BAG | Journal of Basic & Applied Genetics

Vol XXXVII (1); 91-98; Jan-July 2026

Journal of the Argentine Society of Genetics

CALIDAD DEL AIRE INTRADOMICILIARIO Y SU IMPACTO GENOTÓXICO E INFLAMATORIO EN POBLACIONES EXPUESTAS A PLANTAS DE ACOPIO DE CEREALES

INDOOR AIR QUALITY AND ITS GENOTOXIC AND INFLAMMATORY IMPACT IN POPULATIONS EXPOSED TO GRAIN STORAGE FACILITIES

Milanesio M.V.[†1], Salinero M.C.[1,2*], Bonatto M.F.[1,4], Mañas F.[3], Aiassa D.E.[1,4*]

[1] GeMA, Departamento de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), Ruta Nº 36, Km 601. (X5804BYA) Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

[2] Instituto de Investigaciones en Tecnologías Energéticas y Materiales Avanzados (IITEMA), CONICET – UNRC.

[3] Departamento de clínica animal, Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), Ruta Nº 36, Km 601. (X5804BYA) Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

[4] Instituto para el Desarrollo Agroindustrial y de la Salud (IDAS), CONICET – UNRC.

Corresponding authors:
Celeste Salinero
msalinero@exa.unrc.edu.ar

ORCID 0000-0002-3053-8405

Delia Aiassa
daiassa@exa.unrc.edu.ar

ORCID 0000-0002-5143-1340

Cite this article as:
Milanesio M.V., Salinero M.C., Bonatto M.F., Mañas F., Aiassa D.E. 2026. CALIDAD DEL AIRE INTRADOMICILIARIO Y SU IMPACTO GENOTÓXICO E INFLAMATORIO EN POBLACIONES EXPUESTAS A PLANTAS DE ACOPIO DE CEREALES. BAG. Journal of Basic and Applied Genetics XXXVII (1): 91-98.

Received: 07/23/2026
Accepted: 10/24/2026

General Editor:
Guillermo Giovambattista

DOI: 10.35407/bag.2026.37.01.07

ISSN online version: 1852-6233

Available online at
www.sag.org.ar/jbag

RESUMEN

La expansión urbana ha integrado plantas de acopio y acondicionamiento de granos al tejido habitacional, generando externalidades negativas mediante la liberación de material particulado ($PM_{2.5}$) durante las actividades de recepción, manipulación y almacenamiento de granos. Este material particulado constituye una mezcla compleja de contaminantes de origen biológico y químico, que potencialmente puede actuar como vehículo de compuestos agroquímicos asociados con la producción y al almacenamiento de granos. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la asociación entre los niveles de $PM_{2.5}$ en ambientes interiores y biomarcadores de genotoxicidad e inflamación en población residente de Las Higueras, Córdoba. Se realizó un monitoreo gravimétrico de $PM_{2.5}$ en cinco viviendas próximas a fuentes agroindustriales durante periodos estival e invernal, utilizando impactadores tipo Harvard. Paralelamente, se estudió a 22 residentes expuestos y 20 controles, analizando micronúcleos (MN) en mucosa bucal, recuento de plaquetas, linfocitos y niveles de IgE total. Los resultados revelaron una concentración promedio de $PM_{2.5}$ de 31,86 µg/m³, superando los estándares de la Organización Mundial de la Salud. Se hallaron diferencias significativas en el recuento plaquetario y una correlación positiva entre la frecuencia de MN y niveles de IgE ($r = 0,707$, $p < 0,001$). Aunque los parámetros hematológicos permanecieron dentro de rangos clínicos, las alteraciones significativas sugieren una respuesta biológica temprana ante la exposición crónica. Se concluye que el entorno habitacional próximo a plantas de acopio podría representar un factor de riesgo para la inestabilidad genómica y la salud respiratoria, resaltando la necesidad de políticas de salud ambiental preventiva y normativas de distanciamiento urbano.

Palabras clave: Material particulado fino, inmunoglobulina E, genotoxicidad, micronúcleos, exposición ambiental

ABSTRACT

Urban expansion has integrated grain storage and conditioning facilities into residential areas, generating negative externalities through the release of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) during grain receiving, handling, and storage operations. This particulate matter constitutes a complex mixture of biological and chemical contaminants that may potentially act as a carrier of agrochemical compounds associated with crop production and grain storage. In this context, the present study aimed to evaluate the association between indoor $PM_{2.5}$ levels and biomarkers of genotoxicity and inflammation in residents of Las Higueras, Córdoba, Argentina. Gravimetric monitoring of $PM_{2.5}$ was conducted in five homes located near agro-industrial facilities during the summer and winter seasons using Harvard impactors. In parallel, 22 exposed residents and 20 control subjects were evaluated by analyzing micronuclei (MN) in buccal mucosa cells, platelet and lymphocyte counts, and total IgE levels. The results revealed a mean $PM_{2.5}$ concentration of 31.86 µg/m³, exceeding the World Health Organization guideline value. Significant differences were observed in platelet counts, along with a positive correlation between MN frequency and IgE levels ($r = 0.707$, $p < 0.001$). Although hematological parameters remained within clinical reference ranges, the observed alterations suggest an early biological response associated with chronic exposure. It is concluded that residential environments located near grain storage facilities represent a risk factor for genomic instability and respiratory health, highlighting the need for preventive environmental health policies and urban setback regulations.

