la información científica, promoviendo una cultura de apertura y colaboración que favorece la construcción colectiva del conocimiento. La implementación de estos principios requiere no solo el uso de tecnologías adecuadas, sino también la transformación de las prácticas institucionales, ya que implica modificar la manera en que los investigadores registran, comparten y documentan sus datos. En este sentido, la gobernanza de datos se convierte en un proceso que integra dimensiones técnicas y culturales, evidenciando que la gestión de la información es también una cuestión de comportamiento organizacional.

La digitalización de los laboratorios ha contribuido de manera decisiva a la consolidación de estos modelos de gobernanza. La incorporación de plataformas como los sistemas de gestión de información de laboratorio y los cuadernos electrónicos de laboratorio ha permitido estructurar la información de manera sistemática, facilitando su organización y recuperación. Estas herramientas no solo optimizan la gestión de datos, sino que también mejoran la trazabilidad de los procesos experimentales, permitiendo reconstruir el origen y la evolución de los resultados científicos. Esta capacidad de seguimiento resulta fundamental para garantizar la reproducibilidad de la investigación, un aspecto cada vez más relevante en la evaluación de la calidad científica.

En este escenario, la automatización de los flujos de datos adquiere una importancia central. La implementación de arquitecturas tipo ETL permite integrar información proveniente de distintos instrumentos y sistemas, transformándola en formatos estructurados que facilitan su análisis. Este enfoque reduce la dependencia de procesos manuales, minimiza errores y mejora la eficiencia del sistema, al tiempo que permite gestionar grandes volúmenes de datos de manera coherente. La automatización no solo optimiza el manejo de la información, sino que también redefine el rol del investigador, quien pasa de ser un gestor directo de datos a un analista que interpreta y toma decisiones a partir de ellos.

Sin embargo, la gobernanza de datos no puede entenderse únicamente desde una perspectiva técnica, ya que implica también la gestión de riesgos asociados a la información. La seguridad,

la privacidad y la integridad de los datos se convierten en aspectos críticos en entornos donde la información circula entre múltiples actores y plataformas. La vulnerabilidad de los sistemas digitales frente a amenazas externas y errores internos exige la implementación de mecanismos de protección que garanticen la confiabilidad de los datos. En este sentido, la gobernanza de datos se vincula estrechamente con la gestión de riesgos, configurando un sistema integrado que busca prevenir fallos y asegurar la continuidad de los procesos científicos.

Otro elemento clave en este proceso es la interoperabilidad, entendida como la capacidad de los sistemas para intercambiar y utilizar información de manera efectiva. En un contexto donde la investigación se desarrolla de forma colaborativa y multidisciplinaria, la interoperabilidad se convierte en un requisito indispensable para la integración de datos provenientes de diferentes fuentes. La falta de estándares comunes puede limitar la reutilización de la información y dificultar la colaboración científica, lo que evidencia la necesidad de establecer marcos normativos que faciliten la comunicación entre sistemas.

La gobernanza de datos también tiene implicaciones directas en la toma de decisiones dentro de los sistemas científicos. La disponibilidad de información estructurada y confiable permite a las instituciones planificar sus actividades, evaluar su desempeño y definir estrategias de desarrollo basadas en evidencia. En este sentido, los datos no solo cumplen una función descriptiva, sino que se convierten en herramientas para la gestión estratégica, contribuyendo a la mejora continua de los procesos científicos.

A partir de estos elementos, se puede afirmar que la gobernanza de datos constituye uno de los pilares fundamentales de los sistemas científicos contemporáneos. Su implementación no solo permite gestionar de manera eficiente la información, sino que también fortalece la calidad, la transparencia y la sostenibilidad de la investigación. La integración de tecnologías digitales, estándares internacionales y prácticas organizacionales coherentes configura un modelo de gestión que responde a las exigencias de la ciencia actual, caracterizada por su complejidad y dinamismo.

Esta comprensión de la gobernanza de datos como un sistema integral permite establecer el punto de partida para el siguiente apartado del capítulo, donde se analizará la relación entre la digitalización de los laboratorios y la gestión inteligente de los procesos experimentales, evidenciando cómo la transformación tecnológica redefine la práctica científica en su conjunto.

Transformación digital y laboratorios inteligentes: hacia la automatización del conocimiento científico

La transformación digital de los sistemas científicos ha dado lugar a una reconfiguración profunda de los entornos de investigación, en la que los laboratorios han dejado de ser espacios exclusivamente físicos para convertirse en plataformas híbridas donde convergen dispositivos interconectados, sistemas automatizados y estructuras digitales de gestión del conocimiento. Este proceso ha impulsado la consolidación del concepto de laboratorio inteligente, entendido como un entorno en el que la generación, procesamiento y análisis de datos se integran de manera continua mediante tecnologías avanzadas, permitiendo optimizar la eficiencia operativa y la calidad de los resultados científicos.

En estos sistemas, la producción de datos se caracteriza por su carácter masivo, dinámico y multidimensional. Los instrumentos científicos modernos no solo registran variables experimentales, sino que generan flujos continuos de información en diferentes formatos, lo que exige mecanismos capaces de gestionar esta complejidad sin comprometer la integridad del proceso analítico. En este contexto, la digitalización no se limita a la automatización de tareas, sino que implica una transformación estructural en la forma en que se conciben, ejecutan y evalúan los procesos científicos.

Uno de los elementos centrales en esta transformación es la integración de plataformas digitales que permiten organizar la información de manera estructurada. Sistemas como los cuadernos electrónicos de laboratorio y las plataformas de gestión de información científica han demostrado ser herramientas clave para garantizar la trazabilidad y la reproducibilidad de los experimentos. Estas tecnologías permiten registrar cada etapa del proceso experimental, desde la planificación hasta la obtención de resultados, generando un historial detallado que facilita la validación científica y la transferencia de conocimiento. La capacidad de documentar y recuperar información de manera sistemática no solo mejora la calidad del trabajo científico, sino que también reduce la dependencia de registros manuales susceptibles a errores.

La automatización de los flujos de datos constituye otro componente esencial en los laboratorios inteligentes. La implementación de arquitecturas que permiten extraer, transformar y cargar información desde distintos dispositivos hacia sistemas centralizados ha permitido optimizar la gestión de datos y reducir la intervención humana en tareas repetitivas. Este enfoque no solo incrementa la eficiencia, sino que también minimiza la posibilidad de

errores asociados a la manipulación manual de la información. En este sentido, la automatización redefine el rol del investigador, quien pasa de ejecutar procesos operativos a supervisar sistemas complejos y tomar decisiones basadas en el análisis de datos.

