RGe ISSN: 2177-3246

LA IMPORTANCIA DE CONOCER QUE ES EL EXPOSOMA Y SU APLICACIÓN EN LA SALUD PÚBLICA

THE IMPORTANCE OF UNDERSTANDING THE EXPOSOME AND ITS APPLICATION IN PUBLIC HEALTH

A IMPORTÂNCIA DE CONHECER O QUE É O EXPOSOMA E SUA APLICAÇÃO NA SAÚDE PÚBLICA

10.56238/revgeov17n6-100

Adela Alba-Leonel[1], Miguel Ángel Germán Mejía Argueta[2], Samantha Papaqui-Alba[3], Roberto Sánchez-Ahedo[4], Joaquín Papaqui-Hernández[5]

RESUMEN

Introducción: El exposoma, concepto introducido por Wild en 2005, abarca la totalidad de factores exógenos e internos que una persona experimenta a lo largo de su vida y que influyen en su estado de salud o enfermedad. Objetivo: Analizar que es el exposoma y su importancia en la salud pública. Métodos: Se realizó una revisión sistemática de tipo documental, utilizando la metodología PRISMA, en fuentes académicas y herramientas de inteligencia artificial, identificando su clasificación en dominios externo general, externo específico e interno; describe métodos de medición mediante biomarcadores. Resultados: Se destaca la relevancia de integrar enfoques multidisciplinarios y tecnologías emergentes como la inteligencia artificial para la identificación, caracterización y cuantificación de exposiciones, con el fin de diseñar estrategias preventivas, diagnósticas y terapéuticas más personalizadas. Conclusión: Reconocer la importancia de la detección temprana en las diferentes etapas de la vida, tomando en cuenta los desafíos técnicos y metodológicos para medir exposiciones complejas; por lo que es necesario ir generando y desarrollando bases de datos abiertas que fortalezcan la salud pública.

Palabras clave: Exposoma. Biomarcadores. Salud Pública. Inteligencia Artificial.

ABSTRACT

Introduction: The exposome, a concept introduced by Wild in 2005, encompasses the totality of exogenous and internal factors that a person experiences throughout their life and that influence their health or disease. Objective: Analyze what the exposome is and its importance in public health. Methods: A systematic documentary review was conducted using the PRISMA methodology in academic sources and artificial intelligence tools. It identifies its classification into general external, specific external, and internal domains; and describes measurement methods using biomarkers. Results: The importance of integrating

[1] Universidad Nacional Autónoma de México. E-mail: adelaalbaleonel65@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9359-9590
[2] Universidad Nacional Autónoma de México. E-mail: miguel.argueta@unam.mx
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8904-8905
[3] Universidad Nacional Autónoma de México. E-mail: sampapaqui1999@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9126-9387
[4] Universidad Nacional Autónoma de México. E-mail: xocoyotzin@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-3764-1509
[5] Instituto Mexicano de Seguridad Social. E-mail: joaquinpapaqui@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2406-2751

multidisciplinary approaches and emerging technologies such as artificial intelligence for the identification, characterization, and quantification of exposures is highlighted, in order to design more personalized preventive, diagnostic, and therapeutic strategies. Conclusion: The importance of early detection at different stages of life is recognized, taking into account the technical and methodological challenges of measuring complex exposures. Therefore, it is necessary to generate and develop open databases that strengthen public health.

Keywords: Exposome. Biomarkers. Public Health. Artificial Intelligence.

RESUMO

Introdução: O exposoma, conceito introduzido por Wild em 2005, abrange a totalidade de fatores exógenos e internos que uma pessoa experimenta ao longo de sua vida e que influenciam seu estado de saúde ou doença. Objetivo: Analisar o que é o exposoma e sua importância na saúde pública. Métodos: Realizou-se uma revisão sistemática de tipo documental, utilizando a metodologia PRISMA, em fontes acadêmicas e ferramentas de inteligência artificial, identificando sua classificação em domínios externo geral, externo específico e interno; descreve métodos de medição mediante biomarcadores. Resultados: Destaca-se a relevância de integrar enfoques multidisciplinares e tecnologias emergentes como a inteligência artificial para a identificação, caracterização e quantificação de exposições, com o fim de desenhar estratégias preventivas, diagnósticas e terapêuticas mais personalizadas. Conclusão: Reconhecer a importância da detecção precoce nas diferentes etapas da vida, levando em conta os desafios técnicos e metodológicos para medir exposições complexas; portanto, é necessário ir gerando e desenvolvendo bases de dados abertas que fortaleçam a saúde pública.

