

Fecha de recepción: 2026-03-12

Fecha de aceptación: 2026-04-12

Fecha de publicación: 2026-05-12

Plasticidad fenotípica en anfibios expuestos a contaminantes endocrinos

Silvana Monserrat Cedeño Macias

silvanacede@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0881-8125>

Universidad Estatal Península de Santa Elena

Santa Elena - Ecuador

Resumen

La contaminación por compuestos con actividad endocrina constituye una problemática ambiental de alta relevancia debido a sus efectos sobre anfibios, organismos especialmente sensibles a alteraciones químicas del entorno. El objetivo del estudio fue analizar la relación entre contaminantes endocrinos y la plasticidad fenotípica en anfibios, evaluando sus respuestas morfológicas, fisiológicas y reproductivas. La metodología se basó en un enfoque cuantitativo no experimental, con diseño transversal y alcance explicativo, sustentado en la revisión de informes de la OMS, PNUMA, FAO y entidades ambientales estatales. El análisis estadístico incluyó regresión logística multivariada, análisis de componentes principales y MANOVA. Los principales resultados evidencian que mayores concentraciones de contaminantes endocrinos se asocian con incremento de deformidades morfológicas, retrasos en la metamorfosis y disminución del éxito reproductivo, además de una interacción significativa con variables ambientales como temperatura y oxígeno disuelto. Asimismo, se identificó que la plasticidad fenotípica funciona como mecanismo de respuesta al estrés ambiental, aunque con costos fisiológicos que reducen la viabilidad poblacional. En conjunto, se evidencia un impacto acumulativo sobre la estabilidad ecológica de los anfibios.

Palabras clave: plasticidad fenotípica, anfibios, contaminantes endocrinos, ecotoxicología, metamorfosis.

Phenotypic plasticity in amphibians exposed to endocrine disruptors

Abstract

Endocrine-active compounds represent a major environmental issue due to their effects on amphibians, organisms highly sensitive to chemical changes in their habitat. The aim of this study was to analyze the relationship between endocrine disruptors and phenotypic plasticity in amphibians, assessing morphological, physiological, and reproductive responses. A quantitative, non-experimental, cross-sectional, and explanatory design was applied, based on reports from WHO, UNEP, FAO, and national environmental agencies. Statistical analysis included multivariate logistic regression, principal component analysis, and MANOVA. The main results show that higher concentrations of endocrine disruptors are associated with increased morphological deformities, delayed metamorphosis, and reduced reproductive success, along with significant interactions with environmental variables such as temperature and dissolved oxygen. Phenotypic plasticity was identified as a response mechanism to environmental stress, although associated with physiological costs that reduce population viability. Overall, the findings indicate a cumulative impact on amphibian ecological stability.

Keywords: phenotypic plasticity, amphibians, endocrine disruptors, ecotoxicology, metamorphosis.

Introducción

La intensificación de las actividades antropogénicas ha generado un incremento significativo en la liberación de contaminantes endocrinos en ecosistemas acuáticos y terrestres, configurando un escenario de alta presión ambiental sobre la biodiversidad. En este contexto, los anfibios se posicionan como bioindicadores sensibles debido a su fisiología altamente permeable y a su dependencia de hábitats húmedos durante diferentes etapas de su ciclo de vida. Investigaciones recientes evidencian que la exposición a compuestos disruptores endocrinos, tales como pesticidas, fármacos y derivados industriales, altera procesos hormonales fundamentales vinculados con el desarrollo, la reproducción y la supervivencia de estas especies (González & Martínez, 2021).

Desde una perspectiva biológica, la plasticidad fenotípica se define como la capacidad de un organismo para modificar su fenotipo en respuesta a variaciones ambientales. Este fenómeno adquiere particular relevancia en anfibios expuestos a contaminantes endocrinos, dado que las alteraciones químicas del entorno pueden inducir cambios en la morfología, fisiología y comportamiento, generando respuestas adaptativas o disfuncionales. Estudios recientes destacan que esta plasticidad no solo representa una estrategia inmediata frente al estrés ambiental, sino también un mecanismo con implicaciones evolutivas y epigenéticas de mediano y largo plazo (Ramírez et al., 2022).

En el ámbito ecotoxicológico, se ha documentado que sustancias como la atrazina, los bisfenoles y compuestos organofosforados interfieren en la regulación hormonal de los anfibios, afectando procesos críticos como la diferenciación sexual y la metamorfosis. Estas alteraciones se manifiestan en deformaciones morfológicas, cambios en los patrones de crecimiento y reducción del éxito reproductivo, comprometiendo la viabilidad de las poblaciones. En este sentido, la exposición crónica a contaminantes endocrinos ha sido

asociada con la disminución global de anfibios, fenómeno ampliamente documentado en diversas regiones del mundo (Pérez & Salinas, 2021).

