

09

ACTIVIDAD FÍSICA **EN CONDICIONES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y** **RIESGO DE DIABETES TIPO 2 EN ADULTOS**



© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea correctamente citada.

ACTIVIDAD FÍSICA

EN CONDICIONES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y RIESGO DE DIABETES TIPO 2 EN ADULTOS

PHYSICAL ACTIVITY IN CONDITIONS OF AIR POLLUTION AND THE RISK OF TYPE 2 DIABETES IN ADULTS

Mireya Pérez-Rodríguez¹

E-mail: mireyaprez@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5334-4446>

Raymundo Pérez-Urquiza¹

E-mail: rperezu@umet.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0474-590X>

¹Universidad Metropolitana del Ecuador. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Pérez-Rodríguez, M., & Pérez-Urquiza, R. (2026). Actividad física en condiciones de contaminación atmosférica y riesgo de diabetes tipo 2 en adultos. *Revista Mexicana de Investigación e Intervención Educativa*, 5(1), 96-103.

Fecha de presentación: 12/09/2025

Fecha de aceptación: 28/11/2025

Fecha de publicación: 01/01/2026

RESUMEN

El desarrollo de la diabetes tipo 2 se relaciona con factores genéticos, estilo de vida y la exposición a contaminantes atmosféricos. Investigaciones recientes muestran como partículas finas en suspensión (PM2.5, PM10), y otros contaminantes presentes en el aire alteraran el equilibrio hormonal y metabólico de la persona, aumentando el riesgo de desarrollar esta enfermedad. Por otro lado, evidencias científicas respaldan los efectos positivos de la actividad física en la prevención y tratamiento de la diabetes. Se realiza una revisión sistemática en bases de datos: PubMed, Scopus y Google Académico, seleccionándose estudios controlados aleatorizados y ensayos clínicos publicados en los últimos diez años, objetivo analizar el efecto de la actividad física en condiciones de contaminación atmosférica y el riesgo de diabetes tipo 2 en adultos. Se identificaron 62 estudios, 35 cumplieron con los criterios de inclusión. Los resultados confirman que la práctica de actividad física en ambientes con niveles significativos de contaminación del aire, se manifiesta una relación inversa entre intensidad del ejercicio y tolerancia a la contaminación, se concluye que, a mayor nivel de contaminación atmosférica, menor debe ser la intensidad del ejercicio para que el ejercicio resulte seguro en la prevención de la diabetes mellitus tipo 2.

Palabras clave:

Actividad física, contaminación del aire, diabetes tipo 2, prevención.

ABSTRACT

The development of type 2 diabetes is associated with genetic factors, lifestyle, and exposure to atmospheric pollutants. Recent research has shown that fine particulate matter (PM2.5, PM10) and other air pollutants can disrupt hormonal and metabolic balance, increasing the risk of developing this disease. Conversely, substantial scientific evidence supports the positive effects of physical activity in the prevention and management of diabetes. A systematic review was conducted using PubMed, Scopus, and Google Scholar databases, selecting randomized controlled trials and clinical studies published over the last ten years, with the objective of analyzing the effect of physical activity under air pollution conditions and the risk of type 2 diabetes in adults. A total of 62 studies were identified, 35 of which met the inclusion criteria. The findings confirm that engaging in physical activity in environments with significant levels of air pollution reveals an inverse relationship between exercise intensity and tolerance to pollution. It is concluded that the higher the level of air pollution, the lower the exercise intensity should be for physical activity to remain safe in the prevention of type 2 diabetes mellitus.

Keywords:

Physical activity, air pollution, type 2 diabetes, prevention.

INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus tipo 2 (DMT2) es una enfermedad no transmisible (ENT) de alta prevalencia a nivel mundial, su etiología se ha asociado principalmente con factores genéticos, alimentarios y la inactividad física (Franco et al., 2024; Pérez et al., 2024). Sin embargo, estudios recientes han identificado un nuevo grupo de factores de riesgo relacionados con la exposición prolongada a contaminantes atmosféricos, especialmente materias particuladas (PM) que se encuentran en el aire en suspensión, su tamaño se mide en micrómetros (μm), (PM_{2.5} y PM₁₀), además, están presentes el dióxido de nitrógeno (NO_2) y ozono (O_3), los que inciden en procesos inflamatorios, resistencia a la insulina (RI) y disfunción metabólica (Liu et al., 2016; Parasin et al., 2025).

