



## **NIVELES DE METALES Y METALOIDES EN CABALLO. VALORES EN PELO Y SANGRE**

**Celia MOLINERO RINCÓN**

Unidad de Toxicología. Facultad de Veterinaria.  
Universidad de Extremadura (España)  
cmolinero.vet@gmail.com

**Ángel PORTILLO MORENO**

Unidad de Toxicología. Facultad de Veterinaria.  
Universidad de Extremadura (España)  
portilloan@unex.es

**David FERNÁNDEZ CASADO**

Unidad de Toxicología. Facultad de Veterinaria.  
Universidad de Extremadura (España)  
davidfc@unex.es

**Javier GARCÍA MUÑOZ**

Unidad de Toxicología. Facultad de Veterinaria.  
Universidad de Extremadura (España)  
jgarcialam@alumnos.unex.es

**Elsa RODRÍGUEZ SOMOZA**

Unidad de Toxicología. Facultad de Veterinaria.  
Universidad de Extremadura (España)  
elsars@unex.es

**María Salomé MARTÍNEZ MORCILLO**

Unidad de Toxicología. Facultad de Veterinaria.  
Universidad de Extremadura (España)  
martinezmorcillo@unex.es

**Francisco SOLER RODRÍGUEZ**

Unidad de Toxicología. Facultad de Veterinaria.  
Universidad de Extremadura (España)  
solertox@unex.es

**María Prado MÍGUEZ SANTIYÁN**

Unidad de Toxicología. Facultad de Veterinaria.  
Universidad de Extremadura (España)  
mpmiguez@unex.es

**Marcos PÉREZ LÓPEZ**

Unidad de Toxicología. Facultad de Veterinaria.  
Universidad de Extremadura (España)  
marcospl@unex.es

Recibido: 18 de marzo del 2026

Enviado a evaluar: 14 de abril del 2026

Aceptado: 3 de julio del 2026

## RESUMEN

La necesidad de evaluar la contaminación ambiental requiere medir metales y metaloides (Zn, As, Cd, Hg y Pb) en organismos bioindicadores. Se analizaron niveles en pelo y sangre de 34 caballos de la comarca de Los Pedroches (Córdoba, España), considerando sexo y edad, mediante ICP-MS. Se analizó pelo y sangre, pero en sangre As, Cd y Hg no superaron los límites de cuantificación. En pelo, los valores más altos fueron de Zn (127,6 mg/kg) y As (125,0 mg/kg); en sangre, de Zn (2684 µg/L) y Pb (33,3 µg/L). Se observó un alto porcentaje de muestras sanguíneas por debajo del límite de detección para As y Hg (79,5 %) y para Cd (100 %). En pelo, se hallaron correlaciones negativas entre Zn-Cd y Zn-Pb, y positiva entre Cd-Pb ( $p < 0,001$ ). No hubo diferencias significativas por sexo o edad. Los caballos muestran potencial como bioindicadores, aunque se requieren más estudios.

**Palabras clave:** Bioindicador, contaminación, équidos, elementos inorgánicos.

## METAL AND METALLOID LEVELS IN HORSE. VALUES IN HAIR AND BLOOD

### ABSTRACT

Assessing environmental pollution requires the determination of metals and metalloids (Zn, As, Cd, Hg, and Pb) in bioindicator organisms. In this study, their levels were analyzed in hair and blood samples from 34 horses from the Los Pedroches region (Córdoba, Spain), considering sex and age, using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Both hair and blood were analyzed; however, in blood, As, Cd, and Hg did not exceed the limits of quantification. In hair, the highest concentrations corresponded to Zn (127.6 mg/kg) and As (125.0 mg/kg), whereas in blood they corresponded to Zn (2684 µg/L) and Pb (33.3 µg/L). A high percentage of blood samples were below the detection limit for As and Hg (79.5%) and for Cd (100%). In hair, negative correlations were observed between Zn-Cd and Zn-Pb, and a positive correlation between Cd-Pb ( $p < 0.001$ ). No significant differences were found according to sex or age. Horses show potential as bioindicators of inorganic contamination, although further studies are required.

**Keywords:** Bioindicator, pollution, equids, inorganic elements.

## NIVEAUX DE METAUX ET DE METALLOÏDES CHEZ LE CHEVAL. VALEURS DANS LES POILS ET LE SANG

### RÉSUMÉ

L'évaluation de la contamination environnementale nécessite la détermination des métaux et métalloïdes (Zn, As, Cd, Hg et Pb) chez des organismes bioindicateurs. Dans cette étude, leurs niveaux ont été analysés dans des échantillons de poils et de sang de 34 chevaux provenant de la région de Los Pedroches (Cordoue, Espagne), en tenant compte du sexe et de l'âge, à l'aide de la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS). Les poils et le sang ont été analysés ; toutefois, dans le sang, As, Cd et Hg n'ont pas dépassé les limites de quantification. Dans les poils, les concentrations les plus élevées correspondaient au Zn (127,6 mg/kg) et à l'As (125,0 mg/kg), tandis que dans le sang elles correspondaient au Zn (2684 µg/L) et au Pb (33,3 µg/L). Un pourcentage élevé d'échantillons sanguins était inférieur à la limite de détection pour l'As et le Hg

(79,5 %) et pour le Cd (100 %). Dans les poils, des corrélations négatives ont été observées entre Zn-Cd et Zn-Pb, ainsi qu'une corrélation positive entre Cd-Pb ( $p < 0,001$ ). Aucune différence significative n'a été observée selon le sexe ou l'âge. Les chevaux présentent un potentiel en tant que bioindicateurs de la contamination par des éléments inorganiques, bien que des études supplémentaires soient nécessaires.

**Mots-clés:** Bioindicateur, contamination, équidés, éléments inorganiques.

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de los ecosistemas naturales es una realidad que encuentra su origen tanto en fuentes de tipo antropogénico como naturales (aunque sin duda las más relevantes son las derivadas de la acción humana), explicando que actualmente aumente la necesidad de conocer cómo se lleva a cabo la introducción en el ambiente de agentes contaminantes en cantidades tales que supongan un riesgo para los seres vivos (Panebianco y Cáceres-Sáez, 2022).

Uno de los grupos de contaminantes más relevantes es el de los metales y metaloides, elementos inorgánicos altamente persistentes, que no pueden ser creados o destruidos ni mediante procesos biológicos ni por la acción mecánica humana, sólo transformados mediante reacciones químicas (Reyes et al., 2016). Esto último se relaciona con la rápida bioacumulación que presentan en los organismos vivos, lo que, unido a la inherente toxicidad de muchos de ellos, y a su poca capacidad de excreción una vez incorporados en la biocenosis (Rosas, 2005), desencadena que sus efectos tóxicos sean muy relevantes a largo plazo.

Para poder hacer una aproximación al grado de contaminación ambiental que existe por metales y metaloides en un ecosistema, es necesario encontrar bioindicadores fiables que aporten datos significativos para evaluar el hábitat en el que se encuentran (Parra, 2014) e indiquen la repercusión final que suponen estos niveles de contaminación para el ser humano. La elección de distintas especies animales dentro de estos programas de biomonitorización se basa en determinadas características que permiten extrapolar los resultados obtenidos al ámbito de la salud humana y/o ambiental. Además, según la posición ocupada por esa especie en la cadena trófica, será posible evidenciar distintos grados de biomagnificación (Drouillard, 2008). Dentro de este campo, una línea interesante de investigación es el empleo de los équidos domésticos para los programas de biomonitorización de contaminantes inorgánicos en el medio (Nava et al., 2024). Considerando que estos animales son mamíferos perisodáctilos herbívoros, los datos de ellos obtenidos aportarían otro punto de análisis sobre la acumulación en la cadena trófica terrestre de metales pesados. Además, como su vida en general está asociada a los asentamientos humanos, podría ser muy útiles para evaluar el grado de contaminación de estas zonas próximas a la población humana y el medioambiente circundante.

Dentro de los factores endógenos a considerar en un estudio de biomonitorización con una cierta especie animal, además del tejido que sea

analizado, destacarían principalmente dos: el relativo a la edad (el tiempo de exposición de los animales debería influir directamente en la bioacumulación que presentan respecto a los compuestos analizados ) y al sexo (la influencia hormonal que presenta cada animal en cada etapa de desarrollo podría condicionar los mecanismos de toxicocinética) (Cygan-Szczegieliński y Stasiak, 2022a). Y es también necesario considerar la importancia de emplear muestras que no supongan el sacrificio del animal a estudiar, como son el pelo y la sangre. En el caso del pelo, la deposición de metales en este tejido es una forma de excreción del organismo, al menos en el caso de los compuestos más tóxicos (Burger et al., 1994). Además, muchos de estos compuestos presentan una gran afinidad por el grupo sulfhidrilo, siendo el grupo azufre uno de los componentes que conforman la capa externa de la estructura del pelo, reteniendo los metales dentro de la estructura pilosa (García-Muñoz et al., 2023). Esto tiene lugar porque el folículo piloso se encuentra en contacto estrecho con el torrente sanguíneo, reflejando entonces los niveles de metales que han estado circulando por sangre y se han depositado en la estructura del pelo a lo largo de su crecimiento (Hermoso de Mendoza et al., 2011), informando de un periodo prolongado de tiempo previo. Por otra parte, la sangre puede reflejar exposiciones relativamente recientes, en función de la vida media en sangre de cada metal estudiado, pudiendo ser además un indicador precoz de intoxicación de forma individual en el animal (Combariza, 2009).

Con todo ello, el objetivo fundamental que se ha planteado con la realización del presente trabajo se centra en la determinación de los niveles de diversos elementos inorgánicos (Zn, As, Cd, Hg y Pb) en pelo y sangre de caballo, determinando la influencia de ciertas variables endógenas (edad y sexo) sobre la bioacumulación de los elementos inorgánicos antes indicados.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

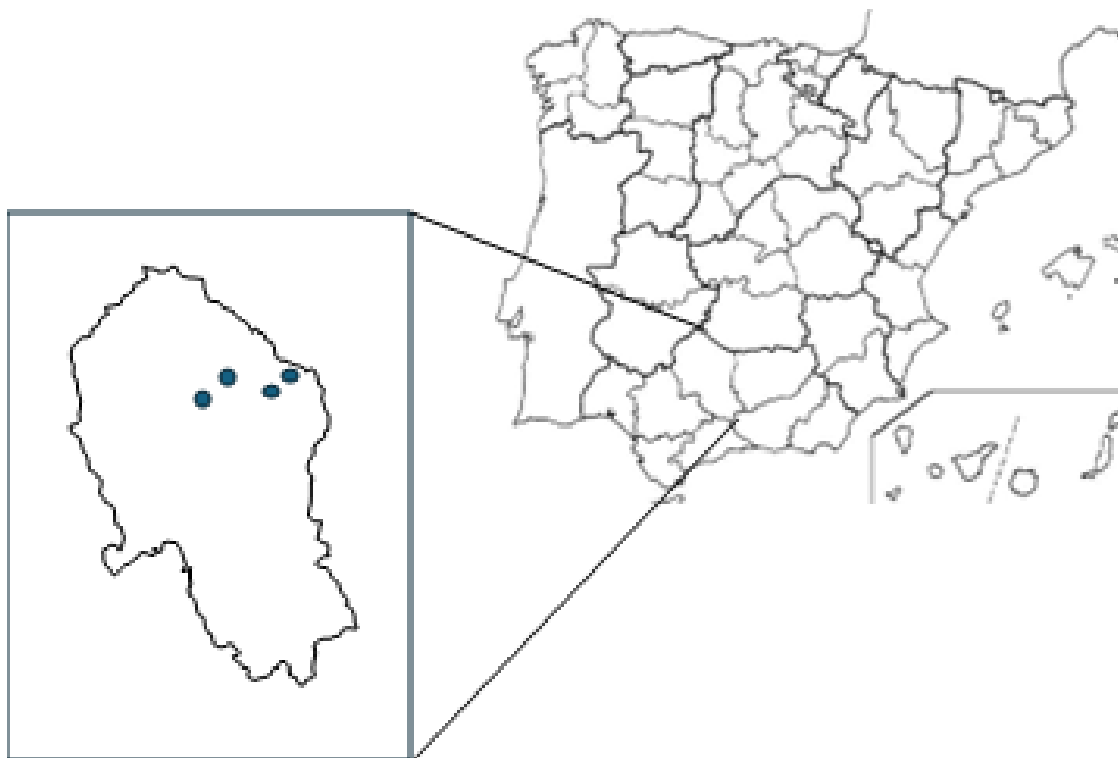
### 2.1. MUESTRAS BIOLÓGICAS

Se realizó un análisis cuantitativo de la presencia de Zn, As, Cd, Hg y Pb en una población de 34 ejemplares de caballos (*Equus ferus caballus*) procedentes de distintas explotaciones de la comarca de los Pedroches (Córdoba, España), en torno a los pueblos principalmente de Villanueva de Córdoba, Obejo, Cardeña y Azuel, mostrados en la **Figura 1**. Zonas escogidas por la abundancia de población equina en la zona y la facilidad de obtener muestras de estos animales. La figura de localización se elaboró con fines ilustrativos a partir de esquemas cartográficos generales.

Se tomó una muestra no destructivas de sangre (volumen de 1-2 ml) y otra de pelo (procedente de la zona craneolateral del costillar, aproximadamente 10 g), a cada uno de los ejemplares muestreados, en total 34 muestras de sangre y 34 muestras de pelo entre los meses de marzo-julio de 2024. El grupo muestral (escogido parcialmente al azar, en función de la disponibilidad mostrada por los propietarios) estaba constituido por 18 hembras y 16 machos. Dentro de esta población, se contó con 18 animales mayores de 4 años y 16 de ellos menores o jóvenes,

ya que a partir de los cuatro años se consideran animales adultos. Los individuos de menor edad contaban con 20 días y los más longevos del estudio contaban con 21 años.

Figura 1. Distribución de las cuatro localidades de la provincia de Córdoba donde se ha efectuado el muestreo, de izquierda a derecha: Obejo, Villanueva de Córdoba, Cardeña y Azuél.



Fuente: Elaboración propia.

Las muestras de sangre se tomaron en tubos de sangre con heparina, conservándose a una temperatura media de  $-18^{\circ}\text{C}$  desde la toma hasta su envío al laboratorio. Las muestras de pelo se tomaron mediante recorte con maquinilla eléctrica de pelo, y se almacenaron en bolsas de plástico individuales, a temperatura ambiente, para ser remitidas al laboratorio ya indicado.

### 3. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Una vez en el laboratorio, se emplearon en todo momento herramientas de procesado de plástico y guantes para la manipulación de las muestras, con el fin de evitar una posible contaminación posterior con metales que pudiera alterar los resultados. Además, los coladores de lavado empleados se limpiaban con acetona y agua destilada entre las diferentes muestras para evitar la contaminación entre éstas, recurriéndose además a bandejas y bolsas de plástico exclusivas para cada animal.

Las muestras de sangre desde el laboratorio de la Unidad de Toxicología, fueron transferidas a nuevos tubos con heparina para su posterior envío al laboratorio de análisis. Por su parte, en el caso de los pelos, tras el pesaje de las muestras en bandejas de plástico, se sometieron a tres lavados

sucesivos con agua corriente, agua destilada y acetona, utilizando un mezclador (IKA® TRAYSTER digital) en ciclos de 5 minutos, para eliminar la contaminación superficial, que pudieran desvirtuar el contenido final cuantificado, al ser relevante ecotoxicológicamente solamente la fracción interna de metales (García-Muñoz et al., 2023). Posteriormente se dejaron secar las muestras en la estufa durante 24 h a 60 °C, tras lo cual se volvieron a pesar (con el fin de obtener el peso seco final), para después empaquetarlas en bolsas de plástico.

### **3.1. TÉCNICA ANALÍTICA: ICP-MS**

El laboratorio que realizó la cuantificación de los metales pesados en ambos tipos de muestras fue el laboratorio de Análisis Elemental y Molecular del Servicio de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Extremadura (SAIUEX, acreditado por ISO 9001:2008), mediante la técnica ICP-MS, equipado con un automuestreador (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA), siguiendo el protocolo previamente optimizado para muestras procedentes de animales salvajes (Nardiello et al., 2019). Esta técnica presenta una capacidad de detección multielemental elevada, así como una muy buena sensibilidad (Fernández-Turiel et al., 2000). Además, ofrece límites de detección (LD) muy bajos de trazas y ultratrazas (<3.00 µg/Kg en pelo, µg/L en sangre), llegando a cuantificar en partes por billón (Thomas, 2008).

Las muestras fueron digeridas mediante un digestor de microondas automatizado (Milestone Ultrawave 1), en un programa a 200 °C y 120 bar, durante 15 minutos. Las soluciones obtenidas se diluyeron posteriormente a 25 ml con agua bidestilada, estando ya preparadas para el análisis directo.

Todas las muestras se analizaron en lotes que incluían blancos (agua destilada ultrapura) y estándares de calibración iniciales. Se utilizó una muestra certificada de hígado bovino liofilizado como material de referencia para el control de calidad del procedimiento analítico (BCR®, ref 185R, Oficina Comunitaria de Referencia, UE). Los rendimientos de recuperación fueron siempre superiores al 84% para los elementos considerados, y los coeficientes de variación fueron siempre inferiores al 12%.

### **3.2. ESTUDIO ESTADÍSTICO**

Se hizo uso del programa GraphPad Prism en su versión 10.2.1. Se ejecutó un análisis de los principales estadísticos descriptivos de los valores cuantificados para los metales pesados estudiados en sangre y pelo (media y la mediana, el error y la desviación estándar, el máximo, el mínimo, el rango y los percentiles 25 % y 75 %). Se determinó si los datos obtenidos seguían una distribución normal, para lo cual se utilizaron las pruebas de D'Agostino-Pearson, Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov, las cuales mostraron que la distribución de los datos no se encontraba dentro de la normalidad. Una vez confirmado este aspecto, se hizo uso de un test no paramétrico t-test para realizar las comparaciones por grupo, utilizando la prueba U de Mann-Whitney.

Se realizó un estudio de las correlaciones mediante el test de Spearman para evaluar si el grado de asociación lineal de cada binomio era estadísticamente significativo. Los resultados se consideraron estadísticamente significativos a partir de un p-valor < 0.05.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. VALORES GLOBALES

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en el presente estudio en lo que respecta a la cuantificación del Zn, As, Cd, Hg y Pb en las muestras de pelo y sangre de caballo. En la **tabla 1** adjunta se muestran los principales estadísticos descriptivos de las distintas variables cuantificadas en el presente estudio, de forma global, sin considerar los factores edad o sexo. En este estudio global es importante destacar el número de muestras dentro del total que se situaron por debajo del límite de detección, para mostrar la representatividad real de los valores cuantificados. Así, el extremo lo constituiría la cuantificación de Cd en sangre, donde el total de las muestras estuvieron por debajo de ese límite de detección. A continuación, destacarían las mediciones de As y Hg en sangre, en cuyo caso para ambas el número de muestras por debajo de este LD fue de 27 sobre un total de 34 (79.5 %) e indicando que tampoco los valores cuantificados para estas dos variables deberían ser considerados para futuros estudios de biomonitorización. También destaca que para el Cd en pelo el número de muestras por debajo del LD fue de 11, constituyendo un 32.3 % del total de las muestras. En este caso, el menor porcentaje permitiría emplear estos datos para futuros estudios, como así se hará en el presente trabajo, si bien, es indudable, que lo conveniente sería ampliar el número de ejemplares de trabajo para confirmar o no esta posible utilidad. Las dos últimas variables donde es posible encontrar muestras por debajo del LD fueron las relativas a los niveles de Hg en pelo (6 muestras por debajo del LD: 17.6 %) y Pb en sangre (2 muestras, 5.9 % sobre el total), permitiendo el estudio posterior estadístico y ecotoxicológico sin problema alguno de ambas variables. El extremo contrario lo constituyeron por tanto las variables representadas por los niveles de Zn en pelo y sangre, As en pelo y Pb en pelo, donde los elementos inorgánicos fueron cuantificados en el total de las muestras analizadas.

En cuanto a los valores obtenidos, resaltan en primer lugar las medias más elevadas correspondientes al Zn en sangre (2684 µg/l), seguidas por el Pb en pelo, con un valor medio de concentración de 259.4 µg/kg. También destacan los niveles medios de Zn en pelo, con un valor obtenido de 127.6 mg/kg, seguido con el As en pelo (125 µg/kg) y el Pb en sangre (33.3 µg/l). En el extremo contrario, en las medias más bajas, una vez excluido el ya indicado Cd en sangre, se encontrarían el Hg y en As en sangre, con unos valores medios de 3.226 y 3.945 µg/l, respectivamente.

Tabla 1. Principales estadísticos descriptivos de los niveles de elementos inorgánicos cuantificados en pelo y sangre de caballo.

|                            | Zn<br>pelo | Zn<br>sangre | As<br>pelo | As<br>sangre | Cd<br>pelo | Cd<br>sangre | Hg<br>pelo | Hg<br>sangre | Pb<br>pelo | Pb<br>sangre |
|----------------------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| <b>Mínimo</b>              | 90,40      | 1958         | 17,50      | <LD          | <LD        | <LD          | <LD        | <LD          | 36,40      | <LD          |
| <b>Percentil 25%</b>       | 118,6      | 2269         | 64,70      | <LD          | <LD        | <LD          | <LD        | <LD          | 130,8      | 7,600        |
| <b>Mediana</b>             | 128,0      | 2644         | 93,90      | <LD          | <LD        | <LD          | 5,000      | <LD          | 245,3      | 12,70        |
| <b>Percentil 75%</b>       | 136,0      | 2953         | 176,8      | <LD          | <LD        | <LD          | 7,210      | <LD          | 328,7      | 36,90        |
| <b>Máximo</b>              | 156,9      | 3741         | 377,9      | 13,60        | 15,10      | <LD          | 16,50      | 8,230        | 952,9      | 271,9        |
| <b>Rango</b>               | 66,50      | 1784         | 360,4      | 10,60        | 12,10      | <LD          | 13,50      | 5,230        | 916,5      | 268,9        |
| <b>Media</b>               | 127,6      | 2684         | 125,0      | 3,945        | 4,748      | <LD          | 5,973      | 3,226        | 259,4      | 33,30        |
| <b>Desviación estándar</b> | 14,58      | 448,1        | 87,81      | 2,451        | 3,706      | <LD          | 3,683      | 0,978        | 173,8      | 52,36        |
| <b>Error estándar</b>      | 2,537      | 78,00        | 15,29      | 0,427        | 0,645      | <LD          | 0,641      | 0,170        | 30,25      | 9,115        |

LD: límite de detección. \* Los valores están expresados en mg/kg (Zn) y µg/kg (As, Cd, Hg y Pb) para su cuantificación en pelo y en µg/l (Zn, As, Cd, Hg y Pb) para su cuantificación en sangre. Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

La relevancia de los datos es más evidente al realizar un estudio comparativo con los valores de referencia que establece la Sociedad Americana de Patología Clínica Veterinaria (Kalashnikov et al., 2019), que aporta intervalos de concentración de distintos metales pesados en pelo, tal como se observa en la **tabla 2**.

Tabla 2. Valores basales de referencia observados para distintos elementos inorgánicos en pelo en sementales y yeguas de Pura Sangre Inglés.

| <b>Elemento analizado</b> | <b>Concentraciones de referencia</b> |
|---------------------------|--------------------------------------|
| <b>Zn</b>                 | 97,33-168,75 mg/kg                   |
| <b>As</b>                 | 6,3-140 µg/kg                        |
| <b>Cd</b>                 | 2-42 µg/kg                           |
| <b>Hg</b>                 | 1,8-18 µg/kg                         |
| <b>Pb</b>                 | 19,5-468 µg/kg                       |

Fuente: Tomado de Kalashnikov et al. (2019).

Con el fin de facilitar la comparación de los resultados del presente trabajo y los de otros estudios consultados de la especie equina con dichos valores de referencia basales, se realizará, cuando sea necesario una media aritmética de ese intervalo. Destaca en primer lugar que para los 5 elementos cuantificados en pelo, todos ellos se situaron dentro de los intervalos especificados en la tabla anterior como basales para la especie equina, sin poseer, por tanto, repercusiones toxicológicas (al menos desde un punto de vista de exposición aguda).

Resultados similares se observan en el estudio desarrollado por van der Merwe et al. (2023), en el cual se obtuvieron valores medios de Zn (145 mg/kg) en pelo, dentro de los rangos de referencia, tan solo ligeramente superiores a los obtenidos en el presente estudio. En cambio, los niveles de As y Cd en pelo se encontraban por debajo del límite de cuantificación

establecido para todas las muestras. Por último, el Pb presentaba una concentración media en pelo (400 µg/kg) considerablemente más alta que la cuantificada en este estudio, pero también situada dentro del intervalo de referencia.

En caballos procedentes de Masuria (Polonia), se analizaron los niveles medios de Cd (10 µg/kg) y Pb (220 µg/kg) en pelo (Stachurska et al., 2011), y de forma similar, Brummer-Holder et al. (2020) registraron concentraciones medias de Zn en pelo de 157,65 mg/kg, en todos los casos dentro de los valores estándar establecidos. Por el contrario, los valores medios de As y Pb en pelo fueron de 851 y 527 µg/kg, más elevados que en los équidos del presente trabajo y superando el rango establecido como referencia para estos elementos en el pelo.

En otro estudio realizado por Asano et al. (2005) en caballos de montar, se determinaron las concentraciones medias en pelo de Zn (178 mg/kg), Hg (910 µg/kg) y Pb (1430 µg/kg). Los niveles medios de Zn, ligeramente superiores a los obtenidos en el presente trabajo, no superaban también los valores estándar establecidos. Por el contrario, los valores obtenidos de Hg y Pb superaron ampliamente no sólo nuestros valores registrados, sino también las concentraciones establecidas como referencia, reflejando una exposición crónica muy notable a estos compuestos analizados.

#### **4.2. INFLUENCIA DEL FACTOR SEXO**

En la **Figura 2** se muestran los resultados correspondientes a los niveles de los distintos elementos analizados en las muestras de pelo y sangre en función del factor sexo. Tras realizar el estudio estadístico pertinente, se observó que no había diferencias significativas para ninguno de los elementos medidos en ninguna de las dos muestras estudiadas, pelo y sangre, mostrando por tanto la no influencia de este factor endógeno en las muestras constitutivas del presente estudio.

En el caso del Zn, se observó que, tanto en pelo como en sangre, las hembras presentaban niveles medios y máximos ligeramente superiores en comparación a los machos. En el estudio realizado en distintas localizaciones de Polonia (Dobrzanski et al., 2005) en yeguas adultas, sus concentraciones medias de Zn en pelo (117.7 mg/kg) fueron tan solo ligeramente inferiores a las obtenidas en nuestro estudio para ambos sexos.

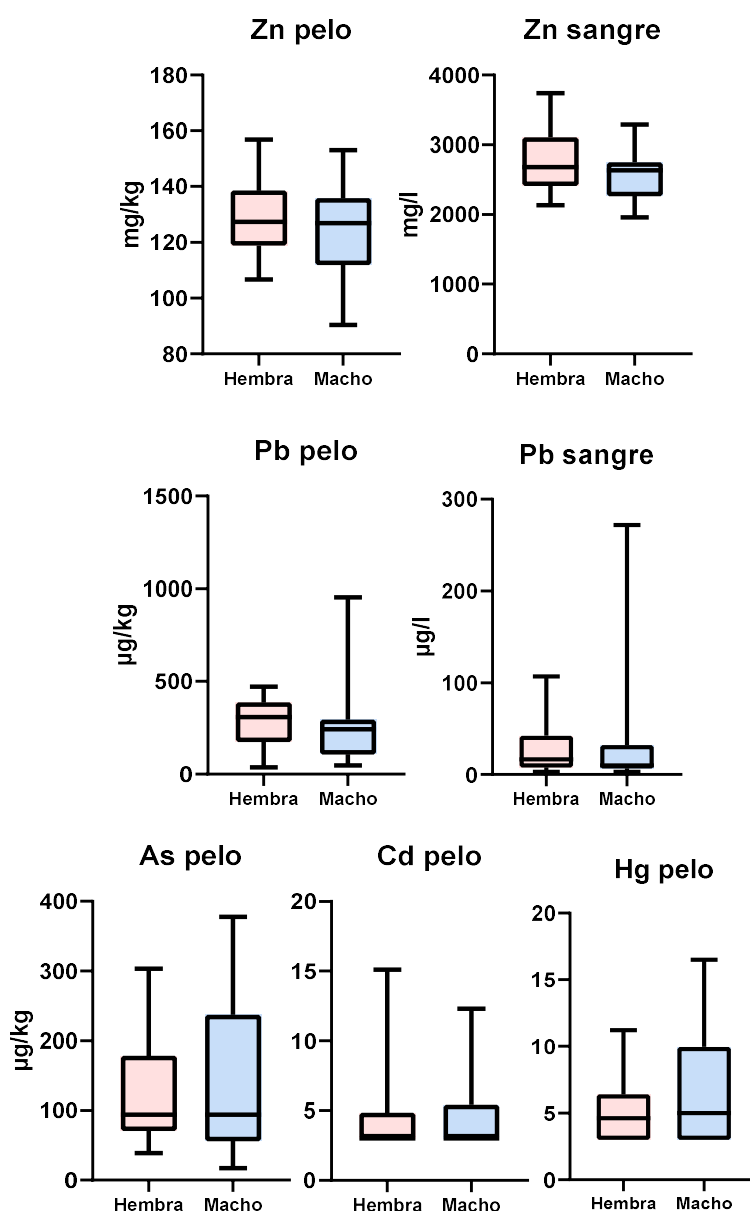
En un estudio realizado en pelo de caballos machos sanos (Asano et al., 2006) las concentraciones medias de Zn de 186 mg/kg fueron marcadamente superiores a las de nuestro estudio. Por el contrario, unos años antes, Asano et al. (2002) llevaron a cabo la determinación de las concentraciones medias de Zn en el pelo de caballos de carreras, tanto en machos como en hembras (92 y 88 mg/kg), inferiores en comparación a las determinadas en este trabajo, pero con la misma tendencia de mayor acumulación en las hembras en relación con los machos.

Con respecto al Pb, Maia et al. (2006) cuantificaron valores medios de Pb en sangre superiores en hembras (8 µg/l) respecto a los machos (5 µg/l), pero globalmente siendo inferiores respecto a las obtenidas en el presente

estudio. De igual forma, Dobrzanski et al. (2005), al realizar mediciones de Pb en pelo de yeguas adultas, obtuvieron una concentración media (90  $\mu\text{g/kg}$ ) muy inferior a la obtenida en este trabajo en curso. Kalashnikov et al. (2019) se encontraron concentraciones medias de Pb en pelo más bajas en machos (50  $\mu\text{g/kg}$ ) que en yeguas (82,4  $\mu\text{g/kg}$ ), tendencia también confirmada años antes en los trabajos de Asano et al. (2002) sobre pelo (760 y 1240  $\mu\text{g/kg}$  en machos y hembras, respectivamente).

En cuanto al As y al Hg cuantificados en pelo en nuestro estudio (recordemos que para sangre no hubo valores destacables) Dobrzanski et al. (2005) determinaron la concentración media de Cd (110  $\mu\text{g/kg}$ ) en pelo en yeguas adultas, concentración muy superior a la observada en nuestro estudio.

Figura 2. Niveles de Zn, Pb, As, Cd y Hg en muestras de pelo y sangre, en función del sexo de los animales muestreados.



Fuente: Elaboración propia.

Kalashnikov et al. (2019) analizaron las concentraciones medias de As, Cd y Hg en pelo, según el sexo de los animales. En el caso del As, se obtuvieron valores medios inferiores en los machos (16.8 µg/kg) en comparación con las hembras (27.4 µg/kg), además de ser concentraciones medias bastante menores a las registradas en los animales de nuestro estudio. De nuevo, en la cuantificación del Cd en pelo, los sementales (5.2 µg/kg) presentaban concentraciones medias ligeramente inferiores respecto a las hembras (6.2 µg/kg) al igual que ocurrió con los valores medios de Hg en pelo en machos (1.8 µg/kg) y hembras (5.2 µg/kg), siendo las concentraciones de ambos elementos (Cd y Hg), muy similares a las obtenidas en este estudio, a excepción de la concentración referente a Hg en machos, cuyo valor medio es inferior al obtenido en el presente estudio.

Asano et al. (2002) cuantificaron niveles ligeramente superiores de As en pelo de caballos de carreras, siendo en hembras mayor (1250 µg/kg) con respecto a machos (1120 µg/kg), al igual que en caso del Hg (340 y 280 µg/kg), mientras que para el Cd fue al revés (90 y 150 µg/kg en hembras y machos respectivamente). Es importante resaltar las elevadas concentraciones medias obtenidas para estos tres elementos analizados en ese estudio, muy superiores a los niveles de referencia recogidos en la **tabla 2** ya mostrada.

#### **4.3. INFLUENCIA DEL FACTOR EDAD**

Tal como se mostró en el epígrafe anterior para el sexo, a continuación, se exponen gráficamente en la **Figura 3** los resultados obtenidos en función del otro factor endógeno considerado: la edad. Observándose que tan sólo para los niveles de Pb en pelo existieron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), siendo más elevados en adultos que en jóvenes.

Aragona et al. (2024) analizaron en sangre los niveles de Zn en caballos adultos de entre 8-12 años, en varias localizaciones de Sicilia. El valor medio de todos los grupos de edad para el Zn se situó en 3409 µg/l, marcadamente superior al valor medio observado en los animales de nuestro estudio.

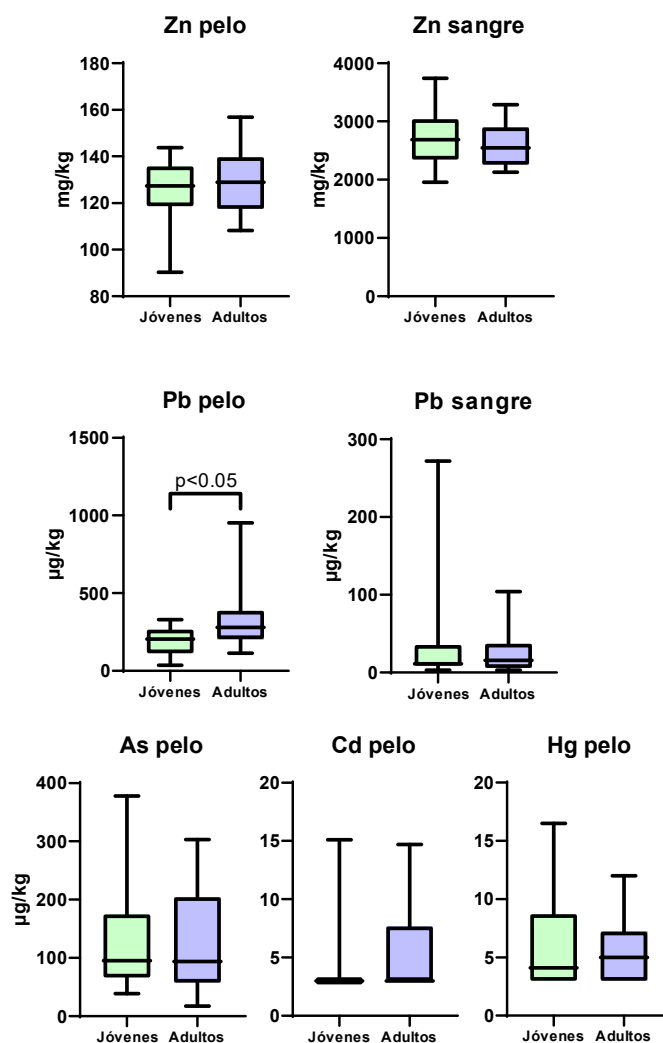
Siguiendo la misma línea de investigación en caballos adultos (6-9 años), pero localizados en Polonia central y clasificados según la actividad física realizada (Cygan-Szczegielniak y Stasiak, 2022b), se obtuvieron valores medios de Zn en pelo de 153.56-185.79 mg/kg solo ligeramente superiores a los datos observados en nuestros animales adultos. Por su parte, Nava et al. (2024) también analizaron los niveles de Zn en pelo (108.8 mg/kg) de caballos adultos, de entre 5 y 10 años, situándose por debajo de los datos medios obtenidos en el presente estudio.

Respecto a la medición de As en el pelo de los animales analizados, en el estudio realizado en caballos de carreras por Asano et al. (2002), clasificados por grupos de edad, y tras reagruparlos en animales jóvenes y adultos, se obtuvieron concentraciones medias de As en pelo superiores en individuos jóvenes (1265 µg/kg), en comparación con los adultos (1165 µg/kg). En cambio, el Cd en pelo mostró un patrón de acumulación algo

mayor en los animales adultos (155  $\mu\text{g/kg}$ ), respecto a los jóvenes (75  $\mu\text{g/kg}$ ), observándose concentraciones medias muy superiores respecto a las obtenidas en el presente estudio y además con una significación estadística asociada a este factor de edad. También destacaron las concentraciones medias en pelo de Hg, siendo superiores en animales jóvenes (450  $\mu\text{g/kg}$ ) respecto a los adultos (195  $\mu\text{g/kg}$ ), y también superando los valores registrados en este trabajo. Con respecto al Cd en pelo, Cygan-Szczegielniak y Stasiak (2022b) analizaron el pelo de caballos adultos (6-9 años), clasificados según la actividad física realizada y obtuvieron valores medios de Cd de 11-15  $\text{mg/kg}$ , marcadamente más elevados en relación con los registrados en el presente estudio.

En cuanto a los valores obtenidos del Pb, en el trabajo que realizaron Maia et al. (2006), se encontraron concentraciones medias en sangre de Pb en animales jóvenes (50  $\mu\text{g/l}$ ) superiores en comparación con los animales envejecidos (3  $\mu\text{g/l}$ ), y los ejemplares de edad media (7-14 años), en los cuales las concentraciones medias obtenidas no superaron el límite de detección, y mostrando una clara diferencia estadísticamente significativa.

Figura 3. Niveles de Zn, Pb, As, Cd y Hg en muestras de pelo y sangre, en función de la edad de los animales muestreados.



Fuente: Elaboración propia.

Un patrón de acumulación similar al observado en el estudio anterior fue identificado también por Stachurska et al. (2011), esta vez en la medición del Pb en pelo. En su análisis, los animales que alcanzaron los mayores valores máximos fueron los potros de un año (400 µg/kg), frente a las hembras adultas (225 µg/kg) y los potros lactantes (100 µg/kg), lo que evidencia una tendencia de acumulación contraria a la registrada en nuestro trabajo y registrando valores en adultos inferiores a los obtenidos en este trabajo.

Por otro lado, en un estudio realizado en China (Liu 2003), se obtuvieron valores medios de Pb en pelo (950 µg/kg) y sangre (40 µg/l) de animales adultos sanos considerablemente superiores a los observados en los animales de nuestro estudio. Estos resultados podrían indicar una mayor exposición al Pb de esa población analizada en China en relación con los animales evaluados en el presente trabajo.

Cabe destacar el trabajo realizado por Cygan-Szczegielniak y Stasiak (2022b), en el que la muestra de elección estaba compuesta por équidos adultos clasificados por su actividad física, y donde se encontraron concentraciones medias de Pb en pelo de entre 578 y 813 µg/kg, de nuevo superiores a los valores obtenidos por ambos grupos de edad analizados en este trabajo. Por otro lado, Nava et al. (2024) cuantificaron la presencia de Pb en sangre, en animales adultos, obteniendo una concentración media de 6.2 µg/l, casi 5 veces menor que la obtenida en el presente trabajo, lo que indica que el nivel de contaminación basal de la zona muestreada por nuestro equipo es considerablemente más alto que el del área evaluada por el grupo de Nava et al. (2024).