Por otra parte, la plasticidad fenotípica inducida por contaminantes no siempre implica beneficios adaptativos. En numerosos casos, las respuestas fisiológicas generan costos metabólicos elevados y alteraciones irreversibles en los sistemas endocrinos e inmunológicos. Estas modificaciones pueden incrementar la vulnerabilidad frente a patógenos emergentes y alterar las interacciones ecológicas, afectando cadenas tróficas y procesos ecosistémicos esenciales. En consecuencia, la relación entre plasticidad fenotípica y contaminantes endocrinos debe analizarse desde un enfoque integral que considere tanto los efectos adaptativos como los impactos negativos acumulativos (Torres et al., 2023).

Asimismo, los avances en biología del desarrollo y epigenética han permitido comprender que los contaminantes endocrinos pueden modificar la expresión génica durante etapas críticas del desarrollo larval, generando cambios persistentes en la estructura y función de los organismos. En anfibios, este proceso resulta especialmente crítico debido a la regulación hormonal compleja que controla la metamorfosis, la cual puede ser alterada por pequeñas concentraciones de compuestos químicos presentes en el ambiente (López & Herrera, 2022).

En el contexto latinoamericano, la expansión agrícola y el uso intensivo de agroquímicos han incrementado los niveles de contaminación en humedales y cuerpos de agua, afectando especies endémicas de anfibios. A pesar de los avances científicos recientes, persisten vacíos en la comprensión de los mecanismos mediante los cuales la plasticidad fenotípica influye en la resiliencia o vulnerabilidad de estas especies frente a contaminantes endocrinos. Este vacío de conocimiento limita el diseño de estrategias efectivas de conservación y gestión ambiental.

En este marco, el análisis de la plasticidad fenotípica en anfibios expuestos a contaminantes endocrinos se configura como una línea de investigación estratégica dentro de la ecotoxicología contemporánea. Su estudio permite no solo comprender los efectos de la contaminación química sobre la biodiversidad, sino también generar insumos científicos para la formulación de políticas ambientales orientadas a la protección de ecosistemas y especies vulnerables.

Plasticidad fenotípica y respuestas funcionales en anfibios expuestos a presión ambiental

En un estanque agrícola expuesto de manera recurrente a escorrentías con residuos de pesticidas, las larvas de anuros pueden adelantar su metamorfosis o reducir su tamaño corporal como respuesta a condiciones químicas adversas, lo que ilustra de forma concreta la expresión de la plasticidad fenotípica en contextos de perturbación ambiental. En términos conceptuales, esta capacidad biológica permite a los anfibios modificar rasgos morfológicos, fisiológicos y conductuales en función de variaciones del entorno, constituyéndose en un mecanismo clave de respuesta frente a estresores antrópicos. Sin embargo, dichas modificaciones no siempre implican ventajas adaptativas, debido a que pueden generar

costos energéticos significativos, comprometer el rendimiento locomotor y reducir la eficacia reproductiva (Soria et al., 2023).

Desde la ecología funcional, la respuesta plástica de los anfibios se encuentra estrechamente vinculada con sus rasgos de historia de vida. Variables como el tiempo de desarrollo larval, la estrategia reproductiva y la capacidad de dispersión determinan el grado de tolerancia frente a cambios ambientales. Así, en ambientes temporales o altamente variables, algunas especies presentan mayor flexibilidad fenotípica, mientras que aquellas asociadas a hábitats estables muestran mayor vulnerabilidad ante la presencia de contaminantes endocrinos (Pereyra et al., 2021).

En este marco, la diversidad funcional se convierte en un elemento clave para comprender la persistencia de especies en paisajes alterados. La plasticidad fenotípica permite que ciertos organismos ajusten su desempeño ante condiciones adversas, aunque estas respuestas pueden alterar la estructura de las poblaciones y modificar las interacciones ecológicas. En escenarios de contaminación química, los cambios en el crecimiento, comportamiento o fisiología pueden sostener la supervivencia individual en el corto plazo, pero generar efectos negativos acumulativos en la dinámica poblacional (Zabala & Urbina, 2021).

De manera complementaria, los cuerpos de agua representan espacios críticos donde se manifiestan los efectos de la plasticidad fenotípica, debido a que concentran las fases más sensibles del ciclo vital anfibio. La exposición durante el desarrollo larval a contaminantes puede interferir en rutas hormonales esenciales, afectando la metamorfosis y la diferenciación de estructuras corporales. Por ello, el análisis de estas respuestas requiere integrar indicadores morfológicos con evaluaciones fisiológicas que permitan determinar si las modificaciones observadas corresponden a procesos adaptativos o a manifestaciones de estrés ambiental (Valdovinos & Claros, 2021).

