



**FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA  
CARRERA MEDICINA VETERINARIA  
SEDE CONCEPCIÓN**

**IMPACTO DE LA GENOTOXICIDAD DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO  
EN LA FAUNA SILVESTRE Y SU BIODIVERSIDAD:  
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA**

Memoria para optar al título de Médico Veterinaria

Profesor tutor: Mg Nelson Sandoval Cancino, MV  
**Estudiante: Daniela Adriana Zamora Rojas**

**® Daniela Adriana Zamora Rojas**

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Concepción, Chile

2025

## CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA

En Concepción, el día 10 de julio de 2025, los abajo firmantes dejan constancia que la estudiante DANIELA ADRIANA ZAMORA ROJAS de la carrera de MEDICINA VETERINARIA ha aprobado la memoria para optar al título de MÉDICO VETERINARIO con una nota de 6,0.



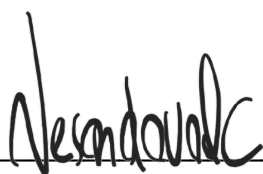
---

Mg. Esteban René Bustamante Henríquez, MV  
Presidente Comisión



---

PhD. Paloma Susana Moreno Méndez, MV  
Profesor Evaluador



---

Mg. Nelson Andrés Sandoval Cancino, MV  
Profesor Tutor

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Margarita y Guillermo, por amarme incondicionalmente, por hacerme sentir siempre su orgullo y por estar presentes en cada etapa de este camino, haciéndose sentir siempre cerca a pesar de los miles de kilómetros que nos separan.

A mi compañera de cuatro patas, mi bebé Coco, por ser el motor de mis días y de mi vida, por acompañarme y por brindarme tranquilidad y alegría en los momentos más difíciles y por sobre todo, entregarme su amor incondicional cada día.

Y a mi pequeño erizo, Domingo, que aunque ya no camina por este mundo, vive en mi recuerdo como una parte importante de este viaje.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Margarita y Guillermo, por todo el sacrificio y el esfuerzo que han entregado para que yo pudiera estudiar esta carrera. Gracias por confiar y creer en mi en cada momento. Este logro también es suyo.

A mi compañera de vida, Vari, por estar a mi lado en cada etapa de este camino. Gracias por tu apoyo incondicional, por desvelarte conmigo, por sostenerme emocionalmente en los momentos más difíciles de este proceso y por nunca dejarme sola.

A mis suegros, Edith y Pedro, por abrirme las puertas de su hogar y brindarme el espacio necesario para desarrollar mi carrera con tranquilidad. Gracias por su generosidad, su cariño constante y por haber sido un gran pilar en esta etapa. Les estaré eternamente agradecida.

A mis amigas de carrera, por su compañía, su cariño y por todos los momentos compartidos que hicieron más llevadero este camino en el estudio, en las prácticas en las risas y en las dificultades.

Y a mi profesor patrocinante, Nelson Sandoval, por su guía, disposición y calidez durante todo el proceso de esta tesis. Su apoyo fue fundamental para poder concretar este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDOS

|                                     |             |
|-------------------------------------|-------------|
| <b>INDICE DE FIGURAS .....</b>      | <b>vii</b>  |
| <b>INDICE DE TABLAS.....</b>        | <b>viii</b> |
| <b>RESUMEN.....</b>                 | <b>ix</b>   |
| <b>ABSTRACT.....</b>                | <b>x</b>    |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>         | <b>1</b>    |
| <b>2. OBJETIVOS.....</b>            | <b>6</b>    |
| <b>3. MATERIALES Y MÉTODO .....</b> | <b>7</b>    |
| <b>4. RESULTADOS.....</b>           | <b>12</b>   |
| <b>5. DISCUSION.....</b>            | <b>20</b>   |
| <b>6. CONCLUSION.....</b>           | <b>23</b>   |
| <b>7. REFERENCIAS.....</b>          | <b>24</b>   |
| <b>8. ANEXOS.....</b>               | <b>29</b>   |

## INDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Formación de micronúcleos debido a la pérdida de cromosomas y fragmentos durante la anafase mitótica ..... | 4  |
| Figura 2. Cantidad de especies por grupo taxonómico.....                                                             | 12 |
| Figura 3. Distribución geográfica de los países analizados sobre genotoxicidad en fauna silvestre .....              | 13 |
| Figura 4. Biomarcadores genéticos utilizados en los estudios primarios revisados .....                               | 14 |
| Figura 5. Daños genéticos evidenciados en los estudios .....                                                         | 14 |
| Figura 6. Grupos de contaminantes y actividades antropogénicas .....                                                 | 16 |
| Figura 7. Cantidad de especies por nivel de riesgo ecológico .....                                                   | 18 |
| Figura 8. Nivel de riesgo ecológico por grupo taxonómico .....                                                       | 18 |
| Figura 9. Asociación entre niveles de RE y niveles de concentraciones de contaminantes .....                         | 19 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Palabras clave con el uso de los operadores booleanos AND, OR y “” .....                        | 8  |
| Tabla 2. Consecuencias fisiológicas discutidas por los autores de los estudios revisados.....            | 15 |
| Tabla 3. Criterios para establecer el nivel de riesgo ecológico (RE).....                                | 17 |
| Tabla 4. Listado de estudios primarios revisados .....                                                   | 29 |
| Tabla 5. Especies evaluadas, cantidad de ejemplares, grupo taxonómico y referencia .....                 | 31 |
| Tabla 6. Información de la zona, sitios de muestreo y contexto ambiental de los estudios revisados ..... | 32 |
| Tabla 7. Descripción del daño genético según resultados de los artículos revisados.....                  | 33 |



## RESUMEN

La genotoxicidad corresponde al daño que ciertos agentes producen en el material genético de los organismos, alterando la estructura del ADN y afectando procesos esenciales a nivel celular. Este tipo de daño puede ser provocado por diversos contaminantes de origen antropogénico, como metales pesados y compuestos orgánicos industriales, entre otros. En la fauna silvestre, dichos agentes pueden generar alteraciones genéticas que podrían influir negativamente en su salud, como la disminución en la capacidad de supervivencia, aspectos que han sido sugeridos en la literatura como potenciales factores de presión para las poblaciones y la biodiversidad. La presente revisión bibliográfica tiene como propósito responder a la pregunta: ¿Cuál es el impacto de la genotoxicidad en las especies de fauna silvestre y su biodiversidad en ecosistemas expuestos a contaminantes de origen antropogénico? Para ello, se plantea como objetivo general “Analizar el impacto de la genotoxicidad de origen antropogénico en las especies de fauna silvestre y en su biodiversidad mediante la revisión de la literatura científica”. El estudio abarca una revisión sistemática de investigaciones publicadas entre los años 2014 y 2024.

Se analizaron 20 artículos científicos, extrayendo información clave como las especies afectadas, ubicación geográfica, tipo y concentración de contaminantes, biomarcadores utilizados y los efectos genotóxicos observados. Los principales biomarcadores utilizados fueron el ensayo de micronúcleos (MN) y el ensayo del cometa (SCGE), destacándose la presencia de MN y la fragmentación del ADN como efectos recurrentes.

A partir de estos datos obtenidos se aplicó una valorización del riesgo ecológico (RE) según criterios previamente definidos, relacionando los efectos genotóxicos observados con variables como el nivel de concentración del contaminante, diferencias significativas, entre otros. Se identificó que el 48,6% de las especies evaluadas presentaron un RE alto, asociándose principalmente a actividades como la industria, minería y el desarrollo urbano. Esta asociación sugiere que la exposición a contaminantes de origen antropogénico puede representar un riesgo ecológico considerable para diversas especies de fauna silvestre.

**Palabras clave:** Genotoxicidad, fauna silvestre, contaminantes antropogénicos, biomarcadores, biodiversidad.

## ABSTRACT

Genotoxicity corresponds to the damage that certain agents produce in the genetic material of organisms, altering the structure of DNA and affecting essential processes at the cellular level. This type of damage can be caused by various pollutants of anthropogenic origin, such as heavy metals and industrial organic compounds, among others. In wildlife, these agents can generate genetic alterations that could negatively influence their health, such as a decrease in survival capacity, aspects that have been suggested in the literature as potential pressure factors for populations and biodiversity. The present literature review aims to answer the question: What is the impact of genotoxicity on wildlife species and their biodiversity in ecosystems exposed to anthropogenic pollutants? To this end, the general objective is “To analyze the impact of genotoxicity of anthropogenic origin on wildlife species and their biodiversity through a review of the scientific literature”. The study covers a systematic review of research published between 2014 and 2024.

Twenty scientific articles were analyzed, extracting key information such as affected species, geographical location, type and concentration of contaminants, biomarkers used and genotoxic effects observed. The main biomarkers used were the micronucleus assay (MN) and the comet assay (SCGE), highlighting the presence of MN and DNA fragmentation as recurrent effects.

Based on these data obtained, an ecological risk assessment (ER) was applied according to previously defined criteria, relating the genotoxic effects observed to variables such as contaminant concentration level, significant differences, among others. It was identified that 48.6% of the species evaluated presented a high ER, mainly associated with activities such as industry, mining and urban development. This association suggests that exposure to anthropogenic contaminants may represent a considerable ecological risk for various wildlife species.

**Keywords:** Genotoxicity, wildlife, anthropogenic pollutants, biomarkers, biodiversity.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Medioambiente y biodiversidad

“La naturaleza y la biodiversidad tienen un valor intrínseco (relacionado con los beneficios generales de la disponibilidad de la naturaleza), y un inmenso valor económico para las sociedades” (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022, p.8). La naturaleza, a través de sus procesos ecológicos y evolutivos, mantiene la calidad del aire, del agua y de los suelos, regula el clima, propicia la polinización, el control de plagas y reduce los efectos de los peligros naturales (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES], 2019).

Sin embargo, en la actualidad, nuestro planeta está sufriendo un cambio ambiental a un ritmo significativamente acelerado. Los ecosistemas están cada vez más sujetos a los efectos negativos del crecimiento de la población, la actividad humana, y a su progresiva huella ecológica (Acevedo-Whitehouse & Duffus, 2009, citado en Jackson, 2001).

Es bien sabido que la actividad humana contamina el ambiente a nivel mundial, y lo hace de diversas formas. Las industrias emiten metales pesados como plomo y mercurio, gases tóxicos como dioxinas, y partículas en suspensión (Shetty et al., 2023). La agricultura utiliza pesticidas y fertilizantes que afectan el suelo y el agua. Los automóviles y fábricas emiten óxidos de nitrógeno y carbono, y la quema de combustibles fósiles liberan hidrocarburos y compuestos orgánicos (Rhind, 2009).

Los efectos negativos en los ecosistemas no se limitan únicamente a la pérdida de hábitats, sino que también incluyen un aumento en la exposición de la fauna silvestre a los contaminantes antropogénicos previamente mencionados. Estos contaminantes presentes en el aire, el agua y el suelo, pueden causar daños genéticos en los organismos, un fenómeno conocido como genotoxicidad (Martínez Guerrero & Pereda Solís, 2019). La genotoxicidad a su vez contribuye a la pérdida de la biodiversidad, ya que afecta la salud y supervivencia de diversas especies, alterando el equilibrio natural de los ecosistemas (Tellería, 2013).