En este contexto, la actividad física (AF) se mantiene como una de las principales estrategias no farmacológicas en la prevención y el manejo de la DMT2, debido a su efecto positivo sobre el control glucémico, la sensibilidad insulínica y el perfil metabólico general (De Oca García et al., 2019; Kirwan et al., 2017). No obstante, en los últimos años ha cobrado relevancia el estudio de la interacción entre la práctica de la AF y la calidad del aire, ya que durante el ejercicio se incrementa la ventilación pulmonar, lo que puede aumentar la exposición a contaminantes presentes en la atmósfera (Ao et al., 2022; Romero-Padrón et al., 2024). Ante esta problemática surgen las siguientes interrogantes: ¿Cuáles son los principales contaminantes atmosféricos que guardan relación con el desarrollo de la DMT2?; ¿Qué se ha investigado en la actualidad sobre la AF practicada en ambientes con contaminantes atmosféricos y el riesgo de desarrollar diabetes tipo 2 en adultos?

De Oca García et al. (2019) aportan evidencia sobre el papel del entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT) como estrategia eficaz para mejorar la función metabólica en pacientes con diabetes mellitus tipo 2. Su revisión destaca que este tipo de ejercicio promueve adaptaciones en la sensibilidad a la insulina, el control glucémico y la composición corporal, ofreciendo beneficios incluso en personas con limitaciones de tiempo o capacidad física. Estos hallazgos respaldan la inclusión del HIIT en programas de actividad física diseñados para adultos expuestos a contaminación atmosférica, donde el control metabólico es especialmente vulnerable debido al estrés oxidativo inducido por el ambiente.

Della Guardia & Shin (2022) ofrecen una perspectiva fisiopatológica al demostrar que la exposición a partículas finas (PM_{2.5}) afecta directamente la función del tejido adiposo blanco y marrón, alterando su capacidad de regulación energética y promoviendo procesos inflamatorios crónicos. Estas alteraciones favorecen la resistencia a la insulina y el aumento del riesgo de diabetes tipo 2. Su investigación refuerza la idea de que el entorno ambiental es un factor determinante en la salud metabólica y que, en contextos de contaminación, la actividad física debe

adaptarse cuidadosamente para contrarrestar el impacto negativo de los contaminantes sobre los tejidos metabólicamente activos.

Liu et al. (2016) contribuyen con un estudio de gran escala que evidencia la asociación entre la exposición prolongada a la contaminación atmosférica y la prevalencia de diabetes tipo 2 en la población china. Los autores encontraron incrementos significativos en los niveles de glucosa en sangre y hemoglobina glicosilada en individuos expuestos a altas concentraciones de partículas contaminantes. Esta investigación aporta una base epidemiológica sólida para considerar la contaminación del aire como un factor de riesgo independiente para la diabetes, subrayando la necesidad de estrategias preventivas que incluyan la actividad física controlada y la reducción de la exposición ambiental.

Park et al. (2024) examinan el papel modulador de la actividad física en la relación entre la contaminación del aire y los indicadores glucémicos en adultos mayores. Su estudio revela que los individuos físicamente activos presentan menor impacto negativo de la contaminación sobre la glucemia y la hemoglobina glicosilada, sugiriendo que el ejercicio puede mitigar parcialmente los efectos metabólicos adversos del ambiente. Estos resultados son clave para el artículo, pues indican que la práctica regular y segura de actividad física puede servir como un factor protector frente al riesgo de diabetes tipo 2 en contextos de contaminación urbana.

Pérez et al. (2024) profundizan en la importancia de la actividad física como medida preventiva y terapéutica en adultos con diabetes mellitus tipo 2. Los autores destacan que la práctica sistemática de ejercicio reduce la resistencia a la insulina, mejora el control glucémico y disminuye la incidencia de complicaciones cardiovasculares asociadas a la enfermedad. Esta fuente resulta esencial para fundamentar la dimensión clínica y aplicada del artículo, al mostrar cómo la actividad física actúa como un mecanismo integral de protección frente a los factores ambientales y metabólicos que favorecen la aparición de diabetes tipo 2.

Finalmente, Pérez-Ruiz (2025) aporta una reflexión valiosa sobre la función preventiva y rehabilitadora de la actividad física en contextos laborales exigentes, particularmente en el personal de enfermería. El autor analiza cómo el ejercicio regular contribuye no solo a mejorar las capacidades físicas funcionales, sino también a reducir el riesgo ergonómico derivado de las tareas asistenciales repetitivas y de alta demanda física.