Key words: Fine particulate matter, immunoglobulin E, genotoxicity, micronuclei, environmental exposure

INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y la expansión de los centros urbanos han agudizado, en las últimas décadas, la colisión entre el uso residencial del suelo y las actividades productivas (Carreño, 2021). Este fenómeno ha dejado numerosas plantas de almacenamiento, clasificación y acondicionamiento de granos, originalmente emplazadas en áreas rurales o periféricas, integradas actualmente al tejido urbano. Se ha documentado ampliamente que este tipo de infraestructura genera externalidades negativas persistentes, incluso tras el cese definitivo de sus operaciones (Asmus *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009). Entre las perturbaciones reportadas se incluyen impactos sonoros, visuales, dificultades de tránsito, producción de residuos y riesgos ocupacionales (Montanaro, 2003; Amador y Barceló, 2011). Un factor crítico, frecuentemente subestimado, es la liberación de material particulado durante las tareas mecánicas de carga, descarga, secado y limpieza, con potenciales efectos adversos sobre la salud pública (Lázzaro, 2010; Amador y Barceló, 2011).

El material particulado (PM) no constituye una fase inerte, sino una mezcla compleja de componentes gaseosos, líquidos y sólidos (Lerda *et al.*, 2001; Kastury *et al.*, 2017; Lim y Kim, 2024). Las partículas respirables ingresan al organismo de forma subrepticia, y sus efectos biológicos están condicionados por su tamaño, composición físico-química y la duración de la exposición (López *et al.*, 2011; Quezada-Maldonado *et al.*, 2021; Lim y Kim, 2024). En particular, la fracción fina ($PM_{2.5}$) presenta una mayor capacidad de penetración sistémica, afectando los sistemas respiratorio, cardiovascular, inmunológico, nervioso y tegumentario (Dominski *et al.*, 2021; Colichón Carranza *et al.*, 2023; Cervantes Valencia *et al.*, 2024; Lim y Kim, 2024).

En las plantas de acopio y acondicionamiento de granos, el material particulado generado durante las operaciones de recepción, transporte, limpieza, secado y almacenamiento constituye una mezcla compleja de origen biológico y químico (Spankie y Cherrie, 2012). Además de fragmentos vegetales, microorganismos, endotoxinas y esporas fúngicas, este polvo podría transportar residuos de plaguicidas utilizados durante la producción y el almacenamiento de los granos, tales como insecticidas y fungicidas empleados para el control de plagas postcosecha. En consecuencia, la exposición al material particulado emitido por estas instalaciones representa una vía potencial de contacto con una mezcla de contaminantes capaces de inducir respuestas inflamatorias (Rumchev *et al.*, 2019) y efectos genotóxicos, cuya magnitud dependerá de la composición específica de las partículas y de las condiciones de exposición.

El monitoreo de estas fracciones es un estándar estratégico para el análisis de riesgo sanitario y la dinámica de dispersión de contaminantes en núcleos urbanos (López *et al.*, 2011; Amarillo *et al.*, 2014; Amarillo, 2015; Tavera Busso *et al.*, 2018). Sin embargo, existe una notable escasez de datos sobre la calidad del aire intradomiciliario en viviendas aledañas a fuentes agroindustriales, así como sobre la relación entre la exposición a $PM_{2.5}$ en dichos entornos y el estado de salud de las poblaciones residentes. Esta brecha de conocimiento resulta crítica, considerando que los espacios interiores (donde la población permanece más del 80% de su tiempo) no operan como sistemas cerrados, sino que actúan como un reflejo directo de la calidad ambiental circundante (Chen y Zhao, 2011; Ji y Zhao, 2015).

Ante este escenario de exposición crónica, los biomarcadores actúan como indicadores tempranos de alteraciones moleculares, bioquímicas y celulares (Sauer *et al.*, 2018; Salama y Chennaoui, 2024). En particular, el estudio de parámetros hematológicos como el recuento de plaquetas y linfocitos permite evaluar la respuesta inflamatoria sistémica y el estado fisiológico general (Hoffbrand y Steensma, 2019), mientras que la inmunoglobulina E (IgE) se utiliza como marcador específico para monitorizar la respuesta inmunológica e inflamatoria exacerbada ante aeroalérgenos (Wang *et al.*, 2022; Lim y Kim, 2024). Complementariamente, la frecuencia de micronúcleos (MN) en mucosa bucal constituye una técnica no invasiva robusta para cuantificar la inestabilidad genómica y el daño al ADN (Aiassa *et al.*, 2019; Mañas *et al.*, 2021; Bolognesi, 2023; Torres Bugarín *et al.*, 2024). La determinación integrada de estos biomarcadores ofrece una herramienta diagnóstica de alta confiabilidad para el monitoreo preventivo en poblaciones expuestas.