Palavras-chave: Exposoma. Biomarcadores. Saúde Pública. Inteligência Artificial.

1 INTRODUCCIÓN

El exposoma es un término acuñado por el epidemiólogo Wild en el 2005, que significa la adición total de todos los factores de riesgo exógenos y endógenos que una persona percibe desde su nacimiento hasta su muerte, como las exposiciones a sustancias químicas, ambientales, radiación, clima, ruido ambiental, estrés, entre otros. En cuanto a las endógenas se encuentran el estilo de vida, comportamientos con respecto a la salud.

Estudiar el exposoma de las personas es complejo por su variabilidad y por la cantidad de factores que interactúan a lo largo de su vida. Sin embargo, es necesario hacer un análisis para comprender cómo los factores de riesgo contribuyen a la salud y/o a las enfermedades. De acuerdo con este análisis permite elaborar y desarrollar estrategias de prevención y tratamiento más personalizadas y por lo tanto más eficaz para el individuo.

Cabe mencionar que el exposoma es dinámico abarca factores de diversa naturaleza, y estos pueden varían a lo largo de la vida, un ejemplo de esto pueden ser su estado o nivel socioeconómico, agentes físicos y/o químicos, hábitos de vida o el entorno donde se desarrolló o vive el individuo.

El exposoma lo podemos clasificar de acuerdo a tres dominios: Externo general, externo especifico e interno.

El dominio externo general comprende los aspectos sociales, psicológicos como clase social, educación; el estado psicológico y mental y el entorno donde vive y/o desarrolla sus actividades diarias.

El dominio externo especifico contempla la radiación, contaminación ambiental y química, microorganismos de tipo infecciosos, dieta, estilo de vida (consumo de sustancias legales o ilegales), la ocupación, entre otros

Dominio interno incluye factores y proceso como: nivel de hormonas, metabolismo, morfología corporal (endomórfico, mesomórfico, hectomórfico), actividad física, microbiota intestinal, epigénetica, etc.

Por lo anterior es necesario analizar que es el exposoma y su importancia en la salud pública

2 MÉTODO

2.1 DISEÑO Y PROTOCOLO

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de tipo documental. Para garantizar la transparencia, la exhaustividad y la reproducibilidad del proceso, se siguieron estrictamente las directrices de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). El estudio se orientó a

conceptualizar el exposoma, identificar sus dominios, métodos de medición y desafíos actuales en el ámbito de la salud y la educación.

2.2 CRITERIOS DE ELEGIBILIDAD (MARCO PICOS)

La selección de los estudios se fundamentó en los siguientes criterios de elegibilidad, estructurados bajo el acrónimo PICO:

a) Población/Contexto: Individuos en cualquier etapa del curso de vida (desde la etapa prenatal hasta la vejez) en entornos de salud pública.

b) Intervención/Fenómeno de interés: El concepto de exposoma como la totalidad de exposiciones no genéticas (factores exógenos y endógenos).

c) Comparador: No aplica para esta revisión documental, aunque se analizaron variaciones según susceptibilidad individual y ventanas críticas.

d) Resultados (Outcomes): Definiciones conceptuales, clasificación en dominios, biomarcadores de exposición/efecto, y el impacto en la carga global de enfermedad.

e) Diseños de estudio: Estudios observacionales, revisiones sistemáticas, informes de organizaciones de salud acreditadas y artículos de investigación original.

f) Criterios de inclusión adicionales: Artículos en texto completo, de libre acceso, publicados entre 2020 y 2025, en idiomas español e inglés, que incluyeran las palabras clave en el título.

g) Criterios de exclusión: Documentos con acceso restringido, solo resúmenes, o aquellos cuyos títulos no guardaran relación directa con el objeto de estudio.

2.3 FUENTES DE INFORMACIÓN Y ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

Se empleó una estrategia de búsqueda híbrida y exhaustiva realizada entre los años 2020 y 2025.

2.3.1 Bases de datos tradicionales

Se consultaron bases de datos de alto impacto: PubMed, Embase, Medline, SciELO, Biblioteca Cochrane y Google Académico. Se utilizaron descriptores controlados (DeCS y MeSH) y operadores booleanos: exposoma AND salud AND enfermedad.