## 1.2. Genotoxicidad

La genotoxicidad es la capacidad relativa que tiene un agente de causar daño en el material genético, lo que puede generar efectos biológicos adversos no sólo en el ácido desoxirribonucleico (ADN), sino que también en aquellas estructuras celulares relacionadas con el comportamiento y funcionalidad de los cromosomas dentro de la célula (Abrevaya, 2008). El daño al material genético ocurre cuando una sustancia genotóxica interactúa con el ADN, afectando su estructura y secuencia. Estas interacciones pueden causar lesiones como roturas, fusiones o mutaciones. Si las mutaciones afectan genes con roles importantes en la comunicación, diferenciación o crecimiento celular, se pueden producir disfunciones celulares y en última instancia, la generación de un proceso neoplásico o la muerte celular (Mohamed et al., 2017).

Asimismo, los agentes capaces de ocasionar toxicidad genética se denominan genotóxicos o xenobióticos, y se pueden clasificar según su origen en: físicos, químicos y biológicos, y según su efecto en: carcinógenos, mutágenos y teratógenos (Abrevaya, 2008).

En la clasificación según su origen, los agentes de tipo físicos incluyen la temperatura, luz ultravioleta, radiaciones ionizantes y radiaciones electromagnéticas, los de tipo químicos corresponden a metales, halógenos, ácidos orgánicos e inorgánicos, entre otros, y dentro de los de tipo biológicos se incluyen algunos parásitos, bacterias, hongos y virus. (Ruiz de Arcaute et al., 2021). Por otro lado, en la clasificación según su efecto, los agentes carcinógenos son aquellos que causan o promueven cáncer, cuyos cambios inducidos son irreversibles. Estos incluyen la radiación ultravioleta (UV) solar, compuestos químicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos, benceno, cromo VI, plaguicidas, entre otros (Matson et al., 2019; Ruiz de Arcaute et al., 2021). Los agentes mutágenos son causantes de mutaciones sobre el ADN, estos incluyen las sustancias radiactivas, rayos X, radiación UV y ciertas sustancias químicas. Y los agentes teratógenos son aquellos causantes de anomalías anatómicas o funcionales durante el desarrollo embrionario de un organismo. Entre estos se encuentran compuestos como la talidomida, cocaína, retinoides, estreptomycin, carbamazepina, entre otros (Ruiz de Arcaute et al., 2021).

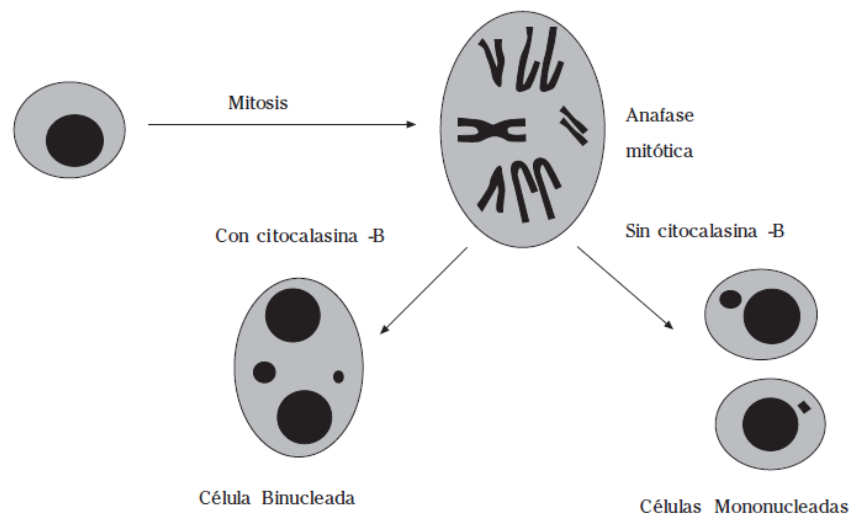
### **1.3. Fauna silvestre como bioindicador de genotoxicidad**

Para evaluar el riesgo potencial de poblaciones naturales expuestas a agentes genotóxicos, son utilizadas especies indicadoras o centinelas y distintos biomarcadores, ya que suministran señales de alarma temprana ante la presencia de tóxicos (Mejía-Saavedra et al., 2014). La utilización de fauna silvestre como bioindicadores entrega información crucial, dado que estas especies, al habitar en áreas contaminadas, están expuestas a una gran variedad de contaminantes, panorama que es difícil de replicar en estudios de laboratorio (Ruiz de Arcaute et al., 2021). El uso de bioindicadores permite determinar la biodisponibilidad de los contaminantes en diferentes lugares, brindando una visión más amplia del riesgo, tanto para la biota como los seres humanos en áreas contaminadas (Mejía-Saavedra et al., 2014).

La información que entregan los bioindicadores es obtenida mediante la utilización de biomarcadores, los que se definen como parámetros medibles que reflejan cambios bioquímicos, histológicos, morfológicos, fisiológicos o etológicos en un organismo, que pueden ocurrir por causas espontáneas o naturales, o por la exposición a agentes xenobióticos, ya sean físicos, químicos o biológicos, que inducen alteraciones en el metabolismo y la composición del organismo (Quero, 2023).

En el estudio de genotóxicos ambientales, existen varios biomarcadores que pueden ser analizados en especies silvestres, en donde se destacan aquellos que tienen por objeto, evaluar los potenciales efectos de inestabilidad genómica en células somáticas o germinales, que permitan valorar el impacto de ciertos agentes (asociados a contaminación ambiental) sobre la biodiversidad y supervivencia de los individuos (Quero, 2023, citado en Bernardi et al., 2015). Entre ellos se encuentra el ensayo de aberraciones cromosómicas, el ensayo de micronúcleos (EMN) y el ensayo del cometa, también conocido como ensayo de electroforesis en gel de células individuales (SCGE). Este último es una técnica sensible, rápida y sencilla que permite detectar daño en el ADN, como rupturas de cadena simple o doble y otros tipos de alteraciones estructurales (Ruiz de Arcaute et al., 2021). Se basa en la migración de fragmentos de ADN, a través de un campo eléctrico, lo que genera una imagen característica en forma de cometa, cuya longitud y forma reflejan el grado de daño genético (Ruiz de Arcaute et al., 2021).

**Figura 1.** Formación de micronúcleos debido a la pérdida de cromosomas y fragmentos durante la anafase mitótica



Fuente: Zalacain, M., Sierrasesúмага, L. y Patiño, A. (2005). *El ensayo de micronúcleos como medida de inestabilidad genética inducida por agentes genotóxicos. Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 28(2), 227-236.

En la figura 1 se observa un esquema que muestra cómo el uso de citocalasina-B permite obtener células con dos núcleos, facilitando la distinción entre células madre e hijas, a diferencia de las células con un solo núcleo que pueden tener pérdida de cromosomas (Zalacaín et al., 2005). Un estudio realizado en peces pertenecientes al lago urbano Villa Dálcar, ubicado al oeste de la ciudad de Río Cuarto, Argentina, encontró un aumento significativo de micronúcleos (Figura 1) (Pollo et al., 2012). en las células sanguíneas. Este tipo de hallazgo ha sido replicado en varias especies de fauna silvestre expuestas a contaminantes antropogénicos, destacando la relación directa entre el nivel del o los contaminantes y el daño genético producido (Pollo et al., 2012).

## 1.4 Importancia de este estudio

Los ecosistemas enfrentan un impacto negativo sin precedentes debido a la creciente contaminación causada por actividades humanas (OMS, 2022). La genotoxicidad inducida por estos contaminantes constituye una amenaza progresiva para la biodiversidad y los ecosistemas (Ruiz de Arcaute et al., 2021). La fauna silvestre, en este contexto actúa como un indicador clave de salud ambiental (Ruiz de Arcaute et al., 2021). Sin embargo, la magnitud de este impacto genotóxico aún no ha sido completamente comprendida, especialmente en regiones con alta biodiversidad.

En esta situación, surge la interrogante: **¿Cuál es el impacto de la genotoxicidad en las especies de fauna silvestre y su biodiversidad en ecosistemas expuestos a contaminantes de origen antropogénico?** Para responder a esta pregunta es necesario profundizar en cómo los contaminantes genotóxicos afectan la estructura genética de las especies de animales silvestres, alterando su fisiología e influyendo negativamente en factores como la sobrevivencia y reproducción. Además, la relación entre la genotoxicidad de origen antropogénico y la pérdida de la biodiversidad de la fauna silvestre sigue siendo un área de estudio crítico, ya que su comprensión es fundamental para el desarrollo de estrategias de conservación y mitigación ambiental.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Analizar el impacto de la genotoxicidad de origen antropogénico en las especies de fauna silvestre y en su biodiversidad mediante la revisión de la literatura científica.

### **2.2. Objetivos específicos**

1. Identificar las especies de fauna silvestre afectadas con los daños genotóxicos en ecosistemas contaminados por actividades humanas.
2. Describir los principales efectos genotóxicos observados en las especies de fauna silvestre.
3. Relacionar la presencia de agentes genotóxicos antropogénicos con el riesgo de disminución en la biodiversidad de la fauna silvestre.



### **3. MATERIALES Y MÉTODO**

#### **3.1. Método**

La presente investigación se basa en una revisión bibliográfica sistemática, la cual se desarrolla mediante la recopilación de información obtenida a partir de artículos científicos primarios, publicaciones y libros electrónicos que tienen relación de manera conjunta, con la contaminación ambiental de origen antropogénico, la genotoxicidad en la fauna silvestre y los efectos negativos en su biodiversidad.

#### **3.2. Materiales**

Computador portátil marca Lenovo, modelo Flex 5, con acceso a internet y software Microsoft Word y Excel.

#### **3.3. Obtención y selección del material bibliográfico**

La obtención del material bibliográfico se lleva a cabo mediante la búsqueda en bases de datos proporcionadas por la red de bibliotecas online de la Universidad San Sebastián, tales como: Medline, Web of Science, EBSCO y Science Direct. Adicionalmente el metabuscador PubMed y motores de búsqueda como Google académico.