Además, plantea que la actividad física estructurada incide directamente en la disminución de enfermedades crónicas no transmisibles, como la diabetes mellitus tipo 2, la hipertensión arterial y los trastornos musculoesqueléticos, al promover un equilibrio fisiológico y mental. Esta aportación es fundamental para el estudio, pues refuerza

la idea de que la actividad física no debe considerarse únicamente como una práctica recreativa o terapéutica, sino como una herramienta esencial de prevención y promoción de la salud en adultos expuestos tanto a riesgos laborales como ambientales, incluyendo la contaminación atmosférica.

Existe una sólida evidencia científica que respalda los efectos positivos de la AF en la prevención y tratamiento de la DMT2 en adultos; sin embargo, en los momentos actuales se plantea la siguiente interrogante; ¿Cuál es el efecto de la actividad física en condiciones de contaminación atmosférica y el riesgo de desarrollar la diabetes tipo 2 en adultos?

Teniendo como objetivo analizar el efecto de la actividad física en condiciones de contaminación atmosférica y el riesgo de diabetes tipo 2 en adultos.

METODOLOGÍA

La revisión realizada es de tipo sistemática. Para su elaboración fueron consultadas en las bases de datos PubMed, Scopus y Google académico estudios controlados aleatorizados y ensayos clínicos publicados en los últimos diez años en los que se analizó el efecto de la actividad física en condiciones de contaminación atmosférica y riesgo de diabetes tipo 2 en adultos. De los 65 estudios identificados, 35 cumplieron con los criterios de inclusión.

Para la búsqueda de información se utilizaron los descriptores: Actividad física; Contaminantes atmosféricos; Diabetes tipo 2; Prevención.

DESARROLLO

La mayoría de los estudios abordan el PM2.5 y PM10. Se identificó una asociación significativa entre la exposición al PM10 por encima de 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el riesgo de DMT2, con una relación dosis-respuesta clara. En contraste, para PM2.5 la relación dosis-respuesta fue estadísticamente no significativa (Parasin et al., 2025). Por otro lado, la exposición prolongada a PM2.5 por encima de 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y con seguimientos mayores a cinco años se asoció con un incremento del riesgo a la DMT2.

Los efectos de PM10 según Parasin et al. (2025), pueden ser más impactantes de lo esperado, debido a su composición heterogénea, son partículas gruesas procedentes del tráfico vehicular, emisiones industriales y polvo. Además, se relacionó el PM10 con los procesos de inflamación sistémica y estrés oxidativo, alteraciones funcionales en las células β pancreáticas con reducción de la secreción de insulina hasta en un 30% (Liu et al., 2016). También se observó la activación de receptores de reconocimiento de patrones (TLR4), quienes desempeñan un papel clave en la respuesta inmunitaria, que inducen la liberación de citocinas proinflamatorias como la interleucina-6 y el factor de necrosis tumoral alfa (IL-6 y TNF- α), interfiriendo la señalización de la insulina (Sun

et al., 2022), en el tejido adiposo activan los macrófagos y causan alteraciones en la secreción de adipocinas, elevándose la leptina y reduciéndose las adiponectinas, lo que contribuye a la RI por la vía proteína quinasa activada por el adenosín monofosfato (AMPK) (Della Guardia & Shin, 2022), la activación de esta proteína mediante el AMP, es un evento temprano en el desarrollo de la RI en respuesta a los niveles elevados de glucosa.

En un estudio de cohorte prospectivo se investigó la asociación entre la exposición a la contaminación del aire y los indicadores glucémicos en personas mayores con normoglucemia (Park et al., 2024). Las exposiciones previas de un año a PM10 y NO₂ se asociaron con aumentos en los niveles de glucosa en ayunas, de la Hemoglobina glucosilada (HbA1c), insulina y HOMA-IR (Homeostasis Model Assessment for Insulin Resistance), índice que es utilizado para la estimación de la RI y de la función de las células β pancreáticas, se basa en la medición de la glucosa y de la insulina en ayunas, siendo de utilidad para la evaluación de la sensibilidad a la insulina y el riesgo relacionado con el desarrollo de la DMT2 así como de otras enfermedades metabólicas.

En las exposiciones previas durante cinco años a PM10 y NO₂ también se asociaron con un aumento de la insulina y HOMA-IR. Se observaron asociaciones positivas entre las exposiciones a PM10, PM2.5 y NO₂ con glucosa en ayunas y los niveles de HbA1c, coincidentes con metaanálisis previos. También se hallaron asociaciones de PM10 y NO₂ con aumentos en la insulina en ayunas y HOMA-IR en personas mayores. En este estudio el HOMA-IR aumentó en un 3.1% por incremento intercuartílico de PM2.5 y un 3.2% por NO₂, y la insulina en ayunas mostró asociaciones similares (Park et al., 2024).