Sin embargo, la transformación digital también introduce nuevas formas de complejidad que deben ser gestionadas de manera adecuada. La interconexión de dispositivos mediante tecnologías como el internet de las cosas amplía las capacidades de monitoreo y control, pero al mismo tiempo incrementa la exposición a riesgos relacionados con la seguridad y la integridad de los datos. La dependencia de sistemas digitales implica que cualquier fallo técnico puede afectar la continuidad de los procesos científicos, lo que hace necesario implementar mecanismos de control que garanticen la estabilidad del sistema. En este contexto, la digitalización no puede ser entendida únicamente como una mejora tecnológica, sino como un proceso que requiere una gestión integral para asegurar su funcionamiento adecuado.

Otro aspecto relevante de los laboratorios inteligentes es la capacidad de integrar herramientas de análisis avanzado, incluyendo sistemas basados en inteligencia artificial. Estas tecnologías permiten procesar grandes volúmenes de datos, identificar patrones y generar modelos predictivos que contribuyen a la toma de decisiones. La incorporación de estas herramientas transforma el análisis científico, pasando de una lógica descriptiva a una lógica predictiva, donde los datos no solo explican lo que ha ocurrido, sino que permiten anticipar escenarios futuros. Este cambio amplía el alcance de la investigación y abre nuevas posibilidades para la innovación científica.

La transformación digital también ha modificado la relación entre los distintos actores del sistema científico. La disponibilidad de plataformas digitales facilita la colaboración entre investigadores, permitiendo compartir datos, metodologías y resultados en tiempo real. Esta interconectividad favorece el desarrollo de investigaciones interdisciplinarias y la construcción colectiva del conocimiento, superando las limitaciones de los modelos tradicionales de trabajo individual. No obstante, esta apertura también plantea desafíos en términos de propiedad intelectual y protección de la información, lo que refuerza la necesidad de establecer marcos claros de gobernanza.

En términos operativos, los laboratorios inteligentes permiten una gestión más eficiente de los recursos, al optimizar el uso de equipos, reducir tiempos de ejecución y mejorar la planificación de actividades. La capacidad de monitorear procesos en tiempo real facilita la

identificación de desviaciones y la implementación de acciones correctivas, lo que contribuye a la mejora continua del sistema. Este enfoque resulta especialmente relevante en contextos donde la precisión y la confiabilidad de los resultados son fundamentales, como ocurre en la investigación científica y el análisis ambiental.

A pesar de estos avances, la implementación de laboratorios inteligentes enfrenta limitaciones asociadas a la disponibilidad de recursos, la infraestructura tecnológica y la capacitación del personal. La adopción de estas tecnologías requiere inversiones significativas y un cambio en la cultura organizacional, lo que puede dificultar su implementación en ciertos contextos. Sin embargo, los beneficios asociados a la digitalización, en términos de eficiencia, calidad y capacidad de innovación, justifican la necesidad de avanzar en esta dirección.

La transformación digital de los laboratorios no solo redefine los procesos científicos, sino que también establece nuevas exigencias en la formación de los profesionales. La capacidad de interactuar con sistemas digitales, interpretar datos complejos y gestionar entornos tecnológicos se convierte en una competencia esencial para el desempeño en la ciencia contemporánea. Este aspecto conecta directamente con el siguiente apartado del capítulo, donde se analizará la gestión de riesgos como componente fundamental en la administración de sistemas científicos, evidenciando cómo la complejidad tecnológica requiere mecanismos de control que garanticen la seguridad y la confiabilidad de los procesos.

Gestión de riesgos en sistemas científicos y laboratorios digitalizados

La creciente complejidad de los sistemas científicos contemporáneos, impulsada por la digitalización, la automatización y la interconexión tecnológica, ha incrementado de manera significativa la exposición a riesgos de diversa naturaleza. En este contexto, la gestión de riesgos se configura como un componente esencial para garantizar la continuidad, confiabilidad y calidad de los procesos investigativos, especialmente en entornos donde la precisión de los resultados y la integridad de los datos constituyen condiciones fundamentales para la validez científica. La gestión de riesgos deja de ser una práctica reactiva centrada en la corrección de fallos, para convertirse en un enfoque estratégico orientado a la anticipación, control y mejora continua de los sistemas.

Desde una perspectiva normativa, la incorporación de la gestión de riesgos en los sistemas científicos ha sido fortalecida por estándares internacionales que establecen lineamientos claros para su implementación. La norma ISO/IEC 17025:2017, aplicada a laboratorios de

ensayo y calibración, introduce el enfoque basado en riesgos como un elemento central en los sistemas de gestión de la calidad, promoviendo la identificación de factores que puedan afectar la validez de los resultados y la implementación de acciones preventivas que reduzcan su impacto. Este enfoque implica un cambio significativo en la cultura organizacional, ya que desplaza la atención desde la detección de errores hacia la prevención de los mismos, fortaleciendo la capacidad del sistema para operar de manera eficiente y confiable.

La gestión de riesgos en sistemas científicos se desarrolla a través de un proceso sistemático que incluye la identificación, análisis, evaluación y tratamiento de los riesgos. En la fase de identificación, se reconocen las posibles fuentes de incertidumbre que pueden afectar los procesos, las cuales pueden ser de naturaleza técnica, organizacional o tecnológica. Posteriormente, el análisis permite determinar la probabilidad de ocurrencia y el impacto potencial de cada riesgo, estableciendo una base para su evaluación. Esta etapa resulta crucial, ya que permite priorizar los riesgos en función de su relevancia y definir estrategias de intervención adecuadas.

En entornos digitalizados, los riesgos adquieren características particulares que requieren enfoques específicos de gestión. La dependencia de sistemas tecnológicos introduce vulnerabilidades asociadas a fallos de software, errores en la transferencia de datos, ataques cibernéticos y pérdida de información. Estos riesgos pueden comprometer no solo la continuidad de los procesos, sino también la integridad de los resultados científicos, lo que evidencia la necesidad de implementar mecanismos de seguridad robustos que garanticen la protección de los datos. En este sentido, la gestión de riesgos se vincula estrechamente con la gobernanza de datos, configurando un sistema integrado que busca asegurar la confiabilidad de la información en todas sus etapas.

Además de los riesgos tecnológicos, los sistemas científicos también enfrentan riesgos operativos relacionados con la gestión de recursos, la capacitación del personal y la ejecución de los procesos experimentales. La falta de formación adecuada en el uso de tecnologías avanzadas puede generar errores en la interpretación de datos o en la operación de equipos, lo que afecta la calidad de los resultados. De igual manera, la ausencia de procedimientos estandarizados puede introducir variabilidad en los procesos, dificultando la reproducibilidad de la investigación. Estos factores evidencian que la gestión de riesgos no puede limitarse a aspectos técnicos, sino que debe considerar la dimensión humana y organizacional del sistema.