#### **3.4. Criterios de búsqueda**

Para la búsqueda de los artículos en las bases de datos, se utiliza una combinación estratégica entre los siguientes términos de búsqueda y los operadores booleanos (AND, OR y “”):

- Genotoxicidad / Genotoxicity
- Fauna silvestre / Wildlife
- Ecotoxicidad / Ecotoxicity
- Biomarcadores / Biomarkers

- Micronúcleos / Micronucleus
- Especies centinela / Sentinel species
- Contaminación ambiental / Environmental pollution
- Desechos industriales / Industrial waste
- Biodiversidad / Biodiversity

La utilización de los operadores booleanos se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Palabras clave con el uso de los operadores booleanos AND, OR y “”

| AND y “”                                                                   | AND, OR y “”                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Genotoxicity AND Wildlife                                                  | Genotoxicity AND (Wildlife OR “Fauna Silvestre”)                                                            |
| Genotoxicity AND Wildlife AND “Sentinel species”                           | (Genotoxicity OR Ecotoxicity) AND (Wildlife OR “Sentinel species”)                                          |
| Genotoxicity AND Wildlife AND Micronucleus                                 | (Genotoxicity OR Ecotoxicity) AND (Wildlife OR “Fauna Silvestre”)                                           |
| “Environmental pollution” AND Biodiversity AND Genotoxicity                | (“Environmental pollution” OR “Contaminación Ambiental”) AND Biodiversity AND (Genotoxicity OR Ecotoxicity) |
| Genotoxicity AND Micronucleus AND “Sentinel species”                       | (Genotoxicity OR Genotoxicidad) AND (Micronucleus OR Biomarkers) AND (Wildlife OR “Sentinel species”)       |
| Genotoxicidad AND “Especies centinela” AND Biodiversidad AND Biomarcadores | (“Environmental pollution” OR “Industrial waste”) AND Wildlife                                              |
| “Desechos Industriales” AND “Fauna silvestre” AND Genotoxicidad            | (Micronúcleos OR Biomarcadores) AND Biodiversidad AND (Genotoxicidad OR Ecotoxicidad)                       |

### 3.5. Ventana temporal

Se incluyen publicaciones en el periodo comprendido entre los años 2014 y 2024, incluyéndolos.

### 3.6. Criterios de inclusión

Para aportar evidencia sólida, se incluyen artículos que cumplen con los siguientes criterios:

- Estudios primarios con análisis directo en uno o más individuos de fauna silvestre.
- Que sean observacionales o experimentales, este último siempre y cuando simule un ambiente natural contaminado.

- Estudios realizados en ambientes contaminados por actividades antropogénicas (urbanos, agrícolas, mineros, industriales, etc.)
- Que emplean la utilización de biomarcadores genéticos, como el ensayo de micronúcleos (EMN), ensayo del cometa (SCGE), entre otros.
- Que incluyen los siguientes datos: Nombre común y científico de las especies, número de individuos estudiados, sitio geográfico del estudio, tipo de contaminantes involucrados, biomarcador utilizado y resultados cuantitativos y cualitativos del daño genético.
- Publicaciones dentro de la ventana temporal seleccionada.
- Publicaciones en idioma español e inglés.

### **3.7. Criterios de exclusión**

Se excluyen publicaciones que no abordan el tema principal de la investigación o que contienen información que no contribuye al cumplimiento de los objetivos planteados anteriormente:

- Artículos de revisión (no estudios primarios).
- Publicaciones procedentes de resúmenes de congresos, tesis y memorias de título que redundan información encontrada en artículos científicos.
- Artículos que estudian especies no consideradas como fauna silvestre en la zona de investigación.
- Estudios que abordan tipos de contaminación distintos a los de origen antropogénico.
- Artículos que no utilizan la aplicación de biomarcadores genéticos.
- Estudios que no indiquen resultados cuantitativos o cualitativos de los análisis.
- Publicaciones fuera de la ventana temporal.
- Publicaciones en idiomas diferentes al español e inglés.

### 3.8. Análisis de datos

Se realiza una recopilación de artículos primarios extraídos desde las fuentes de datos descritas previamente, para ser revisados y filtrados según diversas variables que tengan relevancia y utilidad para poder ser sometidas a análisis posteriores, con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados.

Para ello, se comienza realizando una extracción sistemática de variables clave desde cada uno de los estudios seleccionados para esta revisión, las cuales son registradas y organizadas en Microsoft Excel®. Las variables recopiladas son:

1. Sitio geográfico del estudio (país, ciudad y sitios específicos de muestreo).
2. Contexto general ambiental del entorno (zona costera, agrícola, minera, industrial, asentamientos humanos, etc.).
3. Especies estudiadas (nombre común y científico) y número de individuos.
4. Grupo taxonómico al que pertenece cada especie.
5. Tipo y número de contaminantes involucrados.
6. Biomarcadores genéticos utilizados y tejido analizado (sangre periférica, órganos, hemolinfa, entre otros).
7. Resultados cuantitativos y cualitativos del análisis.

Para el primer objetivo específico, se realiza un análisis descriptivo mixto (cualitativo y cuantitativo) a partir de los datos extraídos y organizados previamente en Microsoft Excel®. Mediante funciones básicas como “Contar.si.conjunto”, filtros y ordenamientos, se cuantifica el total de las especies, el total de los individuos analizados, además de clasificarlos por grupo taxonómico y determinar la cantidad de especies pertenecientes a cada grupo. Asimismo, se determina la distribución geográfica de los 20 estudios revisados, cuantificando los países involucrados e indicando los continentes que se abarcan.

Los resultados son presentados en una tabla descriptiva elaborada en Microsoft Word® que contiene la información de las variables 1, 2, 3 y 4, la cual se incorpora en la sección “Anexos”. Además, se utilizan gráficos circulares (torta) para mostrar los grupos

taxonómicos y un mapa geográfico ilustrativo para representar visualmente la distribución de los países involucrados a nivel mundial.

Para el segundo objetivo específico, se elaboran dos tablas descriptivas en Microsoft Word®, en la cuales se registran la zona geográfica, los sitios de muestreo y el contexto ambiental del sitio, así como también el biomarcador empleado, el tipo de muestra, el tipo de contaminante y los resultados, respectivamente, incorporadas en la sección “Anexos”.

Posteriormente, estos datos son sometidos a un análisis básico en Microsoft Excel®, utilizando funciones de tabla dinámica, para cuantificar los biomarcadores empleados, así como los efectos genotóxicos observados, con el propósito de identificar aquellos que se presentan con mayor frecuencia en los estudios revisados. Los resultados se presentan de forma narrativa y, complementariamente, de manera visual mediante gráficos de barra, para facilitar la interpretación y comparación de la información obtenida.

Y finalmente, para el tercer objetivo específico, se utiliza la información obtenida de los objetivos específicos 1 y 2 (considera datos extraídos de las variables 2 a 7). Esta información es sometida a un análisis y diversas asociaciones, identificando patrones que permiten inferir una posible relación entre la exposición a contaminantes y el potencial impacto negativo en la biodiversidad de la fauna silvestre. Para ello se aplican herramientas de análisis mediante Microsoft Excel®, como tablas dinámicas, segmentación de datos, filtros y gráficos.

Además, se establecen criterios propios para valorizar los resultados obtenidos en el objetivo específico 2, los cuales se construyen considerando la magnitud del daño, la significancia estadística y el nivel de contaminación reportado. A partir de esto se asignan valores de riesgo ecológico (alto, medio y bajo) de afectación negativa en las especies. Esta información es presentada mediante una tabla en la sección “Resultados”.

### **3.9 Valorización de las referencias**

Los estudios incluidos en esta revisión son valorizados con el mismo nivel de relevancia, dado que la mayoría cumple con al menos 6 de los 7 criterios de inclusión establecidos. Esta consistencia metodológica asegura la calidad y pertinencia de las referencias utilizadas para el análisis.

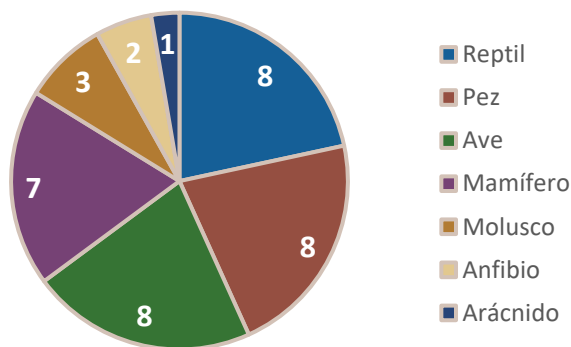
## 4. RESULTADOS

En una primera etapa se identifican y revisan 45 estudios científicos relacionados con la genotoxicidad en fauna silvestre, de los cuales se seleccionan 20 estudios primarios (16 observacionales y 4 experimentales), ya que cumplen con los criterios de inclusión previamente descritos en la metodología. La información general de los estudios seleccionados para la presente revisión, se detallan en la Tabla 4 (Ver anexos).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de datos extraídos de los estudios revisados, los cuales se muestran de manera organizada según los objetivos específicos planteados, permitiendo visualizar la información de manera estructurada respecto a las especies de fauna silvestre estudiadas, los efectos genotóxicos encontrados y su vinculación con el riesgo de pérdida de su biodiversidad.

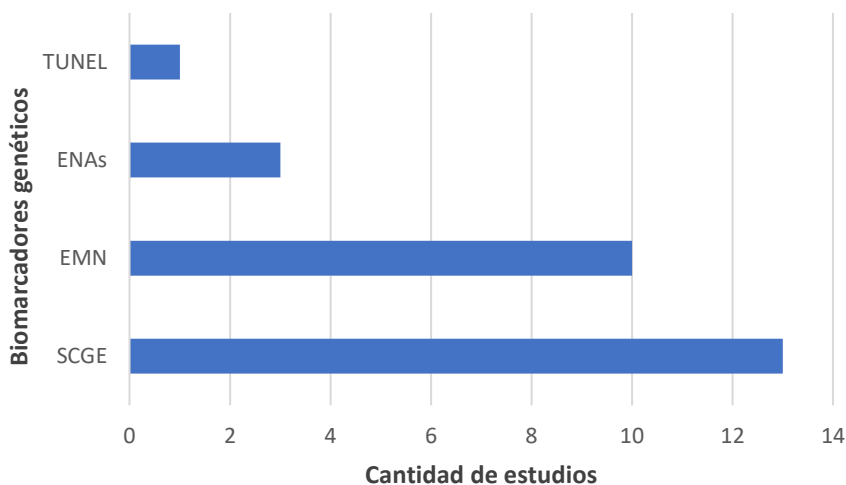
Con base en el primer objetivo específico, se reconocen 37 especies de fauna silvestre, correspondiente a un total de 905 individuos estudiados. Las especies son clasificadas por grupo taxonómico, siendo los reptiles, aves y peces los más representados (8 especies por cada grupo), seguido por mamíferos (7 especies), moluscos (3 especies), anfibios (2 especies) y arácnidos (1 especie) los cuales se representan en la Figura 2. La información completa por especie, como el nombre común y científico, cantidad de individuos analizados, grupo taxonómico y referencia, se presenta en la Tabla 5 (Ver Anexos).