A partir de todo lo anteriormente expuesto, se propone evaluar la asociación entre los niveles de material particulado fino ($PM_{2.5}$) intradomiciliario y biomarcadores de genotoxicidad y bioquímicos de respuesta inflamatoria en población residente de la localidad de Las Higueras (Departamento Río Cuarto, provincia de Córdoba, Argentina). A través de este estudio, se pretende caracterizar el impacto sanitario de la exposición a material particulado derivado de la actividad de acopio y acondicionamiento de granos, estableciendo la proximidad a dichas fuentes como un determinante crítico de la calidad del aire interior y la salud de los habitantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinación de la concentración de partículas en suspensión en el interior de las viviendas

El estudio se llevó a cabo en la localidad de Las Higueras (33° 41′ 26″ S, 64° 43′ 16″ O), departamento Río Cuarto, provincia de Córdoba, Argentina. La región se caracteriza por una economía basada en la actividad agropecuaria y la industrialización de granos.

El muestreo de material particulado fino ($PM_{2.5}$) se realizó en el interior de cinco viviendas ubicadas a menos de 300 metros de plantas de acopio y acondicionamiento de granos, abarcando dos períodos estacionales (invernal y estival), definidos conforme a las directrices del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). La selección de las viviendas se basó en un muestreo por conveniencia, priorizando hogares cuyos residentes manifestaron preocupación por la proximidad a la actividad industrial. Para el diseño del muestreo se tomaron como referencia los criterios metodológicos establecidos por Amarillo (2015).

La medición de $PM_{2.5}$ se efectuó mediante impactadores tipo Harvard acoplados a bombas de vacío de bajo volumen, utilizando filtros de teflón de 1 µm de poro. Para la cuantificación gravimétrica, los filtros fueron acondicionados previamente en estufa a 60 °C durante 24 h y estabilizados en un desecador a temperatura ambiente antes de su pesaje inicial. Las pesadas se realizaron utilizando una balanza analítica Shimadzu AUW220D, con una resolución de 0,01 mg, bajo condiciones controladas de temperatura (20 °C a 25 °C) y humedad relativa (30% a 50%). Para evitar la contaminación, los filtros fueron manipulados exclusivamente con pinzas recubiertas en teflón y guantes.

Los equipos se instalaron en el ambiente de mayor uso de cada vivienda. Los muestreos tuvieron una frecuencia semanal para garantizar una carga de masa suficiente para el análisis gravimétrico. Tras la exposición, los filtros siguieron el mismo protocolo de acondicionamiento y pesaje (tres pesadas pre y post-exposición en días distintos para asegurar la repetibilidad de las mediciones). Los resultados fueron normalizados a concentraciones diarias expresadas en $\mu g/m^3$.

Interpolación ponderada por distancia inversa

A partir de las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ obtenidas en ambos períodos estacionales, se realizó un análisis de distribución espacial. Para ello, se aplicó el método de interpolación ponderada por distancia inversa (IDW), que estima valores en ubicaciones no muestreadas mediante la ponderación de los puntos conocidos, asumiendo que la influencia de un punto disminuye a medida que aumenta la distancia (QGIS, 2023).

Biomarcadores de genotoxicidad y bioquímicos de respuesta inflamatoria

La población en estudio consistió en adultos de ambos sexos con una residencia mínima de 5 años en la zona de influencia de plantas de acopio y acondicionamiento de granos (grupo "expuesto"). Dada la proximidad geográfica de la zona, se seleccionó como grupo control ("no expuesto") una población residente de la ciudad de Río Cuarto (provincia de Córdoba, Argentina). Los criterios de exclusión comprendieron condiciones de salud preexistentes, consumo crónico de fármacos y exposición a radiación ionizante (rayos X) en los 6 meses previos a la toma de muestra. El tamaño muestral se determinó considerando la recomendación de Preston y Hoffmann (2008), quienes sugieren que grupos de 20 o más individuos mitigan la influencia de factores de confusión en la evaluación de alteraciones cromosómicas o mutagénicas.

Cada participante suscribió un consentimiento informado previamente aprobado por el Comité de Ética en Investigaciones Biomédicas del Instituto Multidisciplinario de Biología Celular (IMBICE-2016). Asimismo, se completó un cuestionario estructurado para recopilar datos sociodemográficos, hábitos de vida (consumo de alcohol y tabaco), ocupación y sintomatología clínica, con énfasis en afecciones del sistema respiratorio.

La obtención de muestras biológicas se realizó en época estival mediante punción venosa periférica (5 ml). A partir de sangre total, se determinó el recuento de plaquetas y linfocitos en cámara de Neubauer, mientras que los niveles de inmunoglobulina E (IgE) total fueron cuantificados mediante ensayo de inmunoabsorción ligado a enzimas (ELISA - *Enzyme-Linked Immunosorbent Assay*). Conjuntamente, se obtuvieron muestras de células epiteliales de la mucosa bucal mediante hisopo estéril. Los extendidos citológicos se prepararon siguiendo el protocolo de Tolbert *et al.* (1992) con modificaciones locales, evaluándose 1.000 células por individuo. La identificación de micronúcleos (MN) se realizó bajo los criterios establecidos por Diler y Ergene (2010).

Análisis estadístico

El análisis estadístico de datos se realizó utilizando el programa GraphPad Prism versión 5.02 (2009). Para la concentración de $PM_{2.5}$ se calcularon estadísticos descriptivos como media ($\bar{X}$), desviación estándar (DS) y mediana (Me), analizando los datos para diferentes semanas de toma de muestra (1 a 8 semanas), diferentes puntos de muestreo (viviendas 1 a 5) y época de muestreo (invernal y estival). La normalidad de la distribución de los datos para los biomarcadores bioquímicos y genotóxicos se evaluó mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Para los datos que no presentaron una distribución normal, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney para determinar diferencias significativas entre los grupos expuesto y no expuesto en las variables. La relación entre variables se analizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson (5%). En todos los análisis se estableció un nivel de significancia de $p < 0,05$.