2.3.2 Integración de Inteligencia Artificial Generativa (IAG)

Para potenciar la capacidad de descubrimiento de literatura gris y documentos técnicos, se integraron herramientas de IAG de la siguiente manera:

a) Herramientas utilizadas: Se emplearon modelos de lenguaje de gran tamaño (LLM) como ChatGPT-4 y Perplexity Free, junto con plataformas especializadas en investigación académica como TextCortex.com, Elicit.com y semanticscholar.org.
b) Finalidad: La IA se utilizó para la identificación inicial de fuentes, la síntesis de conceptos complejos y la localización de informes de organizaciones internacionales (OMS, GBD) que a menudo quedan fuera de los índices bibliográficos tradicionales.
c) Procedimiento (Prompting): Se aplicó un prompt estructurado diseñado para minimizar alucinaciones y maximizar la precisión académica: “Encuentra documentos académicos (artículos, informes, casos) sobre el exposoma y su implicación en salud-enfermedad en bases como Cochrane, PubMed y Medline. Detalla clasificación, medición, importancia y desafíos”.

2.4 PROCESO DE SELECCIÓN DE ESTUDIOS

El flujo de selección se dividió en cuatro fases consecutivas para minimizar el sesgo de selección:

a) Identificación: Recopilación de 9,650 registros totales de bases de datos e IA.
b) Cribado (Screening): Eliminación de duplicados y revisión de títulos/resúmenes, resultando en 3,685 registros.
c) Evaluación de elegibilidad: Análisis de 160 textos completos para verificar el cumplimiento de los criterios PICO9.
d) Selección final: Inclusión de 48 artículos que conformaron el corpus definitivo.

Este proceso fue realizado de manera independiente por los revisores, resolviendo discrepancias mediante consenso académico.

2.5 EXTRACCIÓN Y SÍNTESIS DE DATOS

Para la recolección de información se utilizó un formulario de extracción estandarizado que permitió tabular los siguientes elementos: autor/año, ciudad o proyecto, metodologías empleadas, exposiciones evaluadas y hallazgos principales (desempeño predictivo como R2).

La síntesis de datos se realizó mediante un análisis temático y comparativo. Debido a la heterogeneidad de los estudios (que incluyen desde biomonitorización hasta modelado por IA), no se realizó un metaanálisis cuantitativo, optando por una síntesis narrativa que agrupa los hallazgos en dimensiones: conceptual, técnica (biomarcadores), tecnológica (IA y SIG) y de políticas públicas.

2.6 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y RIESGO DE SESGO

La validez de las conclusiones se fortaleció mediante la depuración sistemática de la evidencia, asegurando que los estudios seleccionados cumplieran con los requisitos metodológicos del enfoque sistemático propuesto por PRISMA. Se priorizaron estudios con marcos metodológicos robustos (como los proyectos HELIX y LEnS) para garantizar que la síntesis final refleje el estado del arte con el menor sesgo posible.

2.7 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PRISMA

Con el propósito de garantizar la transparencia y la reproducibilidad del proceso de revisión, el presente estudio siguió las directrices establecidas por la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). El procedimiento se desarrolló de manera secuencial en cuatro etapas interrelacionadas:

a) Identificación: Se recopilaron los estudios potencialmente relevantes a partir de las bases de datos y herramientas de inteligencia artificial generativa previamente descritas, asegurando una cobertura amplia de las fuentes.
b) Cribado: En esta fase se eliminaron los registros duplicados y se llevó a cabo una revisión inicial de títulos y resúmenes para descartar los trabajos que no guardaban relación directa con los objetivos de la investigación.
c) Evaluación de elegibilidad: Los textos completos de los estudios preseleccionados fueron examinados a detalle, aplicando de forma estricta los criterios de inclusión y exclusión definidos previamente.
d) Selección final: Se integraron únicamente aquellos documentos que cumplían con todos los requisitos metodológicos y temáticos, conformando el corpus definitivo para el análisis y síntesis de la información.

Este enfoque permitió depurar de forma sistemática la evidencia disponible, reduciendo el sesgo de selección y fortaleciendo la validez de las conclusiones derivadas del estudio.