**Figura 2.** Cantidad de especies por grupo taxonómico



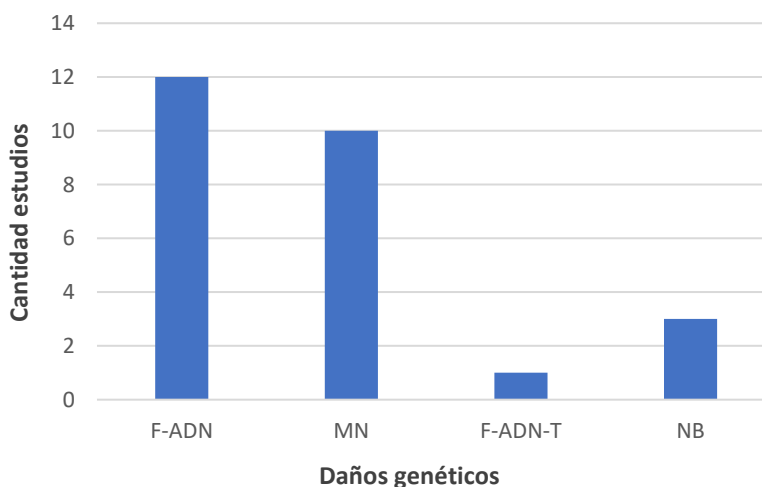


**Figura 4.** Biomarcadores genéticos utilizados en los estudios primarios revisados



Siguiendo este análisis, los efectos genotóxicos reportados en los estudios son: fragmentación del ADN (F-ADN), detectado por SCGE; presencia de micronúcleos (MN), detectado por EMN; fragmentación apoptótica del ADN (F-ADN-T), detectada en ensayo TUNEL y las yemas nucleares (NB) detectadas por ENAs (Figura 5), siendo los principales efectos genotóxicos la fragmentación del ADN y la presencia de micronúcleos. La descripción cualitativa y detallada de los resultados individuales de cada estudio se presentan en la Tabla 7 (Ver anexos).

**Figura 5.** Daños genéticos evidenciados en los estudios





Finalmente se describen las principales posibles consecuencias fisiológicas del daño genético en la fauna silvestre. Estas consecuencias fueron discutidas por los diferentes autores de los presentes estudios revisados, siendo las principales las descritas en la tabla 2. Destacando que estas consecuencias fisiológicas, no fueron medidas directamente en los estudios.

**Tabla 2.** Consecuencias fisiológicas discutidas por los autores de los estudios revisados

**Consecuencias fisiológicas discutidas**

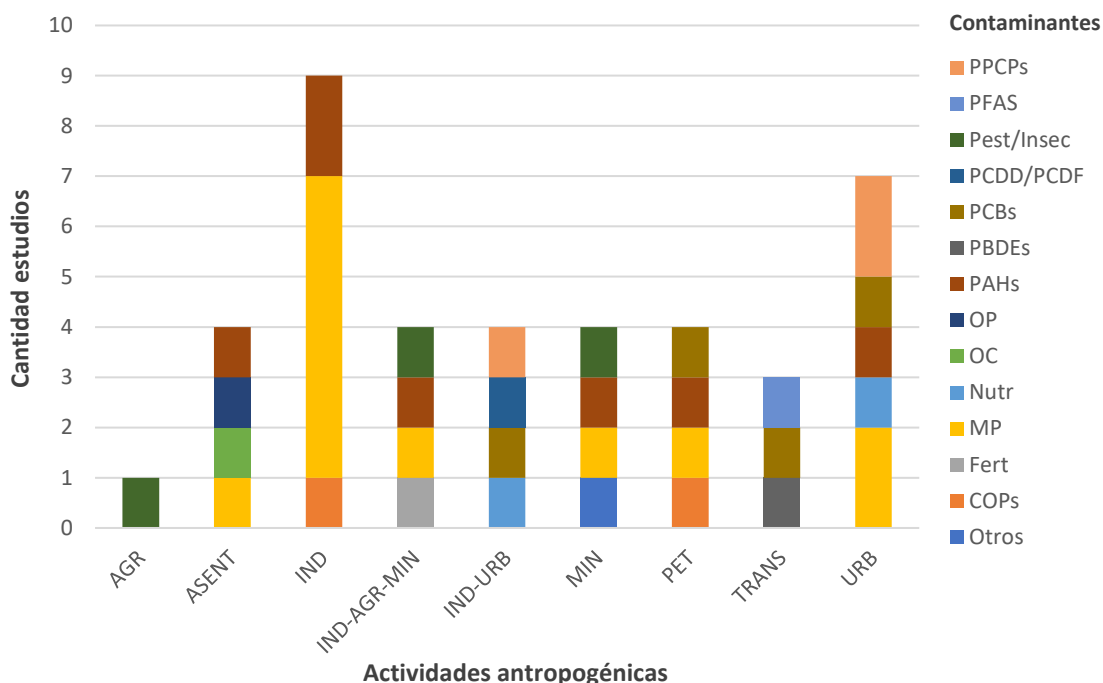
---

Disminución de la capacidad de defensa y supervivencia  
 Daño en etapas tempranas del desarrollo  
 Enfermedades degenerativas  
 Cáncer  
 Alteraciones reproductivas  
 Envejecimiento acelerado  
 Malformaciones del desarrollo  
 Disminución de masa corporal  
 Deterioro en la salud general

En respuesta al tercer objetivo específico, se comienza representando la asociación entre los tipos de contaminantes y actividades antropogénicas reportadas en los estudios (Figura 6), permitiendo evidenciar que las fuentes de genotoxicidad reportadas se vinculan de manera directa con actividades humanas, tales como la industria (IND), minería (MIN), agricultura (AGR), zonas urbanizadas (URB), industrias petroleras (PET), transporte (TRANS) y asentamientos humanos (ASENT), existiendo en algunos casos, una interacción de dichas actividades en varios sitios evaluados.

Los grupos de contaminantes identificados en los estudios se encuentran representados en la leyenda vertical de la Figura 6, incluyendo: productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), sustancias perfluoroalquiladas (PFAS), pesticidas/insecticidas (Pest/Insect), dioxinas y furanos (PCDD/PCDF), bifenilos policlorados (PCBs), éteres difenílicos polibromados (PBDEs), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), organofosforados (OP), organoclorados (OC), nutrientes (Nutr), metales pesados (MP), fertilizantes (Fert), compuestos orgánicos persistentes (COPs) y otros contaminantes no clasificados (Otros).

**Figura 6.** Grupos de contaminantes y actividades antropogénicas



Posteriormente, para interpretar los resultados genotóxicos obtenidos en el segundo objetivo, se diseña una herramienta de valorización con el fin de vincular estos resultados con un nivel de riesgo ecológico (RE) para las especies estudiadas, en tres categorías: alto, medio y bajo. Para ello, se establecen criterios (Tabla 3), que consideran múltiples variables cuantitativas y cualitativas reportadas en los estudios revisados, los que se explican a continuación:

- Magnitud del daño genético: se refiere a cuánto mayor fue el daño observado (por ejemplo, fragmentación del ADN o presencia de micronúcleos) en comparación con un grupo control, con un valor umbral para considerarse alto si fue  $\geq 3$  veces superior. En estudios sin grupo control, se consideró la comparación entre especies.
- Significancia estadística ( $p \leq 0,05$ ): indica si la relación entre la presencia de contaminantes y el daño genético observado fue estadísticamente significativa, lo cual refuerza la validez del hallazgo. Solo se consideraron como significativas aquellas diferencias reportadas explícitamente con valores de  $p \leq 0,05$ .

- Correlación positiva entre los niveles de contaminantes y el daño genético: se refiere a estudios que reportaron una asociación directa entre el aumento de la concentración de contaminantes y el aumento de daño genético.
- Nivel de contaminación del sitio: se evaluó según el número de tipos de contaminantes reportados en el área de estudio. Se clasificó como leve cuando hubo un máximo de 2 tipos de contaminantes, moderado cuando hubo un máximo de 3 tipos de contaminantes y alto cuando hubo 4 o más tipos de contaminantes.

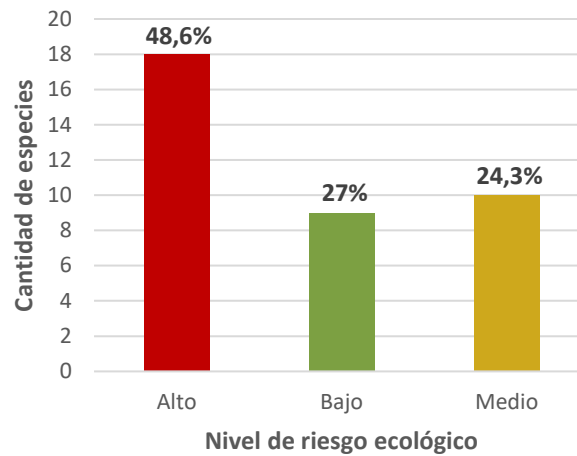
Estos criterios son aplicados individualmente por especie y se asignan a un nivel de RE cuando cumplen con tres o más de los criterios definidos.

**Tabla 3.** Criterios para establecer el nivel de riesgo ecológico (RE)

| Nivel de riesgo | Criterios                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alto            | Daño al ADN $\geq 3$ veces respecto a un sitio control u otra especie<br>Significancia estadística ( $p \leq 0,05$ ) en la relación entre contaminante y daño genético<br>Correlación positiva entre contaminantes y daño genético<br>Sitio altamente contaminado (4 o más tipos de contaminantes)       |
| Medio           | Daño al ADN entre 2–2.9 veces mayor que el sitio control u otra especie<br>Significancia estadística ( $p \leq 0,05$ ) en la relación entre contaminante y daño genético<br>Correlación positiva entre contaminantes y daño genético<br>Sitio moderadamente contaminado (hasta 3 tipos de contaminantes) |
| Bajo            | Daño al ADN $\leq 1.9$ veces respecto al control o nivel basal de daño genético<br>Sin significancia estadística<br>Correlación positiva entre contaminantes y daño genético<br>Sitio levemente contaminado (hasta 2 tipos de contaminantes)                                                             |

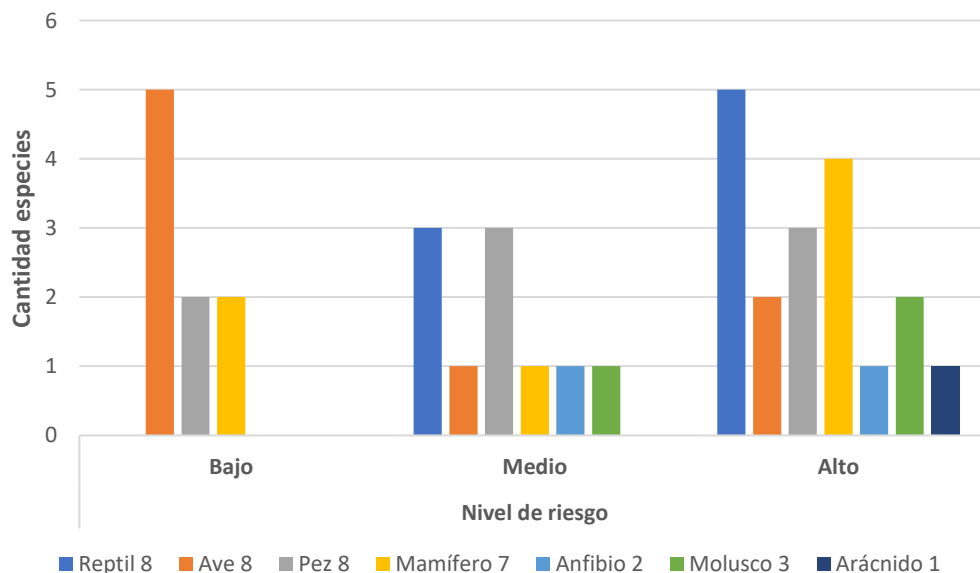
Como resultado de esta clasificación, se observa que 18 de las 37 especies analizadas, presentan un nivel de RE alto (48,6%), 10 especies un RE medio (27%) y 9 especies un RE bajo (24,3%) (Figura 7). Estos resultados indican que existe una tendencia predominante hacia la presencia de condiciones de riesgo elevadas en fauna silvestre expuesta a contaminantes de origen antropogénico.