Tabla 1. Valores hallados de los biomarcadores genotóxicos y bioquímicos estudiados.

	MN/1000 células analizadas Media ± DS	**Linfocitos/mm³** Media ± DS	**Plaquetas/mm³** Media ± DS	**IgE (U/ml)** Media ± DS
Grupo "expuesto"	7,32 ± 2,46[a]	7177,27 ± 1158,73	197045,46 ± 32221,50[a]	94,41 ± 115,34
N= 22	Rango [4-14]	Rango [5200-9200]	Rango [110000-238000]	Rango [7-485]
Grupo "no expuesto"	0,60 ± 0,68	7230,00 ± 1137,91	269450,00 ± 63190,17	143,85 ± 63,91
N= 20	Rango [0-2]	Rango [5200-8200]	Rango [183000-351000]	Rango [64-293]

RESULTADOS

Determinación de la concentración de partículas en suspensión en el interior de las viviendas

Durante el periodo de estudio se recolectaron un total de 39 muestras de material particulado fino ($PM_{2.5}$) en el interior de las viviendas. La concentración promedio global fue de 31,86 µg/m³ (DS= 88,99 µg/m³), con un rango de valores que osciló entre 0,89 y 570,89 µg/m³. Debido a la alta dispersión de los datos, la mediana global de 13,44 µg/m³ resulta un indicador más representativo de la tendencia central de la muestra.

Al comparar los periodos estacionales, se observaron concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ de 20,47 µg/m³ (DS= 15,73 µg/m³) para el periodo invernal y 42,15 µg/m³ (DS= 69,05 µg/m³) para el estival. El análisis estadístico confirmó diferencias significativas entre ambos periodos ($p < 0,05$), registrándose niveles superiores durante la estación estival. Respecto a la tendencia central, las medianas registradas fueron de 12,12 µg/m³ para el periodo invernal y 17,57 µg/m³ para el estival, lo cual evidencia un incremento en los niveles de base durante el verano.

Estudios bioquímicos y de genotoxicidad: Biomarcadores de efecto

La población de estudio estuvo conformada por 22 individuos en el grupo "expuesto" (edad: 39,59 ± 9,41 años; rango: 23–67 años), con una distancia media de residencia a las plantas de acopio de 387,10 ± 290,40 m (rango: 83–1200 m). El grupo control incluyó 20 individuos residentes en áreas sin influencia de plantas de acopio (edad: 40 ± 9,61 años; rango: 23–66 años).

De los cuestionarios de salud se desprende que los participantes expuestos manifestaron sintomatología persistente asociada a una posible respuesta inflamatoria o irritativa del sistema respiratorio (47%). A pesar de la incertidumbre sobre la etiología, se registró una preocupación generalizada por la calidad ambiental. En contraste, el grupo control no presentó sintomatología respiratoria persistente.

Los resultados de los biomarcadores se presentan en la Tabla 1.

Los parámetros hematológicos (plaquetas y linfocitos) se encontraron dentro de los rangos de referencia estándar de la práctica clínica (Hoffbrand y Steensma, 2019). No obstante, es imperativo destacar que, aunque los valores de plaquetas se mantienen en niveles de normalidad, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los residentes próximos a las plantas de acopio y el grupo control. En cuanto a los niveles de IgE, los valores se situaron dentro de los rangos de referencia (Murphy y Weaver, 2016), sin diferencias significativas entre ambos grupos.

La relación entre los biomarcadores de efecto sugiere una asociación positiva entre la frecuencia de micronúcleos (MN) y los niveles de IgE: aquellos participantes con mayor daño genotóxico presentaron, de manera concomitante, una mayor carga de IgE (Figura 1).

Finalmente, el análisis de correlación entre la frecuencia de MN y otros biomarcadores bioquímicos como así también con la distancia de residencia a los centros de acopio ($p > 0,05$; $r = -0,2124$) no arrojaron significancia estadística.

DISCUSIÓN

El presente trabajo constituye la primera evaluación integral que vincula la concentración de material particulado fino ($PM_{2.5}$) en entornos intradomiciliarios con biomarcadores de genotoxicidad y respuesta inflamatoria en una zona agroindustrial de la provincia de Córdoba, Argentina.