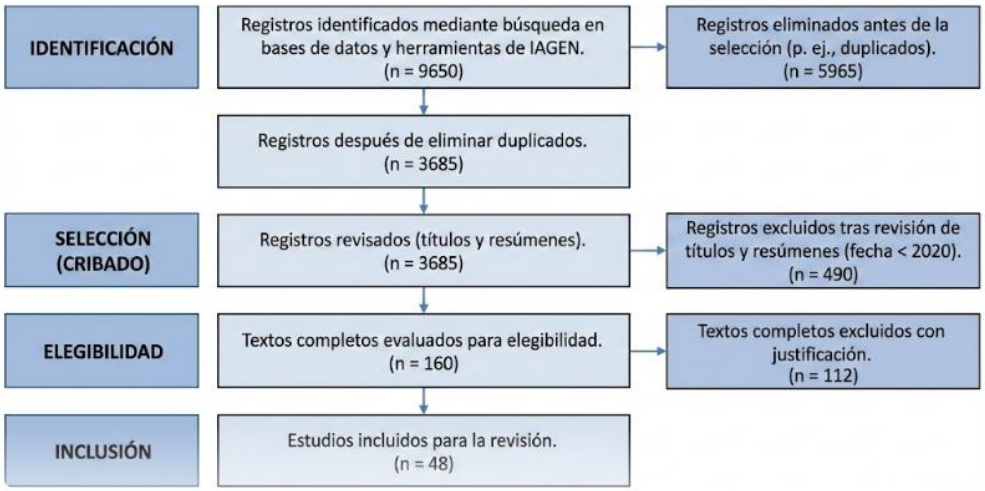
2.8 RESULTADOS DEL PROCESO DE SELECCIÓN

Como resultado de la búsqueda inicial, se identificaron 9650 artículos y tras la aplicación rigurosa de los criterios de inclusión y exclusión, la muestra final quedó compuesta por 48 artículos.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo PRISMA que ilustra este proceso:

Figure 1

Diagrama de flujo PRISMA 2020. Revisión de Artículos sobre Exposoma



Source: elaboración propia.

3 RESULTADOS

3.1 EXPOSOMA: CONCEPTO, RELEVANCIA Y FUNDAMENTO CIENTÍFICO

El exposoma integra todas las exposiciones no genéticas a las que un individuo está sometido desde la vida prenatal hasta la vejez. Este enfoque surge de la necesidad de comprender la carga de enfermedad atribuible a factores ambientales, sociales y biológicos. La OMS estima que el 24% de las enfermedades humanas son atribuibles a exposiciones no genéticas, lo que evidencia un amplio margen de prevención. Asimismo, el Global Burden of Disease identifico que nueve millones de muertes anuales se relacionan con contaminación del aire, agua y suelo, marcando la urgencia de mapear el exposoma humano.

El impacto de estas exposiciones depende de la dosis, duración, momento de la exposición y la susceptibilidad individual. Las variaciones fisiológicas, endocrinas, hormonales y metabólicas a lo largo de la vida determinan ventanas críticas, especialmente durante la gestación (13) y la infancia, donde las exposiciones pueden alterar el proceso de desarrollo con repercusiones de por vida. (8.9)

3.2 MEDICIÓN DEL EXPOSOMA Y USO DE BIOMARCADORES

La medición del exposoma surge del desafío por documentar exposiciones internas y externas de forma integral. Para ello, se emplean estrategias de biomonitorización humana y ambiental, (14) que incluye análisis de sangre, orina, (12) cabello, dientes, uñas, (15) placenta (16) y meconio. (16) Estos bioespecímenes permiten reconstruir exposiciones de

corto y de largo plazo, considerando vidas medias químicas específicas (por ejemplo, 15 h para clorpirifos en sangre). (12)

Los biomarcadores se clasifican en:

a) Exposición: que mide sustancias exógenas o sus metabolitos.
b) Efecto: donde se refleja las alteraciones fisiológicas o bioquímicas asociadas a la enfermedad.
c) Susceptibilidad: que determina la respuesta diferencial a la exposición.

Y las ciencias ómicas (genómica, proteómica, metabolómica) aportan herramientas fundamentales para descubrir nuevos biomarcadores y caracterizar o identificar el o los mecanismos de toxicidad, aunque estas enfrentan el reto de capturar la heterogeneidad, la interindividual de la respuesta biológica. (24)

3.3 PROYECTOS INTERNACIONALES PARA ESTUDIAR EL EXPOSOMA

El proyecto HELIX (Human Early-Life Exposome) representa uno de los grandes esfuerzos más robustos para medir exposiciones prenatales y postnatales en estudios de cohortes europeas. Donde se evalúa los compuestos orgánicos persistentes y no persistentes como: metales, plaguicidas, calidad del aire, ruido, radiación UV y acceso a espacios verdes, integrados como indicadores de crecimiento y de salud infantil.