**Figura 7.** Cantidad de especies por nivel de riesgo ecológico



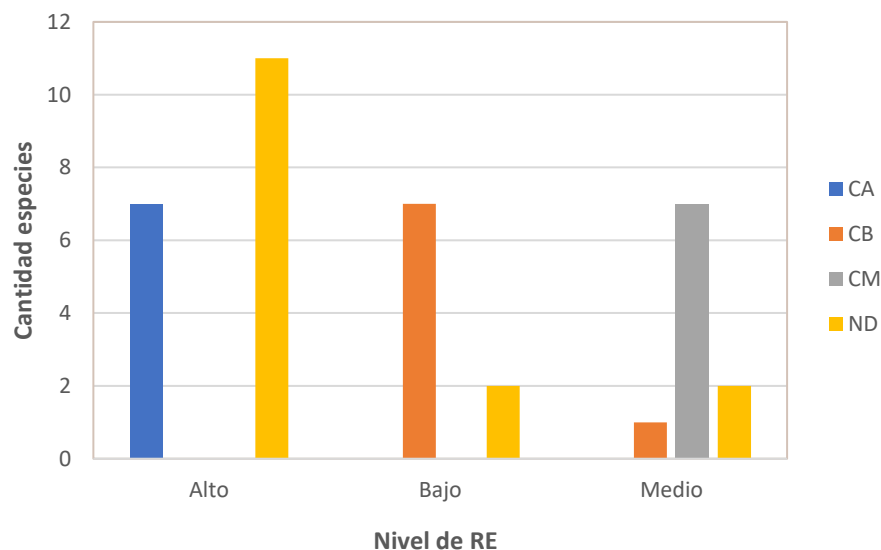
Al graficar el riesgo por grupo taxonómico (Figura 8), se observa que al menos una especie por grupo taxonómico presenta un nivel de RE alto. Asimismo, se observa que los reptiles son el grupo con mayor número de especies en la categoría RE alto, seguido por los mamíferos y los peces. En contraste, solo tres grupos muestran especies con riesgo bajo, siendo el grupo de las aves el más representativo. Esto indica que ciertos grupos taxonómicos pueden ser más susceptibles a los efectos genotóxicos.

**Figura 8.** Nivel de riesgo ecológico por grupo taxonómico



Finalmente, se muestra la asociación entre el nivel de RE y el nivel de concentración del contaminante (información reportada por la mayoría de los estudios revisados). Como se observa en la Figura 9, las especies que tienen un nivel de RE alto, presentan niveles de concentraciones altas (CA) del contaminante, sin embargo, en 11 especies de esta categoría, no se determinan las concentraciones (ND). Asimismo, las especies con RE medio presentan en su mayoría, concentraciones moderadas (CM) del contaminante y por último, las especies con RE bajo coinciden con concentraciones bajas (CB) del contaminante.

**Figura 9.** Asociación entre niveles de RE y niveles de concentraciones de contaminantes



## 5. DISCUSIÓN

El presente trabajo permitió analizar de forma integral el impacto de la genotoxicidad de origen antropogénico en la fauna silvestre, abordando desde la identificación de especies afectadas hasta la relación de estos efectos con el riesgo de pérdida de la biodiversidad, integrando herramientas cuantitativas y cualitativas que fortalecen la comprensión del fenómeno.

Los resultados muestran una amplia diversidad de especies afectadas, abarcando distintos grupos taxonómicos como mamíferos, reptiles, peces, aves, anfibios, moluscos y arácnidos. Esta diversidad evidencia que la genotoxicidad no es un fenómeno restringido a un tipo específico de fauna, sino que puede afectar transversalmente a múltiples grupos taxonómicos, lo que representa una amenaza amplia para la biodiversidad (Tellería, 2013). Si bien la mayoría de los estudios revisados presentan una estandarización adecuada en la identificación de las especies analizadas, algunos estudios incluyen múltiples especies y no desglosan bien la información, lo que dificulta la comprensión e interpretación de la información específica de cada especie, pudiendo afectar la precisión del registro de información en revisiones bibliográficas, tal como se observa en el estudio de Gonzalez et al. (2019), en donde analizaron 8 especies diferentes.

Por otra parte, un gran desafío es la alta heterogeneidad en la forma en que los estudios presentan los resultados de los biomarcadores genéticos aplicados. Las pruebas como el ensayo de micronúcleos (MN) y el ensayo del cometa (SCGE) son las más utilizadas, sin embargo, sus resultados son expresados en porcentajes, valores absolutos, longitudes de cola, momento de cola, entre otros, como se observa en el estudio de Oudi et al. (2019) en donde aplicaron el ensayo cometa y los resultados fueron presentados de diferentes formas. Esta diversidad metodológica dificulta la comparación directa entre estudios y el análisis de los resultados.

Además, se identifica que varios estudios carecen de grupos o sitios controles, lo cual limita la capacidad de establecer diferencias significativas atribuibles a la exposición a contaminantes, tal como se evidencia en el estudio de Musrri et al. (2021) en donde el estudio se realizó en dos sitios contaminados sin un sitio control, dificultando la comparación de los resultados obtenidos.

Por otro lado, la ausencia de concentraciones cuantificadas del contaminante en el ambiente o en las especies analizadas de algunos de los estudios, es otra limitación frecuente, que influye al momento de querer establecer asociaciones directas entre el grado de exposición y el nivel de daño observado, lo cual sería fundamental para validar estos biomarcadores como herramientas sólidas de monitoreo ambiental (Sandoval-Herrera et al., 2020). Estos biomarcadores son herramientas valiosas para detectar daños tempranos en la salud de la fauna silvestre y toma de decisiones en términos de conservación.

A través de la aplicación de criterios establecidos para valorar el riesgo ecológico, se puede observar que casi la mitad de las especies estudiadas (48,6%) presentan un nivel de riesgo ecológico alto. Este riesgo se determina a partir de la asociación de factores como presencia de diferencias significativas de daño genético respecto a grupos controles, correlaciones positivas con la concentración del contaminante y magnitudes elevadas de daño genético. El análisis revela que los reptiles y mamíferos son los grupos más representativos de daño genético respecto al nivel de riesgo ecológico alto, lo que sugiere una mayor vulnerabilidad de estos grupos ante la exposición a genotóxicos ambientales.

Además, la asociación realizada entre el nivel de riesgo ecológico y el nivel de concentración del contaminante fortalece la idea de que la exposición a contaminantes de origen antropogénico representa un factor de riesgo real para la salud genética de las especies silvestres y por ende para su biodiversidad (Gibbons et al., 2015)

La principal limitación para este análisis es la falta de estudios que realicen mediciones de forma directa respecto a las consecuencias fisiológicas o poblacionales del daño genético, limitando la posibilidad de establecer una relación causal sólida.

A esto se suma que la herramienta utilizada para valorizar los resultados y establecer un nivel de riesgo ecológico basada en criterios de elaboración propia, si bien permitió interpretar y clasificar los resultados de manera ordenada y lógica, no corresponde a una metodología validada, por lo que su aplicación se limita solo para fines de esta revisión. Aún así, los patrones que se encuentran en la presente revisión permiten inferir un riesgo ecológico potencial, lo cual es válido en el contexto de una revisión bibliográfica.



## 6. CONCLUSIÓN

Los resultados de esta revisión bibliográfica permiten concluir que las especies de fauna silvestre afectadas por daño genético producido por contaminantes de origen antropogénico pertenecen a siete grupos taxonómicos: reptiles, mamíferos, aves, peces, anfibios, moluscos y arácnidos.

Los principales efectos genotóxicos observados son la fragmentación del ADN y la presencia de micronúcleos, determinados por el ensayo de micronúcleos (MN) y el ensayo de electroforesis en gel de célula única (SCGE o ensayo del cometa).

Del total de especies analizadas, el 48,6% presenta un riesgo ecológico (RE) alto, el 27% un RE medio y el 24,3% un RE bajo. Este riesgo se asocia principalmente a actividades humanas como la industria, minería, desarrollo urbano y agricultura, observándose una relación directamente proporcional entre el nivel de concentración del contaminante y el nivel de RE.

En respuesta a la pregunta de investigación, se concluye que la genotoxicidad inducida por contaminantes de origen antropogénico tiene un impacto negativo sobre las especies de fauna silvestre, comprometiendo su salud e incrementando el riesgo de afectación en la biodiversidad en los ecosistemas expuestos.

Por ello, es fundamental que se continuen desarrollando estudios primarios en diversas regiones del mundo, que permitan evaluar con mayor precisión el impacto de la genotoxicidad sobre las especies de fauna silvestre y su repercusión en la biodiversidad y el equilibrio de los ecosistemas. Estos estudios futuros no solo contribuirán a fortalecer futuras revisiones sistemáticas, sino también a guiar decisiones más informadas en materia de conservación ambiental.