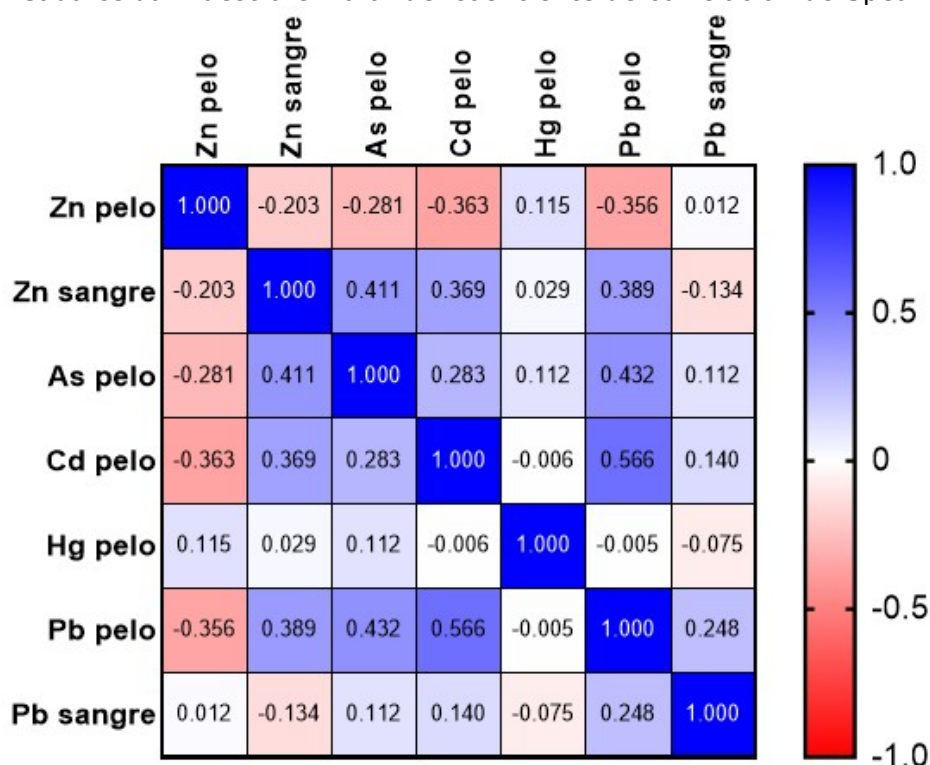
Coincidiendo con estos hallazgos, Asano et al. (2005) reportaron concentraciones medias en pelo de caballos adultos (4-23 años) en el intervalo de 1036-1430 µg/kg y, considerablemente elevadas en comparación con las obtenidas en el presente trabajo.

#### **4.4. ESTUDIO DE CORRELACIONES**

En la **Figura 4** adjunta se muestran los resultados relativos al estudio de las posibles correlaciones existentes entre todos los valores cuantificados, permitiendo el análisis de la posible existencia de correlaciones entre los distintos elementos en un mismo tejido en concreto, y de cada elemento en concreto entre los tejidos estudiados.

El estudio de las posibles correlaciones entre las concentraciones obtenidas de cada elemento en pelo lleva a observar diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) entre los pares Zn-Cd y Zn-Pb, en ambos casos de tipo negativa. También aparece una débil correlación ( $p < 0.05$ ) entre As-Pb, pero en este caso de orden positivo. En sangre, por el contrario, no se observa ninguna correlación relevante.

Figura 4 Matriz de correlaciones de las variables analizadas en pelo y sangre de caballos. Cada celda muestra el valor del coeficiente de correlación de Spearman, r.



Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, al considerar un mismo elemento, en las distintas muestras, no aparecen correlaciones significativas entre ninguno de los dos pares posibles (Zn en pelo y sangre, Pb en pelo y sangre).

Con respecto a las correlaciones significativas observadas, es posible comparar los resultados obtenidos en estudios similares. Es el caso del estudio de Dobrzanski et al. (2005), que mostraron correlaciones entre Cd y Pb en pelo. Además, Oztas et al. (2025) establecieron correlaciones significativas entre el Cd y el As y entre el Cd y el Pb en las muestras de pelo de caballos ( $p < 0,001$  para ambos).

## 5. CONCLUSIONES

En base al análisis de los resultados obtenidos en el presente estudio, es posible concluir que: en general ha sido posible cuantificar la totalidad de los elementos inorgánicos considerados en las muestras de pelo, indicando la idoneidad de este tejido para futuros estudios de biomonitorización ambiental. Por el contrario, la muestra de sangre parece no ser adecuada, al menos para algunos de estos elementos (concretamente As, Cd y Hg), seguramente asociado a la especial toxicocinética de estos metales, limitando el uso de este tejido en futuros estudios ecotoxicológicos. En general, además, destaca que los resultados obtenidos no muestran una influencia clara de ninguna de las dos variables endógenas consideradas (edad y sexo) en los niveles de los elementos inorgánicos estudiados, salvo para el Pb en el pelo con respecto a la edad.

Resulta indudable el interés en ampliar el tamaño de la muestra con el fin de establecer relaciones más sólidas entre las concentraciones obtenidas de los distintos metales, así como del tejido tomado como muestra.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAGONA, F., CICERO, N., NAVA, V., PICCIONE, G., GIANNETTO, C. y FAZIO, F. (2024). Blood and hoof biodistribution of some trace element (Lithium, Copper, Zinc, Strontium and, Lead) in horse from two different areas of Sicily. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 82, 127378. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2023.127378>
- ASANO, K., SUZUKI, K., CHIBA, M., SERA, K., ASANO, R. y SAKAI, T. (2005). Twenty-eight element concentrations in mane hair samples of adult riding horses determined by particle-induced x-ray emission. *Biological Trace Element Research*, 107 (2), 135-140. <https://doi.org/10.1385/BTER:107:2:135>
- ASANO, K., SUZUKI, K., CHIBA, M., SERA, K., ASANO, R. y SAKAI, T. (2006). Relationship between Trace Elements Status in Mane Hair and Atrial Fibrillation in Horse. *Journal of Veterinary Medicine Science*, 68 (7), 769-771. <https://doi.org/10.1292/jvms.68.769>
- ASANO, R., SUZUKI, K., OTSUKA, T., OTSUKA, M. y SAKURAI, H. (2002). Concentrations of toxic metals and essential minerals in the mane hair of healthy racing horses and their relation to age. *Journal of Veterinary Medicine Science*, 64 (7), 607-610. <https://doi.org/10.1292/jvms.64.607>
- BRUMMER-HOLDER, M., CASSILL, B. D. y HAYES, S. H. (2020). Interrelationships Between age and trace element concentration in horse mane hair and whole blood. *Journal of Equine Veterinary Science*, 87, 102922. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2020.102922>
- BURGER, J., MÁRQUEZ, M. y GOECHFELD, M. (1994). Heavy metals in the hair of opossum from Palo Verde, Costa Rica. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 27, 472-476. <https://doi.org/10.1007/BF00214838>
- COMBARIZA, D. A. (2009). Contaminación por metales pesados en el embalse del Muña y su relación con los niveles en sangre de plomo, mercurio y cadmio y alteraciones de salud en los habitantes del municipio de Sibaté (Cundinamarca) 2007. Doctoral Thesis, National University of Colombia, Bogotá, Colombia, 115 pp. [used on November 27, 2025]. Available at: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70168>
- CYGAN-SZCZEGIELNIAK, D. y STASIAK, K. (2022a). Effects of age and sex on the content of heavy metals in the hair, liver and the longissimus lumborum muscle of roe deer *Capreolus capreolus* L. *Environmental science and pollution research international*, 29 (7), 10782-10790. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16425-6>
- CYGAN-SZCZEGIELNIAK, D. y STASIAK, K. (2022b). Concentration of Selected essential and toxic trace elements in horsehair as an important tool for the monitoring of animal exposure and health. *Animals*, 12 (19), 2665. <https://doi.org/10.3390/ani12192665>

- DOBRZANSKI, Z., JANKOWSKA, D., DOBICKI, W. y KUPCZYNSKI, R. (2005). The influence of different factors on the concentration of elements in hair of horses. XII International Congress in Animal Hygiene, Varsovia, Polonia. 4-8 de septiembre, 2005. Vol 2, 450-453. [used on November 27, 2025]. Available at: [https://www.isah-soc.org/userfiles/downloads/proceedings/2005/sections/106\\_vol\\_2.pdf](https://www.isah-soc.org/userfiles/downloads/proceedings/2005/sections/106_vol_2.pdf)
- DROUILLARD, K. G. (2008). Biomagnification. In: Jørgensen, S. E., Fath, B. D. (eds) Encyclopedia of Ecology. Elsevier B.V-Academic Press, Amsterdam, Netherlands, pp. 441-448. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00377-3>
- FERNÁNDEZ-TURIEL, J. L., LLORENS, J. F., LÓPEZ-VERA, F., GÓMEZ-ARTOLA, C., MORELL, I. y GIMENO, D. (2000). Strategy for water analysis using ICP-MS. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 368, 601-606. <https://doi.org/10.1007/s002160000552>
- GARCÍA-MUÑOZ, J., PÉREZ-LÓPEZ, M., SOLER, F., MÍGUEZ-SANTIYÁN, M. P. y MARTÍNEZ-MORCILLO, S. (2023). Non-invasive samples for biomonitoring heavy metals in terrestrial ecosystems. Trace Metals in the Environment, 14, 1-23. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1001334>
- HERMOSO DE MENDOZA, M. H., RODRÍGUEZ, F. S., GARCÍA-FERNÁNDEZ, E., LLANEZA, L. y PÉREZ-LÓPEZ, M. (2011). Diferencias del sexo y de la edad en el contenido de metales pesados (Cd, Cu, Pb y Zn) en pelos de lobo ibérico (*Canis lupus signatus*) del Norte de España. Revista de Toxicología, 28 (2), 140-146. [used on November 27, 2025]. Available at: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91922431005>
- KALASHNIKOV, V. V., ZAJCEV, A. M., ATROSHCHENKO, M. M., MIROSHNIKOV, S. A., ZAVYALOV, O. A., FROLOV, N. A. y SKALNY, A. V. (2019). Assessment of gender effects and reference values of mane hair trace element content in english thoroughbred horses (North Caucasus, Russia) Using ICP-DRC-MS. Biological Trace Element Research, 191, 382-388. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-1634-9>
- LIU, Z. P. (2003). Lead poisoning combined with cadmium in sheep and horses in the vicinity of non-ferrous metal smelters. The Science of the Total Environment, 309, 117-126. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00011-1)
- MAIA, L., DE SOUZA, M. V., FERNANDES, R. B. A., FONTES, M. P. F., VIANA, M. W. S. y LUZ, W. V. (2006). Heavy Metals in horse blood, serum, and feed in Minas Gerais, Brazil. Journal of Equine Veterinary Science, 26, 578-583. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2006.11.007>
- NARDIELLO, V., FIDALGO, L. E., LÓPEZ-BECEIRO, A., BERTERO, A., MARTÍNEZ-MORCILLO, S., MÍGUEZ, M. P., ... PÉREZ-LÓPEZ M. (2019). Metal content in the liver, kidney, and feathers of Northern gannets, *Morus bassanus*, sampled on the Spanish coast. Environmental Science and Pollution Research International, 26 (19), 19646-19654. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05356-y>
- NAVA, V., LICATA, P., BIONDI, V., CATONE, G., GUGLIANDOLO, E., PUGLIESE, M., ... ARAGONA, F. (2024). Horse whole blood trace elements from different sicily areas: biomonitoring of environmental risk. Biological Trace Element Research, 202, 3086-3096. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03889-5>

- OZTAS, T., AKAR, M., VIRKANEN, J., BEIER, C., GOERICKE-PESCH, S., PELTONIEMI, O., ... BJÖRKMAN, S. (2025). Concentrations of arsenic (As), cadmium (Cd) and lead (Pb) in blood, hair and semen of stallions in Finland. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 89, 127633. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2025.127633>
- PANEBIANCO, M. V. y CÁCERES-SÁEZ, I. (2022). Cetáceos bioindicadores de metales pesados. Desde La Patagonia. *Difundiendo Saberes*, 18 (32), 32-42. [used on November 27, 2025]. Available at: <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/desdelapatagonia/article/view/3645/60701>
- PARRA, E. (2014). Aves silvestres como bioindicadores de contaminación ambiental y metales pesados. *Revista CES Salud Pública*, 5 (1), 59-69. [used on November 27, 2025]. Available at: [https://revistas.ces.edu.co/index.php/ces\\_salud\\_publica/article/view/2879/2177](https://revistas.ces.edu.co/index.php/ces_salud_publica/article/view/2879/2177)
- REYES, Y. C., VERGARA, I., TORRES, O. E., DÍAZ, M. y GONZÁLEZ, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16 (2), 66-77. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447>
- ROSAS, H. (2005). Contaminación de sedimentos del río Anoia por metales pesados (Barcelona-España). *Investigación & Desarrollo*, 5, 75-89. <http://dx.doi.org/10.23881/idupbo.005.1-8i>
- STACHURSKA, A., WAŁKUSKA, G., CEBERA, M., JAWORSKI, Z. y CHAŁABIS-MAZUREK, A. (2011). Heavy metal status of polish konik horses from stable-pasture and outdoor maintenance systems in the masurian environment. *Journal of Elementology*, 16 (4), 623-633. <http://dx.doi.org/10.5601/jelem.2011.16.4.11>
- THOMAS, R. (2008). *Practical guide to ICP-MS: A Tutorial for Beginners. Practical Spectroscopy Series*. 2da ed, CRC Press, New York, EEUU. 376 pp.
- VAN DER MERWE, D., VAN DEN WOLLENBERG, L., VAN HEES-VALKENBORG, L., DE HAAN, T. y VAN DER DRIFT, S. (2023). Reference intervals for trace mineral and heavy metal concentrations in horse livers in the Netherlands. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 35 (6) 737-741. <https://doi.org/10.1177/10406387231193328>