El valor promedio para $PM_{2.5}$ registrado (31,86 ± 88,99 µg/m³) supera ampliamente el umbral de exposición segura sugerido por la OMS (2021) de 5 µg/m³. La alta dispersión de los datos sugiere que, más que una exposición constante, la población se encuentra sujeta a eventos de emisión episódicos. En este sentido, el uso de la mediana global (13,44 µg/m³) y estacional (estival: (17,57 µg/m³ vs. invernal: 12,12 µg/m³) resultan descriptores más robustos de la exposición habitual. Este patrón estacional

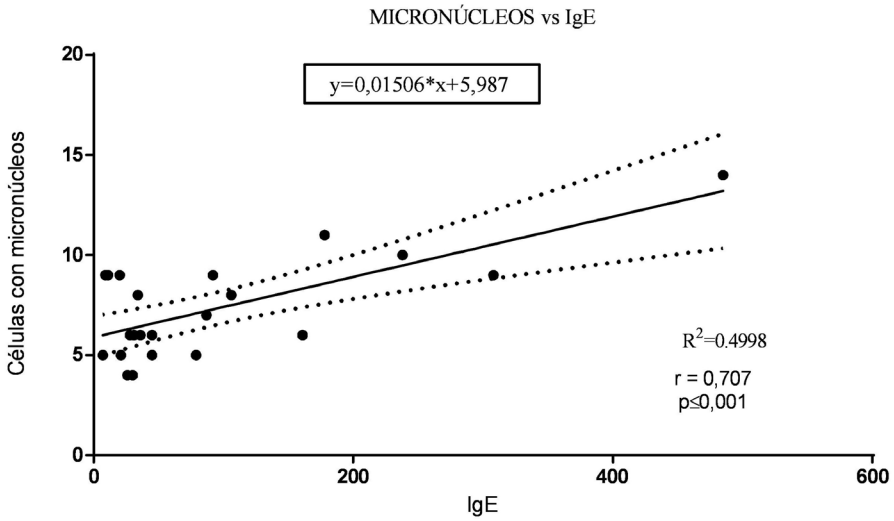


Figura 1. Relación entre frecuencia de MN con niveles de IgE (p≤0,001; R^2 = 0,4998; r = 0,707).

refleja una mayor carga contaminante durante los ciclos de actividad agroindustrial intensiva.

Al contrastar los valores hallados en esta investigación con estudios en entornos urbanos y semiurbanos (Sillanpää *et al.*, 2000; Amarillo, 2015; Miranda *et al.*, 2012; Rojano *et al.*, 2013), los niveles detectados en Las Higueras se posicionan en el umbral superior de los rangos documentados. Considerando la exclusión de fuentes de combustión interna domésticas, el material particulado hallado se vincula estrechamente a la dispersión de polvos orgánicos, especialmente derivados de la manipulación de soja, reconocidos por su potencial como aeroalérgenos (Molinas *et al.*, 2006). Asimismo, el material particulado de origen agrícola puede actuar como vehículo para el transporte atmosférico de residuos de plaguicidas, constituyendo una potencial vía de exposición a compuestos agroquímicos (Boonupara *et al.*, 2023; Haberkon *et al.*, 2024). Bajo los criterios de Colman Lerner *et al.* (2013), la zona de estudio presenta un perfil de contaminación industrial, lo que subraya la necesidad de establecer normativas de distanciamiento y políticas de salud ambiental preventiva.

En relación con el impacto biológico: genotoxicidad y respuesta inflamatoria, los resultados obtenidos demuestran que las condiciones ambientales en las que habitan los participantes del estudio favorecerían procesos de inestabilidad genómica y activación inmunológica. El valor promedio de frecuencia de MN hallado en el grupo "expuesto" (7,32 ± 2,4 MN/1000 células analizadas) denota una evidencia clara de inestabilidad genética en comparación con los valores basales del grupo control. Al contrastar estos hallazgos con otros estudios enfocados en exposiciones ambientales y ocupacionales en poblaciones argentinas, se observa una concordancia significativa. Por una parte, los resultados se alinean con lo descripto por Varea *et al.* (2025), quienes registraron valores de MN en mucosa bucal de 7,73 ± 0,41 en poblaciones expuestas al consumo de agua con arsénico (As), reflejando cómo la exposición crónica a este metaloide a través del recurso hídrico induce niveles de daño citogenético muy cercanos a los observados en el grupo "expuesto" de este trabajo.

Asimismo, la media obtenida guarda relación con los niveles de daño genético documentados en trabajadores rurales expuestos a agentes químicos mixtos. Ferré *et al.* (2018) reportaron una media superior de 9,28 ± 2,08 MN/1000 células analizadas en trabajadores agrícolas con una trayectoria de exposición a plaguicidas de 15 ± 3,15 años. En conjunto, la frecuencia de MN de (7,32 ± 2,4 MN/1000 células analizadas) reafirma la utilidad del ensayo de micronúcleos como un biomarcador de efecto sensible y confiable, evidenciando que el grupo en estudio se encuentra en riesgo genotóxico relevante derivado de su exposición ambiental.

Se observó una correlación positiva y significativa entre la frecuencia de MN en mucosa bucal y los niveles séricos de IgE ($p < 0,001$; $r = 0,707$), en línea con lo reportado por Rodríguez *et al.* (2005) en contextos de inmunidad humoral en exposición a xenobióticos.

En relación con los biomarcadores bioquímicos, si bien los valores de plaquetas se mantuvieron dentro de los rangos de referencia (Hoffbrand y Steensma, 2019), la disminución significativa en el grupo expuesto sugiere una alteración subclínica en la dinámica plaquetaria posiblemente inducida por el ambiente, una variación biológica temprana que podría estar vinculada a la exposición crónica. En cuanto a la IgE la dispersión observada en los niveles hallados apunta a una respuesta inmunológica heterogénea frente a la exposición crónica, que podría interpretarse como una respuesta de mecanismos inmunológicos asociadas con procesos alérgicos e inflamatorios (Vennera y Picado, 2012; Abbas y Goldin, 2025).