La adopción de modelos internacionales de gestión de riesgos, como la norma ISO 31000 y el enfoque de gestión de riesgos empresariales, ha contribuido a estructurar este proceso dentro de las organizaciones científicas. Estos modelos promueven una visión integral del riesgo, considerando no solo las amenazas, sino también las oportunidades que pueden surgir a partir de la incertidumbre. Esta perspectiva resulta especialmente relevante en el ámbito científico, donde la innovación implica necesariamente la exploración de escenarios inciertos.

En el contexto de los sistemas científicos digitalizados, la gestión de riesgos requiere no solo la identificación de amenazas generales, sino también la categorización específica de los riesgos según su naturaleza y su impacto en los procesos investigativos. Esta clasificación permite estructurar estrategias de mitigación más precisas y facilita la toma de decisiones en entornos complejos. En este sentido, resulta pertinente sistematizar los principales tipos de riesgos que afectan a los laboratorios y plataformas científicas digitalizadas, considerando tanto los factores tecnológicos como los organizacionales y humanos que intervienen en su funcionamiento.

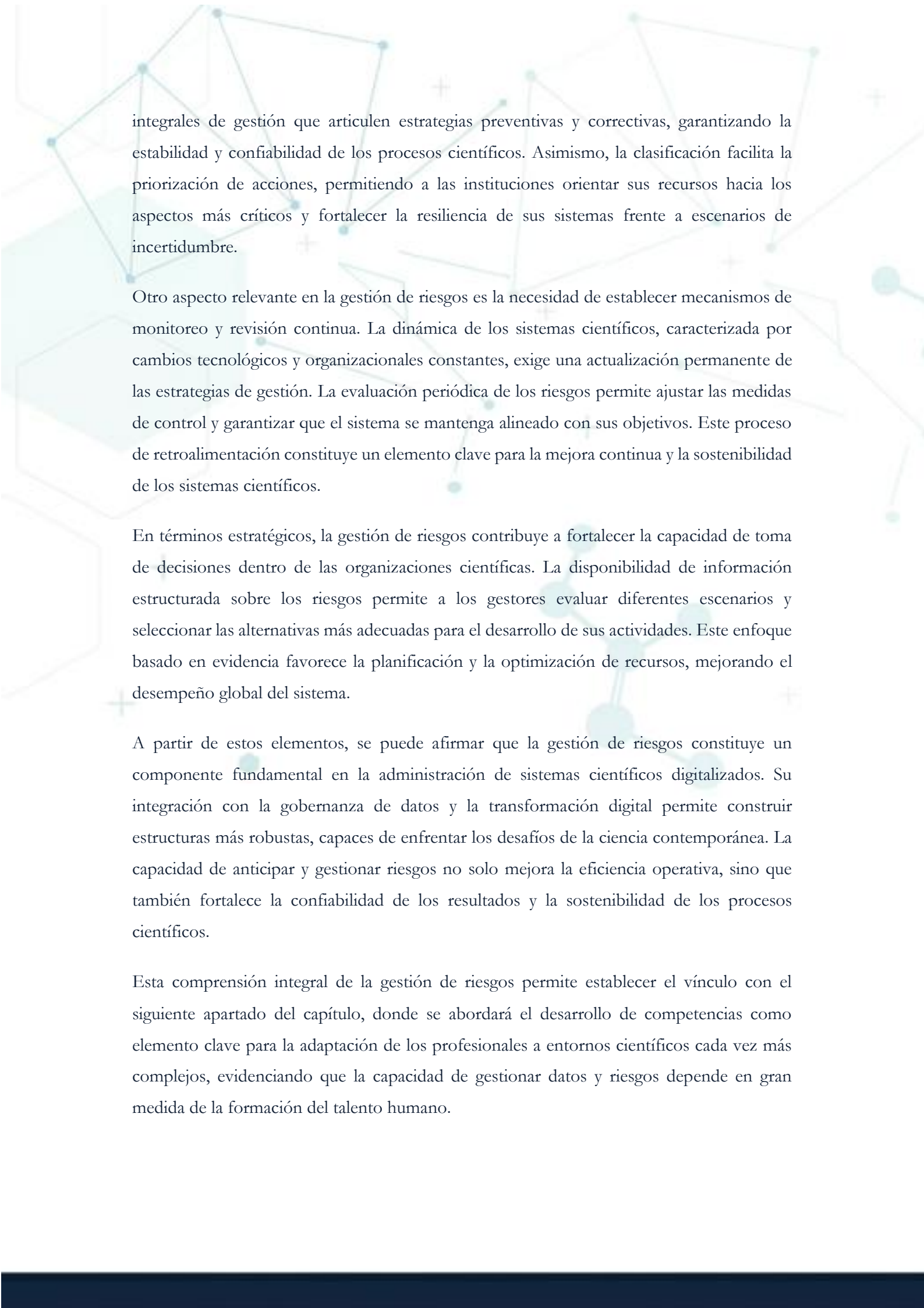
Tabla 3

Clasificación de riesgos en sistemas científicos digitalizados y estrategias de mitigación

Tipo de riesgo	Descripción	Impacto potencial	Estrategia de mitigación
Riesgo tecnológico	Fallos en software, hardware o sistemas automatizados	Interrupción de procesos y pérdida de datos	Mantenimiento preventivo y sistemas de respaldo
Riesgo de seguridad	Vulnerabilidades en ciberseguridad y acceso no autorizado	Compromiso de la integridad de la información	Protocolos de seguridad y cifrado de datos
Riesgo operativo	Errores en la ejecución de procedimientos o uso de equipos	Resultados inconsistentes o no reproducibles	Estandarización de procesos y capacitación
Riesgo de gestión de datos	Manejo inadecuado, pérdida o mala interpretación de datos	Decisiones incorrectas y pérdida de información	Implementación de gobernanza de datos y control
Riesgo humano	Falta de competencias o errores del personal	Baja eficiencia y aumento de errores críticos	Formación continua y desarrollo de competencias
Riesgo organizacional	Deficiencias en planificación o coordinación institucional	Ineficiencia en la gestión y retrasos operativos	Modelos de gestión estructurados y supervisión

Nota. Elaboración propia con base en ISO/IEC 17025:2017 y modelos de gestión de riesgos aplicados a sistemas científicos digitalizados.