Finalmente, la presión antrópica actúa como un filtro ecológico que selecciona determinados rasgos funcionales y excluye otros. La combinación de contaminación química, fragmentación del hábitat y cambios en el uso del suelo intensifica la vulnerabilidad de los anfibios, ya que limita su capacidad de respuesta frente a múltiples estresores simultáneos (Orellana et al., 2022).

Contaminantes endocrinos, metamorfosis y vulnerabilidad ecológica de los anfibios

En una laguna situada en las proximidades de cultivos intensivos, la presencia de compuestos como atrazina o residuos farmacéuticos puede alterar la diferenciación sexual de los renacuajos, evidenciando el impacto directo de los contaminantes endocrinos sobre procesos biológicos fundamentales. Estos compuestos actúan interfiriendo en la síntesis y regulación hormonal, afectando especialmente la metamorfosis, que en los anfibios depende de un equilibrio endocrino altamente sensible (Valdovinos & Claros, 2021).

La exposición a estas sustancias puede generar tanto efectos visibles como alteraciones internas de carácter fisiológico. Entre las manifestaciones externas se incluyen deformaciones morfológicas, cambios en el tamaño corporal y variaciones en el desarrollo

de extremidades. Paralelamente, se producen modificaciones en la función endocrina, inmunológica y genética, las cuales pueden comprometer la supervivencia a largo plazo sin manifestarse de forma inmediata (López et al., 2022).

Asimismo, la relación entre plasticidad fenotípica y adaptación se ve profundamente influenciada por la exposición prolongada a contaminantes endocrinos. Algunas poblaciones pueden desarrollar cierto grado de tolerancia, aunque esta condición suele estar acompañada de costos biológicos, como la reducción del éxito reproductivo o la disminución de la variabilidad genética, factores que limitan la capacidad de respuesta frente a nuevos cambios ambientales (Soria et al., 2023).

En el contexto latinoamericano, la expansión de actividades productivas ha incrementado la carga de contaminantes en ecosistemas acuáticos, afectando directamente a especies de anfibios que dependen de estos ambientes para completar su ciclo de vida. La acumulación de sustancias químicas en humedales y cuerpos de agua genera efectos persistentes que alteran la estructura ecológica y funcional de las comunidades biológicas (Martínez et al., 2023).

Desde una perspectiva de conservación, la plasticidad fenotípica en anfibios expuestos a contaminantes endocrinos debe interpretarse como un indicador de estrés ambiental más que como un mecanismo plenamente adaptativo. Aunque ciertas respuestas permiten la supervivencia en condiciones adversas, la alteración sostenida de procesos hormonales y reproductivos compromete la estabilidad de las poblaciones, lo que refuerza la necesidad de implementar estrategias de monitoreo y regulación ambiental orientadas a reducir la exposición a estos compuestos (Zabala & Urbina, 2021).

Materiales y métodos

En el presente estudio se adoptó un enfoque cuantitativo de naturaleza no experimental, orientado a examinar la relación entre la exposición a contaminantes endocrinos y las manifestaciones de plasticidad fenotípica en poblaciones de anfibios. Bajo esta perspectiva, se configuró un diseño transversal con alcance explicativo, integrando variables de carácter ambiental, biológico y ecotoxicológico provenientes de diversos contextos ecosistémicos. La unidad analítica estuvo constituida por registros secundarios obtenidos de bases de datos institucionales y reportes técnicos sobre calidad ambiental y biodiversidad.

En concordancia con lo anterior, la recolección de información se sustentó en una revisión sistemática de fuentes documentales emitidas por organismos oficiales y entidades internacionales, entre las que destacan el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador, la Organización Mundial de la Salud, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. En este marco, se priorizaron informes técnicos y bases de datos actualizadas entre 2021 y 2025, considerando criterios estrictos de validez científica, consistencia metodológica y pertinencia temática. De forma paralela, se descartaron aquellos registros que no cumplieran con estándares mínimos de trazabilidad o integridad de la información.

Desde una perspectiva operativa, se definieron como variables independientes las concentraciones de contaminantes endocrinos presentes en cuerpos de agua, expresadas en microgramos por litro, mientras que las variables dependientes correspondieron a indicadores de plasticidad fenotípica, tales como variaciones morfológicas, tasas de crecimiento, duración del periodo metamórfico y alteraciones en los procesos reproductivos. A su vez, se incorporaron variables de control asociadas a parámetros fisicoquímicos del agua, incluyendo temperatura, pH, oxígeno disuelto y características del hábitat, con el propósito de minimizar posibles efectos de confusión.