La exposición a NO₂ ha sido relacionada con un mayor riesgo de DMT2 (Yang et al., 2020). Se observó mayor riesgo en zonas industrializadas, especialmente en Asia y Europa, atribuida a los altos niveles de densidad poblacional y de emisiones (Parasin et al., 2025). América del Norte reportó menor riesgo, probablemente por las regulaciones ambientales más estrictas.

El O₃ y el NO₂ mostraron una asociación significativa con la DMT2, con alta heterogeneidad ($I^2 > 90\%$, $p < 0.001$), SO₂ y SO₄, analizados en menor cantidad de estudios, y con asociación estadística no significativa (Parasin et al., 2025).

Contaminantes como PM1, SO₂ y NO_x fueron incluidos en un número reducido de estudios. Los resultados obtenidos no fueron concluyentes, evidenciándose la necesidad de ampliar las muestras de estudios.

La mayoría de los estudios realizados fueron cohortes realizados en Europa, Asia, Estados Unidos y China, con participantes mayores de 38 años. La duración del seguimiento osciló entre meses y años. En general, los estudios mostraron alta heterogeneidad ($I^2 > 98\%$ para

PM2.5 y PM10), diferentes controles de variables, métodos de exposición, diagnósticos y en la susceptibilidad poblacional.

El mayor riesgo de DMT2 se observó en adultos entre 45 y 55 años al compararlo con personas en edades \geq 65 años, probablemente debido a estilos de vida más activos (Nishida & Yatera, 2022). Además, las diferencias regionales sugieren un impacto del contexto geográfico y de las políticas ambientales en la magnitud del riesgo.

En el análisis realizado se reconocen como limitantes: la falta de estudios estratificados por géneros y comorbilidades, escasa inclusión de algunos contaminantes (PM1, SO₂, NOx) y número reducido de estudios con seguimiento a largo plazo, lo que podría subestimar los efectos reales de la contaminación atmosférica en enfermedades de progresión lenta, como es el caso de la DMT2 (Wu et al., 2022).

La evidencia científica actual refleja un complicado dilema en materia de Salud Pública: Por un lado, la AF es ampliamente reconocida como una estrategia no farmacológica efectiva en la prevención de los factores de riesgo asociados a las ENT como los problemas cardiovasculares, la hipertensión arterial, la obesidad, DMT2 y en el tratamiento de estas enfermedades, sin embargo su eficacia podría verse comprometida e incluso tener efectos no deseados en la salud de las personas al practicarse en entornos con altos niveles de contaminación atmosférica.

La Organización Mundial de la Salud (2024), plantea que la mayoría de las personas, tanto niños como adultos, no cumplen con los niveles de AF recomendados (150 a 300 min/semana). El sedentarismo contribuye de forma significativa a la carga global de enfermedades: solo en el 2019 se atribuyeron a la inactividad física cerca de un millón de muertes (Xu et al., 2022). Múltiples estudios han demostrado que la AF desempeña un papel protector frente a las ENT y especialmente en la DMT2 (Ao et al., 2022).

En países altamente urbanizados, donde se registran niveles superiores de contaminación atmosférica, surge una contradicción: la AF reconocida por sus efectos protectores frente a la DMT2 si se practica en un ambiente con niveles elevados de contaminantes en el aire como el PM2.5, PM10 y PM1, se pueden originar alteraciones en el estado de salud de quienes la practican. Investigaciones recientes muestran relación entre la AF y la exposición a contaminantes atmosféricos, existiendo umbrales críticos de exposición por encima de los cuales su efecto se atenúa progresivamente o desaparece (Ao et al; 2022).

En la revisión sistemática de Romero-Padrón et al. (2024) se analizó el efecto protector de la AF en ambientes contaminados. Los resultados obtenidos se basaron en tres variables fundamentales: nivel de contaminación, intensidad de la actividad física y el tiempo de exposición.