El Lifestage Exposome Snapshots (LEnS) (10) surge como un proyecto marco que analiza exposiciones en órganos diana y por periodos críticos, permitiendo avanzar hacia una cartografía más precisa del exposoma humano.

3.4 APORTACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA) AL ANÁLISIS DEL EXPOSOMA

La IA constituye un avance clave para integrar múltiples fuentes de datos ambientales, biológicos y geoespaciales. Entre los hallazgos descritos:

a) Redes neuronales y algoritmos de clustering (ANN, K-means, Fuzzy C-means) han logrado obtener predicciones de contaminantes atmosféricos con buen desempeño R^2=0.7. (18)
b) Modelos supervisados (SVM, KNN, Random Forest) han clasificado condiciones de vivienda como proxies de exposición ambiental que son indicadores indirectos que se utilizan para estimar o reconstruir con precisiones del 82–86% (19), las exposiciones ambientales pasadas o presentes, especialmente son de gran apoyo cuando no se cuenta con mediciones directas.

c) La integración entre Sistemas de Información Geográfica (SIG), datos meteorológicos, tráfico y encuestas permite mapear puntos críticos de exposición urbana. (21) Así mismo permite conectar con otras aplicaciones fuentes de datos (como RRHH, BIM, sensores) para combinar información espacial y no espacial, permitiendo análisis más profundos.

Estos métodos, aplicados en ciudades como Buenos Aires, Salamanca, Jayllihuaya y Bucarest, evidencian el potencial de la IA para analizar exposiciones complejas en tiempo real y apoyar políticas públicas focalizadas. (20)

3.5 DESAFÍOS EN LA EVALUACIÓN DEL EXPOSOMA

Las principales limitaciones de la evaluación del exposoma son:

a) Dificultad para detectar sustancias con vidas medias cortas.

b) Falta de bases de datos estandarizadas y abiertas de bioespecimenes que permitan el desarrollo de mejores diagnósticos y tratamientos, estudiando enfermedades, y formando recursos humanos

c) Grandes limitaciones de análisis cualitativo y cuantitativo de muestras complejas en la identificación de miles de sustancias detectadas por espectrometría de masas.

d) Complejidad para realizar evaluaciones de riesgo múltiple que integran dominios ambientales, biológicos y sociales. (22, 23)

No obstante, los avances en metabolómica y bioinformática e IA prometen mejorar la precisión de la caracterización del exposoma en los próximos años.

Table 1

de datos relevantes de estudios incluidos

Ciudad / Proyecto	Métodos o Tecnologías	Exposición evaluada	Principales hallazgos / desempeño	Relevancia para el exposoma
Buenos Aires	Redes neuronales, clustering	Contaminantes atmosféricos (SO_2, PM10)	R^2=0.718 en pronóstico de contaminantes	Mejora predicción de exposiciones urbanas
Salamanca	Algoritmos supervisados (SVM, KNN, RF)	Condiciones de vivienda como proxy ambiental	Precisión entre 82–86.3%	Identifica viviendas con riesgo ambiental
Jayllihuaya	SIG + fusión de datos	Riesgos ambientales múltiples	Identificación de puntos críticos	Permite focalizar intervenciones
Bucarest	Métodos de IA integrados con datos urbanos	Contaminación ambiental y condiciones de exposición	Detección de zonas vulnerables	Mejora evaluación de riesgos en entornos urbanos

HELIX (Europa)	Biomonitorización + sensores + ómicas	Exposiciones prenatales y postnatales (metales, pesticidas, ruido, aire, UV, espacios verdes)	Asociaciones con crecimiento y salud infantil	Establece marco integral temprano del exposoma
LEnS	Modelos por órgano diana	Ventanas de susceptibilidad	Mapeo del exposoma por sistemas orgánicos	Enfoque más granular y transdisciplinario

Source: elaboración propia.

La evidencia revisada demuestra que el exposoma constituye un constructo esencial para comprender la carga global de enfermedad atribuible a exposiciones no genéticas. La literatura señala que una proporción significativa de las enfermedades humanas (≈24%) son prevenible mediante la identificación y mitigación de factores ambientales, sociales y biológicos, lo cual sustenta el valor epidemiológico del exposoma a lo largo del curso de vida.

Los estudios incluidos muestran un avance significativo en la capacidad de medir, integrar y analizar exposiciones múltiples mediante biomarcadores, bioespecímenes alternativos y tecnologías analíticas de alta resolución. Las ciencias ómicas emergen como herramientas críticas para caracterizar rutas mecanicistas y descubrir nuevos indicadores de exposición, aunque persiste el desafío de capturar la variabilidad individual en las respuestas biológicas.