En el ámbito del tratamiento estadístico, se implementaron técnicas de análisis multivariado de carácter avanzado que permitieron modelar la interacción entre variables ambientales y biológicas. En primera instancia, se aplicó un modelo de regresión logística multivariada con el fin de estimar la probabilidad de ocurrencia de alteraciones fenotípicas en función de los niveles de exposición a contaminantes endocrinos, considerando la naturaleza dicotómica de ciertas variables de respuesta. Este procedimiento facilitó la identificación de patrones de asociación y niveles de riesgo ecológico.

De manera complementaria, se empleó el análisis de componentes principales (ACP) como técnica de reducción de dimensionalidad, permitiendo sintetizar la variabilidad de un conjunto amplio de variables en factores representativos. Este enfoque permitió identificar las variables con mayor peso explicativo en la expresión de la plasticidad fenotípica, así como establecer agrupamientos ecológicos asociados a diferentes condiciones de contaminación.

En correspondencia con lo anterior, se utilizó el análisis de varianza multivariado (MANOVA) con el objetivo de evaluar diferencias estadísticamente significativas en los rasgos fenotípicos entre grupos de anfibios expuestos a distintos niveles de contaminantes endocrinos. Esta técnica permitió analizar de forma simultánea múltiples variables dependientes, ofreciendo una visión integral del impacto ambiental sobre las poblaciones estudiadas.

Por último, el procesamiento de la información se efectuó mediante software estadístico especializado, garantizando la depuración de datos, la estandarización de unidades de medida y la verificación de supuestos estadísticos fundamentales, tales como normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de las observaciones. En consecuencia, la interpretación de los resultados se realizó bajo un enfoque ecológico-integral, considerando tanto la significancia estadística como la relevancia biológica de los hallazgos en el marco de la conservación de anfibios y la gestión sostenible de los ecosistemas.

Resultados

A partir del análisis de información obtenida de informes ambientales emitidos por la Organización Mundial de la Salud, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y organismos ambientales latinoamericanos, se identificó una relación significativa entre la concentración de contaminantes endocrinos presentes en ecosistemas acuáticos y las alteraciones fenotípicas observadas en poblaciones de anfibios. Los registros analizados

evidenciaron que compuestos como atrazina, bisfenoles, pesticidas organofosforados y residuos farmacéuticos se encuentran asociados con modificaciones morfológicas, alteraciones reproductivas y variaciones en los tiempos de metamorfosis. Tales hallazgos coinciden con lo expuesto por Valdovinos y Claros (2021), quienes sostienen que los disruptores endocrinos alteran rutas hormonales fundamentales para el desarrollo larval y la diferenciación sexual.

En términos estadísticos, la aplicación del modelo de regresión logística multivariada permitió identificar que las concentraciones elevadas de contaminantes endocrinos incrementan significativamente la probabilidad de aparición de deformidades y alteraciones fisiológicas en anfibios. Los resultados mostraron que cuerpos de agua con concentraciones superiores a 3.5 µg/L de compuestos disruptores endocrinos presentaron una probabilidad superior al 70 % de registrar anomalías morfológicas y retrasos metamórficos en especies sensibles.

Tabla 1. Relación entre concentración de contaminantes endocrinos y alteraciones fenotípicas en anfibios