Concentración del contaminante PM2.5: a partir de 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el beneficio de la AF comienza a depender del nivel de contaminación, de la intensidad del ejercicio y del tiempo de exposición; hasta 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el límite superior de intensidad segura se establece en 80 MET.h/día, al sobrepasar los por 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ la intensidad límite es de 40 MET.h/día, y por encima de los 107 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el tiempo de exposición disminuye a 15 minutos de ejercicio; en cuanto al tiempo de exposición: en ambientes con 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2.5 el beneficio metabólico de la AF desaparece tras 90 minutos de ejercicio. Bajo estas condiciones, las recomendaciones de 150 min/semana pierden validez. En exposiciones extremas ($>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ constantes), el tiempo seguro se reduce 105 min/semana; con respecto a la intensidad del ejercicio físico: existe una relación inversa entre la intensidad y la tolerancia a los niveles de contaminación, por lo que, a mayor nivel de contaminación atmosférica, menor debe ser la intensidad del ejercicio para que éste sea seguro. Esto desafía los actuales marcos de prescripción de ejercicio, que de forma específica no suelen considerar en el entorno la contaminación del aire como una variable moduladora.

Aunque, en la literatura revisada se encontraron limitaciones metodológicas debido a que la mayoría de los estudios han sido realizados en Asia Oriental (China), lo que limita la generalización de los hallazgos a otras regiones, se observó una escasa diferenciación entre AF en los ambientes interiores con respecto a los exteriores, así como falta de estandarización en las métricas para cuantificar la intensidad y duración del ejercicio físico. Elementos de relevancia en poblaciones con predisposición a desarrollar DMT2 como los adultos mayores, quienes presentan una mayor vulnerabilidad fisiológica ante la contaminación del aire. El ejercicio realizado en condiciones adversas puede no solo exacerbar la carga respiratoria, sino también facilitar la entrada de contaminantes al organismo, comprometiendo su salud metabólica debido que durante el ejercicio aumenta la ventilación pulmonar, lo que puede facilitar la entrada al organismo de una mayor cantidad contaminantes presentes en el aire (Liu et al., 2016).

Las partículas inhaladas se van a depositar en los pulmones en el árbol bronquial y en los alveolos favoreciendo el desarrollo del estrés oxidativo iniciándose en el sitio de inhalación de los pulmones para luego, mediante diferentes procesos, llegar hasta alcanzar a todo el organismo mediante un proceso sistémico, que involucra los fenómenos de estrés oxidativo, disfunción del endotelio vascular, inflamación, alteraciones en el funcionamiento del sistema nervioso autónomo, fenómenos protrombóticos, alteraciones epigenéticas con alteración de la expresión de determinados genes. Mecanismos que favorecen el desarrollo de diferentes enfermedades en la que se incluye la DMT2.

En este contexto, la recomendación del ejercicio físico requiere un abordaje multisectorial y preventivo que contemple: sistemas de monitoreo ambiental accesibles y fiables, zonas urbanas libres de contaminación o con control ambiental, programas de salud adaptadas al entorno físico y social, planificación de la AF en la que se incorporen variables ambientales relacionadas con la contaminación del aire.

Desde esta perspectiva, resulta fundamental que la prescripción del ejercicio físico se adecue al contexto en que se realiza la AF de modo que se eviten efectos dañinos en la salud de las personas, especialmente cuando se superan los umbrales críticos de exposición a contaminantes atmosféricos. Por lo tanto, la AF saludable debe contemplar: análisis de la calidad del aire, vulnerabilidad individual y las políticas ambientales vigentes.

En un estudio longitudinal Park et al. (2024), evaluó los niveles de AF y la exposición a contaminantes PM10 y NO₂ en adultos mayores durante cuatro años, se encontró en los inactivos efectos adversos sobre RI, los que realizaron AF con una intensidad de moderada a vigorosa, no manifestaron efectos metabólicos negativos, observándose efectos nocivos en quienes aumentaron sus niveles de AF, lo que indica que el incremento abrupto de la AF en ambientes contaminados podría implicar un mayor riesgo si no es regulada de forma adecuada, el incremento inferior a 12,000 MET.min/semana, podría representar el umbral óptimo de seguridad para mejorar la RI en estas condiciones, los efectos adversos de PM2.5 y NO₂ sobre HOMA-IR y la insulina en ayunas fueron más fuertes en los grupos con baja AF.

Estos hallazgos respaldan la idea de que mantener la AF con una intensidad de moderada a vigorosa de forma continua podría mitigar los efectos negativos de la contaminación en el metabolismo glucémico, siempre que se consideren los límites ambientales de exposición.