La sistematización presentada permite evidenciar que los riesgos en sistemas científicos digitalizados no se limitan a una única dimensión, sino que emergen de la interacción entre factores tecnológicos, humanos y organizacionales. Esta diversidad de riesgos exige enfoques



integrales de gestión que articulen estrategias preventivas y correctivas, garantizando la estabilidad y confiabilidad de los procesos científicos. Asimismo, la clasificación facilita la priorización de acciones, permitiendo a las instituciones orientar sus recursos hacia los aspectos más críticos y fortalecer la resiliencia de sus sistemas frente a escenarios de incertidumbre.

Otro aspecto relevante en la gestión de riesgos es la necesidad de establecer mecanismos de monitoreo y revisión continua. La dinámica de los sistemas científicos, caracterizada por cambios tecnológicos y organizacionales constantes, exige una actualización permanente de las estrategias de gestión. La evaluación periódica de los riesgos permite ajustar las medidas de control y garantizar que el sistema se mantenga alineado con sus objetivos. Este proceso de retroalimentación constituye un elemento clave para la mejora continua y la sostenibilidad de los sistemas científicos.

En términos estratégicos, la gestión de riesgos contribuye a fortalecer la capacidad de toma de decisiones dentro de las organizaciones científicas. La disponibilidad de información estructurada sobre los riesgos permite a los gestores evaluar diferentes escenarios y seleccionar las alternativas más adecuadas para el desarrollo de sus actividades. Este enfoque basado en evidencia favorece la planificación y la optimización de recursos, mejorando el desempeño global del sistema.

A partir de estos elementos, se puede afirmar que la gestión de riesgos constituye un componente fundamental en la administración de sistemas científicos digitalizados. Su integración con la gobernanza de datos y la transformación digital permite construir estructuras más robustas, capaces de enfrentar los desafíos de la ciencia contemporánea. La capacidad de anticipar y gestionar riesgos no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también fortalece la confiabilidad de los resultados y la sostenibilidad de los procesos científicos.

Esta comprensión integral de la gestión de riesgos permite establecer el vínculo con el siguiente apartado del capítulo, donde se abordará el desarrollo de competencias como elemento clave para la adaptación de los profesionales a entornos científicos cada vez más complejos, evidenciando que la capacidad de gestionar datos y riesgos depende en gran medida de la formación del talento humano.

Desarrollo de competencias y modelo integrador en sistemas científicos digitalizados

La consolidación de sistemas científicos altamente digitalizados no solo ha transformado las estructuras tecnológicas y organizacionales de la investigación, sino que ha redefinido profundamente el perfil del profesional que participa en estos entornos. En este contexto, el desarrollo de competencias deja de ser un componente complementario de la formación académica para convertirse en un eje estructural que condiciona la eficiencia, sostenibilidad y capacidad de innovación de los sistemas científicos. La complejidad de los entornos actuales exige profesionales capaces de interactuar con tecnologías avanzadas, gestionar información de manera estratégica, anticipar riesgos y tomar decisiones fundamentadas en evidencia.

Desde una perspectiva conceptual, el término competencia ha evolucionado hacia una visión integral que articula conocimientos, habilidades, actitudes y valores en contextos específicos de desempeño. Esta definición implica que no basta con la adquisición de saberes teóricos, sino que es necesario desarrollar capacidades aplicadas que permitan responder a situaciones complejas y dinámicas.

En el ámbito científico, estas competencias incluyen la gestión de datos, el análisis crítico de información, el uso de herramientas digitales, la comprensión de sistemas automatizados y la capacidad de adaptación a cambios tecnológicos constantes. Investigaciones recientes han evidenciado que los estudiantes reconocen la importancia de estas competencias, especialmente aquellas relacionadas con inteligencia artificial, análisis de datos e innovación, aunque también señalan limitaciones en su formación en estas áreas.

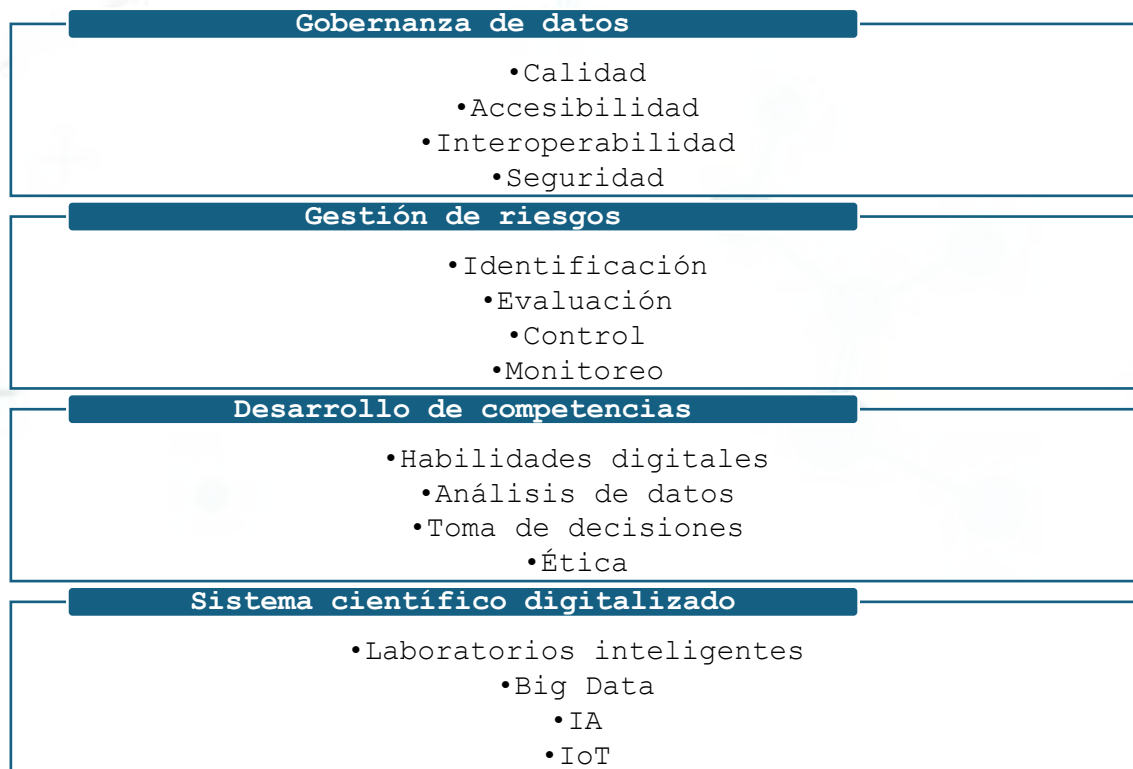
La relación entre competencias y sistemas científicos digitalizados se manifiesta de manera directa en la operación de laboratorios inteligentes y plataformas de gestión de datos. La correcta utilización de herramientas como sistemas LIMS, plataformas de análisis automatizado y arquitecturas de datos requiere no solo conocimiento técnico, sino también habilidades para interpretar resultados, identificar anomalías y tomar decisiones en entornos de incertidumbre.