Al contrastar la baja en el recuento plaquetario con la variabilidad de la IgE, se infiere que el mecanismo predominante del ambiente de estudio es de carácter proinflamatorio y oxidativo, evidenciado por la inestabilidad genómica (MN) y la respuesta hematológica, más que un proceso alérgico clásico mediado exclusivamente por IgE. Esta conclusión se fortalece al observar que las alteraciones citogenéticas preceden a las manifestaciones clínicas, reafirmando el valor de los MN en mucosa bucal como un biomarcador de respuesta temprana (Cuenca y Ramírez, 2004; Sauer *et al.*, 2018).

La ausencia de monitoreo simultáneo en aire exterior constituye una limitación del estudio, al igual que la falta de correlación entre la distancia a los centros de acopio y los biomarcadores evaluados ($p > 0,05$; $r = -0,2124$), hallazgo coincidente con lo observado por Lerda *et al.* (2001) en Marcos Juárez. Esta falta de gradiente lineal sugiere que, dentro del radio de los 1000 metros, otros factores (como la dinámica de vientos o las características edilicias) podrían ser determinantes en la dispersión del contaminante. Estos resultados sugieren que futuras investigaciones deberían incorporar modelos de dispersión atmosférica y análisis de ventilación habitacional para comprender cómo la infraestructura urbana modula la entrada de contaminantes al hogar.

Si bien la falta de monitoreo simultáneo en exteriores representa una limitación metodológica, los hallazgos proporcionan evidencia científica robusta sobre el impacto sanitario del acopio de granos dentro del tejido habitacional. Este estudio ratifica la importancia del biomonitoreo no invasivo para la identificación de riesgos emergentes en poblaciones expuestas y constituye un insumo esencial para el diseño de estrategias de mitigación en salud pública.

Los resultados obtenidos permiten establecer una asociación entre la degradación de la calidad del aire intradomiciliario, caracterizada por niveles de $PM_{2.5}$ que superan los estándares internacionales, y las alteraciones subclínicas en los biomarcadores analizados. La coexistencia de elevadas concentraciones de $PM_{2.5}$ con un incremento en la frecuencia de MN y una respuesta inmunológica heterogénea (IgE) sugiere que las partículas finas actúan como el vector facilitador de procesos proinflamatorios y genotóxicos en la población residente. En este contexto, futuras investigaciones deberían incorporar la caracterización físico-química del material particulado para identificar los componentes responsables de los efectos biológicos observados. La evidencia reunida en este estudio confirma que el entorno habitacional próximo a las plantas de acopio de cereales representa un factor de riesgo para la inestabilidad genómica y la salud respiratoria a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

Aiassa D.E., Mañas F.J., Gentile N.E., Bosch B., Salinero M.C., Gorla N.B.M. (2019) Evaluation of genetic damage in pesticides applicators from the province of Córdoba, Argentina. Environ. Sci. Pollut. Res. 26: 20981–20988. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05344-2.

Abbas M., Goldin J. (2025) Type I Hypersensitivity Reaction. En: StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560561

Amador A.C, Barceló L.E. (2011) Riesgos y prevención de patologías laborales en las plantas de acopio de granos. Rev. Maestría Salud Pública 9(17): 1–18. ISSN: 1667-3700.

Amarillo A.C., Tavera Busso I., Carreras H. (2014) Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in urban environments: health risk assessment by age groups. Environ. Pollut. 195: 157–162.

Amarillo A. (2015) Contaminantes atmosféricos particulados en el área urbana de la ciudad de Córdoba: Impacto en la salud de la población. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

Asmus C., Alonzo H., Palacios M., Silva A., Freitas- Filhote M., Buosi D. (2008) Assessment of human health risk from organochlorine pesticide residues in Cidade dos Meninos, Duque de Caxias, Río de Janeiro, Brazil. Cad. Saúde Pública 24(4):755–766. https://doi.org/10.1590/S0102-311X2008000400005.

Bolognesi C. (2023) The biology of buccal cells and the buccal micronucleus (MN) cytome assay. Span. J. Environ. Mutagen. Genomics. 27(1), 191. https://ojs.diffundit.com/index.php/sema/article/view/1416

Boonupara T., Udomkun P., Khan E., Kajitvichyanukul P. (2023) Airborne pesticides from agricultural practices: A critical review of pathways, influencing factors, and human health implications. Toxics, 11(10), 858. https://doi.org/10.3390/toxics11100858

Carreño G. (2021) Interfases urbano-rurales, conflictos ambientales y gobernanza del riesgo. Estudio de caso de una localidad en la región del noroeste de la provincia de Buenos Aires. Papeles del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales de la Universidad Nacional del Litoral. 12(23): 158–171. https://doi.org/10.14409/p.v12i23.10791.