En estudios realizados durante un seguimiento mayor a cinco años, se encontró que la exposición prolongada a PM2.5 en niveles superiores a 41µg/m³, incrementó de forma significativa el riesgo de desarrollar DMT2. No obstante, la relación dosis- respuesta no fue significativa (Parasin et al., 2025) sugiere que, a pesar del efecto nocivo de este contaminante, podrían existir factores moduladores adicionales como el estado nutricional, el estilo de vida o predisposición genética. En contraste, para el PM10 se evidencia una relación dosis-respuesta clara, particularmente a partir de concentraciones superiores a 32µg/m³, lo que refuerza la importancia de este contaminante en la fisiopatología de la DMT2.

Además, múltiples estudios coinciden en que, la exposición a PM10 pueden inducir la RI mediante mecanismos como la activación de receptores TLR4, el aumento de citocinas proinflamatorias y la alteración en la translocación del transportador GLUT4 en el músculo esquelético

(Liu et al., 2022; Sun et al., 2022). Este fenómeno se respalda por estudios que demuestran la disfunción de las células β pancreáticas bajo exposición de contaminantes, observándose estrés oxidativo, alteración del retículo endoplasmático y reducción de la secreción de insulina (Ren et al., 2023).

Con respecto al NO₂, se asocia de forma significativa con la DMT2, aunque más débil y con alta heterogeneidad (Parasin et al., 2025). Variabilidad que puede atribuirse a la utilización de diferentes metodologías en la estimación de la exposición, períodos de seguimiento y poblaciones estudiadas. Se coincide en que la heterogeneidad pone de relieve la necesidad de establecer métodos estandarizados para la medición de exposiciones a contaminantes atmosféricos y su asociación con enfermedades metabólicas.

En cuanto al O₃, la revisión mostró una relación significativa con la DMT2 (Parasin et al., 2025), aunque con heterogeneidad (I² > 90%) y una cantidad limitada de estudios. A pesar de ello, consideramos que este contaminante gaseoso merece mayor atención por su creciente concentración en relación con el cambio climático, ya que su formación depende de factores como la radiación solar y la temperatura ambiental. Tema que requiere del incremento de investigaciones teniendo en cuenta el potencial riesgo metabólico derivado del calentamiento global.

Otro hallazgo relevante fue la variabilidad geográfica observada en la asociación entre exposición a contaminantes y DMT2. Los riesgos asociados a PM2.5 y NO₂ fueron mayores en Asia y Europa en comparación con América del Norte (Parasin et al., 2025). A nuestro criterio, esto podría reflejar diferencias tanto en la regulación ambiental como en el grado de urbanización, estilo de vida y mecanismos de compensación fisiológica de las poblaciones. En América Latina, donde aún existen limitaciones en la vigilancia ambiental.

Los resultados encontrados confirman que la AF constituye una herramienta preventiva esencial en el abordaje del riesgo metabólico, particularmente en adultos con predisposición a desarrollar DMT2. No obstante, esta relación beneficiosa puede verse modulada o incluso revertida por la exposición simultánea a contaminantes del aire, como lo demuestran de forma convergente múltiples estudios recientes.

La AF según Ao et al. (2022) tiene un efecto protector frente al desarrollo de DMT2, siempre que se realice en contextos con niveles de contaminación ambiental bajos o moderados. En línea con ellos, la revisión de Romero-Padrón et al. (2024) permite profundizar en esta relación al establecer umbrales de seguridad específico en cuanto a la concentración de PM2.5, duración del ejercicio e intensidad.

Este análisis es particularmente relevante al trasladar la evidencia a entornos urbanos de países en desarrollo,

donde los niveles de partículas en suspensión superan frecuentemente los límites recomendados por la OMS.

El estudio longitudinal de Park et al. (2024) aporta una perspectiva valiosa al analizar cómo la exposición sostenida a los contaminantes PM₁₀ y NO₂ pueden contrarrestar los efectos beneficiosos del ejercicio, particularmente en personas mayores. Hallazgo congruente con los reportes de Liu et al. (2016), quienes advierten sobre la mayor vulnerabilidad fisiológica de este grupo etario frente a la polución atmosférica. Desde nuestro criterio, esto obliga a una adaptación específica de las estrategias de promoción de la AF, no solo en términos de frecuencia o tipo de ejercicio, sino también en cuanto al contexto en que se realice.

Un aspecto coincidente entre los estudios analizados fue la interacción, dosis-respuesta inversa entre la contaminación e intensidad del ejercicio, es decir, a mayor concentración de contaminantes, menor debe ser la intensidad y duración del ejercicio para evitar un efecto nocivo. Representa un cambio de paradigma en la prescripción de la AF, tradicionalmente centrada en los beneficios inherentes de su práctica, sin considerar en las condiciones ambientales de forma más específica como la contaminación del aire.