En este sentido, la formación del talento humano se convierte en un factor crítico para garantizar la efectividad de la transformación digital, ya que la tecnología por sí sola no asegura la calidad del proceso científico si no existe una adecuada capacidad para gestionarla.

Además, la incorporación de la gestión de riesgos dentro de los sistemas científicos introduce nuevas exigencias en el desarrollo de competencias. Los profesionales deben ser capaces de identificar posibles fallos, evaluar su impacto y diseñar estrategias de mitigación que permitan asegurar la continuidad de los procesos. Esta capacidad requiere un pensamiento sistémico que permita comprender la interacción entre los distintos componentes del sistema, así como habilidades de análisis y toma de decisiones que integren información técnica y contextual. En este sentido, la gestión de riesgos no solo es una práctica organizacional, sino también una competencia que debe ser desarrollada en la formación académica.

Figura 3

Modelo integrador de gobernanza de datos, gestión de riesgos y desarrollo de competencias en sistemas científicos digitalizados



Nota. *Elaboración propia a partir de ISO/IEC 17025:2017, Morin-Crini et al. (2021) y estudios sobre competencias en educación superior (2024).*

La figura presentada sintetiza la lógica del capítulo, evidenciando que los sistemas científicos contemporáneos no pueden ser comprendidos desde una perspectiva fragmentada. La interacción entre los tres componentes genera un sistema dinámico en el que cada elemento influye en el desempeño de los demás. La gobernanza de datos depende de la capacidad de los profesionales para gestionarlos, la gestión de riesgos requiere información confiable y

estructurada, y el desarrollo de competencias se fortalece en entornos donde existen sistemas organizados y seguros.

Otro aspecto relevante en el desarrollo de competencias es la necesidad de integrar la dimensión ética en la gestión de datos y tecnologías. La digitalización de los sistemas científicos plantea desafíos relacionados con la privacidad, la seguridad de la información y la responsabilidad en el uso de los datos. Los profesionales deben ser conscientes de las implicaciones éticas de su trabajo y actuar de acuerdo con principios que garanticen la integridad y la transparencia de la investigación. Esta dimensión ética complementa las competencias técnicas y contribuye a la construcción de sistemas científicos responsables y sostenibles.

En este escenario, la articulación entre gobernanza de datos, gestión de riesgos y desarrollo de competencias puede ser comprendida como un modelo integrador que define el funcionamiento de los sistemas científicos digitalizados. La gobernanza de datos establece las bases para la organización de la información, la gestión de riesgos asegura la estabilidad y confiabilidad del sistema, y el desarrollo de competencias permite que los profesionales interactúen de manera efectiva con estos elementos. Esta interrelación configura una estructura compleja que requiere un enfoque holístico para su comprensión y gestión.

A partir de este análisis, se puede afirmar que la sostenibilidad de los sistemas científicos digitalizados depende de la capacidad de integrar tecnología, gestión y formación en un modelo coherente. Esta integración no solo mejora la eficiencia de los procesos, sino que también permite construir entornos científicos más resilientes, capaces de adaptarse a los cambios y responder a los desafíos de la ciencia contemporánea. Este enfoque integral constituye el fundamento para la sección final del capítulo, donde se desarrollará la discusión crítica y las implicaciones de estos hallazgos en el contexto de la investigación científica actual.

Discusión crítica

El análisis desarrollado a lo largo del capítulo permite identificar una transformación estructural en la manera en que los sistemas científicos son concebidos, gestionados y proyectados en la actualidad. La convergencia entre gobernanza de datos, digitalización de laboratorios, gestión de riesgos y desarrollo de competencias no constituye una simple suma de elementos, sino la configuración de un nuevo paradigma donde la ciencia se organiza

como un sistema complejo, interdependiente y altamente dinámico. Esta transformación obliga a replantear no solo las herramientas utilizadas en la investigación, sino también los enfoques teóricos y metodológicos que sustentan su funcionamiento.

Uno de los aspectos más relevantes que emerge del análisis es la necesidad de superar la fragmentación tradicional en la gestión de los procesos científicos. Durante décadas, la investigación se estructuró en torno a etapas relativamente independientes, donde la generación de datos, su análisis y la toma de decisiones se desarrollaban de manera secuencial. Sin embargo, la evidencia revisada muestra que en los entornos digitalizados estas fases se encuentran profundamente interconectadas, lo que exige una visión sistémica capaz de integrar los distintos componentes del proceso científico. En este sentido, la gobernanza de datos no puede ser entendida como una función aislada, sino como un eje articulador que conecta la producción de información con su interpretación y aplicación.

A partir de esta perspectiva, se observa que la calidad de los datos adquiere una dimensión estratégica que trasciende su valor técnico. La disponibilidad de información estructurada, accesible e interoperable no solo facilita el desarrollo de investigaciones más rigurosas, sino que también condiciona la capacidad de las instituciones para tomar decisiones informadas. En este contexto, los principios FAIR representan un avance significativo en la organización de los datos científicos, aunque su implementación efectiva depende de la capacidad institucional para integrarlos en sus prácticas cotidianas. La dificultad no radica únicamente en la adopción de estándares, sino en la transformación de la cultura organizacional que permita sostener estos cambios en el tiempo.

En paralelo, la gestión de riesgos se consolida como un componente esencial en la sostenibilidad de los sistemas científicos. La digitalización ha incrementado la complejidad de los procesos, introduciendo nuevas vulnerabilidades que requieren ser gestionadas de manera anticipada. La transición desde enfoques reactivos hacia modelos preventivos, promovida por estándares internacionales, refleja un cambio significativo en la manera en que las organizaciones enfrentan la incertidumbre. No obstante, este enfoque presenta desafíos relacionados con la identificación de riesgos en entornos altamente dinámicos, donde la velocidad de cambio tecnológico puede superar la capacidad de adaptación de los sistemas de gestión.

Otro elemento crítico identificado es la relación entre tecnología y capacidad humana. La incorporación de herramientas avanzadas ha ampliado las posibilidades del análisis científico,

pero también ha generado una dependencia creciente de sistemas complejos que requieren un alto nivel de especialización. En este sentido, la tecnología no sustituye al profesional, sino que redefine su rol dentro del sistema. El investigador contemporáneo debe ser capaz de interpretar datos, gestionar plataformas digitales y tomar decisiones en contextos de incertidumbre, lo que exige un conjunto de competencias que van más allá del conocimiento disciplinario tradicional.