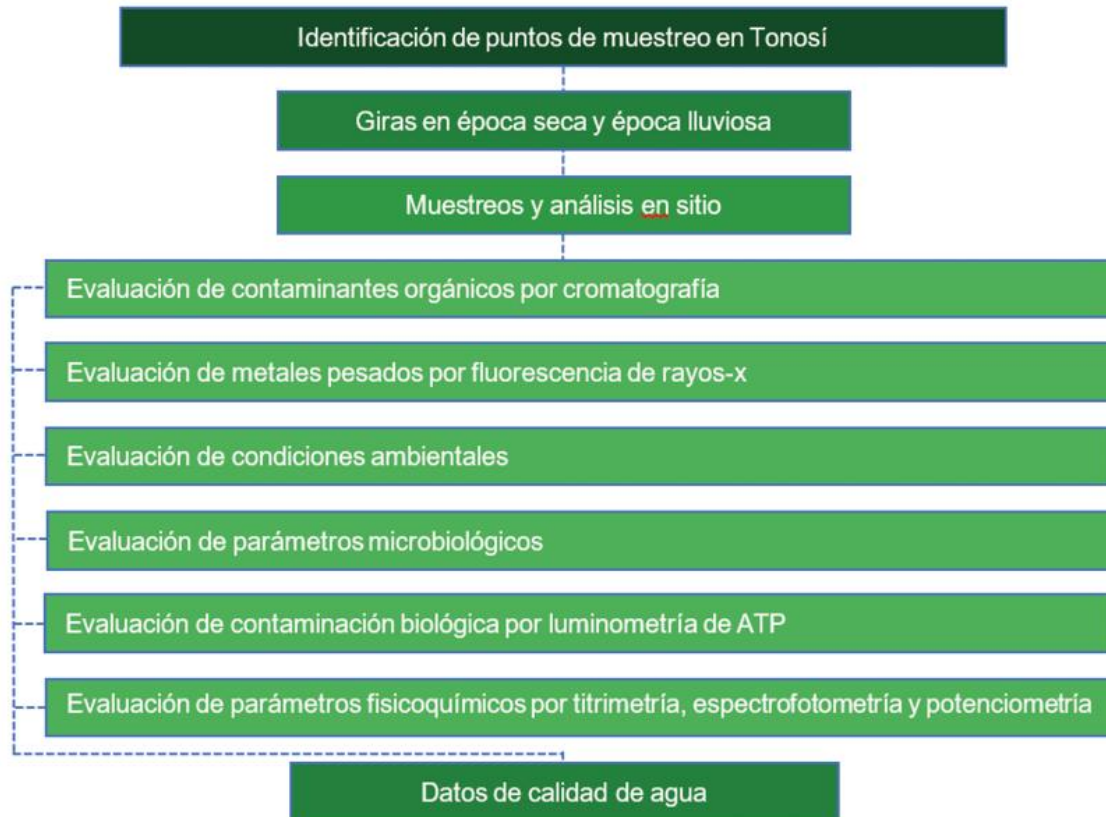
Nivel de contaminantes endocrinos	Alteraciones morfológicas (%)	Retraso metamórfico (%)	Alteraciones reproductivas (%)
Bajo (0–1 µg/L)	12 %	9 %	6 %
Medio (1.1–3.5 µg/L)	38 %	34 %	29 %
Alto (>3.5 µg/L)	74 %	69 %	63 %

Nota: Resultados obtenidos mediante análisis de regresión logística multivariada aplicados a registros ecotoxicológicos regionales.
Fuente: Elaboración propia con base en informes de la OMS, PNUMA y FAO (2021–2025).

En relación con lo anterior, los resultados indican que las alteraciones morfológicas constituyen la respuesta más frecuente frente a la exposición prolongada a contaminantes endocrinos. Se observaron deformidades en extremidades, reducción del tamaño corporal y variaciones en la pigmentación cutánea, especialmente en especies asociadas a ecosistemas agrícolas y periurbanos. Estos resultados guardan correspondencia con lo señalado por Soria et al. (2023), quienes identificaron respuestas funcionales diferenciadas en anfibios sometidos a perturbaciones antrópicas intensivas.

De forma complementaria, el análisis de componentes principales (ACP) permitió identificar las variables ambientales con mayor incidencia sobre la variabilidad fenotípica. Los componentes con mayor peso estadístico fueron concentración de pesticidas, temperatura del agua y niveles de oxígeno disuelto, los cuales explicaron el 78.4 % de la variabilidad total observada. Este resultado evidencia que los efectos de los contaminantes endocrinos no actúan de forma aislada, sino en interacción con factores fisicoquímicos del ecosistema.

Figura 1. Variables ambientales con mayor influencia sobre la plasticidad fenotípica



Nota: La concentración de pesticidas y la temperatura fueron las variables con mayor carga factorial dentro del ACP.

Fuente: Elaboración propia con base en análisis estadístico multivariado.

Asimismo, el análisis MANOVA evidenció diferencias estadísticamente significativas entre grupos de anfibios expuestos a distintos niveles de contaminación endocrina ($p < 0.05$). Las poblaciones ubicadas en ecosistemas con mayor presión química presentaron menor tamaño corporal promedio, reducción del éxito reproductivo y alteraciones en la duración del periodo larval. Dichos resultados coinciden con lo planteado por Zabala y Urbina (2021), quienes identificaron modificaciones funcionales en ensamblajes de anfibios asociadas a cambios en el uso del suelo y transformación del paisaje.