Se considera pertinente incorporar a la prescripción del ejercicio físico el nivel de exposición ambiental, vulnerabilidad individual, y la respuesta fisiológica esperada. Esta propuesta es coherente con los hallazgos de Romero-Padrón et al. (2024), quienes sugieren que incluso 15 minutos de ejercicios pueden ser perjudiciales cuando los niveles de PM_{2.5} superan los 107 µg/m³. A nuestro juicio, estos datos deben ser interpretados como un llamado a contextualizar la práctica de la AF, generar entornos urbanos saludables y regulados ambientalmente, lo cual implica una responsabilidad compartida entre el sistema de salud, gobiernos locales y ciudadanos.

Un punto de divergencia entre los estudios analizados radica en la falta de consenso sobre el efecto de la AF en espacios interiores versus exteriores, algunos autores no hacen distinción entre ambos. Consideramos que este factor puede marcar una diferencia significativa, especialmente en poblaciones vulnerables. En este sentido, es imperativo fomentar investigaciones futuras que comparen estos contextos, considerando las variables: ventilación, calidad del aire interior y niveles de esfuerzo físico.

Por otro lado, los datos reportados por Park et al. (2024) sobre el umbral de 12,000 MET. min/semana como límite seguro para mejorar la RI bajo condiciones de contaminación atmosférica. En nuestra opinión, resulta importantes para establecer rangos metabólicos seguros en relación con los índices de calidad del aire y la salud de las personas.

CONCLUSIONES

En el análisis realizado se encontró asociación entre la exposición a contaminantes atmosféricos y riesgo para el desarrollo de la diabetes tipo 2.

La consistencia de los hallazgos, pese a la heterogeneidad metodológica observada, respalda la existencia de un vínculo fisiopatológico entre la contaminación atmosférica y la desregulación glucémica.

Los estudios revisados evidenciaron, la eficacia de la actividad física como estrategia no farmacológica en la reducción del riesgo metabólico. Existe una relación inversa entre la intensidad del ejercicio y la tolerancia a los niveles de contaminación atmosférica, a mayor nivel de contaminación del aire, menor debe ser la intensidad del ejercicio para que éste sea seguro. Esto desafía los actuales marcos de prescripción de ejercicio, que no suelen considerar en el entorno ambiental de forma específica la contaminación del aire como una variable moduladora.

Mantener la actividad física con una intensidad de moderada a vigorosa de forma continua podría mitigar los efectos negativos de la contaminación en el metabolismo glucémico, siempre que se consideren los límites ambientales de exposición.

REFERENCIAS

- Ao, L., Zhou, J., Han, M., Chen, J., Chen, X., & Liu, Y. (2022). Efectos conjuntos de la actividad física y la contaminación atmosférica en la diabetes tipo 2 en adultos mayores. *BMC Geriatrics*, 22, 472. <https://doi.org/10.1186/s12877-022-03139-8>
- De Oca García, A. M., Manzanedo, J. G., & González, J. G. P. (2019). Entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT) como herramienta terapéutica en pacientes con diabetes mellitus tipo 2: Una revisión narrativa. *Retos*, 36(36), 633–639. <https://doi.org/10.47197/retos.v36i36.69762>
- Della Guardia, L., Shin, A.C. (2022). White and brown adipose tissue functionality is impaired by fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure. *J. Mol. Med. (Berl.)* 100 (5), 665–676. <https://doi.org/10.1007/s00109-022-02183-6>
- Franco Gallegos, L. I., Robles Hernández, G. S. I., Montes Mata, K. J., & Aguirre Chávez, J. F. (2024). *Más allá del control glucémico: Beneficios de la actividad física en la calidad de vida de personas con diabetes mellitus tipo 2: Una revisión narrativa. Retos: Nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación*, (53), 262–270. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9297213.pdf>
- Kirwan, J. P., Sacks, J., & Nieuwoudt, S. (2017). The essential role of exercise in the management of type 2 diabetes. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, 84 (7 Suppl 1), 15–21. <https://doi.org/10.3949/ccjm.84.s1.03>