## 7. REFERENCIAS

- Abrevaya, X. (2008). *¿Qué es la genotoxicidad?* Intramed. Consultado el 12 de septiembre de 2024, de <https://www.intramed.net/content/47111>
- Acevedo-Whitehouse, K. y Duffus, A. L. J. (2009). Effects of environmental change on wildlife health. *Philosophical Transactions Of The Royal Society B Biological Sciences*, 364(1534), 3429-3438. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0128>
- Benvindo-Souza, M., Sotero, D. F., Santos, C. G. A. D., De Assis, R. A., Borges, R. E., De Souza Santos, L. R., & De Melo E Silva, D. (2023). Genotoxic, mutagenic, and cytotoxic analysis in bats in mining area. *Environmental Science And Pollution Research*, 30(40), 92095-92106. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28861-7>
- Da Silva, A. A., De Amorim, É. M., Pereira, M. G., De Santana, S. L., Da Silva, M. A., De Araujo Lira, A. F., & Rohde, C. (2023). Genotoxic effects of anthropogenic environments in the leaf litter-dwelling scorpion *Tityus pusillus* Pocock, 1893 (Scorpiones; Buthidae). *Mutation Research/Genetic Toxicology And Environmental Mutagenesis*, 887, 503585. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2023.503585>
- Da Silva, D. T., De Andrade Guedes, T., França, R. T., De Martinez Gaspar Martins, C., & Loebmann, D. (2024). Hematological and genotoxic biomarkers in a natural population of freshwater turtles *Trachemys dorbigni* (Duméril & Bibron, 1835) (Testudines: Emydidae) living in an urban area in Southern Brazil. *Environmental Science And Pollution Research*, 31(25), 37215-37228. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33515-3>
- De Arcaute, C. R., Pérez-Iglesias, J., Nikoloff, N., Natale, G., Soloneski, S., & Larramendy, M. (2014). Genotoxicity evaluation of the insecticide imidacloprid on circulating blood cells of Montevideo tree frog *Hypsiboas pulchellus* tadpoles (Anura, Hylidae) by comet and micronucleus bioassays. *Ecological Indicators*, 45, 632-639. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.034>
- Demir, F. T., & Yavuz, M. (2019). Heavy metal accumulation and genotoxic effects in levant vole (*Microtus guentheri*) collected from contaminated areas due to mining activities. *Environmental Pollution*, 256, 113378. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113378>

- Frixione, M. G., D'Amico, V., Adami, M. A., & Bertellotti, M. (2022). Urbanity as a source of genotoxicity in the synanthropic Kelp Gull (*Larus dominicanus*). *The Science Of The Total Environment*, 850, 157958. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157958>
- Gibbons, D., Morrissey, C., & Mineau, P. (2015). A review of the direct and indirect effects of neonicotinoids and fipronil on vertebrate wildlife. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 103–118. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3180-5>
- Gilroy, È. A. M., Kleinert, C., Lacaze, É., Campbell, S. D., Verbaan, S., André, C., Chan, K., Gillis, P. L., Klinck, J. S., Gagné, F., Fournier, M., y De Solla, S. R. (2023). In vitro assessment of the genotoxicity and immunotoxicity of treated and untreated municipal effluents and receiving waters in freshwater organisms. *Environmental Science And Pollution Research*, 30(23), 64094-64110. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26845-1>
- González-Mille, D. J., Ilizaliturri-Hernández, C. A., Espinosa-Reyes, G., Cruz-Santiago, O., Cuevas-Díaz, M. D., Del Campo, C. C. M., y Flores-Ramírez, R. (2019). DNA damage in different wildlife species exposed to persistent organic pollutants (POPs) from the delta of the Coatzacoalcos river, Mexico. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 180, 403-411. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.030>
- Gutiérrez, J. M., Da Conceição, M. B., Molisani, M. M., & Weber, L. I. (2018). Genotoxicity Biomonitoring Along a Coastal Zone Under Influence of Offshore Petroleum Exploration (Southeastern Brazil). *Bulletin Of Environmental Contamination And Toxicology*, 100(3), 338-343. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2276-x>
- Haarr, A., Hylland, K., Eckbo, N., Gabrielsen, G. W., Herzke, D., Bustnes, J. O., Blévin, P., Chastel, O., Moe, B., Hanssen, S. A., Sagerup, K., & Borgå, K. (2017). DNA damage in Arctic seabirds: Baseline, sensitivity to a genotoxic stressor, and association with organohalogen contaminants. *Environmental Toxicology And Chemistry*, 37(4), 1084-1091. <https://doi.org/10.1002/etc.4035>
- IPBES. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Versión 1)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6417333>
- Marrugo-Negrete, J., Durango-Hernández, J., Calao-Ramos, C., Urango-Cárdenas, I., & Díez, S. (2019). Mercury levels and genotoxic effect in caimans from tropical ecosystems impacted

- by gold mining. *The Science Of The Total Environment*, 664, 899-907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.340>
- Martínez-Guerrero, J. H. y Pereda-Solís, M. E. (2019). *Ecología y salud de la fauna silvestre* (1ra ed.). Universidad Juárez del Estado de Durango. <https://ulibros.com/ecologia-y-salud-de-la-fauna-silvestre-8wqua.html>
- Matson, C. W., Gillespie, A. M., McCarthy, C., McDonald, T. J., Bickham, J. W., Sullivan, R. y Donnelly, K. C. (2009). Wildlife toxicology: biomarkers of genotoxic exposures at a hazardous waste site. *Ecotoxicology*, 18 (7), 886–898. <https://doi.org/10.1007/s10646-009-0350-1>
- Mejía-Saavedra, J., Ilizaliturri-Hernández, C., Espinosa-Reyes, G., González-Mille, D., Cilia-López, G. y Díaz-Barriga, F. (2014). Uso de bioindicadores para la evaluación integrada del riesgo en sitios contaminados de México. En C. A. González, A. Vallarino, J. C. Pérez y A. Low-Pfeng (Eds). *Bioindicadores: guardianes de nuestro futuro ambiental* (1ra ed., pp. 737-757). El Colegio de la Frontera Sur y Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Mohamed, S., Sabita, U., Rajendra, S. y Raman D (2017). Genotoxicity: Mechanisms, Testing Guidelines and Methods. *Global Journal Of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*, 1(5), 1-6. <https://doi.org/10.19080/gjpps.2017.01.555575>
- Musri, C. A., Palma-Rojas, C., Von Brand, E., & Abessa, D. M. S. (2021). Environmental Genotoxicity Assessment Using Micronucleus (and Nuclear Abnormalities) Test on Intertidal Mussel *Perumytilus purpuratus*: A Tool for Biomonitoring the Chilean Coast. *Bulletin Of Environmental Contamination And Toxicology*, 107(1), 77-83. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03132-8>
- Oudi, A., Chokri, M. A., Hammouda, A., Chaabane, R., Badraoui, R., Besnard, A., & Santos, R. (2019). Physiological impacts of pollution exposure in seabird's progeny nesting in a *Mediterranean contaminated area*. *Marine Pollution Bulletin*, 142, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.056>
- Organización Mundial de la Salud. Oficina Regional de la OMS Para Europa. (2022). *Naturaleza, biodiversidad y salud: una descripción general de las interconexiones*. <https://iris.who.int/handle/10665/352803>

- Pérez-Coyotl, I., Martínez-Vieyra, C., Galar-Martínez, M., Gómez-Oliván, L., García-Medina, S., Islas-Flores, H., Borja, R. P., Gasca-Pérez, E., Novoa-Luna, K., y Dublán-García, O. (2017). DNA damage and cytotoxicity induced on common carp by pollutants in water from an urban reservoir. Madín reservoir, a case study. *Chemosphere*, 185, 789-797. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.072>
- Pollo, F. E., Salas, N. E., Mancini, M. A. y Martino, A. L. (2012). Estudio comparativo de la frecuencia de micronúcleos y anomalías nucleares en eritrocitos de tres especies ícticas. *Acta toxicológica argentina*, 20(2), 62-67. [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1851-37432012000200003&lng=es&tlng=en](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-37432012000200003&lng=es&tlng=en).
- Quero, A. A. M. (2023). *Evaluación de las aves silvestres como posibles centinelas de salud ambiental a través de la exposición a plaguicidas anticolinesterásicos* [Tesis para optar al Grado académico de Doctor en Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional del Litoral, Argentina]. <https://hdl.handle.net/11185/7100>
- Rhind, S. M. (2009). Anthropogenic pollutants: a threat to ecosystem sustainability? *Philosophical Transactions Of The Royal Society B Biological Sciences*, 364(1534), 3391-3401. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0122>
- Ruiz de Arcaute, C., Laborde, M. R. R., Soloneski, S. M. E. y Larramendy, M. L. (2021). Genotoxicidad y carcinogénesis. En P. Carriquiriborde (Ed.) *Principios de Ecotoxicología* (1ra edición., pp. 148-183). Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Exactas. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/131176>
- Sandoval-Herrera, N., Castillo, J. P., Montalvo, L. G. H., & Welch, K. C. (2020). Micronucleus Test Reveals Genotoxic Effects in Bats Associated with Agricultural Activity. *Environmental Toxicology And Chemistry*, 40(1), 202-207. <https://doi.org/10.1002/etc.4907>
- Sargsyan, A., Simonyan, A., Hovhannisyan, G., Arakelyan, M., & Aroutiounian, R. (2018). *Application of the comet assay, micronucleus test and global DNA methylation analysis in Darevskia lizards as a sentinel organism for genotoxic monitoring of soil pollution*. *Mutation Research/Genetic Toxicology And Environmental Mutagenesis*, 842, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2018.10.005>

- Shetty, S. S., Deepthi, D., Harshitha, S., Sonkusare, S., Naik, P. B., Kumari, S. y Madhyastha, H. (2023). Environmental pollutants and their effects on human health. *Heliyon*, 9(9), e19496. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19496>
- Tellería, J. L. (2013). Pérdida de biodiversidad. Causas y consecuencias de la desaparición de las especies. *Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 10, 13-25.
- Zalacain, M., Sierrasesúmaga, L. y Patiño, A. (2005). El ensayo de micronúcleos como medida de inestabilidad genética inducida por agentes genotóxicos. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 28(2), 227-236. [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1137-66272005000300007&lng=es&tlng=es](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272005000300007&lng=es&tlng=es).
- Zapata, L. M., Bock, B. C., Orozco, L. Y., & Palacio, J. A. (2016). Application of the micronucleus test and comet assay in *Trachemys callirostris* erythrocytes as a model for in situ genotoxic monitoring. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 127, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.016>

## 8. ANEXOS

**Tabla 4.** Listado de estudios primarios revisados

| N° | Autores y año               | Título del artículo y DOI                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Tipo de estudio |
|----|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1  | Sargsyan et al, 2019        | Application of the comet assay, micronucleus test and global DNA methylation analysis in Darevskia lizards as a sentinel organism for genotoxic monitoring of soil pollution <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2018.10.005">https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2018.10.005</a>                           | Observacional   |
| 2  | Oudi et al, 2021            | Physiological impacts of pollution exposure in seabird's progeny nesting in a Mediterranean contaminated area <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.056">https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.056</a>                                                                                        | Observacional   |
| 3  | Gonzalez et al, 2019        | DNA damage in different wildlife species exposed to persistent organic pollutants (POPs) from the delta of the Coatzacoalcos river, Mexico <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.030">https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.030</a>                                                                 | Observacional   |
| 4  | Obiakor et al, 2014         | Genotoxicity of freshwater ecosystem shows DNA damage in preponderant fish as validated by in vivo micronucleus induction in gill and kidney erythrocytes <b>DOI:</b> <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.mrgentox.2014.09.010">http://dx.doi.org/10.1016/j.mrgentox.2014.09.010</a>                                          | Observacional   |
| 5  | Pérez et al, 2017           | DNA damage and cytotoxicity induced on common carp by pollutants in water from an urban reservoir. Madín reservoir, a case study <b>DOI:</b> <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.072">http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.072</a>                                                             | Experimental    |
| 6  | Gilroy et al, 2023          | In vitro assessment of the genotoxicity and immunotoxicity of treated and untreated municipal effluents and receiving waters in freshwater organisms <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1007/s11356-023-26845-1">https://doi.org/10.1007/s11356-023-26845-1</a>                                                           | Observacional   |
| 7  | Ruiz de Arcaute et al, 2014 | Genotoxicity evaluation of the insecticide imidacloprid on circulating blood cells of Montevideo tree frog <i>Hypsiboas pulchellus</i> tadpoles (Anura, Hylidae) by comet and micronucleus bioassays <b>DOI:</b> <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.034">http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.034</a> | Experimental    |
| 8  | Frixione et al, 2022        | Urbanity as a source of genotoxicity in the synanthropic Kelp Gull ( <i>Larus dominicanus</i> ) <b>DOI:</b> <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157958">http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157958</a>                                                                                                  | Observacional   |
| 9  | Sandoval et al, 2020        | Micronucleus Test Reveals Genotoxic Effects in Bats Associated with Agricultural Activity <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1002/etc.4907">https://doi.org/10.1002/etc.4907</a>                                                                                                                                          | Observacional   |
| 10 | Sebbio et al, 2014          | Interspecies variation in DNA damage induced by pollution <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1093/czoolo/60.2.308">https://doi.org/10.1093/czoolo/60.2.308</a>                                                                                                                                                            | Observacional   |
| 11 | Turna y Yavuz, 2019         | Heavy metal accumulation and genotoxic effects in levant vole ( <i>Microtus guentheri</i> ) collected from contaminated areas due to mining activities <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113378">https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113378</a>                                                     | Observacional   |