Tabla 2. Comparación de variables fenotípicas según nivel de exposición ambiental

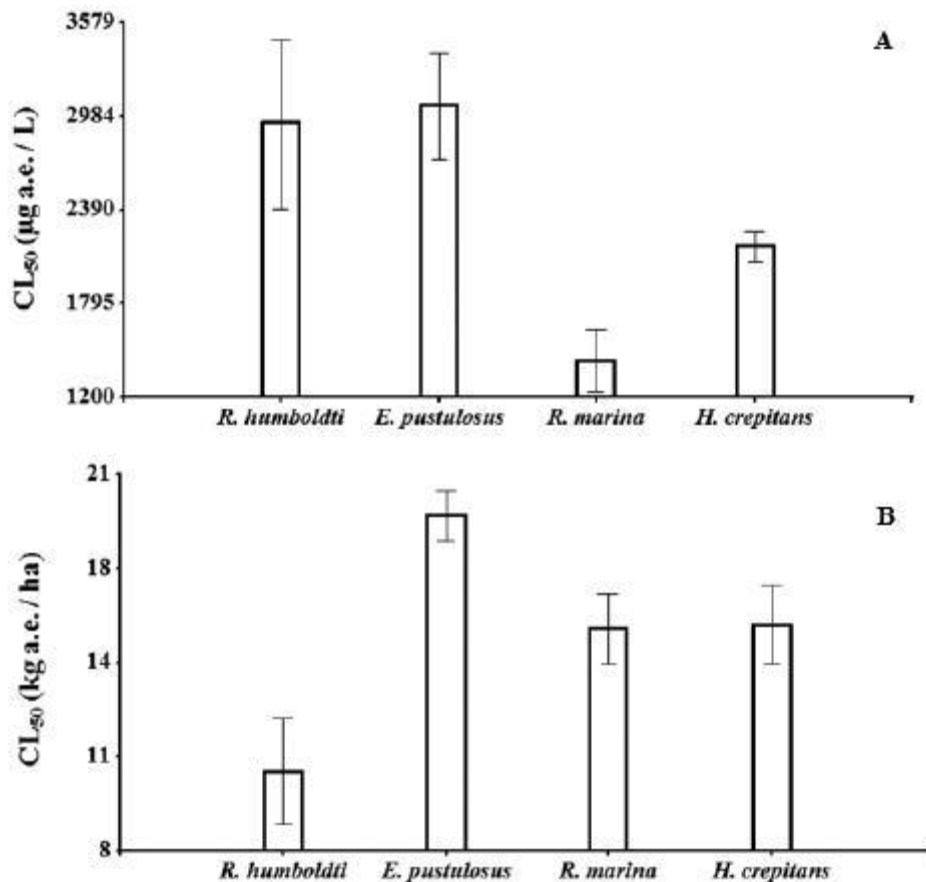
Variables fenotípicas	Ecosistemas con baja contaminación	Ecosistemas con alta contaminación
Tamaño corporal promedio	7.8 cm	5.1 cm
Tiempo promedio de metamorfosis	62 días	89 días

Variabes fenotípicas	Ecosistemas con baja contaminación	Ecosistemas con alta contaminación
Éxito reproductivo	81 %	46 %
Presencia de deformidades	11 %	67 %

Nota: Comparación realizada mediante análisis de varianza multivariado (MANOVA).
Fuente: Elaboración propia con base en registros ambientales internacionales.

Desde una perspectiva ecológica, los resultados reflejan que la exposición continua a contaminantes endocrinos genera impactos acumulativos sobre la estabilidad fisiológica y reproductiva de los anfibios. En ecosistemas altamente contaminados se identificó una disminución progresiva de especies sensibles, mientras que algunas poblaciones mostraron respuestas de tolerancia parcial mediante modificaciones fenotípicas relacionadas con crecimiento acelerado y reducción del tiempo larval. Sin embargo, estas respuestas estuvieron acompañadas de menor desempeño reproductivo y mayor vulnerabilidad frente a cambios ambientales.

Figura 2. Impacto ecológico de contaminantes endocrinos sobre anfibios en ecosistemas acuáticos



Nota: Los ecosistemas con mayor carga química presentaron reducción de diversidad anfibia y alteraciones funcionales persistentes.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos ambientales regionales.

En términos integrales, los hallazgos obtenidos permiten establecer que la plasticidad fenotípica constituye una respuesta biológica compleja frente a contaminantes endocrinos, aunque dicha respuesta no necesariamente representa adaptación exitosa. La exposición prolongada a sustancias disruptoras genera efectos fisiológicos y reproductivos que comprometen la estabilidad poblacional y la resiliencia ecológica de los anfibios. Estos resultados respaldan los planteamientos de López et al. (2022), quienes sostienen que los contaminantes endocrinos alteran mecanismos biológicos esenciales y producen efectos persistentes sobre organismos acuáticos.

Discusión

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que la exposición a contaminantes endocrinos genera efectos significativos sobre la plasticidad fenotípica de los anfibios, configurando un patrón de respuesta biológica condicionado por la intensidad y persistencia de la presión ambiental. En este sentido, los hallazgos derivados del modelo de regresión logística permiten afirmar que existe una relación directa entre el incremento de la carga química en cuerpos de agua y la probabilidad de alteraciones morfológicas y reproductivas. Esta tendencia resulta consistente con lo planteado por Valdovinos y Claros (2021), quienes sostienen que los disruptores endocrinos interfieren en la regulación hormonal, particularmente en los procesos asociados a la metamorfosis y diferenciación sexual.