La inteligencia artificial se posiciona como un eje transversal que potencia la evaluación del exposoma mediante algoritmos predictivos, clasificación, análisis espacial y fusión de datos heterogéneos. Los estudios realizados en ciudades de Latinoamérica y Europa evidencian que la IA mejora la predicción de contaminantes, e identifica zonas de riesgo urbano y permite desarrollar modelos más robustos de exposición ambiental.

Los proyectos HELIX y LEnS representan referentes metodológicos en la integración de biomonitorización, sensores ambientales y enfoques por ventanas de susceptibilidad. Estos modelos permiten establecer relaciones entre exposiciones tempranas y resultados en salud infantil, lo que refuerza la importancia de intervenir en etapas críticas del desarrollo.

La literatura converge en señalar que la evaluación del exposoma requiere enfoques multidisciplinarios que integren toxicología, epidemiología, enfermería, medicina y ciencias de datos. Es importante mencionar que persisten retos, como la necesidad de bases de datos abiertas, metodologías armonizadas y capacidad analítica para abordar exposiciones múltiples con vidas medias cortas. Sin embargo, el progreso tecnológico y la expansión de metodologías de IA anticipan mejoras importantes en la caracterización del exposoma y su aplicación en políticas de salud pública.

4 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos son consistentes con los avances internacionales en torno al exposoma y permiten contextualizar de manera crítica su relevancia, los logros metodológicos alcanzados y los retos que persisten para su implementación en investigación poblacional. La estimación de que cerca del 24% de la carga global de la enfermedad es atribuible a exposiciones no genéticas coincide plenamente con los informes globales de la OMS y del Global Burden of Disease, que han documentado un impacto sustancial de la contaminación del aire, agua y suelo sobre la morbilidad y mortalidad a nivel mundial. La cifra de alrededor de nueve millones de muertes anuales atribuidas a contaminantes ambientales concuerda con reportes previos, lo que refuerza la urgencia de integrar metodologías del exposoma para comprender la complejidad de dichas exposiciones.

Los hallazgos coinciden con la literatura donde se destaca la importancia de las ventanas críticas de susceptibilidad, principalmente durante la gestación y la infancia. Estudios previos han documentado variaciones fisiológicas, endocrinas y metabólicas que modulan la vulnerabilidad frente a contaminantes químicos y factores ambientales durante estas etapas principalmente (8, 9, 13). En este sentido, la evidencia reafirma que las exposiciones tempranas pueden estimular alteraciones con repercusiones permanentes en el desarrollo, lo cual es plenamente congruente con los resultados de proyectos internacionales como HELIX.

En cuanto a las técnicas de medición del exposoma, los resultados muestran una amplia adopción de biomonitorización a través de muestras de sangre, orina, cabello, dientes, uñas, placenta y meconio, lo cual coincide con recomendaciones internacionales que marcan la utilidad de diversos bioespecímenes para reconstruir las exposiciones de corto y a largo plazo (12, 14–16). La clasificación de los biomarcadores tales como: exposición, efecto y susceptibilidad estos son congruentes con marcos conceptuales establecidos en toxicología y epidemiología ambiental, mientras que la incorporación de tecnologías ómicas refleja la tendencia global hacia la identificación de mecanismos biológicos tempranos y de rutas de toxicidad (24).

En lo que respecta a los proyectos internacionales, particularmente HELIX y LEnS, demuestran una concordancia notable con la literatura al resaltar la importancia de combinar biomarcadores, sensores ambientales, SIG y de enfoques basados en etapas críticas del desarrollo. HELIX ha sido ampliamente reconocido como uno de los esfuerzos más robustos para caracterizar exposiciones prenatales y postnatales de cohortes europeas; y los hallazgos presentados —como la evaluación de metales, plaguicidas, ruido, calidad del aire

y espacios verdes— coinciden plenamente con su abordaje integral. LEnS, aporta un enfoque innovador mediante modelos por órgano diana, lo cual se alinea con la tendencia internacional hacia una cartografía más granular del exposoma humano.