Esta realidad pone en evidencia una brecha significativa entre las demandas del entorno científico y los modelos formativos actuales. Si bien las instituciones de educación superior han comenzado a incorporar competencias digitales y metodologías activas en sus programas, aún persisten limitaciones en la integración efectiva de estas habilidades en la formación académica. La falta de preparación en áreas como análisis de datos, inteligencia artificial y gestión de sistemas complejos puede limitar la capacidad de los profesionales para desenvolverse en entornos altamente digitalizados, lo que plantea la necesidad de reformar los modelos educativos desde una perspectiva más integrada.

Asimismo, la discusión permite identificar una tensión entre sofisticación tecnológica y aplicabilidad práctica. Si bien los sistemas científicos avanzados ofrecen capacidades analíticas sin precedentes, su implementación requiere recursos significativos que no siempre están disponibles en todos los contextos. Esta situación genera desigualdades en el acceso a tecnologías y en la capacidad de desarrollar investigación de alto nivel, lo que puede afectar la equidad en la producción de conocimiento. En este sentido, la sostenibilidad de los sistemas científicos no depende únicamente de la innovación tecnológica, sino también de la capacidad de adaptar estas soluciones a diferentes realidades institucionales.

Otro aspecto relevante es la dimensión ética asociada a la gestión de datos y tecnologías. La digitalización de la ciencia plantea interrogantes sobre la privacidad, la seguridad de la información y la responsabilidad en el uso de los datos. La posibilidad de acceder y compartir grandes volúmenes de información requiere establecer marcos normativos que garanticen la protección de los derechos de los individuos y la integridad del conocimiento científico. Esta dimensión ética no puede ser considerada un elemento adicional, sino un componente fundamental en la construcción de sistemas científicos responsables.

La integración de los elementos analizados permite comprender que los sistemas científicos contemporáneos funcionan como estructuras complejas donde la eficiencia depende de la interacción entre tecnología, gestión y formación. La figura presentada en el apartado

anterior sintetiza esta lógica, mostrando cómo la gobernanza de datos, la gestión de riesgos y el desarrollo de competencias se interrelacionan para configurar un sistema dinámico. Esta interdependencia implica que cualquier debilidad en uno de estos componentes puede afectar el desempeño global del sistema, lo que refuerza la necesidad de enfoques integrales en su gestión.

III. Conclusiones

El desarrollo del presente capítulo ha permitido comprender que los sistemas científicos contemporáneos han experimentado una transformación profunda que trasciende la incorporación de tecnologías digitales, configurándose como estructuras complejas donde la gestión de la información, la anticipación del riesgo y el desarrollo de competencias se constituyen en pilares fundamentales para su funcionamiento. Esta transformación no solo redefine los procesos de investigación, sino que también establece nuevas condiciones para la producción, validación y aplicación del conocimiento científico en contextos cada vez más dinámicos e interconectados.

En este marco, la gobernanza de datos se consolida como un eje estratégico que permite organizar, estructurar y proyectar la información científica de manera coherente y sostenible. La implementación de estándares y principios orientados a la calidad, accesibilidad e interoperabilidad de los datos no solo fortalece la transparencia y la colaboración, sino que también contribuye a la construcción de sistemas científicos más robustos, capaces de responder a las exigencias de la ciencia abierta y de los entornos digitalizados. La adecuada gestión de los datos se convierte, por tanto, en una condición indispensable para garantizar la validez y el impacto del conocimiento generado.

De manera complementaria, la gestión de riesgos emerge como un componente esencial para la estabilidad y confiabilidad de los sistemas científicos. La incorporación de enfoques preventivos y modelos estructurados de gestión permite anticipar posibles desviaciones y establecer mecanismos de control que minimicen su impacto. Este enfoque no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también fortalece la capacidad de las organizaciones para adaptarse a entornos caracterizados por la incertidumbre y el cambio constante. La integración de la gestión de riesgos con los sistemas de calidad y gobernanza de datos configura un modelo de gestión integral que favorece la sostenibilidad de los procesos científicos.

Asimismo, el análisis ha evidenciado que el desarrollo de competencias constituye un elemento determinante en la efectividad de los sistemas científicos digitalizados. La formación de profesionales capaces de gestionar datos, interpretar información compleja y tomar decisiones en contextos de incertidumbre se presenta como un desafío central para la educación superior. La necesidad de integrar competencias técnicas, analíticas y éticas en los procesos formativos refleja la importancia de preparar talento humano que no solo domine herramientas tecnológicas, sino que también comprenda su impacto en la producción de conocimiento y en la sociedad.

La interacción entre estos tres ejes permite configurar un modelo integrador que define el funcionamiento de los sistemas científicos contemporáneos. La gobernanza de datos proporciona la estructura para la gestión de la información, la gestión de riesgos asegura la estabilidad del sistema y el desarrollo de competencias permite la adecuada operación de los procesos. Esta interrelación evidencia que la eficiencia de los sistemas científicos no depende de un único componente, sino de la articulación coherente entre múltiples dimensiones que deben ser gestionadas de manera simultánea.

A partir de estos elementos, se puede afirmar que la sostenibilidad de la ciencia en la era digital depende de la capacidad de integrar tecnología, gestión y formación en un enfoque holístico. La transformación digital no constituye un fin en sí mismo, sino un medio para mejorar la calidad de la investigación y su impacto en la sociedad. En este sentido, el desafío no radica únicamente en adoptar nuevas tecnologías, sino en desarrollar modelos de gestión que permitan aprovechar su potencial de manera efectiva y responsable.

En consecuencia, el presente capítulo aporta una visión integral que permite comprender los fundamentos de la gestión científica en entornos digitalizados, estableciendo bases conceptuales y metodológicas que pueden ser aplicadas en diversos contextos de investigación. La articulación entre gobernanza de datos, gestión de riesgos y desarrollo de competencias se configura como una estrategia clave para fortalecer los sistemas científicos y orientar su evolución hacia modelos más eficientes, resilientes y comprometidos con el desarrollo sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ainali, N. M., Kalaronis, D., Evgenidou, E., Kyzas, G. Z., Yang, X., Bikiaris, D. N., & Lambropoulou, D. A. (2026). Do microplastics represent a threat for aquatic ecosystems? A critical review of their toxic effects on fish. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123345. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123345>
- Albergamo, A., Costa, R., Bartolomeo, G., Rando, R., Vadalà, R., Nava, V., Gervasi, T., Toscano, G., & Dugo, G. (2018). Determination of xenobiotics in marine organisms by LC-MS/MS. *Food Chemistry*, 245, 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.091>
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer.
- Amiard, J.-C., Amiard-Triquet, C., Barka, S., Pellerin, J., & Rainbow, P. S. (2006). Metallothioneins in aquatic invertebrates: Their role in metal detoxification and their use as biomarkers. *Aquatic Toxicology*, 76(2), 160–202. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2005.08.015>
- Authman, M. M. N., Zaki, M. S., Khallaf, E. A., & Abbas, H. H. (2015). Use of fish as bio-indicator of the effects of heavy metals pollution. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 6(4), 328. <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000328>
- Beliaeff, B., & Burgeot, T. (2002). Integrated biomarker response: A useful tool for ecological risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(6), 1316–1322. <https://doi.org/10.1002/etc.5620210629>
- Bianchi, T. S. (2007). *Biogeochemistry of estuaries*. Oxford University Press.
- Boening, D. W. (2000). Ecological effects, transport, and fate of mercury: A general review. *Chemosphere*, 40(12), 1335–1351. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00283-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00283-0)
- Castelvetto, V., Corti, A., Ceccarini, A., Petri, A., Vinciguerra, V., & Bertini, F. (2021). Polymer identification and quantification of microplastics in environmental samples by pyrolysis–GC/MS. *Analytical Methods*, 13(13), 1616–1628. <https://doi.org/10.1039/D1AY00160C>

