
Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio. ¿Estamos mirando lo mismo?



Trabajo Fin de Grado

Grado en Ciencias
Ambientales

Autora: Irati Artola
Soria

Director: Benjamín
Juan Gómez Moliner

Curso 2022-2023

*<< ¿Volverán alguna vez? >>, preguntan, y yo no encuentro respuesta que darles.
Los olmos todavía se están muriendo, y lo mismo los pájaros.
¿Se hace algo por salvarlos? ¿Puede hacerse algo? ¿Puedo yo hacer algo?*

R.Carson en *La Primavera Silenciosa*

Índice General

Resumen.....	4
1. Introducción.....	5
2. Objetivos.....	8
3. Metodología.....	8
3.1. Formulación de la pregunta.....	8
3.2. Identificación de trabajos relevantes.....	9
3.3. Evaluación de la calidad de los estudios.....	9
3.4. Resumir las pruebas.....	10
3.5. Interpretación de los resultados.....	10
4. Desarrollo.....	11
4.1. Resultados.....	11
4.1.1. Recuento final de trabajos.....	11
4.1.2. Extracción de endpoints y Análisis estadístico.....	12
4.2. Interpretación de los resultados y Discusión.....	17
5. Conclusiones.....	20
6. Bibliografía.....	21

Resumen

Este trabajo contiene una revisión bibliográfica sistemática sobre el éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio siguiendo el método de Wright et al. (2007). Tras formular la pregunta ¿Estamos midiendo lo mismo?, se ha procedido a la identificación de trabajos relevantes mediante una búsqueda por WoS. Se ha realizado la evaluación de la calidad de los estudios, se han creado categorías donde se ha agrupado cada *endpoint* medido en los trabajos y se ha realizado una interpretación de los resultados tras el respectivo análisis estadístico. El objetivo ha sido el de verificar si existen diferencias significativas en la frecuencia de medición de *endpoints* reproductivos de la exposición subletal a mercurio en aves, comparando los trabajos realizados en campo y laboratorio. Tras obtener una recopilación de 49 trabajos y agrupar los 95 *endpoints* medidos bajo las categorías, se ha aplicado el método propuesto por Neu et al. (1974) incluyendo la corrección de Bonferroni, donde se han hallado diferencias significativas. Los resultados han mostrado cómo la categoría de Condición física de los animales se mide por encima de lo esperado en los laboratorios, y en campo, es la categoría de Pollos y Mortalidad la que se mide por encima de lo esperado. Estas diferencias pueden deberse al grado de dificultad de manipulación y alcance del animal en unos y otros trabajos. Futuros esfuerzos podrían centrarse en unificar criterios para la inclusión de unos u otros *endpoints* asegurándose de que exista siempre un mínimo número en común de cada categoría (entre los trabajos de campo y laboratorio), lo que ayudaría a salvar las diferencias actuales y contribuir en su comparabilidad.

1. Introducción

El desarrollo industrial ha posibilitado una comodidad material nunca antes vista en la historia (Breech, 1978). En los laboratorios del mundo industrializado se han sintetizado nuevos compuestos y ello ha acarreado la liberación en el medio ambiente de cantidades que en muchos lugares alcanzan concentraciones de riesgo, impactando en la fisiología de los seres vivos y el funcionamiento de los ecosistemas (Bernanke y Köhler, 2008). Primero extraído para la obtención de oro y plata y más tarde extendido en amalgamas dentales (práctica rehusada debido a los problemas de salud que ello acarrió), aparece en termómetros (actualmente de Galinstan o simplemente digitales), así como en lámparas fluorescentes, en baterías y antisépticos, como catalítico, involucrado en la producción del monómero cloruro de vinilo (PVC) y biocida en la industria papelera y fungicida (Hylander y Meili, 2003). Actualmente procede en su mayoría de la minería (se ha extraído el 80 % recogido en los yacimientos) (Kalisíńska et al., 2019) y de las centrales eléctricas de carbón (Figura 1); sobre todo de China e India. Sin embargo, pese a que a finales del siglo pasado se restringe su uso en muchos de los productos y las emisiones se reducen considerablemente, se ha generado un legado de contaminación (Demeneix, 2014). Debido a su capacidad de mantenerse en las redes tróficas su distribución se manifiesta a escala global, de tal forma que hasta en el asentamiento humano más remoto, en el oeste de Groenlandia (Qaanaaq) sin ser un pueblo industrial, sus habitantes poseen el nivel de mercurio en sangre más alto de todo el planeta. ¿El origen? Su principal fuente de alimentación son ballenas, focas y peces (Starke et al., 2006).

El más conocido y primer gran desastre de envenenamiento por mercurio ocurrió en el año 1956, en la bahía de Minamata. Desde 1951 hasta 17 años después, una empresa de Japón utilizó el sulfato de mercurio como base de catalizador para fabricar el acetaldehído. Las consecuencias fueron funestas ya que en aquella época los desechos iban a parar directamente a las aguas. Allí, el mercurio se convierte en metilmercurio, comienza a acumularse, y se bioacumula en la cadena trófica (con una mayor concentración cuanto mayor sea el pez), los cuales sirven como alimento a la población. Otro hecho más reciente ocurrió en Irak en el año 1972. En esta ocasión, debido al consumo de granos de arroz tratados con fungicidas que contenían mercurio. 6530 personas fueron hospitalizadas, de las cuales 459 murieron (Bakir et al., 1973). Aún así, no es hasta el año 2001 que se inicia una evaluación mundial de sus consecuencias tóxicas por parte del Consejo de Administración del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (Starke et al., 2006). En este informe se asientan las bases para las restricciones y prohibiciones que se

Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?

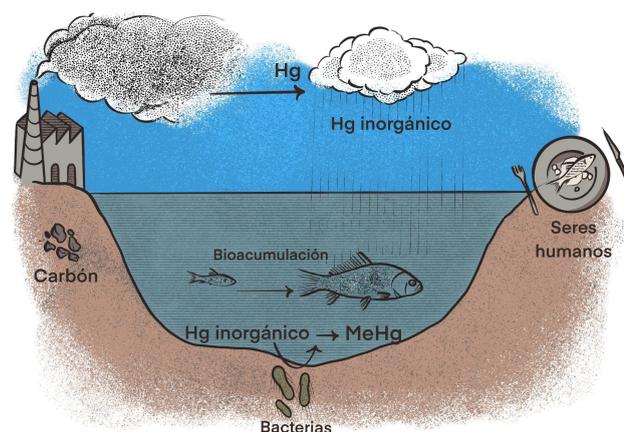


Figura 1. Esquema representativo de la incorporación del mercurio inorgánico al agua, procedente de la quema del carbón, y de su transformación en metilmercurio (Modificado ¹)

establecen posteriormente en cada país participante, tales como la prohibición de exportación de mercurio fuera de la UE y la clausura de las instalaciones de células de mercurio para la producción de cloro antes del año 2020. Con la creación del *Convenio Internacional de Minamata sobre el Mercurio* hace diez años, dedicado exclusivamente a este compuesto (Lennett y Gutierrez, 2015), se marca un hito histórico.

En el campo de la ornitología acumula ya más de medio siglo de estudio (Fuchsman et al., 2017) y es uno de los metales pesados con mayor número de trabajos realizados en el estudio de la bioacumulación en la fauna salvaje (Celik et al., 2021). De las formas que puede adoptar en la naturaleza, el metilmercurio (MeHg) (Figura 2) es la forma más biodisponible que existe y también la más tóxica (Kaliszińska, 2019), ya que es esta forma la que se bioacumula y biomagnifica con facilidad (Chan, 2019). Por consiguiente, muchos de los estudios realizados para analizar las consecuencias en la fauna se han centrado en esta forma orgánica (Albers et al., 2007; Bouton et al., 1999; Burgess y Meyer, 2008; El-Begearmi et al., 1982; Frederick y Jayasena, 2011; Heinz, 1975; Heinz et al., 2010a; entre otros). Las aves, debido a su inherente movilidad, las convierte en un adecuado objeto de estudio de contaminantes que afectan a escala global. Estas responden a los cambios y variaciones ambientales, por muy leves que estos sean, de manera rápida, al ser muy sensibles, por lo que se utilizan a menudo como bioindicadoras (Amat, 2010). Son también abundantes y fácilmente observables, lo que ha facilitado su estudio y avistamiento (Aves terrestres (Guías de campo Blume), 2003).