Un aporte destacado en la revisión es la integración de la IA, cuyos resultados muestran diversos predictores similares a los reportados en la literatura global. Las redes neuronales y algoritmos de clustering con valores de R^2 alrededor de 0.70 (18) son consistentes con lo observado en estudios de modelado atmosférico en otras regiones del mundo. Del mismo modo, la precisión de 82–86% reportada por modelos supervisados como SVM, KNN y Random Forest (19) es comparable a lo publicado internacionalmente sobre la clasificación de riesgos ambientales y de reconstrucción de exposiciones en ausencia de mediciones directas. La evidencia adicional sobre la utilidad de SIG y la fusión de datos para mapear puntos críticos urbanos (20, 21) concuerda con estudios en ciudades altamente urbanizadas donde la IA, lo que ha permitido identificar zonas vulnerables y diseñar intervenciones focalizadas.

Definitivamente, los desafíos identificados son la —dificultad para medir sustancias de vida media corta, la falta de bases de datos estandarizadas, limitaciones analíticas en espectrometría de masas y sobre todo la complejidad de factores de riesgo múltiple (22, 23)— son los problemas ampliamente documentados en la literatura internacional. La dificultad para capturar y medir exposiciones dinámicas y multifactoriales constituye uno de los términos metodológicos más debatidos en el exposoma, siendo esta una problemática global. Sin embargo, tal como sugieren diversos autores, los avances en metabolómica, bioinformática e IA ofrecen diversas perspectivas prometedoras para reducir estas brechas en los próximos años.

La evidencia de los resultados se alinea con las tendencias identificadas en la literatura internacional, lo que refuerza la importancia del exposoma como marco conceptual y metodológico, y señala la necesidad de continuar fortaleciendo las capacidades técnicas, de infraestructura científica y esfuerzos multidisciplinarios que permitan su aplicación plena en salud pública y epidemiología contemporánea.

5 CONCLUSIÓN

El exposoma se ha consolidado como un marco esencial para comprender la contribución de las exposiciones no genéticas en la carga global de enfermedad. La evidencia coincide en que una parte sustancial de las patologías crónicas, de desarrollo y ambientales pueden prevenirse mediante la identificación de factores de riesgo, por lo que la medición e intervención sobre dichas exposiciones a lo largo del curso de vida son

fundamentales para la prevención. Los avances metodológicos descritos —incluyendo biomonitorización a través de diversos bioespecímenes, el uso de herramientas ómicas, sensores ambientales y modelos analíticos de alta resolución— permiten la caracterización de una forma cada vez más precisa de las interacciones entre el entorno y la biología humana.

Asimismo, la integración de IA y SIG han emergido como un componente clave y fundamental para analizar exposiciones complejas, predecir contaminantes y localizar zonas de riesgo con mayor eficiencia. Los estudios internacionales, particularmente HELIX y LEnS, corroboran la relevancia de las ventanas críticas de susceptibilidad y demuestran el valor de enfoques integrales que combinan datos biológicos, ambientales y espaciales. Estos modelos robustos ofrecen un precedente metodológico para investigaciones futuras, especialmente en contextos donde las exposiciones múltiples y los factores sociales interactúan de manera dinámica.

Sin embargo, a pesar de los avances, aún persisten desafíos importantes como: la limitada capacidad para medir sustancias de vida media corta, la falta de bases de datos armonizadas, la complejidad analítica de muestras altamente heterogéneas y la necesidad de abordar riesgos múltiples de forma simultánea. No obstante, el progreso acelerado en metabolómica, bioinformática e IA anticipa un escenario favorable para superar estas limitaciones en los próximos años.

El exposoma representa una oportunidad estratégica para fortalecer la investigación epidemiológica, orientar políticas públicas basadas en evidencia y promover intervenciones preventivas más eficaces. Consolidar esta perspectiva requiere de inversión sostenida en infraestructura científica, capacitación interdisciplinaria y esfuerzos colaborativos que permitan avanzar hacia una comprensión más completa, equitativa y accionable de las exposiciones que moldean la salud humana.

REFERENCES

Adibi JJ, Whyatt RM, Williams PL, Calafat AM, Camann D, Herrick R, *et al.* Caracterización de la exposición a ftalatos en mujeres embarazadas, evaluada mediante muestras repetidas de aire y orina. Environ Health Perspect 2008;116(4):467–473. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18414628/.https://doi.org/10.1289/ehp.10749.