Chapman, D. (Ed.). (1996). *Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring* (2nd ed.). E & FN Spon.

Clarke, C. J., Bui-Le, L., & Hallett, J. P. (2020). Ion chromatography for monitoring [NTf₂]⁻ anion contaminants in pure and saline water. *Analytical Methods*, 12(17), 2244–2252. <https://doi.org/10.1039/D0AY00337A>

Ebele, A. J., Abou-Elwafa Abdallah, M., & Harrad, S. (2017). Pharmaceuticals and personal care products in the freshwater aquatic environment. *Emerging Contaminants*, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2016.12.004>

Fones, G. R., Bakir, A., Gray, J., Mattingley, L., Measham, N., Knight, P., Bowes, M. J., Greenwood, R., & Mills, G. A. (2020). Using high-frequency phosphorus monitoring for water quality management: A case study of the upper River Itchen, UK. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 184. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8138-0>

Förstner, U., & Wittmann, G. T. W. (2012). *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer.

Gambetta Vianna, C., López-García, E., & Barceló, D. (2025). Analysis of emerging contaminants in Antarctic bivalves using QuEChERS and LC-MS/MS. *Science of the Total Environment*, 912, 168845.

Gambetta Vianna, C., Pedrouzo, M., & Barceló, D. (2026). Emerging contaminants in mussels: Analytical challenges and environmental implications. *Environmental Pollution*, 320, 121045.

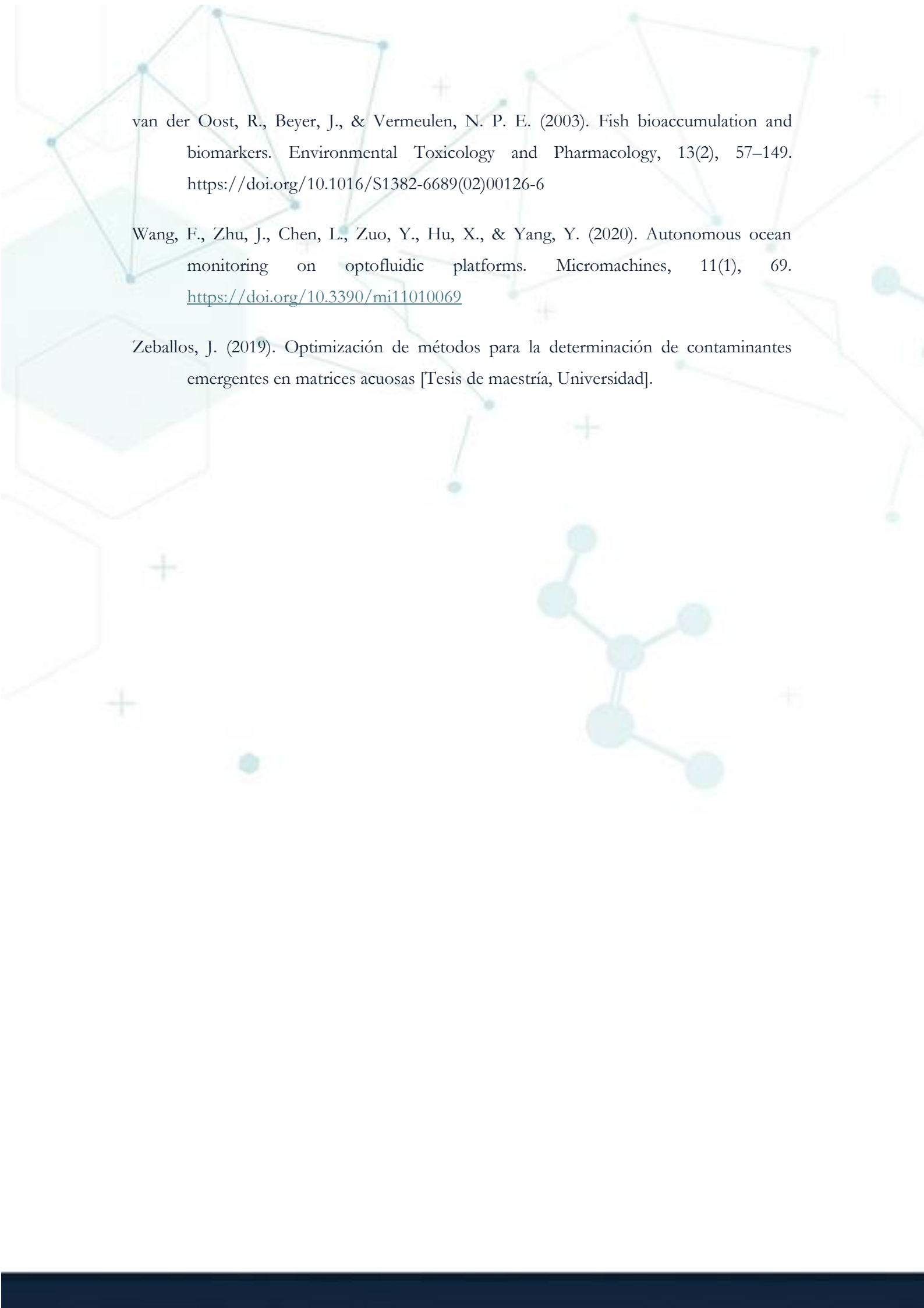
García-Gómez, C., Postigo, C., & Barceló, D. (2025). Occurrence of emerging contaminants in greywater discharges from ships. *Marine Pollution Bulletin*, 190, 114835.

Guijarro-Ramírez, N., Sánchez, R., & Todolí, J.-L. (2024). Development of a dispersive liquid–liquid aerosol phase extraction method for the quantification of Ag, Cd, Cu, Ni, and Pb in seawater by ICP-OES. *ACS Omega*, 9(27), 29422–29430. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01615>

- Guillermo López, J. (2020). Contaminantes emergentes en efluentes urbanos: Origen, impacto y tratamiento. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 45–62.
- Harris, D. C. (2016). *Quantitative chemical analysis* (9th ed.). W. H. Freeman.
- Hernández Cruz, A., & Santacruz Ortega, H. (2023). Detección de metales en agua a través de teléfonos inteligentes. *Epistemus*, 17(35), 98–106. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i35.299>
- Hook, S. E., Gallagher, E. P., & Batley, G. E. (2014). The role of biomarkers in the assessment of aquatic ecosystem health. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 10(3), 327–341. <https://doi.org/10.1002/ieam.1517>
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. ISO.
- Keith, L. H. (1991). *Environmental sampling and analysis: A practical guide*. Lewis Publishers.
- Li, X., Zhang, Y., Wang, Z., & Chen, L. (2023). Design and implementation of data management systems for large-scale scientific facilities: The case of CSNS and HEPS. *Journal of Big Data*, 10(1), 45–62.
- Livingstone, D. R. (2001). Contaminant-stimulated reactive oxygen species production in aquatic organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 42(8), 656–666. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00060-1)
- López, J. G. (2020). Contaminantes emergentes en efluentes urbanos: implicaciones para la gestión ambiental. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 45–62.
- Luoma, S. N., & Rainbow, P. S. (2008). *Metal contamination in aquatic environments*. Cambridge University Press.
- Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Torri, G., & Crini, G. (2021). Applications of polymers in wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 1451–1476. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01136-3>

- Noguera-Oviedo, K., & Aga, D. S. (2016). Lessons learned from more than two decades of research on emerging contaminants in the environment. *Journal of Hazardous Materials*, 316, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.058>
- Ogunkeyede, A. O., Urhibo, V. O., & Okorhi-Damisa, F. B. (2026). Microbial safety and physicochemical integrity of houseboat water in a petroleum-impacted creek system. *Sahel Journal of Life Sciences*, 4(1), 388–397. <https://doi.org/10.33003/sajols-2026-0401-46>
- OpenBIS Team. (2022). openBIS ELN-LIMS system: User guide and architecture overview. ETH Zurich.
- Pedrouzo, M., Borrull, F., Pocurull, E., & Marcé, R. M. (2011). Determination of pharmaceuticals in environmental samples by LC-MS/MS. *Journal of Chromatography A*, 1218(46), 8148–8157. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.09.022>
- Petrie, B., Barden, R., & Kasprzyk-Hordern, B. (2015). A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment. *Water Research*, 72, 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.053>
- Picó, Y., Barceló, D., & Farré, M. (2019). Emerging contaminants in water: Analytical methodologies and environmental implications. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.05.012>
- Plotka-Wasyłka, J., Szczepańska, N., de la Guardia, M., & Namieśnik, J. (2018). Miniaturized solid-phase extraction techniques. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 73, 19–38.
- Pocurull, E., Marcé, R. M., González-Mariño, I., Rodil, R., Montes, R., Estévez-Danta, A., Andreu, V., Bijlsma, L., Celma, A., Hernández, F., López de Alda, M., López-García, E., Picó, Y., Postigo, C., Rico, A., Valcárcel, Y., & Quintana, J. B. (2020). El análisis de aguas residuales con fines epidemiológicos: Presente y futuro en España. *Revista Española de Drogodependencias*, 45(2), 91–103.
- Rainbow, P. S. (2002). Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: Why and so what? *Environmental Pollution*, 120(3), 497–507. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00238-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00238-5)

- Resma, N. S., Meaze, A. M. H., Hossain, S., Khandaker, M. U., Kamal, M., & Deb, N. (2023). Heavy metal accumulation in fish and human health risk assessment. *Heliyon*, 9(1), e12825. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12825>
- Richardson, S. D., & Kimura, S. Y. (2016). Emerging environmental contaminants: Challenges facing the analytical chemist. *Analytical Chemistry*, 88(1), 546–582. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b04493>
- Robles-Molina, J., Lara-Ortega, F. J., Gilbert-López, B., García-Reyes, J. F., & Molina-Díaz, A. (2012). Multi-residue method for analysis of contaminants in wastewater. *Talanta*, 97, 492–501. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.04.055>
- Rodríguez, A. S., Zafra-Gómez, A., & Ballesteros, O. (2021). Molecularly imprinted polymers in analytical chemistry: Applications for environmental monitoring. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 413, 345–360.
- Roesijadi, G. (1992). Metallothioneins in aquatic animals. *Aquatic Toxicology*, 22(2), 81–114. [https://doi.org/10.1016/0166-445X\(92\)90026-J](https://doi.org/10.1016/0166-445X(92)90026-J)
- Sánchez, M., & Torres, P. (2024). Percepción de competencias digitales en estudiantes universitarios en entornos de aprendizaje tecnológico. *Revista Educación y Tecnología*, 18(1), 25–40.
- Sauvé, S., & Desrosiers, M. (2014). A review of what is an emerging contaminant. *Chemosphere*, 119, 674–681. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.067>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Principles of instrumental analysis* (6th ed.). Cengage Learning.
- Soledad-Rodríguez, A., Zafra-Gómez, A., & Ballesteros, O. (2021). Molecularly imprinted polymers for extraction of emerging contaminants. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 413, 345–360.
- Tolkou, A. K., Toubanaki, D. K., & Kyzas, G. Z. (2023). Detection of toxic metals in fish and implications for health and sustainability. *Sustainability*, 15(23), 16242. <https://doi.org/10.3390/su152316242>



van der Oost, R., Beyer, J., & Vermeulen, N. P. E. (2003). Fish bioaccumulation and biomarkers. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 13(2), 57–149. [https://doi.org/10.1016/S1382-6689\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S1382-6689(02)00126-6)

Wang, F., Zhu, J., Chen, L., Zuo, Y., Hu, X., & Yang, Y. (2020). Autonomous ocean monitoring on optofluidic platforms. *Micromachines*, 11(1), 69. <https://doi.org/10.3390/mi11010069>

Zeballos, J. (2019). Optimización de métodos para la determinación de contaminantes emergentes en matrices acuosas [Tesis de maestría, Universidad].

Química Analítica e Instrumental

*Herramientas críticas para la
sostenibilidad marina*

ISBN: 978-9907-9519-5-0



EDUINCA
EDITORIAL DE EDUCACIÓN, INVESTIGACIÓN Y CULTURA ACADÉMICA