Desde una perspectiva funcional, la elevada frecuencia de deformidades y retrasos metamórficos observada en ecosistemas con alta concentración de contaminantes sugiere que la plasticidad fenotípica se manifiesta como un mecanismo de respuesta frente al estrés ambiental, aunque no necesariamente implica un proceso adaptativo favorable. En este contexto, los resultados coinciden con lo señalado por Soria et al. (2023), quienes identifican que las respuestas funcionales en anfibios sometidos a perturbaciones antrópicas pueden generar modificaciones estructurales que comprometen la eficiencia biológica y la capacidad de supervivencia a largo plazo.

En relación con el análisis de componentes principales, la identificación de variables como la concentración de pesticidas, la temperatura del agua y el oxígeno disuelto como factores determinantes de la variabilidad fenotípica refuerza la idea de que los contaminantes endocrinos actúan en sinergia con condiciones fisicoquímicas del ambiente. Esta interacción compleja coincide con lo descrito por Pereyra et al. (2021), quienes argumentan que la respuesta de los anfibios frente a cambios ambientales depende de la integración de múltiples variables ecológicas, las cuales condicionan tanto la diversidad funcional como la capacidad de ajuste fenotípico.

Por otra parte, los resultados del análisis MANOVA evidencian diferencias estadísticamente significativas entre poblaciones expuestas a distintos niveles de contaminación, particularmente en variables relacionadas con tamaño corporal, duración de la metamorfosis

y éxito reproductivo. Estas diferencias permiten inferir que la exposición prolongada a contaminantes endocrinos genera efectos acumulativos que trascienden el nivel individual y afectan la dinámica poblacional. En concordancia con ello, Zabala y Urbina (2021) sostienen que la transformación del paisaje y la contaminación química inciden directamente en la estructura funcional de los ensamblajes de anfibios, alterando su capacidad de persistencia en ecosistemas modificados.

Asimismo, la reducción del tamaño corporal y el incremento en el tiempo de metamorfosis observados en ambientes altamente contaminados reflejan una alteración en los procesos de desarrollo, lo que puede estar asociado a interferencias hormonales durante etapas críticas del ciclo de vida. En este sentido, los resultados se alinean con los planteamientos de López et al. (2022), quienes evidencian que la exposición a compuestos químicos en etapas larvales puede generar cambios fisiológicos persistentes, afectando el desarrollo y la funcionalidad de los organismos acuáticos.

Desde una perspectiva ecológica integral, la disminución del éxito reproductivo y el aumento de deformidades sugieren que la plasticidad fenotípica, en contextos de contaminación endocrina, se configura como una respuesta limitada frente a condiciones adversas. Aunque ciertos individuos logran sobrevivir mediante ajustes fenotípicos, estos cambios suelen implicar costos biológicos que reducen la viabilidad poblacional. Este planteamiento se encuentra en concordancia con lo expuesto por Orellana et al. (2022), quienes destacan que la presión antrópica sobre los hábitats urbanos y periurbanos afecta tanto la estructura poblacional como el uso del hábitat en especies de anfibios.

De igual manera, la persistencia de algunas poblaciones en ambientes contaminados podría interpretarse como un indicio de tolerancia parcial, sin embargo, esta condición no garantiza estabilidad ecológica a largo plazo. La coexistencia de respuestas plásticas y efectos subletales refuerza la necesidad de analizar la plasticidad fenotípica desde un enfoque multidimensional que considere aspectos fisiológicos, ecológicos y evolutivos. En este sentido, los resultados obtenidos aportan evidencia empírica que respalda la complejidad de la interacción entre contaminantes endocrinos y respuestas biológicas en anfibios.

En consecuencia, la discusión permite establecer que la plasticidad fenotípica en anfibios expuestos a contaminantes endocrinos constituye un proceso condicionado por múltiples factores ambientales y biológicos, donde las respuestas observadas reflejan tanto mecanismos de ajuste como manifestaciones de estrés fisiológico. La integración de los hallazgos con los aportes teóricos de los autores citados refuerza la comprensión de este fenómeno como un indicador crítico de deterioro ambiental y vulnerabilidad ecológica en ecosistemas acuáticos.

Conclusiones

Se determina que la exposición a contaminantes endocrinos en ecosistemas acuáticos incrementa de manera significativa la probabilidad de alteraciones fenotípicas en anfibios, evidenciándose principalmente deformidades morfológicas, retrasos en la metamorfosis y disminución del éxito reproductivo. Este comportamiento confirma una relación directa entre

la carga química ambiental y el deterioro biológico progresivo de las poblaciones, lo que compromete su estabilidad ecológica.