¹ Diagrama basado en la Figura 1-2., del libro *Losing Our Minds* (Demeneix, 2014).

Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?

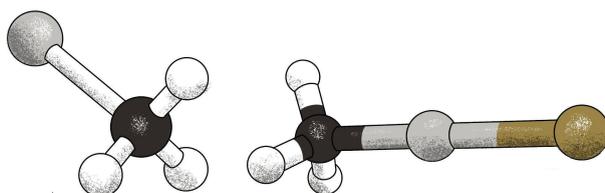


Figura 2. Compuestos en 3D del Metilmercurio (izqda.) y Metilcloromercurio (dcha.) (Elaboración propia).

Si la acumulación en el organismo llega a tal punto, ocasiona la muerte. No obstante, en la mayoría de las ocasiones la exposición a MeHg ocurre en dosis subletales que pueden tener efectos en la fisiología y ecología de los seres vivos. El tóxico se puede acumular en órganos como el hígado, las glándulas sexuales (Kitowski et al., 2012) o el riñón (Haegele et al., 1974). El MeHg se encuentra asociado (incluso a bajas dosis) a efectos neurotóxicos afectando particularmente al sistema nervioso de aquellos que se encuentran en desarrollo, tal como pudieron observar Heinz y Hoffman (2003), afectando a la capacidad motriz y de respuesta a estímulos nerviosos (Bose et al., 2012; Gilbert y Grant-Webster, 1995). Ejemplo de ello, el personaje de Lewis Carroll “el sombrerero loco” de Alicia en el País de las Maravillas está basado en aquellos trastornos observados en las personas que fabricaban sombreros con mercurio (Jackson, 2018 y Price, 1984). Los efectos subletales de la exposición a Hg pueden ser particularmente notorios en periodos de especial sensibilidad en la que los animales están sujetos a mayores presiones ambientales o tróficas. La reproducción es una fase especialmente sensible en la vida del animal y hasta las exposiciones más pequeñas, si ocurren de forma continuada, pueden derivar en una acumulación que más tarde afecte a la reproducción (Zhang et al., 2013). Los efectos subletales del mercurio han sido ampliamente estudiados y delineados con cierta precisión en el laboratorio, pero al trasladar el estudio a campo estos se difuminan y no es tan sencillo relacionar su efecto. Es posible que ese desajuste se deba en parte a que, entre los distintos estudios se miden distintos parámetros que no son directamente comparables entre sí. Entendiendo *endpoint* como todos aquellos criterios de valoración utilizados para medir la afectación de las concentraciones subletales de mercurio en la reproducción de las aves (Müguerza, 2019) y teniendo en cuenta que son dos las cuestiones que ponen en jaque la viabilidad de una población; su mortalidad y la reproducción (con una mayor importancia si cabe en esta última en las especies de lento crecimiento) (Manlik, 2019), se ha procedido a estudiar la variable del éxito reproductivo a través de los *endpoints* reproductivos por tratarse de la forma más adecuada de medición de la afectación de los contaminantes (Morales-Caselles et al., 2009).

2. Objetivos

En la presente revisión bibliográfica se ha perseguido comparar los *endpoints* reproductivos considerados en trabajos con exposiciones subletales a mercurio en campo y laboratorio.

Se pretende estudiar los parámetros o *endpoints* reproductivos utilizados en los estudios de campo por un lado, y laboratorios por otro, con el fin de comparar y determinar si existen diferencias significativas en su frecuencia de medición entre unos y otros.

Conocer qué *endpoints* reproductivos se miden podría ayudar a entender las discrepancias en resultados entre estudios, informar la transferibilidad de los valores tóxicos de referencia determinados en laboratorio y contribuir en conocimiento a la hora de plantear futuros trabajos de investigación.

3. Metodología

Con la intención de realizar una revisión bibliográfica sistemática (siendo esta una síntesis de todos los estudios relevantes en un tema específico) se ha realizado una metodología de trabajo basada en el método descrito por Wright et al. (2007) consistente en cinco pasos.

3.1. Formulación de la pregunta

El primer paso ha sido plantearse la pregunta de investigación: De los estudios que se realizan en los laboratorios, ¿en cuántos de ellos se está logrando aportar información significativa en la afectación real del mercurio?, ¿Se están utilizando diseños replicables en la naturaleza o hay un enfoque propio de laboratorio? Para conocer qué queremos saber y por qué, hay que establecer unos límites claros antes de comenzar con la búsqueda tanto como para reducir los tiempos y aumentar la productividad encontrando artículos de interés. Por ello, la pregunta de investigación debe estar correctamente formulada (Cook et al., 1995).

3.2. Identificación de trabajos relevantes

En cuanto al protocolo de búsqueda y para la selección de las fuentes bibliográficas se ha llevado a cabo una recopilación de todos los estudios disponibles actualmente hasta la fecha (año 2023) sobre los efectos subletales de la exposición a mercurio en aves. Para ello, se ha utilizado el buscador online Web of Science (WoS) siendo esta una de las bases de datos más importantes junto con Scopus, MEDLINE, Google Scholar, etc (Chen, 2017). Se han utilizado palabras clave (*keywords*) como método principal de búsqueda (Tabla 1). Así, se han ido realizando sucesivas búsquedas, modificando tanto las palabras clave utilizadas como los campos, con el objetivo de poder llegar al mayor número de trabajos posibles existentes en la materia.

3.3. Evaluación de la calidad de los estudios

De cada búsqueda, ordenada por números (Tabla 1) se realiza primero una gran criba, descartando rápidamente por el título aquellos que no tengan nada que ver con el objeto de estudio o no nos lleven a responder la pregunta de investigación. El resto se guardan como posibles (también con los que existe cierta duda) en una hoja de cálculo, en un listado para poder recuperarlos y consultarlos en cualquier momento. Seguidamente, de entre estos estudios posibles recogidos, se ha revisado el resumen o abstract de cada trabajo, donde tras su lectura, se ha realizado un segundo descarte en los que proceden. Finalmente, aquellos no descartados quedan recogidos en otro listado aparte, del cual se realiza una lectura más pausada. En este punto cabe recordar que aún es posible realizar un descarte posterior tras su lectura completa. En el momento de la búsqueda se han establecido ciertos criterios para proceder a la inclusión o no de un trabajo. En cuanto a la forma de exposición al mercurio, se ha dado validez a la ingestión por vía oral, por el modo de exposición de la fauna salvaje en la naturaleza (Zhang et al., 2013), descartando los estudios en laboratorios que utilizaron inyecciones de Hg. De la misma forma, respecto a su química, solo se han considerado las formas orgánicas como el metilmercurio por tratarse de la forma que más abunda en la naturaleza, ya que los peces lo presentan de esta forma en un 95 % como mínimo (Bloom, 1992). Por ello, su forma inorgánica y el etilmercurio también se desechan por estar asociados a otros procesos (Clarkson et al., 2006).

*Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?*

Tabla 1. Resumen de los keywords utilizados para cada búsqueda bibliográfica realizada (1-6) en WoS y número de trabajos extraídos por búsqueda (Elaboración propia).

Búsqueda	Tema	Título	Número
1	mercury AND (bird OR avian) AND (sub-lethal OR sublethal)		1
2	bird OR avian	methylmercury AND dietary	7
3	bird OR avian	mercur* AND diet*	3
4	(bird OR avian) AND reproduct*	mercur* AND effect	1
5	(mercur* AND effect AND bird)		8
6	(mercur* AND effect*) AND (reproduct or breed) AND bird		5

3.4. Resumir las pruebas

Para poder responder a la cuestión de si se están mirando o no los mismos endpoints reproductivos en campo y laboratorio en las aves y realizar su respectivo análisis estadístico, a partir de la lista de trabajos definitivamente seleccionados, se ha procedido a identificar los *endpoints* reproductivos medidos de cada trabajo y se han agrupado bajo alguna de las categorías creadas con el fin de obtener sus frecuencias observadas (Tabla 3).