|    |                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |               |
|----|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 12 | Marrugo et al, 2019          | Mercury levels and genotoxic effect in caimans from tropical ecosystems impacted by gold mining <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.340">https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.340</a>                                                                                                 | Observacional |
| 13 | Da Silva et al, 2023         | Genotoxic effects of anthropogenic environments in the leaf litter-dwelling scorpion <i>Tityus pusillus</i> Pocock, 1893 (Scorpiones; Buthidae) <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2023.503585">https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2023.503585</a>                                                   | Observacional |
| 14 | Zapata et al, 2016           | Application of the micronucleus test and comet assay in <i>Trachemys callirostris</i> erythrocytes as a model for in situ genotoxic monitoring <b>DOI:</b> <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.016">http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.016</a>                                                    | Observacional |
| 15 | Dimitrov et al, 2016         | Genotoxicity biomonitoring of anthropogenic pollution in rice fields using the micronucleus test in striped field mouse ( <i>Apodemus agrarius pallas</i> , 1771) <b>Link:</b> <a href="https://www.researchgate.net/publication/298712693">https://www.researchgate.net/publication/298712693</a>                        | Experimental  |
| 16 | Benvindo-Souza et al, 2023   | Genotoxic, mutagenic, and cytotoxic analysis in bats in mining area <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1007/s11356-023-28861-7">https://doi.org/10.1007/s11356-023-28861-7</a>                                                                                                                                       | Observacional |
| 17 | Gutierrez et al, 2018        | Genotoxicity Biomonitoring Along a Coastal Zone Under Influence of Offshore Petroleum Exploration (Southeastern Brazil) <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1007/s00128-018-2276-x">https://doi.org/10.1007/s00128-018-2276-x</a>                                                                                     | Observacional |
| 18 | Musri et al, 2021            | Environmental Genotoxicity Assessment Using Micronucleus (and Nuclear Abnormalities) Test on Intertidal Mussel <i>Perumytilus purpuratus</i> : A Tool for Biomonitoring the Chilean Coast <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1007/s00128-021-03132-8">https://doi.org/10.1007/s00128-021-03132-8</a>                 | Observacional |
| 19 | Tavares da Silva et al, 2024 | Hematological and genotoxic biomarkers in a natural population of freshwater turtles <i>Trachemys dorbigni</i> (Duméril & Bibron, 1835) (Testudines: Emydidae) living in an urban area in Southern Brazil <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1007/s11356-024-33515-3">https://doi.org/10.1007/s11356-024-33515-3</a> | Observacional |
| 20 | Haarr et al, 2017            | DNA damage in Arctic seabirds: Baseline, sensitivity to a genotoxic stressor, and association with organohalogen contaminants <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1002/etc.4035">https://doi.org/10.1002/etc.4035</a>                                                                                                 | Experimental  |



**Tabla 5.** Especies evaluadas, cantidad de ejemplares, grupo taxonómico y referencia

| N° | Referencia                   | Especie                          |                                 | Cantidad | Grupo taxonómico |
|----|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------|------------------|
|    |                              | Nombre común                     | Nombre científico               |          |                  |
| 1  | Sargsyan et al, 2019         | Lagartija armenia                | <i>Darevskia armeniaca</i>      | 17       | Reptil           |
|    |                              | Lagarto de Azerbaiyán            | <i>(Darevskia raddei)</i>       | 47       | Reptil           |
| 2  | Oudi et al, 2021             | Charrán o Gaviotín común         | <i>Sterna hirundo</i>           | 46       | Ave              |
| 3  | Gonzalez et al, 2019         | Cocodrilo de Morelet             | <i>Crocodylus moreletii</i>     | 3        | Reptil           |
|    |                              | Tortuga de orejas rojas          | <i>Trachemys scripta</i>        | 6        | Reptil           |
|    |                              | Iguana verde                     | <i>Iguana iguana</i>            | 8        | Anfibio          |
|    |                              | Sapo gigante                     | <i>Rhinella marina</i>          | 14       | Anfibio          |
|    |                              | Robalo                           | <i>Centropomus parallelus</i>   | 8        | Pez              |
|    |                              | Bagre                            | <i>Ariopsis felis</i>           | 3        | Pez              |
|    |                              | Lisa                             | <i>Mugil cephalus</i>           | 8        | Pez              |
|    |                              | Tilapia                          | <i>Oreochromis sp</i>           | 5        | Pez              |
| 4  | Obiakor et al, 2014          | Pez lagarto                      | <i>Synodontis clarias</i>       | 12       | Pez              |
|    |                              | Tilapia del Nilo                 | <i>Tilapia nilotica</i>         | 12       | Pez              |
| 5  | Pérez et al, 2017            | Carpa común                      | <i>Cyprinus carpio</i>          | 30       | Pez              |
| 6  | Gilroy et al, 2023           | Mejillón de agua dulce           | <i>Euryntia dilatata</i>        | 28       | Molusco          |
| 7  | Ruiz de Arcaute et al, 2014  | Rana arbórea común               | <i>Hypsiboas pulchellus</i>     | 20       | Anfibio          |
| 8  | Frixione et al, 2022         | Gaviota cocinera                 | <i>Larus dominicanus</i>        | 55       | Ave              |
| 9  | Sandoval et al, 2020         | Murciélago bigotudo de Parnell   | <i>Pteronotus mexicanus</i>     | 24       | Mamífero         |
| 10 | Sebbio et al, 2014           | Killi del Mediterráneo           | <i>Aphanius fasciatus</i>       | 41       | Pez              |
| 11 | Turna y Yavuz, 2019          | Ratón de campo                   | <i>Microtus guantheri</i>       | 92       | Mamífero         |
| 12 | Marrugo et al, 2019          | Caimán                           | <i>Caiman crocodilus fuscus</i> | 45       | Reptil           |
| 13 | Da Silva et al, 2023         | Escorpión de hojarasca           | <i>Tityus pusillus</i>          | 25       | Arácnido         |
| 14 | Zapata et al, 2016           | Tortuga hicotea                  | <i>Trachemys callirostris</i>   | 73       | Reptil           |
| 15 | Dimitrov et al, 2016         | Ratón de campo rayado            | <i>Apodermus agrarius</i>       | 21       | Mamífero         |
| 16 | Benvindo-Souza et al, 2023   | Murciélago frugívoro de Seba     | <i>Carollia perspicillata</i>   | 36       | Mamífero         |
|    |                              | Murciélago de lengua larga común | <i>Glossophaga soricina</i>     | 10       | Mamífero         |
|    |                              | Murciélago lanzón mayor          | <i>Phyllostomus hastatus</i>    | 8        | Mamífero         |
|    |                              | Murciélago vampiro común         | <i>Desmodus rotundus</i>        | 5        | Mamífero         |
| 17 | Gutierrez et al, 2018        | Mejillón pardo                   | <i>Perna perna</i>              | 80       | Molusco          |
| 18 | Musri et al, 2021            | Chorito maico o Mejillín         | <i>Perumytilus purpuratus</i>   | 26       | Molusco          |
| 19 | Tavares da Silva et al, 2024 | Tortuga de agua dulce            | <i>Trachemys dorbigni</i>       | 16       | Reptil           |
| 20 | Haarr et al, 2017            | Eider común                      | <i>Somateria mollissima</i>     | 15       | Ave              |
|    |                              | Arao negro                       | <i>Cephus grylle</i>            | 10       | Ave              |
|    |                              | Gaviota de patas negras          | <i>Rissa tridactyla</i>         | 20       | Ave              |
|    |                              | Gaviota hiperbórea               | <i>Larus hyperboreus</i>        | 15       | Ave              |
|    |                              | Págalo parásito                  | <i>Stercorarius parasiticus</i> | 15       | Ave              |
|    |                              | Págalo grande                    | <i>Stercorarius skua</i>        | 6        | Ave              |

**Tabla 6.** Información de la zona, sitios de muestreo y contexto ambiental de los estudios revisados

| N° | Zona geográfica                     | Sitios de muestreo según el artículo                                                                                                                                                                                  | Contexto ambiental del sitio                                               |
|----|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Ereván, Armenia                     | 2 sitios contaminados en Desfiladero Hrazdan (HR y YN) y 2 sitios controles (KB y LN).                                                                                                                                | Actividades industriales                                                   |
| 2  | Golfo de Gabes, Túnez               | 2 sitios altamente contaminados (Chatt-Essalem y Sfax) y 1 sitio control (Monastir)                                                                                                                                   | Actividades industriales                                                   |
| 3  | Estado de Veracruz, México.         | 1 sitio: en Golfo de México, Delta del río Coatzacoalcos                                                                                                                                                              | Actividades industriales (químicas y petroquímicas)                        |
| 4  | Estado de Anambra, Nigeria.         | 5 sitios altamente contaminados en Rpio Anambra, (L1 a L5).                                                                                                                                                           | Cercano a pozos petroleros e instalaciones productoras de petróleo.        |
| 5  | Estado de México, México.           | 4 sitios contaminados en Río Tlalnepantla, Embalse de Madín (SS1, SS2, SS4 y SS5) y 1 sitio control (SS3).                                                                                                            | Descargas de la localidad.                                                 |
| 6  | Toronto, Ontario, Canadá.           | 3 grupos con muestras de agua del Lago Ontario: Puerto de Hamilton, Bahía de Humber y Puerto de Toronto y 1 grupo control (agua con etanol).                                                                          | Actividades industriales y urbanas.                                        |
| 7  | La Plata, Buenos Aires, Argentina.  | Grupos con diferentes concentraciones de insecticida Imidacloprid. Grupo positivo CP y grupo control CN.                                                                                                              | Condiciones de laboratorio que imitaron un ambiente altamente contaminado. |
| 8  | Chubut, Patagonia, Argentina.       | 1 sitio al Noreste de la provincia de Chubut en diferentes años: 2013 vertedero mixto (ML) y 2021 vertedero urbano (UL).                                                                                              | Zona cercana a puerto y actividades industriales.                          |
| 9  | Estado de Colima y Jalisco, México. | 3 sitios con diferentes niveles de exposición a contaminantes: Cuevas La Fábrica (alta), Don Pancho (intermedia) y El Salitre (baja).                                                                                 | Zonas de agricultura y asentamientos humanos                               |
| 10 | Civitavecchia, Italia.              | 2 sitios: Zona sur y norte de la Reserva Natural “Salinas de Tarquinia”.                                                                                                                                              | En torno a la central térmica de carbón ENEL.                              |
| 11 | Korkuteli, Antalya, Turquía.        | 5 sitios contaminados (Site 1 a Site 5) y 1 sitio control (Control site).                                                                                                                                             | Canteras de mármol y piedra con actividad minera activa.                   |
| 12 | Región del Caribe, Colombia.        | 2 sitios contaminados en Humedales de La Mojana (S1 y S2) y 1 sitio control (S3).                                                                                                                                     | Actividades mineras                                                        |
| 13 | Estado de Pernambuco, Brasil.       | 5 sitios: EPA1 (escasa, área de protección ambiental), EPA2 (desecho adecuado de residuos), EPA3 (desecho inadecuado de residuos), EPA4 (zona de conservación) y CAT (propiedad privada en Parque Nacional Catimbau). | Diferentes niveles intervención antropogénica por asentamientos humanos.   |