Allende, D., Cremades, P., Puliafito, S. E., Fernandez, R. P., & Gunella, F. P. (2010). Estimación de un factor de riesgo de exposición a la contaminación urbana para la población de la ciudad de Buenos Aires. https://www.semanticscholar.org/paper/Estimaci%C3%B3n-de-un-factor-de-riesgo-de-exposici%C3%B3n-a-Allende-Cremades/fc877e62479f6dc7232d126f85e3a29c9bd061c1

Andra SS, Austin C, Wright RO, Arora M. Reconstrucción de la exposición prenatal y en la primera infancia a sustancias químicas orgánicas multiclase mediante dientes: hacia un exposoma temporal retrospectivo. Environ Int 2015;83:137–145. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26134987/.https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.05.010

Gakidou E, Afshin A, Abajobir AA, *et al.* Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990-2016: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. Lancet. 2017;390(10100):1345-1422. doi:10.1016/S0140-6736(17)32366-8

Gonzales-Paco, M. G., Flores-Asencio, S., Tapia-Catacora, P. C., & Pino-Cordero, D. (2024). Analysis of healthy housing with Artificial Intelligence in the periurban area of Jayllihuaya Puno – 2023. C&T Riqchary Revista de Investigación En Ciencia y Tecnología, 6(1), 1-6. https://doi.org/10.57166/riqchary.v6.n1.2024.115

Griffin P, Mason H, Heywood K, Cocker J. Absorción oral y dérmica de clorpirifos: un estudio en voluntarios humanos. Occup Environ Med 1999;56(1):10–13. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10341740/.https://doi.org/10.1136/oem.56.1.10.

Januchs, M. G. C. (2012). Aplicación de técnicas de inteligencia artificial a la predicción de contaminantes atmosféricos. https://doi.org/10.20868/upm.thesis.11206

Kirschbaum C, Tietze A, Skoluda N, Dettenborn L. El cabello como un calendario retrospectivo de la producción de cortisol: aumento de la incorporación de cortisol al cabello en el tercer trimestre del embarazo. Psiconeuroendocrinología 2009;34(1):32–37. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18947933/.https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2008.08.024.

Laohaudomchok W, Lin X, Herrick RF, Fang SC, Cavallari JM, Christiani DC, *et al.* Uñas de los pies, sangre y orina como biomarcadores de la exposición al manganeso. J Occup Environ Med 2011;53(5):506–510. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21494156/.https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e31821854da.

Martin-Sanchez F, Bellazzi R, Casella V, Dixon W, Lopez-Campos G, Peek N. Progress in Characterizing the Human Exposome: a Key Step for Precision Medicine. Yearb Med Inform. 2020;29(01):115-120. doi:10.1055/s-0040-1701975

Prüss-Üstün A, Corvalän C. Preventing disease through healthy environments: Towards an estimate of the environmental burden of disease. Eng Sanit e Ambient. 2007;12(2):115-116. doi:10.1590/s1413-41522007000200001

Rappaport SM, Barupal DK, Wishart D, Vineis P, Scalbert A. The blood exposome and its role in discovering causes of disease. Environ Health Perspect. 2014;122(8):769-774. doi:10.1289/ ehp.1308015

Shaffer RM, Smith MN, Faustman EM. Developing the regulatory utility of the exposome: Mapping exposures for risk assessment through lifestage exposome snapshots (LEnS). Environ Health Perspect. 2017;125(8):1-8. doi:10.1289/EHP1250

Terry MB, Michels KB, Brody JG, *et al.* Environmental exposures during windows of susceptibility for breast cancer: A framework for prevention research. Breast Cancer Res. 2019;21(1):1-16. doi:10.1186/s13058-019-1168-2

Uppal K, Walker DI, Jones DP. xMSannotator: un paquete de R para la anotación en red de datos metabolómicos de alta resolución. Anal Chem 2016ª;89(2):1063–1067. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b01214.

Vermeulen R, Schymanski EL, Barabási AL, Miller GW. The exposome and health: Where chemistry meets biology. Science. 2020;367(6476):392-396. doi:10.1126/science.aay3164

Wild CP. Complementing the genome with an “exposome”: The outstanding challenge of environmental exposure measurement in molecular epidemiology. Cancer Epidemiol Biomarkers Prev. 2005;14(8):1847-1850. doi:10.1158/1055-9965. EPI-05-0456

Wild CP. The exposome: From concept to utility. Int J Epidemiol. 2012;41(1):24-32. doi:10.1093/ije/ dyr236

Wright RO. Environment, susceptibility windows, development, and child health. Curr Opin Pediatr. 2017; 29(2): 211-217. doi:10.1097/MOP.0000000000000465

Yusa V, Millet M, Coscolla C, Roca M. Métodos analíticos para el biomonitoreo humano de pesticidas. Una revisión. Anal Chim Acta 2015;891:15–31. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26388361/.https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.05.032.