3.5. Interpretación de los resultados

Tras esto se ha realizado un análisis estadístico mediante la prueba del Chi - cuadrado. Esta es una prueba que analiza la diferencia entre lo observado y lo esperado entre dos variables (en este caso, los estudios realizados en campo y en laboratorio) (León-Figueroa, 2022). Asimismo, se ha aplicado el método propuesto por Neu et al. (1974) que incluye la corrección de Bonferroni para comparar las distintas categorías de los endpoints y poder saber en qué categorías existen diferencias significativas, en caso de que existiesen.

4. Desarrollo

4.1. Resultados

4.1.1. Recuento final de trabajos

De la primera búsqueda realizada (Tabla 1) se recuperan 62 artículos, donde primeramente se seleccionan 10 como posibles y finalmente se escoge uno. De la segunda búsqueda aparecen 101 trabajos. En esta ocasión también se seleccionan 10 de entre los posibles y finalmente se escogen 7. A partir de la tercera búsqueda se comienza a incluir el icono del asterisco (*) al final de algunas palabras, el cual se utiliza para que se aumenten las posibilidades de encontrar la misma palabra con terminaciones similares. De la tercera búsqueda se recuperan 33 artículos y se escogen 3. Con la cuarta búsqueda se recuperan 28 trabajos, se seleccionan 4 para el análisis detallado y se acaba escogiendo solamente uno. En una quinta búsqueda, se recuperan 651 artículos, de los cuales 27 se seleccionan para un análisis más detallado y de dichos trabajos son 8 los finalmente escogidos. La última búsqueda recupera 101 artículos, de entre los que se han preseleccionado 10 y otros 5 fueron guardados como trabajos definitivos (llegados a este punto, algunos de los trabajos recuperados se repetían de búsquedas anteriores). Con esto se obtiene un total de 25 trabajos los cuales han sido obtenidos mediante las sucesivas búsquedas mencionadas.

Aunque esta ha sido la principal forma de búsqueda, no todos los trabajos recopilados han sido extraídos a través de la citada búsqueda. Así, se han podido recopilar numerosos trabajos mediante las citas encontradas en las páginas de dichos estudios. Estas citas han sido de suma utilidad, teniendo en cuenta la dificultad de encontrar trabajos en campo, por no ser estos muy abundantes. Gracias a los trabajos de Burger y Gochfeld (1997), así como el de Fuchsman et al., (2017) ambos de recopilación bibliográfica, se han podido añadir numerosos trabajos de campo enriqueciendo de gran manera la recopilación (Henny et al., 2005; Anderson et al., 2008; Jackson et al., 2011; Burgess y Meyer, 2008; Longcore et al., 2007; Brasso y Cristol, 2008; Hallinger y Cristol, 2011; entre otros). Incluir estos trabajos ha aumentado relevantemente el tamaño muestral, dando mayor potencia al análisis estadístico.

*Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?*

De los trabajos seleccionados se ha procedido a otro descarte debido a que no se ha podido acceder a ellos. Ha sido así por no tener la universidad suscripción (acceso vetado) y ser estos de pago o por tratarse de trabajos tan antiguos que no han podido ser localizados en línea, por lo que han tenido que ser descartados para el presente trabajo. También se han descartado todos aquellos que tras su lectura detenida, se ha visto que no incluyen información útil para la cuestión aquí planteada. Dentro de este último caso destacan estudios con suministro de mercurio vía inyección y no oral, numerosas mediciones de concentraciones en plumas y sangre pero no relacionados con efectos en ninguna de las fases de la reproducción, estudios que miran simplemente la bioacumulación en el organismo, comparaciones del nivel de mercurio en plumas y huevos, así como estudios con mercurio inorgánico. De los que no se ha podido tener acceso pero hubiesen podido servir como objeto de estudio para incluirlos al análisis estadístico destacan los estudios de Heinz (1979): Metilmercurio: Efectos reproductivos y conductuales en tres generaciones de ánades reales, Newtoff y Emslie (2017): Exposición al mercurio y dieta del pelícano pardo (*Pelecanus occidentalis*) en Carolina del Norte, EE.UU, además del trabajo de Finley y Stendell (1978): Supervivencia y éxito reproductivo de patos negros alimentados con metilmercurio. Tras esto se ha logrado obtener un listado de 49 trabajos definitivos (Tabla 2) con la cual es la que se ha trabajado para realizar el análisis estadístico. Obsérvese cómo existe un mayor número de trabajos experimentales realizados en los laboratorios en comparación con el campo;son casi el doble en número.

4.1.2. Extracción de endpoints y Análisis estadístico

Una vez realizada la identificación de los *endpoints* se ha procedido a agruparlos bajo categorías (Tabla 3). Así, cada trabajo tendrá asociados una o varias categorías de *endpoints* siempre según cuántos de ellos mida. A la hora de realizar la categorización se han tenido en cuenta las principales fases del proceso reproductivo de las aves, desde la puesta en el nido, hasta el nacimiento del pollo. De esta forma se distinguen las categorías de 3- *Puesta*, 4- *Calidad del Huevo* y 5- *Pollos y Mortalidad* (Tabla 3). Además, cuestiones como el comportamiento diferente apreciado en algunos de los estudios entre los grupos control y los alimentados con mercurio se han agrupado bajo una misma categoría (1- *Comportamiento*). Todo lo relacionado con el físico del animal se ha considerado bajo una misma categoría (2- *Condición física*) y, parámetros medidos que no correspondiesen dentro de ninguna de las cinco categorías anteriores se han agrupado en la misma categoría bajo

*Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?*

el término 6-Otros. Tras esta categorización se han ordenado los trabajos por fecha de realización y por tipo de estudio: laboratorio o campo. Esta forma de proceder ha sido así en cuanto que es condición obligatoria para poder llevar a cabo la comparación entre las dos variables. La razón de ordenar los trabajos cronológicamente ha sido la de poder extraer información extra del estudio de los distintos *endpoints* reproductivos. Así, si se realiza un análisis cronológico de los *endpoints*, vemos como a grandes rasgos en la década de los 70 comienza a haber un gran boom de estudios en laboratorios sobre el tema de los efectos subletales del mercurio. Puede que motivado por el reciente acontecimiento ocurrido en Irak y sin haber olvidado aún a Minamata. Por alguna razón en la década de los 80 se deja el estudio del mercurio un poco de lado (desde 1982 hasta 1997 no se ha encontrado ningún trabajo al respecto). Pero desde ese año en adelante, se publican en dos décadas tantos estudios como desde el comienzo. Específicamente respecto a las categorías, durante la década de los 90 se deja de mirar la de 3- Puesta, pero con el comienzo del siglo XXI se retoma y no deja ya de mirarse. En cuanto a rarezas, los *endpoint* recogidos bajo la categoría de 6- Otros solamente se miraron en el año 2016 y su consecutivo (Buck et al., 2016 y Chin et al., 2017) y tres son en total los estudios que miden el comportamiento (Bouton et al., 1999; Heinz, 1974 y Heinz y Hoffman, 1997). Cabe destacar que en cuanto a los estudios realizados en campo estos son tardíos y también más escasos; no comienzan hasta la década de los noventa y con una primera tímida cuantía de dos estudios por parte de King et al. (1991) y DesGranges et al. (1998), sin embargo, en la primera década de los 2000 arrancan con fuerza.

En total se han extraído 95 endpoints de los cuales 26 corresponden a trabajos de campo y 69 a laboratorio. El número medio de endpoints en campo es de 1,63 mientras que en laboratorio alcanza los 2,09. El total de las frecuencias observadas de cada categoría de *endpoints* puede consultarse en la Tabla 4. Para la realización de la prueba del chi cuadrado, donde en la hipótesis testada se espera que cada categoría de *endpoints* se haya medido en similar proporción tanto en campo como en laboratorio, se ha realizado una tabla dinámica donde se agrupan la frecuencia de aparición de cada categoría de *endpoints* (Tabla 4). A partir de dichos datos se ha procedido a calcular el valor del chi, resultando el sumatorio final con un valor de 12,1771 con 5 grados de libertad. Se ha obtenido un valor de $\chi^2 = 12,1771$. Con un valor de P de 0,0128 y por tratarse de un valor menor a 0,05; se rechaza la hipótesis de que las diferencias en la frecuencia de *endpoints* entre estudios de campo y laboratorio no difieren de lo esperable al azar, y por tanto, se concluye que las diferencias son significativas estadísticamente.

*Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?*

Tabla 2. Listado final de los estudios seleccionados numerados en orden cronológico creciente. Sombreado de color verde los estudios de campo y en azul los de laboratorio (Elaboración propia).

Estudio (Autor, Año)				
1. (Fimreite, 1970)	11. (Al-Fayadh et al., 1976)	21. (Sepúlveda et. al, 1999)	31. (Hill et al., 2008)	41. (Varian-Ramos et. al, 2013)
2. (Fimreite, 1971)	12. (Al-Soudi et al., 1976)	22. (Henny et al., 2002)	32. (Anderson et al., 2008)	42. (Varian-Ramos et. al, 2014)
3. (Peakall y Lincer, 1972)	13. (El-Begearmi et al., 1977)	23. (Heinz y Hoffman, 2003)	33. (Burgess y Meyer, 2008)	43. (Provencher et al., 2016)
4. (Spann et al., 1972)	14. (Hill y Soares, 1977)	24. (Heinz y Hoffman, 2004)	34. (Brasso y Cristol, 2008)	44. (Buck et. al, 2016)
5. (Haegele et al., 1974)	15. (Eskeland y Nafstad, 1978)	25. (Henny et al., 2005)	35. (Herring et al., 2009)	45. Chin et.al, 2017)
6. (March et al., 1974)	16. (El-Begearmi et al., 1982)	26. (Weech et al., 2006)	36. (Heinz et. al, 2010a)	46. (Paris et. al, 2018)
7. (Heinz, 1974)	17. (King et al., 1991)	27. (Albers et. al, 2007)	37. (Heinz et.al, 2010b)	47. (Hedde et al., 2020)
8. (Scott et. al, 1975)	18. (DesGranges et al., 1998)	28. (Longcore et al., 2007)	38. (Jackson et al., 2011)	48. (Zabala et. al, 2021)
9. (Heinz, 1975)	19. (Heinz y Hoffman, 1998)	29. (Anthony et al., 2007)	39. (Frederick y Jayasena, 2011)	49. (Zabala et. al, 2023)
10. (Hill y Shaffner, 1976)	20. (Bouton et. al, 1999)	30. (Ackerman et al., 2008)	40. (Hallinger y Cristol, 2011)	

*Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?*

Tabla 3. *Endpoints* reproductivos agrupados por categoría (Elaboración propia).

Nº	Categoría	Endpoints reproductivos
1	Comportamiento	Niveles de actividad, Búsqueda eficiente de comida, Puesta de huevos fuera de la caja, Latencia a la llamada de aproximación maternal, Número de rodeos realizados en la huida, % de tiempo que el ave permanece en el pedal tras la aproximación inicial, Número de veces que el pájaro saltó del pedal hacia el altavoz.
2	Condición física	Peso, Pérdida de peso, Peso al nacer, Masa del polluelo, Peso a los 7 días de edad de los polluelos, Anomalías, Embriones deformes, Desarrollo embrionario, Salud general, Signos neurológicos, Índice de condición (masa corporal / longitud de la cabeza), Condición fisiológica, Salud (abundancia media de trematodos).
3	Puesta	Fecundidad, Tamaño de puesta, Día de inicio de la puesta, Incubabilidad, Producción de nidos, Nidos improductivos, Probabilidad de nidificación, Latencia para poner el primer huevo, Latencia para volver a nidificar, Número de intentos de nidificación, Número de huevos puestos, Proporción de huevos eclosionados, Tamaño medio de la nidada en el momento de la eclosión.
4	Calidad del huevo	Espesor de la cáscara, Resistencia de la cáscara, Huevo sin cáscara, Número de huevos sanos, Cáscara excretada, Peso del huevo, volumen del huevo, Unidad de Haugh.
5	Pollos y Mortalidad	Éxito de volantones, Producción de pollos, Supervivencia de los pollos, % de supervivencia, Supervivencia previa al volantón, Supervivencia de pollos de 6 días de edad, Mortalidad de crías, Éxito de crías, Número de crías de 50 días de edad, Supervivencia de pollos de 6 días de edad, Éxito reproductivo en 1 año, Éxito reproductivo total, Proporción de parejas que producen un volantón, Volantones producidos, Tamaño medio de la nidada al volantón, Supervivencia a los 21, 30, 90 días (machos y hembras), Crías producidas por territorio, Número de pollos por pareja territorial, Crías por nido, Crías por nido activo, Volantones por nido.
6	Otros	Heredabilidad de la acumulación en sangre, Variación fenotípica, Neurotoxicidad.

*Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?*

Tabla 4. Tabla de contingencia para las frecuencias observadas en campo y laboratorio para cada categoría (Elaboración propia).

Categoría	Observado						Total
	1	2	3	4	5	6	
Campo	0	1	7	3	15	0	26
Laboratorio	3	13	18	16	17	2	69
Total	3	14	25	19	32	2	95

Tras esta constatación se ha procedido a inspeccionar el resultado y determinar exactamente en qué categoría de los *endpoints* se dan las diferencias. Utilizando la corrección de Bonferroni (Neu et al., 1974) y tal como se muestra en la Tabla 5 se extrae que las diferencias significativas ocurren en la segunda y quinta categoría de *endpoints* (*Condición física; Pollos y Mortalidad*). Los resultados muestran que los *endpoints* que recoge la segunda categoría se miden de forma significativa por encima de lo esperado en los laboratorios en comparación con el campo. Por el contrario, la categoría *Pollos y Mortalidad* se mide por encima de lo esperado en los estudios situados en campo.

Tabla 5. Resultados del estadístico Z de Bonferroni para cada categoría con sus respectivos Intervalos de Confianza (IC). No significativo (No S.), Significativo (S.) (Elaboración propia).

Categoría	Comportamiento	Condición física	Puesta	Calidad del huevo	Pollos y Mortalidad	Otros
IC Superior	0,000	-0,061	0,040	-0,050	0,321	0,000
IC Inferior	0,000	0,138	0,499	0,281	0,833	0,000
Valor	0,043	0,188	0,261	0,232	0,246	0,029
Resultado	No S.	S	No S.	No S.	S	No S.

4.2. Interpretación de los resultados y Discusión

Volviendo a la pregunta que nos concierne y tras demostrarse que existen diferencias significativas entre los endpoints típicamente medidos en campo y laboratorio, cabe preguntarse el porqué de esa diferencia. Una posible respuesta es que sea una cuestión de facilidades técnicas. Es evidente que en los estudios experimentales existe mayor accesibilidad a la hora de realizar cualquier tipo de medición. Esta podría ser una de las razones por las que la categoría de *Condición física* haya aparecido con una mayor frecuencia de forma significativa. Al tener en todo momento a los animales disponibles y muchas veces acostumbrados a la manipulación, tareas que en campo pueden resultar sino imposible, lo menos una odisea, cómo realizar una medición a los polluelos cada ciertos días de desarrollo, en el laboratorio es una cuestión más sencilla, incluso podría decirse que rutinaria. En su hábitat natural, el hecho de exponer al animal a esta manipulación extra con el único objetivo de obtener el dato del peso, podría hacer que afectase negativamente a la reproducción. Así lo testifica White et al. (1983), donde la gaviota reidora mostró una menor capacidad incubadora tras su manipulación. Esta diferencia puede deberse también a la ética de trabajo mostrada en los estudios en el medio natural donde se procura intervenir lo mínimo posible en los procesos naturales que sigue cada especie; buscando causarles el mínimo estrés, molestia e impacto (Minteer y Collins, 2008). De la misma manera una de las formas más habituales en el campo de la zoología para poder determinar la distribución cualitativa y cuantitativa de los animales y su hábitat son los censos (Cifuentes et al., 1993). Se trata de una técnica muy útil para obtener datos de calidad sin que esto suponga un detrimento para el animal; sin contacto ni manipulación. Esto podría explicar el hecho de que los *endpoints* de “Pollo producidos por territorio” o “Pollos por nido” se hayan repetido a lo largo de todos los trabajos de campo existentes, salvo en uno. Por otro lado, el hecho de que en laboratorio haya tenido tanta importancia la condición física del pollo puede responder más a cuestiones relacionadas con la industria alimentaria, donde interesa que las crías nazcan con un peso mayor, sin embargo, en un sentido ecológico la importancia de esta medición se torna menos clara (Labocha y Hayes, 2012). Donde además, se ha hallado una relación negativa entre la condición corporal de los pollos y su éxito reproductivo (Grames et al., 2023).

En cuanto al resto de categorías, aunque no haya habido diferencias significativas en su medición, también presentan distintos grados de dificultad de medición. Muchos de los *endpoints* medidos en los estudios experimentales no son trasladables a campo. Medir el

*Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?*

nivel de concentración en sangre es un *endpoint* muy difícil de trasladar, por ejemplo. Ocurre lo mismo con el grosor de la cáscara de huevo. De la misma forma, un *endpoint* que introduce una escala tan grande como es el número de pollos por territorio, al trasladarla a un espacio reducido y confinado como es un laboratorio hace que pierda su dimensión y por tanto, su sentido. En cambio en campo ha sido algo que se ha medido mucho. Aún y todo, esta medición también cuenta con dificultades propias en un entorno natural donde la accesibilidad a los nidos puede verse condicionada. No ocurre lo mismo en los estudios llevados a cabo en los laboratorios donde es posible controlar totalmente ciertas condiciones. En muchos de estos trabajos las variables ambientales como el alimento, la luz y el agua se han visto modificadas a merced del investigador. Ejemplo de ello es el trabajo de Varian-Ramos et al. (2014) donde las aves fueron expuestas a largas horas de luz artificial con la intención de acelerar el proceso de reproducción. En otros trabajos vemos como el hecho de alimentar a los animales a su merced (*ad libitum*) hizo que las nidadas y temporada de cría se alargaran comparado a lo previamente observado en esa especie en la naturaleza (Zabala et al., 2023). Aunque este control presenta ventajas al ser una forma de poder relacionar de forma directa al mercurio con los daños causados, estas son unas condiciones no reproducibles en su totalidad en la naturaleza. Aunque las conclusiones derivadas de dichos estudios podrían estar condicionadas, son los datos extraídos de los trabajos en laboratorio los que se utilizan como guía para establecer los límites y umbrales de las concentraciones tóxicas (Heinz y Hoffman, 2003).

Otra de las dificultades que se presenta en la comparabilidad entre ambos, es el hecho de que en los estudios en los laboratorios no se esté teniendo en consideración el efecto sinérgico que puede surgir en el organismo al verse expuesto a otro tipo de estresores. La falta de comida (Zabala et al., 2021), la exposición conjunta con otros químicos, la migración (Bottini et al., 2022), el peligro constante de ser depredado, así como un aumento de las temperaturas (Hallinger y Cristol, 2011) pueden afectar y acrecentar de forma negativa el efecto que causa el mercurio en la reproducción. Según el estudio de Karasov y Meyer (2000), se concluye que en todas las especies afecta dicha covariación. En el caso de las aves migratorias se ha observado que la exposición les afecta desembocando en una mayor mortalidad. Se han realizado varios trabajos que hayan intentado conocer los efectos en conjunto con otros químicos. Ejemplo de ello son los trabajos de El-Begearmi et al. (1977 y 1982); Eskeland y Nafstad (1978) y Heinz y Hoffman (1998); entre otros.

*Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?*

Un factor también importante a tener en cuenta es el momento vital de la exposición. Aunque aún se desconozca concretamente el motivo, si esta coincide con la etapa juvenil, conlleva consecuencias en su vida adulta así como en la fase de reproducción (Paris et al., 2018). Algunos trabajos han estudiado las consecuencias en los neonatos y otros lo han hecho en juveniles de un año (Al-Fayadh et al., 1976). En cuanto a la especie estudiada, según Celik et al. (2021) las anátidas y las rapaces podrían estar más expuestas a los contaminantes en comparación con el resto de especies. En el momento en el que se empezaron a utilizar los insecticidas en Escocia las parejas reproductoras del Águila Real (*Aquila chrysaetos*) descendieron en un 43 % (Dorst, 1976). A su vez, según lo extraído de la recopilación bibliográfica, son las anátidas (*Anas platyrhynchos*) quienes parecen mostrar una mayor resistencia - o al menos no es la especie más sensible - ante el mercurio (Heinz et al., 2010a y Zhang et al., 2013), por lo que este último autor recomienda no utilizarla como referencia para otras especies al no ser representativa. Esta sería una cuestión a tener en cuenta ya que podría subestimarse el efecto del tóxico en las aves. Fuchsman et al. (2017) concluye que se deberían de utilizar valores de referencia de toxicidad por similitud de peso en aquellas especies que aún no hayan sido estudiadas o testadas. Cabe destacar que algunas especies solamente se han estudiado en los laboratorios; es el caso de *Coturnix japonica*, *Anas platyrhynchos* y *Gallus gallus domesticus*. En el caso de esta última especie los trabajos coinciden en tiempo y lugar con el envenenamiento por arroz. En cuanto a los resultados de los trabajos existen muchas disparidades en sus conclusiones. La mayoría de trabajos que indican que el mercurio no parece tener consecuencias en lo medido coinciden con las primeras décadas en las que se llevaron a cabo los estudios. Así Peakall y Lincer (1972) concluyen que el grosor de la cáscara de huevo no se ve afectado por el mercurio, Al-Fayadh y sus colaboradores (1976) no encuentran diferencias entre las aves expuestas y el grupo de control y de la misma manera, Hill y Soares (1977) destacan que no hay evidencias de que el mercurio afecte a nada. Este hecho puede explicarse con que las técnicas, usos y manejos en los estudios experimentales han mejorado mucho desde entonces. Tanto que algunas de las técnicas explicadas en los estudios ya no se realizan. Heinz et al. (2010a) y Heinz et al. (2010b), sacrificaron a todos los animales tras finalizar el experimento y Haegele et al. (1974), los asfixiaron.

Este estudio muestra las diferencias que existen entre los *endpoints* reproductivos medidos en exposición subletal a mercurio entre estudios de campo y laboratorio. Sería recomendable unificar criterios de uso entre ambos y establecer un marco común en la utilización de los *endpoints*. Una posible mejora es que todos los estudios incluyan siempre

*Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?*

más de un *endpoint* (hasta el momento no ha sido así); particularmente los de laboratorio por ser más fáciles de controlar. También en estos se podrían incluir más asiduamente las mediciones de “pollos por nido” o “pollos por pareja” por ser estos *endpoints* muy medidos en campo. Asimismo, además de que el peso es un *endpoint* muy difícil de medir en campo, conocer en qué momento concreto de su desarrollo se encuentra el animal es difícil, por lo que poder llegar a concluir si es el mercurio lo que está influyendo en su peso es también arduo. A la hora de plantear futuras investigaciones, resultaría interesante ampliar el estudio a otros grupos de seres vivos utilizando la misma metodología de trabajo, con el fin de saber si se dan también diferencias en las mediciones, y concretamente en las aves, se deberían tener en cuenta las diferencias halladas con el fin de no agravarlas.

5. Conclusiones

Tras una revisión sistemática sobre la subletalidad del mercurio en estudios en campo y laboratorio se han escogido y analizado 49 trabajos, de los cuales 16 corresponden a trabajos de campo y 33 a laboratorio. Los *endpoints* medidos en cada trabajo se han agrupado en 6 categorías genéricas y se han encontrado diferencias significativas en su frecuencia de uso tanto en campo como en laboratorio. En laboratorio los *endpoints* de la categoría 2- *Condición física* han estado sobrerrepresentados. En campo, los *endpoints* de la categoría 5- *Pollos y Mortalidad* han estado sobrerrepresentados. Una posible causa podría ser el hecho de que se ha escogido la forma de medición más sencilla para cada caso. En laboratorio las aves se encuentran accesibles y fácilmente manipulables para obtener datos como el peso, y en campo, encontrándose en libertad, la forma más sencilla de obtener información sin causarles molestias es mediante la observación directa. Esas diferencias posiblemente resulten en una capacidad reducida de trasladar y comparar resultados entre los estudios. Mientras se siga sin medir las mismas cosas difícilmente serán comparables. La principal recomendación para paliar dicha diferencia es la de consensuar la inclusión de medición de un mínimo común de *endpoints* para cada trabajo realizado.

6. Bibliografía

- Ackerman, J. T., Takekawa, J. Y., Eagles-Smith, C. A., & Iverson, S. A. (2008). Mercury contamination and effects on survival of American avocet and black-necked stilt chicks in San Francisco Bay. *Ecotoxicology*, 17(2), 103-116. <https://doi.org/10.1007/s10646-007-0164-y>
- Albers, P. H., Koterba, M. T., Rossmann, R., Link, W. A., French, J. B., Bennett, R. S., & Bauer, W. C. (2007). Effects of methylmercury on reproduction in American Kestrels. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 26(9), 1856. <https://doi.org/10.1897/06-592R.1>
- Al-Fayadh, H., Mehdi, A. W. R., Al-Soudi, Kh., Al-Khazraji, A. K., Al-Jiboori, N. A., & Al-Muraib, S. (1976). Effects of Feeding Ethyl Mercury Chloride to Chickens. *Poultry Science*, 55(2), 772-779. <https://doi.org/10.3382/ps.0550772>
- Al-Soudi, K. A., Al-Fayadh, H. A., Al-Khazraji, A. K., Mehdi, A. W. R., Al-Jiboori, N. A. J., & Al-Muraib, S. (1976). Preliminary Study of the Effects of Feeding Ethyl Mercury Chloride on Four Breeds of Chickens. *Poultry Science*, 55(5), 1913-1917. <https://doi.org/10.3382/ps.0551913>
- Amat, J. A., & Green, A. J. (2010). Waterbirds as Bioindicators of Environmental Conditions. En C. Hurford, M. Schneider, & I. Cowx (Eds.), *Biological Monitoring in Freshwater Habitats* (pp. 45-52). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9278-7_5
- Anderson, D. W., Suchanek, T. H., Eagles-Smith, C. A., & Cahill, T. M. (2008). Mercury residues and productivity in osprey and grebes from a mine-dominated ecosystem. *Ecological Applications*, 18(sp8), A227-A238. <https://doi.org/10.1890/06-1837.1>
- Anthony, R. G., Miles, A. K., Ricca, M. A., & Estes, J. A. (2007). Environmental contaminants in bald eagle eggs from the aleutian archipelago. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 26(9), 1843. <https://doi.org/10.1897/06-334R.1>
- Bakir, F., Damluji, S. F., Amin-Zaki, L., Murtadha, M., Khalidi, A., Al-Rawi, N., Tikriti, S., Dhahir, H., Clarkson, T. B., Smith, J. G., & Doherty, R. A. (1973). Methylmercury Poisoning in Iraq. *Science*, 181(4096), 230-241. <https://doi.org/10.1126/science.181.4096.230>

- Bernanke, J., Köhler, H.R. (2008). The Impact of Environmental Chemicals on Wildlife Vertebrates en Whitacre, D.M. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (Vol. 198). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-09647-6_1
- Bloom, N. S. (1992). On the Chemical Form of Mercury in Edible Fish and Marine Invertebrate Tissue. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(5), 1010-1017. <https://doi.org/10.1139/f92-113>
- Bose, R., Onishchenko, N., Edoff, K., Janson Lang, A. M., & Ceccatelli, S. (2012). Inherited Effects of Low-Dose Exposure to Methylmercury in Neural Stem Cells. *Toxicological Sciences*, 130(2), 383-390. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfs257>
- Bottini, C. L. J., Whiley, R. E., Branfireun, B. A., & MacDougall-Shackleton, S. A. (2022). Effects of methylmercury and food stress on migratory activity in song sparrows, *Melospiza melodia*. *Hormones and Behavior*, 146, 105261. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2022.105261>
- Bouton, S. N., Frederick, P. C., Spalding, M. G., & McGill, H. (1999). Effects of chronic, low concentrations of dietary methylmercury on the behavior of juvenile great egrets. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18(9), 1934-1939. <https://doi.org/10.1002/etc.5620180911>
- Brasso, R. L., & Cristol, D. A. (2008). Effects of mercury exposure on the reproductive success of tree swallows (*Tachycineta bicolor*). *Ecotoxicology*, 17(2), 133-141. <https://doi.org/10.1007/s10646-007-0163-z>
- Breech, I. (1978). La Polución en *La Vida en el Planeta Tierra*. Montaner y Simon.
- Buck, K. A., Varian-Ramos, C. W., Cristol, D. A., & Swaddle, J. P. (2016). Blood Mercury Levels of Zebra Finches Are Heritable: Implications for the Evolution of Mercury Resistance. *PLOS ONE*, 11(9), e0162440. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162440>
- Burger, J., & Gochfeld, M. (1997). Risk, Mercury Levels, and Birds: Relating Adverse Laboratory Effects to Field Biomonitoring. *Environmental Research*, 75(2), 160-172. <https://doi.org/10.1006/enrs.1997.3778>
- Burgess, N. M., & Meyer, M. W. (2008). Methylmercury exposure associated with reduced productivity in common loons. *Ecotoxicology*, 17(2), 83-91. <https://doi.org/10.1007/s10646-007-0167-8>
- Celik, E., Durmuş, A., Adizel, Ö., & Uyar, H. N. (2021). A bibliometric analysis: what do we know about metals(oids) accumulation in wild birds? *Environmental Science and Pollution Research*, 28(8), 10302-10334. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12344-8>

- Chin, S. Y., Hopkins, W. A., & Cristol, D. A. (2017). Mercury alters initiation and construction of nests by zebra finches, but not incubation or provisioning behaviors. *Ecotoxicology*, 26(9), 1271-1283. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1852-x>
- Cifuentes, P., González, S. y Ramos, Á. *Diccionario de la naturaleza. Hombre, Ecología, Paisaje*. Espasa-Calpe.
- Clarkson, T. W., & Magos, L. (2006). The Toxicology of Mercury and Its Chemical Compounds. *Critical Reviews in Toxicology*, 36(8), 609-62. <https://ehu.idm.oclc.org/login?url=https://www.proquest.com/scholarly-journals/toxicology-mercury-chemical-compounds/docview/218899817/se-2>
- Cook, D. J., Sackett, D. L., & Spitzer, W. O. (1995). Methodologic guidelines for systematic reviews of randomized control trials in health care from the Potsdam Consultation on Meta-Analysis. *Journal of Clinical Epidemiology*, 48(1), 167-171. [https://doi.org/10.1016/0895-4356\(94\)00172-m](https://doi.org/10.1016/0895-4356(94)00172-m)
- Demeneix, B. (2014). *Losing our minds : how environmental pollution impairs human intelligence and mental health* (Ser. Oxford series in behavioral neuroendocrinology). Oxford University Press.
- DesGranges, J.-L., Rodrigue, J., Tardif, B., & Laperle, M. (1998). Mercury Accumulation and Biomagnification in Ospreys (*Pandion haliaetus*) in the James Bay and Hudson Bay Regions of Québec. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 35(2), 330-341. <https://doi.org/10.1007/s002449900384>
- Dorst, J. (1976). *Las aves en su medio ambiente* (Ser. Historia natural destino, 14). Destino.
- El-Begearmi, M. M., Sunde, M. L., & Ganther, H. E. (1977). A Mutual Protective Effect of Mercury and Selenium in Japanese Quail. *Poultry Science*, 56(1), 313-322. <https://doi.org/10.3382/ps.0560313>
- El-Begearmi, M. M., Ganther, H. E., & Sunde, M. L. (1982). Dietary interaction between methylmercury, selenium, arsenic, and sulfur amino acids in Japanese quail. *Poultry Science*, 61(2), 272-279. <https://doi.org/10.3382/ps.0610272>
- Eskeland, B., & Nafstad, I. (1978). The modifying effect of multiple generation selection and dietary cadmium on methyl mercury toxicity in Japanese quail. *Archives of Toxicology*, 40(4), 303-314. <https://doi.org/10.1007/BF00310336>
- Fimreite, N. (1970). Effects of methyl mercury treated feed on the mortality and growth of leghorn cockerels. *Canadian Journal of Animal Science*, 50(2), 387-389. <https://doi.org/10.4141/cjas70-058>

Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?

- Fimreite, N. (1971). Effects of dietary methylmercury on ring necked pheasants. *Canadian Wildlife Service. Occasional paper* (9).
https://publications.gc.ca/collections/collection_2018/eccc/CW69-1-9-eng.pdf
- Finley, M. T., & Stendell, R. C. (1978). Survival and reproductive success of black ducks fed methyl mercury. *Environmental pollution*, 16(1), 51-64.
[https://doi.org/10.1016/0013-9327\(78\)90137-4](https://doi.org/10.1016/0013-9327(78)90137-4)
- Frederick, P., & Jayasena, N. (2011). Altered pairing behaviour and reproductive success in white ibises exposed to environmentally relevant concentrations of methylmercury. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1713), 1851-1857.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2010.2189>
- Fuchsman, P. C., Brown, L. E., Henning, M. H., Bock, M. J., & Magar, V. S. (2017). Toxicity reference values for methylmercury effects on avian reproduction: Critical review and analysis: Methylmercury effects on birds. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36(2), 294-319. <https://doi.org/10.1002/etc.3606f>
- Gilbert, S. G., & Grant-Webster, K. S. (1995). Neurobehavioral Effects of Developmental Methylmercury Exposure. *Environmental Health Perspectives*, 103, 135–142.
<https://doi.org/10.2307/3432363>
- Grames, E. M., Montgomery, G. A., Youngflesh, C., Tingley, M. W., & Elphick, C. S. (2023). The effect of insect food availability on songbird reproductive success and chick body condition: Evidence from a systematic review and meta-analysis. *Ecology Letters*, 26(4), 658–673. <https://doi.org/10.1111/ele.14178>
- Haegele, M. A., Tucker, R. K., & Hudson, R. H. (1974). Effects of dietary mercury and lead on eggshell thickness in mallards. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 11(1), 5-11. <https://doi.org/10.1007/BF01685020>
- Hallinger, K. K., & Cristol, D. A. (2011). The role of weather in mediating the effect of mercury exposure on reproductive success in tree swallows. *Ecotoxicology*, 20(6), 1368-1377.
<https://doi.org/10.1007/s10646-011-0694-1>
- Hedde, C., Elliott, J. E., Brown, T. M., Eng, M. L., Perkins, M., Basu, N., & Williams, T. D. (2020). Continuous exposure to mercury during embryogenesis and chick development affects later survival and reproduction of zebra finch (*Taeniopygia guttata*). *Ecotoxicology*, 29(8), 1117-1127.
<https://doi.org/10.1007/s10646-019-02074-6>
- Heinz, G. (1974). Effects of low dietary levels of methyl mercury on mallard reproduction. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 11(4), 386-392.
<https://doi.org/10.1007/BF01684947>

- Heinz, G. (1975). Effects of methylmercury on approach and avoidance behavior of mallard ducklings. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 13(5), 554-564. <https://doi.org/10.1007/BF01685179>
- Heinz, G. H. (1979). Methylmercury: Reproductive and behavioral effects on three generations of mallard ducks. *The Journal of Wildlife Management*, 43(2), 394. <https://doi.org/10.2307/3800348>
- Heinz, G. H., & Hoffman, D. J. (1998). Methylmercury chloride and selenomethionine interactions on health and reproduction in mallards. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 17(2), 139-145. <https://doi.org/10.1002/etc.5620170202>
- Heinz, G. H., & Hoffman, D. J. (2003). Embryotoxic Thresholds of Mercury: Estimates from Individual Mallard Eggs. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 44(2), 257-264. <https://doi.org/10.1007/s00244-002-2021-6>
- Heinz, G. H., & Hoffman, D. J. (2004). Mercury accumulation and loss in mallard eggs. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23(1), 222. <https://doi.org/10.1897/03-111>
- Heinz, G. H., Hoffman, D. J., Klimstra, J. D., & Stebbins, K. R. (2010a). Enhanced reproduction in mallards fed a low level of methylmercury: An apparent case of hormesis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(3), 650-653. <https://doi.org/10.1002/etc.64>
- Heinz, G. H., Hoffman, D. J., Klimstra, J. D., & Stebbins, K. R. (2010b). Reproduction in mallards exposed to dietary concentrations of methylmercury. *Ecotoxicology*, 19(5), 977-982. <https://doi.org/10.1007/s10646-010-0479-y>
- Henny, C. J., Hill, E. F., Hoffman, D. J., Spalding, M. G., & Grove, R. A. (2002). *Nineteenth Century Mercury: Hazard to Wading Birds and Cormorants of the Carson River, Nevada*.
- Henny, C. J., Kaiser, J. L., Packard, H. A., Grove, R. A., & Taft, M. R. (2005). Assessing Mercury Exposure and Effects to American Dippers in Headwater Streams near Mining Sites. *Ecotoxicology*, 14(7), 709-725. <https://doi.org/10.1007/s10646-005-0023-7>
- Herring, G., Gawlik, D. E., & Rumbold, D. G. (2009). Feather mercury concentrations and physiological condition of great egret and white ibis nestlings in the Florida Everglades. *Science of The Total Environment*, 407(8), 2641-2649. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.043>
- Hill, E. F., & Shaffner, C. S. (1976). Sexual Maturation and Productivity of Japanese Quail Fed Graded Concentrations of Mercuric Chloride. *Poultry Science*, 55(4), 1449-1459. <https://doi.org/10.3382/ps.0551449>

- Hill, E. F., & Soares, J. H. (1977). Reproductivity of Japanese Quail Fed Mercuric Chloride in the Absence of Vitamin D. *Poultry Science*, 56(2), 710-712. <https://doi.org/10.3382/ps.0560710>
- Hill, E. F., Henny, C. J., & Grove, R. A. (2008). Mercury and drought along the lower Carson River, Nevada: II. Snowy egret and black-crowned night-heron reproduction on Lahontan Reservoir, 1997–2006. *Ecotoxicology*, 17(2), 117-131. <https://doi.org/10.1007/s10646-007-0180-y>
- Hylander, L. D., & Meili, M. (2003). 500 years of mercury production: global annual inventory by region until 2000 and associated emissions. *The Science of the total environment*, 304(1-3), 13–27. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00553-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00553-3)
- Jackson, A. C. (2018). Chronic Neurological Disease Due to Methylmercury Poisoning. *Canadian Journal of Neurological Sciences / Journal Canadien Des Sciences Neurologiques*, 45(6), 620-623. <https://doi.org/10.1017/cjn.2018.323>
- Jackson, A. K., Evers, D. C., Etterson, M. A., Condon, A. M., Folsom, S. B., Detweiler, J., Schmerfeld, J., & Cristol, D. A. (2011). Mercury exposure affects the reproductive success of a free-living terrestrial songbird, the Carolina Wren (*Thryothorus ludovicianus*). *The Auk*, 128(4), 759-769. <https://doi.org/10.1525/auk.2011.11106>
- Kalisińska, E. (Ed.). (2019). *Mammals and birds as bioindicators of trace element contaminations in terrestrial environments : an ecotoxicological assessment of the northern hemisphere*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00121-6>
- King, K. A., Custer, T. W., & Quinn, J. S. (1991). Effects of mercury, selenium, and organochlorine contaminants on reproduction of Forster's terns and black skimmers nesting in a contaminated Texas Bay. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 20(1), 32-40. <https://doi.org/10.1007/BF01065325>
- Karasov, W. H., & Meyer, M. (2000). Testing the role of contaminants in depressing avian numbers. *Revista Chilena de Historia Natural*. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2000000300009>
- Kitowski, I., Kowalski, R., Komosa, A., Lechowski, J., Grzywaczewski, G., Scibior, R., Pitucha, G., & Chrapowicki, M. (2012). Diversity of total mercury concentrations in kidneys of birds from Eastern Poland. *Ekologia*, 31(01), 12-21. https://doi.org/10.4149/ekol_2012_01_12
- Labocha, M. K., & Hayes, J. P. (2012). Morphometric indices of body condition in birds: a review. *Journal of Ornithology*, 153(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s10336-011-0706-1>

Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?