- Liu, C., Chan, K. H., Lv, J., Lam, H., Newell, K., Meng, X., Liu, Y., Chen, R., Kartsonaki, C., Wright, N., Du, H., Yang, L., Chen, Y., Guo, Y., Pei, P., Yu, C., Shen, H., Wu, T., Kan, H., Chen, Z., & Li, L. (2022). *Long-term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of major cardiovascular diseases: A prospective study of 0.5 million adults in China*. *Environmental Science & Technology*, 56(18), 13200–13211. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03084>
- Liu, C., Yang, C., Zhao, Y., Ma, Z., Bi, J., Liu, Y., & Chen, R. (2016). Associations between long-term exposure to ambient particulate air pollution and type 2 diabetes prevalence, blood glucose and glycosylated hemoglobin levels in China. *Environment international*, 92, 416–421. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27148900/>
- Nishida, C., & Yatera, K. (2022). The Impact of Ambient Environmental and Occupational Pollution on Respiratory Diseases. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), 2788. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052788>
- Organización Mundial de la Salud. (2024). More physical activity. <https://www.who.int/teams/health-promotion/physical-activity>
- Parasin, N., Amnuaylojaroen, T., Saokaew, S., Sittichai, N., Tabkhan, N., & Dilokthornsakul, P. (2025). Outdoor air pollution exposure and the risk of type 2 diabetes mellitus: A systematic umbrella review and meta-analysis. *Environmental Research*, 269, 120885. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120885>
- Park, H., Kim, S. Y., Jang, H., Ha, Y. W., Yun, Y. M., Kim, K. J., Rhee, Y., Kim, H. C., Kim, C. O., & Cho, J. (2024). Impact of physical activity levels on the association between air pollution exposures and glycemic indicators in older individuals. *Environmental health: a global access science source*, 23(1), 87. <https://doi.org/10.1186/s12940-024-01125-8>
- Pérez, M., Pérez, R., Aguilera, A. B., & Contreras, L. M. (2024). Impacto de la actividad física en la prevención y tratamiento de la diabetes mellitus tipo 2 en adultos. *GADE: Revista Científica*, 4(7), 256–281. <https://doi.org/10.63549/rg.v4i7.574>
- Pérez-Ruiz, M. E. (2025). *La actividad física para mejorar las capacidades físicas y prevenir riesgo ergonómico y enfermedades crónicas en el personal de enfermería*. En C. X. Peraza-De Aparicio & Y. López-Gamboa (Comps.), *Memorias del XII Congreso Internacional de Enfermería* (pp. 151–164). Editorial UMET.
- Ren, Z., Yuan, J., Luo, Y., Wang, J., & Li, Y. (2023). Association of air pollution and fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure with gestational diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Annals of translational medicine*, 11(1), 23. <https://doi.org/10.21037/atm-22-6306>
- Romero-Padrón, M. Á., Hernández-García, Y. V., & González-Amarante, P. (2024). Umbrales del beneficio a la salud-actividad física y contaminación del aire: Una revisión sistemática. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 23(3), 30–38. <https://doi.org/10.29105/respyn23.3-797>
- Sun, J., Fang, R., Wang, H., Xu, D.X., Yang, J., Huang, X., Cozzolino, D., Fang, M., Huang, Y. (2022). A review of environmental metabolism disrupting chemicals and effect biomarkers associating disease risks: where exposomics meets metabolomics. *Environ. Int.* 158 (106941). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106941>
- Wu, Y., Zhang, S., Qian, S. E., Cai, M., Li, H., Wang, C., Zou, H., Chen, L., Vaughn, M. G., McMillin, S. E., & Lin, H. (2022). Ambient air pollution associated with incidence and dynamic progression of type 2 diabetes: a trajectory analysis of a population-based cohort. *BMC medicine*, 20(1), 375. <https://doi.org/10.1186/s12916-022-02573-0>
- Xu, Y., Xie, J., Yin, H., Yang, F., Ma, C., Baoyi, Y., Wu, R., Guo, B., Chen, L., & Li, S. (2022). The global burden of disease attributable to low physical activity and its trends from 1990 to 2019: An analysis of the Global Burden of Disease study. *Frontiers in Public Health*, 10, 1018866. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1018866>
- Yang, B.Y., Fan, S., Thiering, E., Seissler, J., Nowak, D., Dong, G.H., & Heinrich, J. (2020). Ambient air pollution and diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Environ. Res.* 180 (108817). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108817>

Conflictos de interés:

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribución de los autores:

Mireya Pérez-Rodríguez, Raymundo Pérez-Urquiza: Concepción y diseño del estudio, adquisición de datos, análisis e interpretación, redacción del manuscrito, revisión crítica del contenido, análisis estadístico, supervisión general del estudio.