Cervantes-Valencia M.E., López-Valdez N., Rojas-Lemus M., González-Villalva A., Morales-Ricardes G., Bizarro-Nevares P., Ustarroz-Cano M., Salgado-Hernández J.A., Mendoza-Martínez S., Lamas-Orozco L.M., Fortoul T.I. (2024) Antioxidantes naturales y su efecto contra el estrés oxidante provocado por la contaminación por material particulado. Rev. Fac. Med. UNAM. 67(4): 7–20. http://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2024.67.4.02

Chen C., Zhao B. (2011) Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. Atmos. Environ. 45(2): 275–288. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048

Colichón Carranza R.D., Torres del Aguila A., Lozano Carranza C.M., Lozano Chung A. (2023) Impacts of Particulate Matter ($PM_{2.5}$) on the atmospheric quality of the District of Morales - Province of San Martin – 2022. SAP Biomed. Chem. Eng. Innov. 2, 67. https://doi.org/10.56294/evk202367

Colman Lerner J., Müller A., Aguilar M., Matamoros N. (2013) Contaminación del aire por compuestos orgánicos volátiles y material particulado en La Plata y Ensenada. II Jornadas de Investigación y Transferencia de la Facultad de Ingeniería. Facultad de Ingeniería. 587–592.

Cuenca P., Ramírez V. (2004) Aberraciones cromosómicas en trabajadoras expuestas ocupacionalmente a plaguicidas. Rev. Biol. Trop. 52: 219–224.

Diler S.B., Ergene S. (2010) Nuclear anomalies in the buccal cells of calcite factory workers. Genet. Mol. Biol. 33(2): 374–8.

Dominski F.H., Lorenzetti Branco J.H., Buonanno G., Stabile L., Gameiro da Silva M., Andrade A. (2021) Effects of air pollution on health: A mapping review of systematic reviews and meta-analyses. Environ. Res. 201, 111487. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111487.

Ferré D.M., Quero M., Hynes V., Saldeña E., Lentini V., Tornello M., Carracedo R., Gorla N.B. (2018) Ensayo de micronúcleos de citoma bucal en trabajadores de fincas frutícolas que han aplicado plaguicidas alrededor de quince años. Rev. Int. Contam. Ambient. 34(1): 23-33.

GraphPad Software (2009) GraphPad Prism (versión 5.02) [Software]. https://www.graphpad.com

Haberkon N.B.R., Aparicio V.C., De Gerónimo E., Mendez M.J. (2024) Multiresidues of pesticides in the particulate matter (PM10) emitted by rural soils of the semiarid pampas, Argentina. A potential source of air pollution. Environmental Pollution, 360, 124617. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124617

Hoffbrand A.V., Steensma D.P. (2019). Hoffbrand's Essential Haematology (8th Ed.). Wiley-Blackwell, New Jersey, Estados Unidos.

Ji W., Zhao B. (2015) Contribution of outdoor-originating particles, indoor-emitted particles and indoor secondary organic aerosol (SOA) to residential indoor $PM_{2.5}$ concentration: A model-based estimation. Build. Environ. 90, 196–205. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.006

Kastury F., Smith E., Juhasz A.L. (2017) A critical review of approaches and limitations of inhalation bioavailability and bioaccessibility of metal(loid)s from ambient particulate matter or dust. Sci. Total Environ. 574: 1054–1074.

Lazzaro P.C. (2010) Medición del nivel de polvo respirable a los que se ven expuestos los operarios de plantas de acopio durante el proceso de carga camión. Trabajo Final. Especialización en Higiene y Seguridad en el Trabajo Agrario. Escuela para Graduados Alberto Soriano. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

Lerda D., Bardaji M., Re V., Demarchi V., Villa O. (2001) Contaminación del aire por silos, su incidencia sobre la salud, una problemática regional. Arch. Alerg. Inmunol. Clín. 32(2): 52–56.

Lim E.Y., Kim G.D. (2024) Particulate Matter-Induced emerging health effects associated with oxidative stress and inflammation. Antioxidants 13, 1256. https://doi.org/10.3390/antiox13101256.

López M., Ceppi S., Palancar G., Olcese L. (2011). Elemental concentration and source identification of PM_{10} and $PM_{2.5}$ by SR-XRF in Córdoba City, Argentina. Atmos. Environ. 45(31): 5450–5457.

Mañas F., Agost L., Salinero M.C., Méndez A., Aiassa D. (2021) Cytogenetic markers and their spatial distribution in a population living in proximity to areas sprayed with pesticides. Environ. Toxicol. Pharmacol. 88, 103736. https://doi.org/10.1016/j.etap.2021.103736

Miranda R., Andrade M., Fornaro A. (2012) Urban air pollution: a representative survey of $PM_{2.5}$ mass concentrations in six Brazilian cities. Air Qual. Atmos. Health 5(1): 63–77. https://doi.org/10.1007/s11869-010-0124-1

Molinas J., Corbari M., Ardusso L., Crisci C. (2006) Impacto económico del asma y la rinitis alérgica por cáscara de soja. Invenio. Revista de Investigación Académica. Universidad del Centro Educativo Latinoamericano. ISSN 0329 – 3475 (109).

Montanaro L. (2003) Módulo: Riesgos derivados del trabajo en silos. Colección de Módulos: La salud y el trabajo. Fundación para la Promoción de la Seguridad y Salud en el Trabajo. Argentina.

Murphy K., Weaver C. (2016) Janeway's Immunobiology (9th Ed.). Garland Science. New York, Estados Unidos.

OMS (2021) Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión ($MP_{2,5}$ y MP_{10}), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Resumen Ejecutivo. Ginebra. Organización Mundial de la Salud 2021. ISBN 978-92-4-003546-1 (versión electrónica).