- Lennett, D., & Gutierrez, R. (2015). *Convenio de Minamata sobre el mercurio*.
<https://www.nrdc.org/sites/default/files/minamata-convention-on-mercury-manual-SP.pdf>
- Longcore, J. R., Haines, T. A., & Halteman, W. A. (2007). Mercury in Tree Swallow Food, Eggs, Bodies, and Feathers at Acadia National Park, Maine, and an EPA Superfund Site, Ayer, Massachusetts. *Environmental Monitoring and Assessment*, 126(1-3), 129-143. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9326-2>
- León-Figueroa, D. A. (2022). Metodología de investigación Estadística Aplicada e instrumentos en Neuropsicología - Carlos Daniel. *usmpe*.
https://www.academia.edu/74069059/Metodolog%C3%ADa_de_investigaci%C3%B3n_En Estad%C3%ADstica_Aplicada_e_instrumentos_en_Neuropsicolog%C3%ADa_Carlos_Daniel
- Lundholm, C. (1995). Effects of methyl mercury at different dose regimes on eggshell formation and some biochemical characteristics of the eggshell gland mucosa of the domestic fowl. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*, 110(1), 23-28.
[https://doi.org/10.1016/0742-8413\(94\)00081-k](https://doi.org/10.1016/0742-8413(94)00081-k)
- Manlik, O. (2019). The Importance of Reproduction for the Conservation of Slow-Growing Animal Populations. En P. Comizzoli, J. L. Brown, & W. V. Holt (Eds.), *Reproductive Sciences in Animal Conservation* (Vol. 1200, pp. 13-39). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23633-5_2
- March, B. E., Soong, R., Bilinski, E., & Jonas, R. E. E. (1974). Effects on Chickens of Chronic Exposure to Mercury at Low Levels Through Dietary Fish Meal. *Poultry Science*, 53(6), 2175-2181. <https://doi.org/10.3382/ps.0532175>
- Minteer, B. A., & Collins, J. P. (2008). From Environmental to Ecological Ethics: Toward a Practical Ethics for Ecologists and Conservationists. *Science and Engineering Ethics*, 14(4), 483-501. <https://doi.org/10.1007/s11948-008-9087-0>
- Morales-Caselles, C., Lewis, C., Riba, I., DeValls, T. Á., & Galloway, T. (2009). A multibiomarker approach using the polychaete *Arenicola marina* to assess oil-contaminated sediments. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(6), 618-629. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0139-z>
- Mugüerza, P. (2019). Manual de traducción inglés-español de protocolos de ensayos clínicos. 2ª edición. *Fundación Dr. Antonio Esteve*.
https://www.esteve.org/capitulos/manual-de-traduccion-ingles-espanol-de-protocolos-de-ensayos-clinicos-2a-edicion/?doing_wp_cron=1684591112.012989044189453125

Éxito reproductor de aves en exposición subletal a mercurio en campo y laboratorio.
¿Estamos mirando lo mismo?

0000

- Neu, C. W., Byers, C. R., & Peek, J. M. (1974). A Technique for Analysis of Utilization-Availability Data. *The Journal of Wildlife Management*, 38(3), 541-545. <https://10.2307/3800887>
- Newtoff, K. N., & Emslie, S. D. (2017). Mercury Exposure and Diet in Brown Pelicans (*Pelecanus occidentalis*) in North Carolina, USA. *Waterbirds*, 40(1), 50-57. <https://doi.org/10.1675/063.040.0107>
- Paris, O. J., Swaddle, J. P., & Cristol, D. A. (2018). Exposure to Dietary Methyl-Mercury Solely during Embryonic and Juvenile Development Halves Subsequent Reproductive Success in Adult Zebra Finches. *Environmental Science & Technology*, 52(5), 3117-3124. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04752>
- Peakall, D. B., & Lincer, J. L. (1972). Methyl mercury: Its effect on eggshell thickness. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 8(2), 89-90. <https://doi.org/10.1007/BF01684512>
- Price T.M.L. (1984). Did the Mad Hatter have mercury poisoning? *BMJ*, 288(6413), 324-324. <https://doi.org/10.1136/bmj.288.6413.324-a>
- Provencher, J. F., Forbes, M. R., Hennin, H. L., Love, O. P., Braune, B. M., Mallory, M. L., & Gilchrist, H. G. (2016). Implications of mercury and lead concentrations on breeding physiology and phenology in an Arctic bird. *Environmental Pollution*, 218, 1014-1022. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.052>
- Scott, M. L., Zimmermann, J. R., Marinsky, S., Mullenhoff, P. A., Rumsey, G. L., & Rice, R. W. (1975). Effects of PCBs, DDT, and Mercury Compounds upon Egg Production, Hatchability and Shell Quality in Chickens and Japanese Quail. *Poultry Science*, 54(2), 350-368. <https://doi.org/10.3382/ps.0540350>
- Sepúlveda, M. S., Jr., G. E. W., Frederick, P. C., & Spalding, M. G. (1999). Effects of Mercury on Health and First-Year Survival of Free-Ranging Great Egrets (*Ardea albus*) from Southern Florida. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 37(3), 369-376. <https://doi.org/10.1007/s002449900527>
- Spann, J. W., Heath, R. G., Kreitzer, J. F., & Locke, L. N. (1972). Ethyl Mercury *p*-Toluene Sulfonanilide: Lethal and Reproductive Effects on Pheasants. *Science*, 175(4019), 328-331. <https://doi.org/10.1126/science.175.4019.328>
- Starke, L., Starke, L., Nierenberg, D., & Worldwatch Institute. (2006). *La situación del mundo 2006 : informe anual del worldwatch institute sobre progreso hacia una sociedad*

sostenible (1a ed.). Icaria Editorial.

- Varian-Ramos, C. W., Swaddle, J. P., & Cristol, D. A. (2013). Familial differences in the effects of mercury on reproduction in zebra finches. *Environmental Pollution*, 182, 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.07.044>
- Varian-Ramos, C. W., Swaddle, J. P., & Cristol, D. A. (2014). Mercury Reduces Avian Reproductive Success and Imposes Selection: An Experimental Study with Adult- or Lifetime-Exposure in Zebra Finch. *PLOS ONE*, 9(4), e95674. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095674>
- Weech, S. A., Scheuhammer, A. M., & Elliott, J. E. (2006). Mercury exposure and reproduction in fish-eating breeding in the Pinchi Lake region, British Columbia, Canada. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(5), 1433. <https://doi.org/10.1897/05-181R.1>
- White, D.H., Mitchell, C.A. y Hill, E.F. Parathion alters incubation behavior of laughing gulls. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 31, 93–97 (1983). <https://doi.org/10.1007/BF01608772>
- Wright, R. W., Brand, R. A., Dunn, W., & Spindler, K. P. (2007). How to write a systematic review. *Clinical orthopaedics and related research*, 455, 23–29. <https://doi.org/10.1097/BLO.0b013e31802c9098>
- Zabala, J., Rodríguez-Jorquera, I., Trexler, J. C., Orzechowski, S., Garner, L., & Frederick, P. (2021). Accounting for food availability reveals contaminant-induced breeding impairment, food-modulated contaminant effects, and endpoint-specificity of exposure indicators in free ranging avian populations. *Science of The Total Environment*, 791, 148322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148322>
- Zabala, J., Trexler, J. C., Jayasena, N., & Frederick, P. (2023). Timing and magnitude of net methylmercury effects on waterbird reproductive output are dependent on food availability. *Science of The Total Environment*, 858, 159706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159706>
- Zhang, R., Wu, F., Li, H., Guo, G., Feng, C., Giesy, J. P., & Chang, H. (2013). Toxicity reference values and tissue residue criteria for protecting avian wildlife exposed to methylmercury in China. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 223, 53–80. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5577-6_3