|    |                                                                    |                                                                                                                                                            |                                                                                |
|----|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 14 | Cuenca de los ríos Magdalena (Bolívar) y Sinú (Córdoba), Colombia. | 2 sitios contaminados (Magangué y Lorica) y 1 sitio control (Medellín).                                                                                    | Actividades industriales, agrícolas y mineras                                  |
| 15 | Tsalapitsa y Strandzha, Bulgaria.                                  | 1 sitio contaminado (Arrozales de Tsalapitsa) y 1 sitio control (Parque Natural de Strandzha).                                                             | Sitio contaminado con fuerte impacto antropogénico                             |
| 16 | Estado de Goiás, Brasil.                                           | 4 sitios contaminados: S1 y S2 en Barro alto, S3 y S4 en Niquelandia y 1 sitio control en Barro alto (bosques riparios)                                    | Actividad y reserva minera a cielo abierto de ferromanganeso.                  |
| 17 | Estado de Rio de Janeiro, Macaé, Brasil                            | 3 sitios contaminados: Macaé (ME), Playa campista (CB), Playa Pedrinha (PB) y 1 sitio control: Archipiélago de Santana (SA). Todos en la costa del sureste | Exploración petrolera marina.                                                  |
| 18 | Coquimbo, Chile                                                    | 2 sitios: La Pampilla (mayor intervención antropogénica) y Totorillo (menor intervención antropogénica)                                                    | Actividades urbanas, portuarias y pesqueras.                                   |
| 19 | Ciudad de Pelotas, Brasil                                          | 1 sitio con alta intervención antropogénica en Canal abierto al sur de Brasil.                                                                             | Actividades urbanas y descargas irregulares de aguas residuales                |
| 20 | Svalbard, Noruega.                                                 | 1 sitio con moderada a baja Influencia antropogénica                                                                                                       | Transporte a larga distancia se considera la principal fuente de contaminación |

**Tabla 7.** Descripción del daño genético según resultados de los artículos revisados

| N° | Biomarcador | Tipo de muestra                 | Grupo de contaminantes | Resultados                                                                                                                                                                                                                                       |
|----|-------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | SCGE        | Sangre periférica (eritrocitos) | Metales pesados        | <b>SCGE:</b> Aumento significativo de intensidad de cola (TI) en sitios con mayor contaminación (HR y YN), en comparación con los sitios controles (KB y LN)                                                                                     |
|    | EMN         |                                 |                        | <b>EMN:</b> Frecuencia de micronúcleos (MN) no difiere entre sitios contaminados y sitios control.                                                                                                                                               |
| 2  | EMN         | Sangre periférica (eritrocitos) | Metales pesados y PAHs | Aumento significativo en la frecuencia de MN en sitios contaminados (Chatt-Essalem y Sfax) en comparación al sitio control (Monastir) (3 veces mayor).<br><br>También se evidencian anomalías nucleares (NA), pero no se determinó su frecuencia |
| 3  | SCGE        | Sangre periférica (eritrocitos) | COPs y PCBs            | Aumento significativo de TI y mayor momento de cola en reptiles respecto a los otros grupos taxonómicos analizados ( <i>C. moreletii</i> 3 veces mayor que <i>A. felis</i> ). Asociación positiva                                                |

|    |             |                                 |                                      |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----|-------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |             | Líquido celómico                |                                      |         | entre los niveles de contaminantes y daño genético. Se sugiere mayor susceptibilidad de los reptiles a los contaminantes.                                                                                                                                                                                                                                           |
| 4  | EMN         | Branquias<br>Riñones            | Metales pesados y PAHs               |         | Aumento significativo en frecuencia de MN observado más en <i>S. clarias</i> que en <i>T. nilótica</i> (20 veces mayor que sitio control), más en branquias que en riñones y más en estación seca que lluviosa.                                                                                                                                                     |
|    | SCGE        |                                 |                                      |         | Resultados de los tres análisis realizados, corresponden al sitio SS2 (más contaminado) en comparación con el sitio control:<br><br><b>SCGE:</b> Aumento significativo en el índice T/N (longitud cola/diámetro núcleo) en hígado.                                                                                                                                  |
| 5  | EMN         | Hígado, hemolinfa, branquias    | Metales pesados y PPCPs              |         | <b>EMN:</b> Aumento significativo en la frecuencia de MN en todos los tejidos analizados (más en sangre), en comparación con sitio control.<br><br><b>TUNEL:</b> Aumento significativo en células TUNEL positivas en comparación con sitio control en todos los órganos (más en hígado y branquias).                                                                |
|    | TUNEL       |                                 |                                      |         | Correlaciones altas entre contaminante y daño genético.                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 6  | SCGE        | Hemolinfa                       | PPCPs, PCDD/PCDF Nutrientes          | PCBs, y | TI elevado en sitio contaminado (Puerto de Hamilton) el doble de veces mayor en comparación con sitio control (Agua con etanol).                                                                                                                                                                                                                                    |
| 7  | SCGE<br>EMN | Sangre periférica (eritrocitos) | Pesticida/Insecticida (Imidacloprid) |         | <b>SCGE:</b> Aumento significativo de TI en concentraciones de 30mg/L durante 48-96 horas en control positivo (CP) en comparación con control negativo (CN).<br><br><b>EMN:</b> Aumento significativo en la frecuencia de MN y otras anomalías nucleares en CP durante 96 horas en 15 mg/L o durante 48 horas en 15-30 mg/L del contaminante en comparación con CN. |
| 8  | ENAs        | Sangre periférica (eritrocitos) | COPs                                 |         | Aumento significativo en la frecuencia de anormalidades nucleares del vertedero mixto (ML), sitio más contaminado, en comparación con el vertedero urbano (UL), siendo las yemas nucleares y escotadas las más prevalentes.                                                                                                                                         |
| 9  | EMN         | Sangre periférica (eritrocitos) | Pesticidas/Insecticidas              |         | Aumento significativo en la frecuencia de MN en el sitio La Fábrica (alta exposición a contaminantes) 10 veces mayor, en comparación con El Salitre (baja exposición)                                                                                                                                                                                               |
| 10 | SCGE        | Hemolinfa                       | Metales pesados                      |         | Aumento significativo de TI en comparación con la especie <i>Helix spp</i> (mostró niveles bajos de TI), 2 veces mayor.<br><br>Correlación positiva entre concentraciones de TI y concentraciones de los contaminantes                                                                                                                                              |
| 11 | SCGE        | Sangre periférica (eritrocitos) | Metales pesados                      |         | Aumento significativo de TI en sitio con mayor contaminación (Site 4) en comparación con sitio control (Control site).                                                                                                                                                                                                                                              |

|    |      |                                 |                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----|------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12 | SCGE | Sangre periférica (eritrocitos) | Metales pesados                                               | Aumento significativo de daño al ADN en sitio S1 (contaminado) en comparación con sitio control (S3), representado por índice DICA (26 veces mayor). Correlación altamente significativa entre concentraciones de THg y DICA en todos los tejidos.       |
| 13 | SCGE | Hemolinfa                       | Pesticidas/Insecticidas, Otros                                | Daño 20 veces superior en sitios contaminados (EPA2 y EPA3) en comparación con sitio control (CAT) y sitio protegido (EPA1).                                                                                                                             |
| 14 | EMN  | Sangre periférica (eritrocitos) | Metales pesados, PAHs, Organofosforados, Organoclorados       | EMN: Aumento significativo en la frecuencia de MN (16 veces mayor en sitio 2 (Lorica)) en comparación con sitio control (Medellín).                                                                                                                      |
|    | SCGE | Sangre periférica (eritrocitos) |                                                               | SCGE: Aumento significativo en largo de cola en sitio 2 en comparación al sitio control. DI con valores 8 y 2 veces mayor en Lorica y Magangué respectivamente.                                                                                          |
| 15 | EMN  | Sangre periférica (eritrocitos) | Metales pesados, PAHs, Fertilizantes, Pesticidas/Insecticidas | Aumento significativo en la frecuencia de MN en sitio contaminado (Arrozales de Tsalapitsa) en comparación con sitio control (Parque Natural de Strandzha), 4 veces mayor.                                                                               |
| 16 | SCGE | Tejido epitelial bucal          | Metales pesados                                               | Aumento significativo en la frecuencia de MN y TI en especies de murciélagos de S1 y S2 (alta actividad minera) en comparación con S5 (control). Variación de daño genético entre especies y sitios de muestreo.                                         |
|    | EMN  | Tejido epitelial bucal          |                                                               | <i>C. perspicillata</i> y <i>G. soricina</i> mostraron mayor sensibilidad al daño genético.                                                                                                                                                              |
| 17 | SCGE | Hemolinfa                       | Metales pesados y PAHs                                        | Aumento significativo en frecuencia de MN y TI en sitios ME, CB y PB en comparación con sitio SA (control), siendo el sitio ME el que presenta mayor daño genético.                                                                                      |
|    | EMN  | Hemolinfa                       |                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 18 | ENAs | Hemolinfa                       | Metales pesados y PAHs                                        | Aumento significativo en la frecuencia de MN (4,4 veces mayor) en sitio Totoralillo y La Pampilla (mayor presión antropogénica) en comparación con sitio control de estudio previo.<br><br>Aumento significativo de yemas nucleares (NB) en La Pampilla. |
| 19 | ENAs | Sangre periférica (eritrocitos) | PCBs, PAHs, Nutrientes, PPCPs.                                | Niveles absolutos altos de anomalías nucleares (63.79%), siendo las yemas nucleares las representativas.                                                                                                                                                 |
| 20 | SCGE | Sangre periférica (linfocitos)  | PCBs, PFAS                                                    | Daño al ADN en niveles basales y resultados sin variación entre especies. Concentraciones bajas de contaminantes.                                                                                                                                        |