Preston R.J., Hoffmann G.R. (2008) Genetic toxicology. In: Klaassen C.D. (Ed), Casarett & Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons (7th Ed.). McGraw Hill, Nueva York, Estados Unidos. pp. 381-413.

QGIS (2023). Spatial Analysis (Interpolation). QGIS User Guide. https://docs.qgis.org/3.28/en/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html

Quezada-Maldonado E.M., Sanchez-Perez Y., Chirino Y.I., Garcia-Cuellar C.M. (2021) Airborne particulate matter induces oxidative damage, DNA adduct formation and alterations in DNA repair pathways. Environ. Pollut. 287, 117313.

Rojano R., Angulo L., Restrepo G. (2013) Niveles de partículas suspendidas totales (PST), PM_{10} y $PM_{2.5}$ y su relación en lugares públicos de la ciudad Riohacha, caribe colombiano. Inf. Tecnol. 24(2): 37––46. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000200006

Rodríguez T., Borrego I., Pérez L., Castillo C. (2005) Determinación de inmunoglobulinas en obreros manipuladores de plaguicidas. Rev. Cubana Salud Trab. 6(1): 48–56.

Rumchev K., Gilbey S., Mead-Hunter R., Selvey L., Netto K., Mullins B. (2019) Agricultural dust exposures and health and safety practices among Western Australian wheatbelt farmers during harvest. Int. J. Environ. Res. Public Health. 16(24), 5009. https://doi.org/10.3390/ijerph16245009

Salama Y., Chennaoui M. (2024) A critical review of biomarkers in toxicology and risk assessment of environmental pollutants. Ann. Environ. Sci. Toxicol. 8(1): 006––018. https://dx.doi.org/10.17352/aest.000075

Sauer J.M., Porter A.C. (2018) Biomarker programs, Predictive Safety Testing Consortium. Preclinical biomarker qualification. Exp. Biol. Med. 243(3): 222–227. https://doi.org/10.1177/1535370217743949

Sillanpää A., Salonen R., Pennanen A. (2000) A chemical and toxicological comparison of urban air PM_{10} collected during winter and spring in Finland. J. Inhal. Toxicol. 12: 95–103.

Spankie S., Cherrie J.W. (2012) Exposure to grain dust in Great Britain. Annals of occupational hygiene, 56(1): 25-36. https://doi.org/10.1093/annhyg/mer084

Tavera Busso I., Tames F., Avelino Silva J., Ramos DS., Homemb V., Ratola M., Carreras H. (2018) Biomonitoring levels and trends of PAHs and synthetic musks associated with land use in urban environments. Sci. Total Environ. 618: 93–100.

Tolbert P.E., Shy C.M., Allen J.W. (1992) Micronuclei and other nuclear anomalies in buccal smears: methods development. Mutat. Res. 271(1): 69–77.

Torres Bugarín O., Santiago Martínez R., González Barajas A.J., Ríos Esquivel P.E., Ramos Ibarra M.L., Arellano García M.E. (2024). Micronuclei and nuclear abnormalities in oral epithelial cells: effective and simple tool in early detection of individuals highly susceptible to genomic instability. Rev. Bio Ciencias 11, e1650. https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1650

Varea, M.C., Masoero, C.I., Mañas, F.J., Aiassa, D. (2025). Evaluación del riesgo sanitario por la presencia de arsénico en agua destinada al consumo humano en las localidades de Sampacho, Las Vertientes y Rio Cuarto, provincia de Córdoba, Argentina. Ab Intus FAV-UNRC. 16(8): 1-11.

Vennera M.C., Picado C. (2012) Patologías mediadas por la inmunoglobulina E: de la inmunoglobulina E al omalizumab. Inmunología 31(4): 119–126.

Wang G., Lu Y., Wang T., Zhang X., Han J., Luo W. (2009) Factors influencing the spatial distribution of organochlorine pesticides in soils surrounding chemical industrial parks. J. Environ. Qual. 38: 180–187.

Wang H., Li X-B., Chu X.J., Cao N.W., Wu H., Huang R.G., Li B.Z., Ye D.Q. (2022) Ambient air pollutants increase the risk of immunoglobulin E-mediated allergic diseases: a systematic review and meta-analysis. Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 29(33): 49534–49552. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20447-z

FUENTES DE FINANCIACIÓN

El presente estudio fue desarrollado mediante subsidios recibidos de la Secretaría de Ciencia y Técnica (SeCyT) de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC).

AGRADECIMIENTOS

A los participantes voluntarios del estudio.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

M. V. Milanesio participó en la conceptualización, el diseño metodológico, el trabajo de campo (adquisición de datos experimentales), el análisis formal de datos, la interpretación de resultados y la redacción del primer borrador del manuscrito. M. C. Salinero contribuyó al diseño metodológico, el análisis de los datos, la interpretación de los resultados, la redacción del primer borrador del manuscrito y la revisión crítica del manuscrito. M. F. Bonatto contribuyó al diseño metodológico, la validación de los resultados, la redacción del primer borrador del manuscrito y la revisión crítica del manuscrito. F. Mañas colaboró en el diseño metodológico, el análisis de los datos y la revisión del manuscrito final. D. E. Aiassa participó en la conceptualización, concibió y supervisó el proyecto, obtuvo el financiamiento, participó en la interpretación de los resultados, revisó críticamente el manuscrito y aprobó la versión final.