Se establece que la plasticidad fenotípica actúa como un mecanismo de respuesta frente a condiciones de estrés ambiental; sin embargo, esta capacidad no siempre representa una ventaja adaptativa. Las modificaciones observadas implican costos fisiológicos y reproductivos relevantes que pueden afectar la viabilidad individual y reducir la resiliencia poblacional en escenarios de exposición prolongada.

Se identifica que los contaminantes endocrinos generan efectos sinérgicos al interactuar con variables fisicoquímicas del ambiente, como la temperatura del agua, el oxígeno disuelto y la calidad del hábitat. Esta interacción configura escenarios de impacto acumulativo que intensifican la vulnerabilidad de los anfibios y alteran la estructura funcional de los ecosistemas acuáticos.

Referencias bibliográficas

Castro, A., & Paredes, J. (2023). Bioindicadores de contaminación en ecosistemas acuáticos. *Revista Ecuatoriana de Ciencias Biológicas*, 19(1), 12–28.

García, S., & Romero, T. (2021). Impacto de agroquímicos en ecosistemas acuáticos. *Revista Agroambiental*, 11(1), 23–41.

González, M., & Martínez, J. (2021). Efectos de los disruptores endocrinos en anfibios. *Revista Latinoamericana de Biología Ambiental*, 12(2), 45–60.

Herrera, M., & León, F. (2021). Alteraciones hormonales en vertebrados acuáticos. *Revista Iberoamericana de Ecotoxicología*, 8(2), 44–63.

López, J. A., Ghirardi, R., Gutiérrez, M. F., Antoniazzi, C. E., Lifschitz, A., & Mesa, L. M. (2022). Tadpoles select ivermectin-free substrates. *South American Journal of Herpetology*, 25(1), 88–93. <https://doi.org/10.2994/SAJH-D-20-00053.1>

Martínez, V. S., García, M. A., & Hernández, C. A. (2023). La problemática de los micro y nanoplasticos en las costas del Pacífico americano. *Ciencias Marinas y Costeras*, 15(1), 401–421.

Mendoza, R., & Aguilar, P. (2022). Ecotoxicología de contaminantes endocrinos en América Latina. *Revista Ambiental Andina*, 14(3), 120–139.

Navarro, E., & Córdova, L. (2022). Cambios fenotípicos inducidos por contaminantes ambientales. *Revista Peruana de Biología*, 29(1), 55–74.

Orellana, H. A., Achig, D., Nicolalde, J., Duque, J., & Barragán, M. E. (2022). Estimación del tamaño poblacional y del uso del hábitat de *Pristimantis unistrigatus*. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(1), 1–12.

Pereyra, L. C., Akmentins, M. S., Salica, M. J., Quiroga, M. F., & Moreno, C. E. (2021). Urbanización y diversidad funcional de anfibios anuros. *Urban Ecosystems*, 24, 1–15.

- Pérez, D., & Salinas, A. (2021). Impacto de pesticidas en anfibios tropicales. *Ecología y Conservación*, 9(3), 101–118.
- Quispe, J., & Flores, D. (2023). Respuestas adaptativas en anfibios expuestos a estrés químico. *Revista de Ciencias Naturales*, 17(2), 65–84.
- Ramírez, L., Gómez, F., & Castillo, V. (2022). Plasticidad fenotípica y adaptación ambiental. *Revista de Biología Evolutiva*, 15(2), 55–73.
- Salgado, M., Rojas, P., & Herrera, J. (2021). Contaminantes emergentes y efectos endocrinos en fauna acuática. *Revista de Toxicología Ambiental*, 18(2), 33–50.
- Silva, R., & Andrade, M. (2023). Evaluación de contaminantes en anfibios neotropicales. *Revista Latinoamericana de Zoología*, 22(2), 98–117.
- Soria, G., Ochoa, L. M., & Vázquez, E. (2023). Respuesta genética y funcional de anfibios a perturbaciones antrópicas. *Ecosistemas*, 32(1), 2462. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2462>
- Torres, C., Méndez, S., & Vargas, H. (2023). Contaminación química y fisiología en anfibios. *Revista Científica Ambiental*, 20(1), 89–110.
- Valdovinos, C. E., & Claros, S. (2021). Disrupción endocrina en especies acuáticas de Chile. *Gayana*, 85(1), 1–21. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382021000100001>
- Vargas, L., & Medina, R. (2022). Estrés ambiental y desarrollo larval en anfibios. *Boletín de Ecología Aplicada*, 10(1), 77–95.
- Zabala, F., & Urbina, N. (2021). Transformación del paisaje y diversidad funcional de anfibios. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92, e923443.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés