

Uso del selenio en organismo acuáticos. Una revisión

Selenium use in aquatic organisms. A review

Jenny Hoya-Flórez¹ , Ana Estrada-Posada²  y Jonny Yepes-Blandón*¹ 

1. Grupo de Investigación en Peces Nativos - GIPEN, Piscícola San Silvestre, Barrancabermeja, Colombia

2. ISAGEN S.A. E.S.P, Medellín, Colombia

Resumen

Los nutrientes presentes en el alimento, son de vital importancia para los procesos biológicos en los animales, de esta manera la selección de los ingredientes que conforman la dieta, son esenciales para determinar la inclusión apropiada. Estos nutrientes se dividen en dos grupos macronutrientes que se requieren en grandes cantidades, y proporcionan la mayor parte de energía que necesita un organismo, entre los cuales se encuentran proteínas, lípidos y carbohidratos y los micronutrientes requeridos en menor cantidad, utilizados para regeneración de tejidos y la regulación de procesos corporales, como las vitaminas y los minerales. Estos últimos, garantizan un buen desarrollo de las funciones fisiológicas de los organismos y son necesarios para el metabolismo, generando un fortalecimiento del sistema inmunitario y prevención de enfermedades. Entre los minerales con marcado interés en la acuicultura se encuentra el selenio (Se), mineral traza, que se encuentra en forma de compuestos inorgánicos como selenito y selenato, o compuestos orgánicos en forma de seleno-aminoácidos tales como seleno-cisteína y seleno-metionina. La importancia biológica del selenio radica en su incorporación a moléculas llamadas selenoproteínas, las cuales tienen diferentes funciones tales como; homeostasis de los organismos, (tiorredoxina y del glutatión), en el metabolismo de hormonas tiroideas, (tironina dehidrogenasa), maduración de espermatozoides y antioxidantes (glutatión peroxidasa), funciones musculares (selenoproteína N), entre otras. De las diferentes selenoproteínas que existen, la mayor parte de ellas se conservan en peces. En los sistemas de acuicultura se ha venido implementando su incorporación en la dieta, con resultados óptimos en los parámetros zootécnicos, en el fortalecimiento inmunológico, y en la expresión de genes. Esta revisión muestra la importancia de Se en peces, destacándose estudios que evalúan los efectos de suplementar dietas con Se para la alimentación de animales acuáticos en cautiverio y la necesidad de determinar requerimientos especie-específicos.

Palabras clave: minerales; selenoproteínas; genes; antioxidantes; peces; nutrición

Abstract

The nutrients present in the feed are of vital importance for the biological processes in animals, in this way, the selection of the ingredients that make up the diet are essential to determine the appropriate inclusion. These nutrients are divided into two groups: macronutrients that are required in high quantities and provide most of the energy needed by an organism, among which are proteins, lipids and carbohydrates, and micronutrients required in smaller quantities, used for tissue regeneration and regulation of body processes, such as vitamins and minerals. The latter guarantee a good development of the physiological functions of the organisms and are necessary for the metabolism, generating a strengthening of the immune system and prevention of diseases. Among the minerals of particular interest in aquaculture is selenium (Se), a trace mineral found in the form of inorganic compounds such as selenite and selenate, or organic compounds in the form of seleno-amino acids such as seleno-cysteine and seleno-methionine. The biological importance of selenium lies in its incorporation into molecules called selenoproteins, which have different functions such as homeostasis of organisms (thioredoxin and glutathione), in the metabolism of thyroid hormones (thyronine dehydrogenase), sperm maturation and antioxidants (glutathione peroxidase), muscle functions (selenoprotein N), among others. Of the different selenoproteins that exist, most of them are conserved in fish. In aquaculture systems, their incorporation in the diet has been implemented, with optimal results in zootechnical parameters, immunological strengthening, and gene expression. This review shows the importance of Se in fish, highlighting studies that evaluate the effects of supplementing diets with Se for feeding aquatic animals in captivity and the need to determine species-specific requirements.

Key words: minerals; selenoproteins; genes; antioxidants; fish; nutrition

*Autor de correspondencia: jonny.yepes@udea.edu.co

Editor: Víctor Macías

Recibido: 18 de abril de 2022

Aceptado: 15 de junio de 2022

Publicación en línea: 30 de junio de 2022

Citar como: Hoya-Flórez, J., Estrada-Posada, A. y Yepes-Blandón, J. 2022. Uso del selenio en organismo acuáticos. Una revisión.

Intropica 17(1): 97 -113 Doi:

<https://doi.org/10.21676/23897864.4546>



Introducción

Los peces son considerados una fuente importante de proteína, lípidos, vitaminas y minerales en la alimentación humana. En las últimas décadas, se ha presentado un aumento en la demanda de productos piscícolas para la nutrición y seguridad alimentaria de una población mundial en crecimiento (The Food and Agriculture Organization (FAO), 2020). Actualmente, el 58 % de la producción mundial de peces está representada por tres grupos de peces dulceacuícolas, *Ctenopharyngodon idellus* (carpa herbívora), *Hypophthalmichthys molitrix* (carpa plateada), *Oreochromis niloticus* (tilapia nilótica), según The Food and Agriculture Organization (FAO), se espera que para el 2030 se introduzcan especies como el *Pangasius pangasius* (panga), perteneciente a la familia de los bagres, alcanzando un 62 % en la producción mundial (The Food and Agriculture Organization (FAO), 2020). Latinoamérica presenta una gran diversidad de organismos acuáticos, y en los últimos 50 años se han cultivado aproximadamente 70 especies (Bondad 2007); representadas principalmente por el género *Oreochromis*.

En Colombia, el número de especies registradas es alrededor de 1 572, entre especies de cultivo y de ambiente natural, de estas, las especies exóticas *Oreochromis niloticus* y *Oncorhynchus mykiss* (trucha) representan el 61 % y el 17 % respectivamente, de las especies nativas *Piaractus brachipomu* ahora *Piaractus orinoquensis* (cachama) el 19 % y solo el 3 % restante representa las demás especies nativas, (DoNascimento *et al.*, 2016; Escobar *et al.*, 2019).

La cuenca del Magdalena-Cauca posee el mayor número de especies endémicas, con aproximadamente el 68 %, de las cuales la mayoría presentan algún grado de vulnerabilidad (Valdelamar-Villegas, 2018; Maldonado, 2020). Por esta razón, en las dos últimas décadas se ha generado gran interés en la implementación de paquetes tecnológicos que permitan el uso sostenible del recurso ictiológico y la conservación de las especies.

Las especies nativas como *Prochilodus magdalenae* (bocachico), *Pseudoplatystoma magdaleniatum* (bagre rayado) y *Scrubim cuspicaudus* (blanquillo) entre otras especies, podrían incorporarse a programas de diversificación de la piscicultura continental colombiana (Prieto *et al.*, 2015). Sin embargo, sus tecnologías de producción se encuentran en etapas tempranas y la información disponible asociada a aspectos nutricionales y reproductivos aún es escasa (Flores-Nava y Brown, 2010; Prieto *et al.*, 2015; Fontalvo *et al.*, 2018). Esta es una de las causas que ha motivado a los productores a preferir las especies exóticas

como alternativa para el desarrollo piscícola (Prieto *et al.*, 2015). Por tanto, es necesario avanzar en el desarrollo de tecnologías de producción de peces nativos seguras y eficiente que permitan un desempeño productivo y reproductivo mediante el manejo, particularmente de estrategias alimenticias, que puedan suplir los requerimientos nutricionales (Chatzifotis *et al.*, 2010; Jabeen y Chaudhry, 2011).

Los trabajos de Pohlenz y Gatlin (2014) y Yepes-Blandón y Botero-Aguirre (2018), destacan que el campo de la nutrición en peces se ha centrado principalmente en el establecimiento de los requerimientos nutricionales mínimos de las especies de interés comercial; sin embargo, en peces nativos es poco lo que se conoce (National Research Council (NCR), 2011; Prieto *et al.*, 2015). Diferentes estudios exponen la importancia de la nutrición y la alimentación en el crecimiento y la reproducción de varias especies de peces en cautiverio. Por otro lado, se ha documentado que la composición nutricional y la ración suministrada en peces adultos influye en el eje hipotálamo-hipófisis-gónada, afectando la respuesta a tratamientos hormonales, la cantidad, la calidad de los huevos, el éxito del desove, el desarrollo embrionario, el crecimiento y la sobrevivencia larval (Norambuena *et al.*, 2012; Pohlenz y Gatlin, 2014; Prieto *et al.*, 2015).

Los nutrientes del alimento son clave para todos los procesos biológicos en el animal, por ende, la selección de los ingredientes que conforman la dieta es un aspecto de gran importancia para determinar los niveles de inclusión apropiados (National Research Council (NCR), 2011). Existen nutrientes (proteína, lípidos y carbohidratos) que se requieren en grandes cantidades, estos proporcionan la mayor parte de la energía que necesita un organismo, son conocidos como macronutrientes; mientras que otros como las vitaminas y los minerales, se requieren en pequeñas cantidades y se utilizan para la regeneración de tejidos y la regulación de procesos corporales, estos son los micronutrientes (Velasco-Garzón y Gutiérrez-Espinosa, 2019).

Los minerales en la dieta de los peces garantizan un buen desarrollo de las funciones fisiológicas de los organismos, siendo necesarios en el metabolismo, en el que contribuyen al fortalecimiento del sistema inmunitario y a su vez favorecen la prevención de enfermedades (Zhou, 2017). En los últimos años, autores como Hernawy y Pérez (2008), han profundizado en la necesidad de incorporar los minerales en la nutrición animal, debido a las evidencias de los efectos que produce la deficiencia o el exceso, lo que ha despertado interés en estudiar la bioquímica, biotransformación, disponibilidad, fuentes y

métodos de suplementación (Velasco y Corredor, 2011; Gutiérrez-Espinosa *et al.*, 2019).

Según la función reguladora de los minerales en el organismo y la cantidad que se requiere en la dieta de los animales, se clasifican en macro, los que se requieren en cantidad altas (Ca, P, Na, K, Cl, Mg y S) y micro que se necesitan en menor cantidad (Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, I, F, Co y Se) (Hedao *et al.*, 2008; Xiong *et al.*, 2017; Velasco-Garzón y Gutiérrez-Espinosa, 2019). Estos últimos han sido bien documentados, participan como cofactores de diversos procesos fisiológicos y metabólicos como el mantenimiento de la presión osmótica, constituyentes de tejidos, transmisión de impulsos nerviosos, contracciones musculares entre otros (Schrauzer y Surai, 2009; Kieliszek y Błażej, 2013).

En peces, el Selenio es un mineral que ha despertado interés, debido a que se ha demostrado que el suministro en dosis adecuadas genera efectos positivos en el metabolismo e influye en el desempeño animal tanto productivo como reproductivo (Rider *et al.*, 2009); mientras que el exceso puede causar distrofias musculares, retraso en el crecimiento, entre otros (Janz *et al.*, 2010). El objetivo de esta revisión es analizar el uso del selenio en sistemas acuícolas, cómo es su participación e interacción en el metabolismo de los organismos acuáticos, particularmente en peces; cuáles son las fuentes y formas de suministro; así como la toxicidad y algunos aspectos moleculares del requerimiento nutricional específico.

Los minerales en la dieta de los animales

Los minerales son elementos químicos inorgánicos importantes en el organismo de los animales acuáticos, necesarios para el metabolismo y crecimiento, sin embargo, es difícil establecer los requerimientos de minerales en peces (Hernawy, 2008; Velasco, 2011; Zhou, 2017; Gutiérrez-Espinosa *et al.*, 2019). A diferencia de lo que ocurre en el caso de los animales terrestres que dependen por completo de un aporte de minerales en el alimento, los organismos acuáticos son capaces de absorber los minerales requeridos directamente del agua a través de las branquias y superficie corporal (Gutiérrez-Espinosa *et al.*, 2019). El grado de absorción varía entre las especies de peces y puede obedecer a alteraciones de ciertos factores ambientales, como la concentración y biodisponibilidad, la temperatura y el pH del agua, entre otros (Gilannejad, 2018; Ramírez *et al.*, 2020). Así mismo, los peces marinos y de agua dulce también presentan diferencias en cuanto a la disponibilidad de los minerales en su organismo. Los peces de agua dulce, por ejemplo, viven en un ambiente hipotónico, en los cuales hay un proceso de

hidratación por ingreso de agua a través de las branquias, causando una constante pérdida de sal y con ello de minerales, por ende, demandan un mayor suministro de estos en la dieta, que los peces marinos en su ambiente hipertónico (Ruales 2010; National Research Council (NCR), 2011).

En las últimas décadas, se han desarrollado investigaciones para determinar requerimientos de minerales en organismos acuáticos (Wang *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2016; Gutiérrez-Espinosa *et al.*, 2019), considerándose como óptimo el nivel que refleje un efecto positivo sobre parámetros zootécnicos de interés como el crecimiento (longitud y peso) y la conversión alimenticia (National Research Council (NCR), 2011). Los estudios de los minerales, relacionados con aspectos fisiológicos y moleculares, aún son escasos; pero en el caso del Se, se ha avanzado en entender su papel en los procesos antioxidantes y en la formación de selenoproteínas (Vinchira y Muñoz, 2010; Duntas y Benvenega, 2015; Zhu *et al.*, 2016).

En nutrición animal, el Se está de forma inorgánica como selenito (SeO^{-2}_3) y selenato (SeO^{-2}_4) y orgánica como selenio-metionina y selenio-cisteína. Todas estas formas son absorbidas sin regulación y todas tienen una alta biodisponibilidad (Burk y Hill, 2015). Se ha mostrado que ambas formas de Se varían en la retención tisular y que la forma orgánica resulta ser superior a la inorgánica. Esta última, se deposita en menor concentración en muchos tejidos comparada con la forma orgánica (Mahan *et al.*, 2004; Surai, 2020). En estudios de mamíferos se ha observado una mayor acumulación de Se orgánica en tejidos fetales (Mahan *et al.*, 2004) y mayor transferencia del mineral en el calostro y la leche (Chen *et al.*, 2016; Falk *et al.*, 2018).

El Se es un micro mineral de importancia biológica para diferentes organismos (Kasaikina *et al.*, 2012; Kieliszek y Błażej, 2013), participa en varios procesos metabólicos e interactúa en cierto grado como sustituto de la vitamina E (Schwarz y Foltz, 1957; Ma *et al.*, 2014). El interés por este mineral inició al ser considerado un elemento tóxico, sin embargo, Schwarz y Foltz (1957) evidenciaron un papel esencial en mamíferos al señalar que su deficiencia producía la enfermedad del "músculo blanco", inmunodeficiencia y distrofias musculares, entre otros. Existen reportes que indican que niveles adecuados de Se influyen en la respuesta inmunitaria (Flohé, 2000; Ryan-Harshman y Aldoori, 2005; Markley *et al.*, 2021; Dalgaard *et al.*, 2018), en la función antioxidante y antiinflamatoria (Liu *et al.*, 2016a), en la disminución del riesgo de tumores (Mahan *et al.*, 2004; Burk y Hill *et al.*, 2015), en la prevención de enfermedades cardiovasculares y en la toxicidad producida por micotoxinas o por contaminantes como el cadmio (Ren, 2020).

En organismos acuáticos el Se es considerado un nutriente esencial, que interviene en el adecuado desarrollo, a nivel inmunológico, en el crecimiento y en el mantenimiento de

funciones metabólicas normales; adicionalmente, en estudios realizados en los últimos años en diferentes especies animales incluidos organismos acuáticos se le ha atribuido participación en la reproducción (Wischhusen *et al.*, 2020).

La utilización, retención y acumulación de Se en peces está condicionada, entre otros factores, por la forma química del mineral (orgánica e inorgánica), así se demostró en juveniles de *Oreochromis niloticus*, donde se suministraron diferentes niveles de inclusión de Se orgánico, los autores concluyeron que a una concentración de 0,1- 0,89 mg/kg hay mejor acumulación en relación con el inorgánico (Vinchira *et al.*, 2014). Resultados similares fueron arrojados por Lin (2009), donde mostró que la retención de Se muscular de juveniles de *Epinephelus malabaricus*, fue mayor cuando se suministró Se orgánico respecto a los animales tratados con Se inorgánico, mejorando con ello la calidad de la carne.

Por otro lado, Wang *et al.* (2019) determinó los requerimientos de Se en juveniles de *Acanthopagrus schlegelii* encontrando que a mayor nivel de inclusión mayor era la ganancia en peso de los animales tratados, adicionalmente, los resultados presentaron una correlación con las concentraciones de Se en hígado y músculo, que aumentaron gradualmente con la adición del mineral, concluyendo que el nivel óptimo para la especie era de 0,86 mg/kg. Liu *et al.* (2016b), relacionaron una disminución en el crecimiento y la eficiencia alimentaria de *Oncorhynchus mykiss* al suministrar una dieta que contenía exceso de Se (10 mg de Se/kg en la dieta). Los datos expuestos, permiten concluir que el nivel de inclusión y el requerimiento de Se es específico para cada especie.

El selenio como parte estructural de las selenoproteínas

Las funciones biológicas del Se es atribuido en gran medida a que hacen parte estructural de moléculas llamadas selenoproteínas. Los miembros de esta familia ejercen diversas funciones y su síntesis depende de cofactores específicos y del Se dietético que en conjunto forman parte integral y esencial en procesos fisiológicos de los animales (Kryukov, 2003; Lobanov *et al.*, 2009; Zoidis *et al.*, 2018). Según Lobanov *et al.* (2008), el conjunto de selenoproteínas y sus variantes o isoformas moleculares en un organismo se conoce como selenoproteoma. Se han detectado aproximadamente 45 sub familias de selenoproteínas, 28 en mamíferos y 41 en peces óseos; en estos últimos, se ha expuesto que conservan un mayor tamaño con aproximadamente 32 a 37 genes que codifican para selenoproteínas, mientras que, en mamíferos se han

identificado alrededor de 23 a 25 genes, lo que sugiere que en los organismos acuáticos existe una mayor dependencia por este tipo de proteínas (Lobanov *et al.*, 2008; Mariotti 2012), como resultado de un proceso evolutivo que parte de la bioacumulación de Se a través de la cadena alimenticia y factores ambientales (Álvarez *et al.*, 2010, Lobanov *et al.*, 2009, Stewart *et al.*, 2010; Mariotti 2012).

Mariotti *et al.* (2012) registra genes con linajes específicos de selenoproteínas en peces óseos, ejemplo de ello es el pez cebra (*Danio rerio*), con copias adicionales de selenoproteínas como SelO₂, SelT1b y SelW2b. En medaka (*Oryzias latipes*) y espinoso (*Gasterosteus aculeatus*), se identificó selenoproteína generada por una duplicación de SelJ, la cual se ha reportado sólo en peces, la Fep15 (selenoproteína de pescado de 15 kDa) se identificó previamente sólo en peces óseos (Novoselov *et al.*, 2006), recientemente en el tiburón elefante (*Cetorhinus maximus*) y como un homólogo de Cys en la rana (Anura). Estos hechos sugieren que algunas de estas selenoproteínas han hecho parte del selenoproteoma vertebrado ancestral que se perdió antes de la división de los reptiles conservándose a través de la evolución solo en peces y ranas (Taylor *et al.*, 2003; Lobanov *et al.*, 2008).

La tabla 1 registra las selenoproteínas que se han identificado en peces, allí se encuentra la familia del glutatión peroxidasa 1 (GPx1), la primera en ser descubierta en mamíferos, así mismo, se han identificado ocho grupos, seis de ellos con residuos de selenocisteína (Novoselov *et al.*, 2006; Mariotti *et al.*, 2012). En los peces se han identificado glutatión peroxidasa dependientes de Se (GSH-Px), tales como, GSH-Px x1 (citósólica), GSH-Px x2 (gastrointestinal), GSH-x3 (extracelular) y GSH-x4 (peróxidos de fosfolípidos - PHGPx) (Hefnawy y Pérez, 2008; Flohé y Brigelius-Flohé, 2012). Entre otras selenoproteínas se han reportado las deiodinasas importantes en el metabolismo de las hormonas tiroideas y tioreductasas (TrxR), con función óxido-reducción (redox) (Álvarez *et al.*, 2010).

La incorporación de Se, en las selenoproteínas se da por mecanismos específicos, se inserta selenocisteína en las cadenas polipeptídicas, por medio de codificación de un codón con doble papel en el código genético, el codón UGA, que sirve como codón de terminación en el proceso de transducción; sin embargo, con la presencia de SECIS (secuencia de inserción de selenocisteína) este codón se convierte en un codón de iniciación, con el cual se da inicio a la formación de selenoproteínas. (Chambers *et al.*, 1986).

Tabla 1. Selenoproteínas identificadas en peces.

Selenoproteína	Función	Referencia
Selenoproteínas 15 (15 kDa o Sep15)	Mediación del efecto químico receptivo de algunas patologías de tipo cancerígeno en órganos como el hígado y el riñón.	Kumaraswamy <i>et al.</i> (2000) Mariotti <i>et al.</i> (2012) Kasaikina <i>et al.</i> (2012) Burk <i>et al.</i> (2015)
Fish 15 kDa selenoprotein-like (Fep15)	Localizada en el retículo endoplasmático y el aparato de Golgi, con función relacionada al plegamiento de proteínas.	Kasaikina <i>et al.</i> (2012) Novoselov <i>et al.</i> (2006)
Glutathione peroxidase (GSH-Px), 7 isoformas	Neutralización de especies reactivas – antioxidantes, ampliamente distribuido en todos los compartimentos celulares.	Hawkes <i>et al.</i> (1983) Boschan <i>et al.</i> (2002) Pacitti <i>et al.</i> (2015)
Odothyronine Deiodinase (Dio1), 4 isoformas	Regulación de hormonas tiroideas.	Bianco <i>et al.</i> (2002) Nettore <i>et al.</i> (2017)
Methionine-R-Sulfoxide Reductase (MsrB1)	Neutralización de especies reactivas – antioxidantes	Castellano <i>et al.</i> (2005) Fomenko <i>et al.</i> (2009)
Selenophosphate Synthetase (SPS2a)	Metabolismo del selenio	Kasaikina <i>et al.</i> (2001) Lobanov <i>et al.</i> (2009)
Selenoprotein (Sel), 23 isoformas	Vinculadas con el sistema inmune, el plegamiento de proteínas, en funciones musculares y reductoras	Álvares <i>et al.</i> (2010) Kryukov (2003) Papp <i>et al.</i> (2007) Schomburg y Schweizer (2009)
Tiorredoxina reductasa (TR), 2 isoformas	Función de oxidación - reducción	Vázquez <i>et al.</i> (2018) Novoselov <i>et al.</i> (2006) Lothrop <i>et al.</i> (2009)

Para la formación de selenoproteínas, el Se debe ingresar al pez (figura 1), ya sea a través de la dieta como Set-Met o a través del agua como selenito (SeO^{-2}_3) y selenato (SeO^{-2}_4), una vez allí, se da la absorción intestinal, que en el caso de los peces es más eficiente a nivel gástrico. Para el caso del Se incorporado a través de la dieta, este comparte la misma ruta de transporte activo junto a los demás aminoácidos mientras que, para el Se presente en el agua se da un proceso de transporte activo por cotransporte para selenato y difusión pasiva para el caso del selenito (Bakke et al., 2010). Una vez en el intestino, diferentes moléculas como proteínas plasmáticas o albúminas séricas transportan la Se-Met o los selenatos y selenitos a la circulación

sanguínea donde por diferentes enzimas liasas son transformados a selenuro el cual, será precursor de la síntesis de SelProt.

Parte del Se que ingresa al animal, ya sea en su forma orgánica o inorgánica, y que no es sintetizado para la formación de selenoproteínas, se acumula en el organismo del pez, y son absorbidas sin regulación y con una alta biodisponibilidad (Burk y Hill, 2015). Sin embargo, se ha demostrado, que ambas formas de Se varían en la retención tisular (Surai, 2020). observándose una mayor acumulación de Se orgánico en tejidos y en diferentes órganos como hígado y riñón, y mayor transferencia a la progenie (Falk *et al.*, 2018).

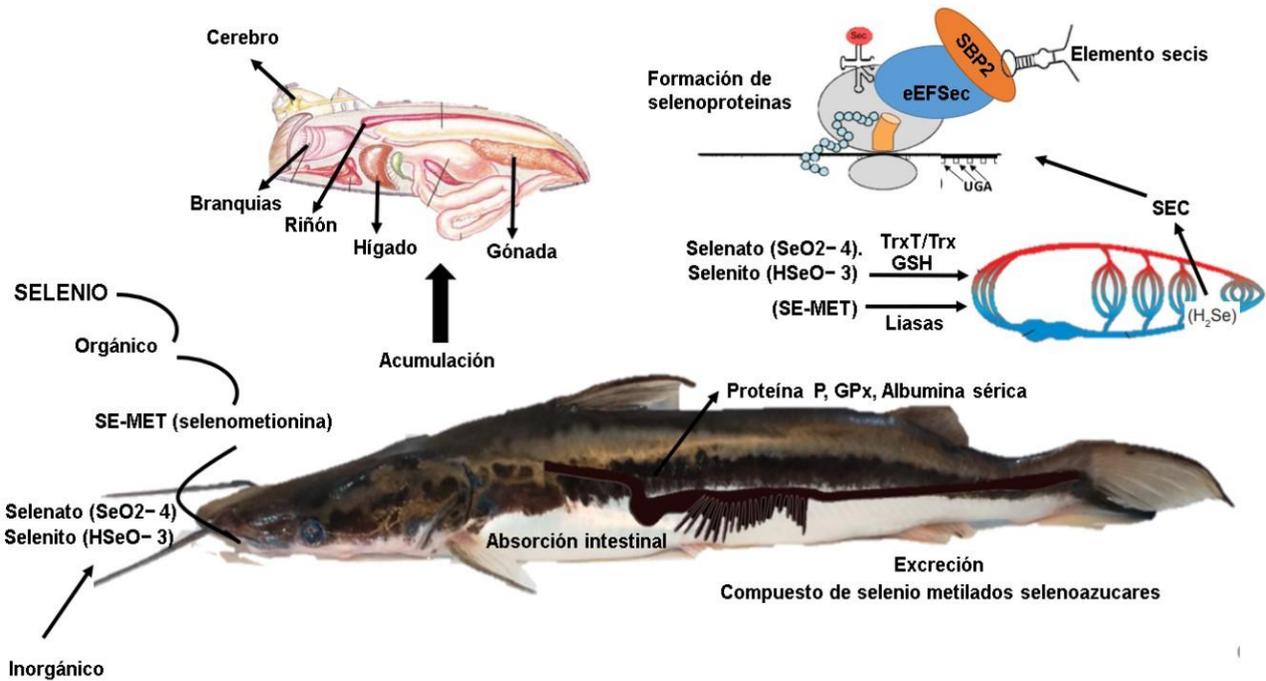


Figura 1. Ruta metabólica del selenio (Se) en peces.

Incorporación de selenio en la dieta de los peces

Un factor importante para la suplementación con Se, es la disponibilidad en el medio y su incorporación en la alimentación de peces (Khan 2017; Chen *et al.*, 2019). El Se orgánico, como SeMet y selenio-levadura, se absorbe fácilmente y con mayor eficiencia y disponibilidad que las formas inorgánicas (Chen *et al.*, 2019).

Los peces pueden ingerir el Se disuelto en el agua y el suministrado en la dieta; sin embargo, este último, se absorbe y acumula con mayor facilidad (Chen 2016). Por lo anterior, existen múltiples canales o vehículos para ofrecer la fuente mineral de Se en los peces, por ejemplo, el enriquecimiento de microorganismos (rotíferos). Penglase *et al.* (2011), enriquecieron el rotífero *Brachionus plicatilis* con Se orgánico para alimentar larvas de *Gadus morhua*, observándose la maximización de la actividad del GSH-Px en las larvas. Ribeiro *et al.* (2012) alimentaron larvas de lenguado con alimento vivo enriquecido con Se, obteniendo un aumento significativo de Se corporal y una mayor actividad en las peroxidases. Así mismo Liu *et al.* (2016a), encontraron que la biodisponibilidad de Se orgánico como levadura a un nivel de 0,43 mg/kg es mayor que las fuentes inorgánicas, observándose un mejor crecimiento en *Megalobroma amblycephala* (dorada roma) mayor concentración en el músculo, una mejor respuesta antioxidante

y calidad de la carne.

Otra manera de suministrar Se es a través de fuentes vegetales, Schram *et al.* (2008), reportan que la adición de ajo (*Allium sativum*), el cual tiene altas concentraciones de este mineral, en la dieta de *Clarias gariepinus* arrojó un efecto positivo sin afectar el rendimiento productivo de los animales. Otro vehículo de Se es mediante el uso de nano-partículas las cuales exhiben una baja toxicidad en comparación con el selenito y selenato (Medina Cruz *et al.*, 2018). Estos mismos autores, sintetizaron nano-Selenio a partir de bacteriogénicos usando *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* y *S. aureus* resistente a la meticilina, mostrando actividad antimicrobiana y sin efectos citotóxicos, lo que permite su utilización en el campo de la nutrición sin efectos negativos sobre los animales. Otro estudio en *Carassius auratus* demostró que las nano partículas de Se son más eficientes para aumentar el contenido de Se muscular en comparación con el Se orgánico (Zhou *et al.*, 2017; Jahanbakhshi *et al.*, 2021).

Una vez el Se es suministrado en la dieta ingresa al organismo para producir efectos benéficos en el pez. En la tabla 2, se exponen efectos del Se en diferentes especies de peces, reportes en crecimiento, actividad enzimática, transferencia materna y, expresión de genes relacionados con aspectos inmunológicos, reproductivos y nutricionales.

Tabla 2. Efecto del selenio en peces.

Especie	Se (mg/kg)	Respuesta metabólica	Referencia
<i>Salmo trutta</i> (Trucha común)	4,70	Bajas tasas de eclosión y baja sobrevivencia en larvas.	Covington <i>et al.</i> (2018)
<i>Macrobrachium nipponense</i>	1,07	Este requerimiento se determinó al medir la actividad de enzimas antioxidantes, crecimiento y la sobrevivencia.	Youqin <i>et al.</i> (2018)
<i>Ictalurus punctatus</i> (Bagre de canal)	0,28	Mayor aprovechamiento del Se suministrado orgánico que el inorgánico.	Gatlin <i>et al.</i> 1986
<i>Rachycentron canadum</i> L (Cobia)	0,78	Aumento de la actividad de glutatión peroxidasa, mayores porcentajes en crecimiento y sobrevivencia.	Liu <i>et al.</i> (2010)
<i>Gadus morhua</i> L. (Bacalao común)	0,70	Se vehiculizó el Se en rotíferos enriquecidos (0.7 Se/mg/kg) para satisfacer los requisitos de las larvas de bacalao. Mejor desempeño larval.	Penglase <i>et al.</i> (2011)
<i>Carassius auratus</i> gibelo (Carpa)	1,18	Se evidenció una relación lineal entre las actividades de GSH-Px dependientes de Se y las concentraciones de Se hepático. Mejor desempeño de los animales.	Han <i>et al.</i> (2011) Jahanbakhshi (2021).
	0,25	Acumulación de Se en riñón, hígado y músculo, sin embargo, el crecimiento no se afectó. Indicadores bioquímicos de antioxidantes en el hígado y el riñón evidenciaron una condición de estrés oxidativo en los juveniles.	Elia <i>et al.</i> (2011)
	0,73	Este requerimiento se determinó al medir la actividad de enzimas antioxidantes como el superóxido Dismutasa (SOD), el crecimiento y la sobrevivencia.	Zhu <i>et al.</i> (2016)
<i>Epinephelus malabaricus</i> (Mero)	0,70	Crecimiento y sobrevivencia en juveniles.	Yu-Hung <i>et al.</i> (2014)
<i>Tinca tinca</i> (Tenca)	1,00	Efecto positivo en la respuesta antioxidante y aumento del glutatión S-transferasa.	Pacini <i>et al.</i> (2012)
<i>Acipenser medirostris</i> (Esturión blanco)	19,70	Efectos adversos en ambas especies, con mayores hallazgos histopatológicos en el hepatopáncreas del esturión verde.	De Riu <i>et al.</i> (2014)
<i>A. transmontanus</i> (Esturión verde)			
<i>Seriola lalandi</i> (Jurel)			
<i>Danio rerio</i> (Pez zebra)	2,00	Adición de Se y vitamina E. Mejoras en el crecimiento, aumento de la conversión alimenticia, aumento de glóbulos rojos y mejora del filete.	Le <i>et al.</i> (2014)
<i>Cyprinus carpio</i> (Carpa común)	30	Disminución del éxito reproductivo, e influyó en el desarrollo de la descendencia.	Penglase <i>et al.</i> (2014)
	1,00	La actividad de la alanina transaminasa (ALT) fue significativamente mayor en los peces alimentados con 2mg de nano-Se/kg en comparación con otros grupos tratados.	Ashouri <i>et al.</i> (2015)

Especie	Se (mg/kg)	Respuesta metabólica	Referencia
	0,70	Las actividades de la GPx y la SOD en plasma sanguíneo fue significativa en los grupos con adición de Se en relación al grupo control. Mayor recuento de glóbulos rojos, hematocrito y hemoglobina.	Saffari <i>et al.</i> (2018)
<i>Piaractus mesopotamicus</i> (Cachama blanca)	1,56	Mejor respuesta inmune y antioxidante.	Takahashi <i>et al.</i> (2017)
<i>Megalogramma amblycephala</i> (Dorada roma)	0,20	Crecimiento, aumento en la capacidad antioxidante y mejora de la carne.	Liu <i>et al.</i> (2016a)
<i>Argyrosomus regius</i> (Perca regia)	3,98	Mejor crecimiento, equilibrio antioxidante y estado inmunológico innato de los juveniles.	Mansour <i>et al.</i> (2017)
	3,98	Mejora en la estructura hepática, con ausencia de signos histopatológicos a concentraciones elevadas de selenio, aumento en el área de absorción en los grupos suplementados con selenio	Khalil <i>et al.</i> (2019)
<i>Oncorhynchus mykiss</i> (Trucha arcoiris)	2,40	Mayores concentraciones tisulares en hígado y riñón, lo que indicaría que estos órganos se involucran en su excreción, la vida media biológica del selenio disminuyó a medida que se aumentaba su concentración en la dieta.	Hilton <i>et al.</i> (1982)
	0,38	Regulación positiva de la expresión de genes de selenoproteínas en el hígado y expresión de 11 genes diferenciados en el músculo.	Wang <i>et al.</i> (2013)
<i>Acanthopagrus schlegelii</i> (Dorada cabeza negra)	0,86	Rendimiento sobre el crecimiento, estrés oxidativo, acumulación significativa de selenio en los tejidos.	Wang <i>et al.</i> (2019)
<i>Oreochromis niloticus</i> L. (Tilapia del Nilo)	0,86	Mejora del sistema antioxidante, no afectación de los parámetros bioquímicos, hematológicos y crecimiento de los juveniles.	Durigon <i>et al.</i> (2019)
	0,21	La suplementación con selenio orgánico (seleno-levadura) e inorgánico (selenito de sodio) entre 0.10 y 1.60 mg/kg no afectó el desempeño productivo, indicando que, para esta especie, la forma de selenio no influye sobre los resultados óptimos de rendimiento productivo.	Vinchira <i>et al.</i> (2014)
	0,50	Reducción significativa de los residuos de cadmio en el cuerpo del pez.	Abdel <i>et al.</i> (2007)
	2,06	Efecto positivo en la actividad de mieloperoxidasa (MPO) y superóxido dismutasa (SOD), enzimas antioxidantes que mejoran la respuesta inmune.	Lee <i>et al.</i> (2016)

El selenio en la reproducción animal

La reproducción en peces se puede ver afectada por diferentes factores: genéticos, de manejo, ambientales y nutricionales (Rodríguez, 2014). Este mineral (Se) puede afectar el desempeño reproductivo ya sea por su excesos o deficiencia en la dieta, debido a la relación de este mineral con procesos antioxidantes

que se correlacionan con la fertilidad y la reproducción de los animales (Cabrera *et al.*, 2019).

Estudios realizados en reproducción animal, relacionan el efecto de algunas peroxidases con la espermatogénesis y la generación de energía para el movimiento flagelar a través de la fosforilación oxidativa de los espermatozoides (Carrillo *et al.*, 2018). En mamíferos, se ha relacionado la función antioxidante

del Se con la biosíntesis de testosterona, la producción y la movilidad de los espermatozoides (Ahsan *et al.*, 2019; Hamza y Diab, 2020) y la deficiencia del mineral, con reducción de la motilidad (Petrujkić, 2014; Adedara *et al.*, 2019). En ratones, con suministro de nano partículas de Se, se inhibe la lesión testicular y mejora la respuesta antioxidante (Hamza y Diab, 2020).

Se ha indicado que en mamíferos la suplementación con Se además de mejorar la actividad antioxidante y estimular la producción de estradiol, progesterona y hormonas tiroideas como las T4, también, mejora el metabolismo general de los principales nutrientes como proteínas, carbohidratos y lípidos (Cerny, 2016; Qazi *et al.*, 2018). Por otro lado, autores como Xiong *et al.* (2017), demostraron que la adición de 2 o 4 µg/mL de selenito de sodio durante la maduración in vitro de óvulos de *Bos grunniens* (Yak), aumentó el número de ovocitos con división celular; así mismo, la baja concentración de Se en el líquido folicular de mamíferos, puede causar infertilidad, sugiriendo que la actividad antioxidante de GSH-Px en el microambiente folicular puede desempeñar un papel en la gametogénesis y la fertilización.

En peces, aún es escasa la información sobre la relación de la función del Se con la reproducción; sin embargo, existen algunos estudios disponibles como el de Medina-Cruz *et al.* (2018), quienes evaluaron la motilidad y viabilidad espermática de semen criopreservado de esturiones (*Acipenser*); carpas (*Cyprinus*) y truchas (*Salmo trutta*). Los autores demostraron que en procesos de criopreservación; el uso de enzimas proporciona mayor sobrevivencia espermática postdescongelación, debido a la disminución en los daños en la membrana celular.

Los reportes en *Salmo trutta* hechos por Covington *et al.* (2018) mostraron una correlación positiva entre el Se presente en las hembras y la deposición del mineral en las ovas, lo que se reflejó en mayor sobrevivencia en la larvicultura. Penglase (2011), en *Danio rerio* evaluó el metabolismo y la utilización del Se, incluida la actividad de la GSH-Px, el ARNm, expresión de proteínas y el desempeño reproductivo así mismo encontró que con una suplementación de Se en la dieta (30 mg/kg) disminuyó el éxito reproductivo; mientras que, la descendencia alimentada por encima de 0,3 mg Se/kg de dieta tuvo menor actividad locomotora que los otros grupos, lo que indica un efecto negativo cuando se suministra por encima de los requerimientos.

Wischhusen (2020) suplementó truchas (*Salmo gairdneri*) con Se seis meses antes de la reproducción, registrando una mayor

proporción de desoves con relación al grupo control; además evidenció transferencia materna del mineral en los ovocitos. Esta suplementación con Se orgánico condujo a una mayor expresión génica de SelPa, GSH-Px1a, GSH-Px1b2, CAT y MsrB2, deduciendo con esto un efecto positivo en la suplementación de Se en reproductores y su impacto.

El selenio y su efecto en la sanidad, la inmunidad y parámetros hematológicos

Constantemente, los peces se exponen a diferentes factores medioambientales que promueven respuestas fisiológicas que mantienen su homeostasis, un ejemplo de ello es la generación de formas reactivas de oxígeno (ROS), que aunque es un proceso normal del organismo, en exceso produce estrés oxidativo (Rodríguez *et al.*, 2014); este estrés oxidativo se puede dar en peces, cuando se someten a altas densidades de manejo, exposición a contaminantes, entre otros, generando con ello daños en la célula y efectos negativos en el animal. (Mudron y Rehage, 2018). Existen mecanismos antioxidantes endógenos para mitigar estos efectos nocivos, entre ellos la GSH-Px, SOD, lisozima, la fosfatasa alcalina, la fosfatasa acida entre otras, que se utilizan como biomarcadores de estrés oxidativo en el organismo (Li *et al.*, 2011).

Dentro de las funciones del Se, la más conocida es su propiedad antioxidante; existen diferentes reportes orientados a mostrar los efectos positivos de este mineral en relación con la inmunidad de los peces. Kong *et al.* (2017), en un estudio en abulón (*Haliotis discus*) evidenciaron que la adición de Se orgánico en la dieta aumentó la actividad de lisozimas en la hepatopáncreas, así mismo, se han encontrado hallazgos similares para la *Oreochromis niloticus*, en la cual, se reporta aumento en la actividad de fosfatasa alcalina y fosfatasa ácida (Lee *et al.*, 2016).

Takahashi *et al.* (2017), indicó que el Se es un nutriente esencial para las defensas antioxidantes en los peces debido a su papel en la prevención de la inmunosupresión causada por estrés oxidativo, después de estudiar la relación entre el estrés oxidativo y el estado inmune con Se. Este autor encontró que la suplementación de Se a 1,15 mg de levadura Se/kg en *Piaractus mesopotamicus* restableció la producción de enzimas antioxidantes (GSH-Px y GST), permitiendo el aumento de algunos parámetros inmunológicos y hematológicos como el estallido respiratorio, número de leucocitos y actividad de lisozima, recuento de glóbulos rojos, hematocrito, volumen corpuscular medio y recuento de glóbulos blancos.

Khan (2017), evaluaron el efecto sinérgico que produce la suplementación con selenio y vitamina C, en el pez *T. putitora*, indicando que esta combinación potencializa los efectos del selenio, aumentando significativamente el crecimiento, la concentración sérica de hormona del crecimiento (GH), recuento de glóbulos rojos (RBC), el nivel de hemoglobina (Hb), el valor del hematocrito (Hct) y la actividad de la lisozima sérica.

En otro estudio realizado por Ashouri *et al.* (2015), en *Carassius auratus* encontraron una disminución significativa en la actividad plasmática de la SOD, con tendencia decreciente de la actividad plasmática y la capacidad antioxidante (T-AOC) cuando se suplementó con valores por encima de lo reportado para la especie, por otro lado, se encontró que niveles elevados de Se disminuyen la actividad de enzimas antioxidantes; lo cual sugiere la necesidad de suministrar el mineral en las concentraciones adecuadas.

Zhou *et al.* (2017) sugieren que, el Se promueve la ingesta de alimento y, por lo tanto, el crecimiento en la carpa Gibel, adicionalmente, se encontró una correlación positiva entre los altos niveles de actividades hepáticas de CAT, SOD y GSH-Px y T-AOC y una defensa efectiva contra el daño oxidativo. Así mismo, Monteiro *et al.* (2009), evaluaron los efectos del Se sobre biomarcadores de estrés oxidativo en *Brycon cephalus*, encontrando una mayor actividad de GSH-Px en el hígado, debido a un aumento en las concentraciones hepáticas de esta enzima, lo que indica que GSH-Px hepático se afecta significativamente por los niveles de Se en la dieta.

Los parámetros hematológicos en peces, también tienen importancia como indicadores del estado nutricional y sanitario (Pádua, 2013). Safari (2018), en *Cyprinus carpio* obtuvo un mayor recuento de glóbulos rojos, hematocrito, hemoglobina y glóbulos blancos, porcentaje de neutrófilos y actividad de la lisozima sérica en aquellos animales a los que se les suministró Se en la dieta, sugiriendo una correlación positiva cuando se interrelacionan procesos inmunológicos, antioxidantes y hematológicos.

Mansour (2017), evaluó el efecto de la adición de levaduras de Se en la dieta sobre el estado antioxidante, cambios hematológicos y parámetros inmunes celulares y humorales en *Argyrosomus regius*, los resultados indicaron que la actividad catalasa, SOD y estado antioxidante fue aumentando significativamente, mientras que las sustancias reactivas tiobarbitúricas, que funcionan como marcadores de estrés oxidativo, disminuyeron con el aumento de la suplementación

de Se. Para los parámetros hematológicos e inmunitarios (inmunoglobulina, lisozima, mieloperoxidasa, actividad de estallido respiratorio), se encontraron resultados significativamente mayores, demostrando que la suplementación de Se a 3,98 mg de levadura Se/kg mejora el crecimiento, el equilibrio antioxidante y la inmunidad innata.

Factores relacionados con la sanidad también se ven influenciados por adición de Se, estudios han sugerido que nano partículas de Se actúan en la eliminación de bacterias que son resistentes a determinados antibióticos. Medina *et al.* (2018), registraron una disminución del crecimiento bacteriano en *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, con resistencia a la meticilina, cuando utilizó nano partículas de Se de 90-150 nm de diámetro.

De otro lado, De Riu *et al.* (2014), evaluaron el efecto de la SeMet en la dieta sobre el crecimiento, la carga tisular y la histopatología en *Acipenser medirostris* y *Acipenser transmontanus*, los peces fueron alimentados durante ocho semanas con dietas que contenían concentraciones de L-SeMet en la dieta por encima de 19,7 mg/kg; los resultados mostraron una mayor mortalidad en el *A. medirostris* respecto al *A. transmontanus*, la tasa de crecimiento disminuyó significativamente, siendo mayor en *A. medirostris* y a partir de la semana cuatro se presentaron anomalías en riñón e hígado de ambas especies; además, a mayor concentración de L-SeMet hubo mayor efecto histopatológico en *A. medirostris* respecto *A. transmontanus*, indicando que aún en la misma familia de peces pueden variar las dosis de Se a suministrar.

Khalil *et al.* (2019), en un análisis histopatológico de hígados de *A. regius*, sin suministro de Se encontraron una congestión moderada de acinos pancreáticos y sinusoides hepáticas, además de, vacuolas grasas en algunos hepatocitos, mientras tanto, los animales suplementados con Se mantuvieron la arquitectura hepática normal, aumentaron las células calciformes y la actividad de aminotransferasas en hígado reflejando el buen estado de salud e integridad de los hepatocitos. Jingyuan *et al.* (2020), quienes encontraron en *Megalobrama amblycephala*, que la incorporación de Se-levadura en la dieta reduce las alteraciones de la histoestructura del hígado después de la exposición a nitritos o lo reportado por Abdel (2010), el cual concluyó que la suplementación con este mineral, provocó reducción de la toxicidad de cadmio en el agua, y reducción de los residuos de este en el cuerpo del pez, mejorando a su vez el crecimiento, la supervivencia, y la utilización de alimento.

Efecto de la suplementación de selenio en peces sobre la expresión génica

La concentración de Se en la dieta se relaciona positivamente con los niveles de ARNm de genes de selenoproteína en animales Wang *et al.* (2019). Identificar los genes que participan en los diferentes sistemas fisiológicos de los peces, permite conocer marcadores genéticos que se relacionan con el funcionamiento a nivel reproductivo, inmunitario y nutricional de las especies de peces (Skugor *et al.*, 2009).

Wang *et al.* (2018), suministraron una fuente de Se a *Oncorhynchus mykiss* durante 10 semanas para evaluar la expresión génica de selenoproteínas, los resultados arrojaron una diferencia de expresión en genes de hígado y músculo, mostrando que, para el hígado, SelP exhibió una abundancia mayor que los otros genes de selenoproteína lo que se relaciona con su función de transporte y suministro de selenio a los tejidos, para el músculo se evidenciaron varios genes incluidos FEP 15, GPX1b2, GPX4a1, GPX4b, SelH, SelJa, SelK, SelMI, SelP, SelT2l SelU, SelWI y TrxR3b los cuales mostraron alta expresión, indicando que tanto en hígado como para músculo se deben mantener altas concentraciones para conservar la homeostasis en el organismo de los peces (Huang *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2019).

Kong *et al.* (2018), evaluó el efecto del Se en factores como el crecimiento, la oxidación, la inmunidad y la expresión génica de selenoproteínas en una especie acuática como *Haliothis tuberculata*, los resultados mostraron que las actividades enzimáticas relacionadas con la oxidación aumentaron inicialmente con bajos niveles de Se en la dieta y disminuyeron con niveles más altos, la actividad enzimática relacionada a la inmunidad aumentó y la expresión génica fue aumentando progresivamente con las dosis más bajas de Se 0,30 mg; sugiriendo que una tasa de inclusión entre 0,15 - 0,30 ppm de Se promueve el crecimiento, la inmunidad y la expresión de selenoproteínas en esta especie.

Pacitti *et al.* (2015), en un estudio en trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) evidenció en la expresión de transcripciones de las selenoproteínas, un efecto inverso a la adición de selenio, indicando un aumento de expresión de genes en la mayoría de los tejidos, en los tratamientos con las menores dosis, especialmente para la transcripción de gpx1b1 y las isoformas de TrxR3 y SelP, también, que solo en músculo hubo una mayor expresión de gpx1a y gpx1b2, en el tratamiento que contenía elevadas dosis de selenio, sin embargo esto podría estar asociado a la aparición de estrés oxidativo, debido a un exceso de este mineral.

Los estudios, no solo sugieren la importancia del selenio en la expresión de genes, sino también la necesidad de ahondar en más investigaciones con enfoques moleculares, que permitan conocer más a fondo el selenoproteoma de los peces, considerando que es el más conservado a través del tiempo con relación a los mamíferos.

Conclusión

La información bibliográfica disponible destaca que el Se, tanto orgánico como inorgánico, presenta efectos positivos en la salud de los peces cuando se suministra en las dosis adecuadas para la especie en particular. Deficiencia o exceso de cualquier nutriente pueden tener efectos sobre la resistencia a enfermedades, supervivencia, mecanismos de defensa, sistema antioxidante, reproducción entre otros. Así mismo, existen otros factores como la disponibilidad del nutriente, parámetros medio ambientales, especies, tamaño y expresión de genes que influyen también en el desempeño del organismo animal.

Agradecimientos

Esta revisión fue apoyada por ISAGEN S.A. y Piscícola San Silvestre S.A. dentro del convenio marco 33/121 del Programa de Manejo para la protección de los recursos pesqueros y piscícolas del río Sogamoso y su plano de inundación

La inclusión de pequeñas cantidades de Se beneficia parámetros zootécnicos, reproductivos y mejora el sistema inmune de las especies y es una estrategia para el desarrollo de tecnología de cultivo de especies de peces nativos, las cuales son una alternativa para la diversificación de la piscicultura continental colombiana y el fomento a nivel mundial de especies de interés comercial y de cultivo.

Referencias

- Abdel-Tawwab, M. y Wafeek, M. 2010. Response of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) to Environmental Cadmium Toxicity During Organic Selenium Supplementation. *Journal of the World Aquaculture Society* 41(1): 106-114. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2009.00317.x>.
- Abdel-Tawwab, M., Mousa, M. A.A. y Abbass, F.E. 2007. Growth performance and physiological response of African catfish, *Clarias gariepinus* (B.) organic selenium prior to the exposure to environmental copper toxicity. *Aquaculture* 72(1-4): 335-345. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.09.004>.
- Ahsan, U., Kamran, Z., Raza, I., Ahmad, S., Babar, W., Riaz, M. H. y Iqbal, Z. (2014). Role of selenium in male reproduction -A review. *Animal Reproduction Science* 146(1-2): 55-62. Doi:

<https://doi:10.1016/j.anireprosci.2014.01.009>.

Álvarez Fernández, G., Bustos Jaimes, I., Castañeda Patlán, C., Guevara Fonseca, J., Romero Álvarez, I. y Vázquez Meza, H. 2010. *Mensaje Bioquímico*. Departamento de Bioquímica, Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Ashouri, S., Keyvanshokoh, S., Salati, A. P., Johari, S. A. y Pasha-Zanoosi, H. 2015. Effects of different levels of dietary selenium nanoparticles on growth performance, muscle composition, blood biochemical profiles and antioxidant status of common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture* 446: 25-29. <https://doi:10.1016/j.aquaculture.2015.04.021>.

Bianco, A. C., Salvatore, D., Gereben, B., Berry, M.J., y Larsen, P. R. 2002. Biochemistry, Cellular and Molecular Biology, and Physiological Roles of the Iodothyronine Selenodeiodinases. *Endocrine Reviews* 23(1): 38-89. <https://doi.org/10.1210/edrv.23.1.0455>.

Bondad-Reantaso, M. 2007. Assessment of freshwater fish seed resources for sustainable aquaculture. Fisheries Technical Paper. No. 501. Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. Rome.

Burk, R. F. y Hill, K.E. 2015. Regulation of Selenium Metabolism and Transport. *Annual Review of Nutrition* 35(1): 109-134. Doi: <https://doi:10.1146/annurev-nutr-071714-034250>.

Carrillo-Nieto, O., Domínguez-Vara, I.A., Huerta-Bravo, M., Jaramillo-Escutia, G., Díaz-Zarco, S., Vázquez-Armijo, J.F., Pescador-Salas, N. y Revilla-Vázquez, A. 2018. Actividad de GSX-Px, concentración de selenio y calidad del eyaculado en sementales ovinos suplementados con selenio durante la época reproductiva. *Agrociencia* 52(6): 827-839.

Cerny, K.L., Anderson, L., Burris, W.R., Rhoads, M., Matthews, J. C. y Bridges, P.J. 2016. Form of supplemental selenium fed to cycling cows affects systemic concentrations of progesterone but not those of estradiol. *Theriogenology* 85(5): 800-806. <https://doi:10.1016/j.theriogenology.2015.10.022>.

Cerny, K.L., Anderson, L., Burris, W.R., Rhoads, M., Matthews, J.C. y Bridges, P.J. 2016. Form of supplemental selenium fed to cycling cows affects systemic concentrations of progesterone but not those of estradiol. *Theriogenology* 85(5): 800-806. Doi: <https://10.1016/j.theriogenology.2015.10.022>.

Chambers, I., Frampton, J., Goldfarb, P., Affara, N., McBain, W. y Harrison, P.R. 1986. The structure of the mouse glutathione peroxidase gene: the selenocysteine in the active site is encoded by the "termination" codon, TGA. *The EMBO Journal* 5(6): 1221-

1227. <https://doi:10.1002/j.1460-2075.1986.tb04350.x>

Chatzifotis, S., Panagiotidou, M., Papaioannou, N., Pavlidis, M., Nengas, I. y Mylonas, C.C. 2010. Effect of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition and serum metabolites of meagre (*Argyrosomus regius*) juveniles. *Aquaculture* 307(1-2): 65-70. Doi: <https://doi:10.1016/j.aquaculture.2010.07.002>.

Chen, J., Han, J. H., Guan, W. T., Chen, F., Wang, C. X., Zhang, Y. Z. y Lin, G. 2016. Selenium and vitamin E in sow diets: II. Effect on selenium status and antioxidant status of the progeny. *Animal Feed Science and Technology* 221: 101-110. Doi: <https://10.1016/j.anifeedsci.2016.08.021>.

Chen, J., Zhang, F., Guan, W., Song, H., Tian, M., Cheng, L., Zhang, Y. (2019). Increasing selenium supply for heat-stressed or actively cooled sows improves piglet preweaning survival, colostrum and milk composition, as well as maternal selenium, antioxidant status and immunoglobulin transfer. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 52: 89-99. <https://doi:10.1016/j.jtemb.2018.11.010>

Covington, S.M., Naddy, R.B., Prouty, A.L., Werner, S.A. y Lewis, M.D. 2018. Effects of in situ selenium exposure and maternal transfer on survival and deformities of brown trout (*Salmo trutta*) fry. *Environmental Toxicology and Chemistry* 37(5): 1396-1408. Doi: <https://doi:10.1002/etc.4086>.

De Riu, N., Lee, J.W., Huang, S.S.Y., Moniello, G. y Hung, S.S.O. 2014. Effect of dietary selenomethionine on growth performance, tissue burden, and histopathology in green and white sturgeon. *Aquatic Toxicology* 148: 65-73. Doi: <https://doi:10.1016/j.aquatox.2013.12>.

Donascimiento, C., Cárdenas-Bautista, J.S., Acosta, K.G.B., González-Alvarado, A. y Medina, C.A. 2016. Illustrated and online catalog of type specimens of freshwater fishes in the colección de peces dulceacuícolas of Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (IAVH-P), Colombia. *Zootaxa* 4171(3): 401. Doi: <https://doi:10.11646/zootaxa.4171.3.1>.

Duntas, L.H. y Benvenega, S. 2015. Selenium: an element for life. *Endocrine* 48(3): 756-775. Doi: <https://10.1007/s12020-014-0477-6>.

Durigon, E.G., Kunz, D.F., Peixoto, N.C., Uczay, J. y Lazzari, R. 2018. Diet selenium improves the antioxidant defense system of juveniles Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Brazilian Journal of Biology*. Doi: <https://10.1590/1519-6984.187760>.

- Elia, A.C., Prearo, M., Pacini, N., Dörr, A.J. M. y Abete, M.C. 2011. Effects of selenium diets on growth, accumulation and antioxidant response in juvenile carp. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74(2): 166-173. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.04.006>.
- Escobar, M.D., R.P., Machado-Allison, A., Farias, I.P. y Hrbek, T. 2019. A new species of *Piaractus* (Characiformes: Serrasalminae) from the Orinoco Basin with a redescription of *Piaractus brachyomus*. *Journal of Fish Biology* jfb.13990. Doi: <https://doi.org/10.1111/jfb.13990>.
- Falk, M., Bernhoft, A., Framstad, T., Salbu, B., Wisløff, H., Kortner, T.M. y Oropeza-Moe, M. 2018. Effects of dietary sodium selenite and organic selenium sources on immune and inflammatory responses and selenium deposition in growing pigs. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 50: 527-536 Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.03.00>.
- Flohé, J.R. y Andreesen, R.L. 2000. Selenium, the Element of the Moon, in Life on Earth. *IUBMB Life (International Union of Biochemistry and Molecular Biology: Life)* 49(5): 411-420. Doi: <https://doi.org/10.1080/152165400410263>.
- Flores-Nava, A. y Brown, A. 2010. Peces nativos de agua dulce de América del Sur de interés para la acuicultura: una síntesis del estado de desarrollo tecnológico de su cultivo. Food and Agriculture Organization (FAO), Roma.
- Fomenko, D.E., Novoselov, S.V., Natarajan, S.K., Lee, B.C., Koc, A., Carlson, B.A. y Gladyshev, V.N. 2008. MsrB1 (Methionine-R-sulfoxide Reductase 1) Knock-out Mice. *Journal of Biological Chemistry* 284(9): 5986-5993. Doi: <https://doi.org/10.1074/jbc.m805770200>.
- Fontalvo, P.P. Berdugo, G.O. y Narváez Barandica, J. 2018. Diversidad y estructura genética del *Prochilodus magdalenae* (Pisces: Prochilodontidae) aguas arriba y abajo de la represa Betania, Colombia. *Intropica* 13(2): 87-100. Doi: <https://doi.org/10.21676/23897864.2505>.
- Gatlin, D.M., Poe, W.E. y Wilson, R.P. 1986. Effects of Singular and Combined Dietary Deficiencies of Selenium and Vitamin E on Fingerling Channel Catfish (*Ictalurus punctatus*). *The Journal of Nutrition* 116(6): 1061-1067. Doi: <https://doi.org/10.1093/jn/116.6.1061>.
- Gilannejad, N., Martínez-Rodríguez, G., Yúfera, M. y Moyano, F.J. 2018. Modelling digestive hydrolysis of nutrients in fish using factorial designs and desirability function. *PLOS ONE* 13(11), e0206556. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206556>.
- Gutiérrez-Espinosa, M.C., Velasco-Garzón, J.S. y León-Morales, C.A. 2019. Revisión: necesidades nutricionales de peces de la familia Pimelodidae en Sudamérica (Teleostei: Siluriformes). *Revista de Biología Tropical* 67(1): 146-163. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v67i1.33627>.
- Hamza, R.Z., y Diab, A. E.-A. A. 2020. Testicular protective and antioxidant effects of selenium nanoparticles on Monosodium glutamate-induced testicular structure alterations in male mice. *Toxicology Reports* 7: 254-260. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.01.012>.
- Han, D., Xie, S., Liu, M., Xiao, X., Liu, H., Zhu, X. y Yang, Y. 2011. The effects of dietary selenium on growth performances, oxidative stress and tissue selenium concentration of gibel carp (*Carassius auratus gibelio*). *Aquaculture Nutrition* 17(3): e741-e749. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2010.00841.x>.
- Hawkes, W.C. y Tappel, A.L. 1983. In vitro synthesis of glutathione peroxidase from selenite Translational incorporation of selenocysteine. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Gene Structure and Expression* 739(2): 225-234. [https://doi.org/10.1016/0167-4781\(83\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0167-4781(83)90033-7).
- Hedaoo, M.K., Khllare, K.P., Meshram, M.D., Sahatpure, S.K. y Patil, M.G. 2008. Comparative studies of certain Biochemical constituents of normal cyclic and anoestrus surti buffaloes. *Veterinary World* 1(4): 105.
- Hefnawy, A.E. y Pérez, J.T., 2008. Selenio y salud animal: importancia, deficiencia, suplementación y toxicidad. *Archivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da UNIPAR*. 153-165.
- Hilton, J.W. y Hodson, P.V. 1983. Effect of increased dietary carbohydrate on selenium metabolism and toxicity in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *The Journal of Nutrition* 113(6): 1241-1248. Doi: <https://doi.org/10.1093/jn/113.6.1241>.
- Huang, X., Tang, J., Xu, J., Jia, G., Liu, G., Chen, X. y Zhao, H. 2016. Supranutritional dietary selenium induced hyperinsulinemia and dyslipidemia via affected expression of selenoprotein genes and insulin signal-related genes in broiler. *RSC Advances* 6(88): 84990-84998. Doi: <https://doi.org/10.1039/c6ra14932d>.
- Jabeen, F. y Chaudhry, A.S. 2011. Chemical compositions and fatty acid profiles of three freshwater fish species. *Food Chemistry* 125(3): 991-996. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.09.103>.
- Jahanbakhshi, A., Pourmozaffar, S., Adeshina, I., Mahmoudi, R., Erfanifar, E. y Ajdari, A. 2021. Selenium nanoparticle and selenomethionine as feed additives: effects on growth

performance, hepatic enzymes' activity, mucosal immune parameters, liver histology, and appetite-related gene transcript in goldfish (*Carassius auratus*). *Fish Physiology and Biochemistry* 47(2): 639-652. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10695-021-00937-6>.

Janz, D.M., D.K. DeForest, M.L. Brooks, P.M. Chapman, G. Gilron, D. Hoff, W.A. Hopkins, D.O. McIntyre, C.A. Mebane, V.P. Palace, J.P. Skorupa, and M. Wayland. 2010. Selenium toxicity to aquatic organisms. En Chapman, P.M., Adams, W.J., Brooks, M.L., Delos, C.G., Luoma S.N., Mahe W.A.r, Ohlendor, H.M.f, Presse, T.S. y D. Shaw, P. Editors. *Ecological Assessment of Selenium in the Aquatic Environment*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Pensacola, Florida.

Jingyuan, H., Yan, L., Wenjing, P., Wenqiang, J., Bo, L., Linghong, M. y Xianping, G. 2020. Dietary selenium enhances the growth and anti-oxidant capacity of juvenile blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*). *Fish & Shellfish Immunology* 101: 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.03.041>.

Kasaikina, M.V., Hatfield, D.L. y Gladyshev, V.N. 2012. Understanding selenoprotein function and regulation through the use of rodent models. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Cell Research* 1823(9): 1633-1642. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2012.02.018>.

Khalil, H.S., Mansour, A.T., Goda, A.M.A. y Omar, E.A. 2018. Effect of selenium yeast supplementation on growth performance, feed utilization, lipid profile, liver and intestine histological changes, and economic benefit in meagre, *Argyrosomus regius*, fingerlings. *Aquaculture* 501: 135-143 Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.11.018>.

Khan, K.U., Zuberi, A., Fernandes, J.B.K., Ullah, I. y Sarwar, H. 2017. An overview of the ongoing insights in selenium research and its role in fish nutrition and fish health. *Fish Physiology and Biochemistry* 43(6): 1689-1705. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10695-017-0402-z>.

Khan, K.U., Zuberi, A., Fernandes, J.B.K., Ullah, I. y Sarwar, H. 2017. An overview of the ongoing insights in selenium research and its role in fish nutrition and fish health. *Fish Physiology and Biochemistry* 43(6): 1689-1705. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10695-017-0402-z>.

Kong, Y., Ding, Z., Zhang, Y., Ye, J. Y Du, Z. 2017. Dietary selenium requirement of juvenile oriental river prawn *Macrobrachium nipponense*. *Aquaculture* 476: 72-78. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.04.010>.

Kong, Y., Li, S., Liu, M., Yao, C., Yang, X., Zhao, N. y Li, M. 2018.

Effect of dietary organic selenium on survival, growth, antioxidation, immunity and gene expressions of selenoproteins in abalone *Haliotis discus hannai*. *Aquaculture Research* doi: <https://doi.org/10.1111/are.13956>.

Kryukov, G.V. 2003. Characterization of mammalian Selenoproteomes. *Science* 300 (5624): 1439-1443. Doi: <https://doi.org/10.1126/science.1083516>.

Kumaraswamy, E., Malykh, A., Korotkov, K. V., Kozyavkin, S., Hu, Y., Kwon, S.Y. y Gladyshev, V.N. 2000. Structure-Expression Relationships of the 15-kDa Selenoprotein Gene. *Journal of Biological Chemistry* 275(45): 35540-35547. <https://doi.org/10.1074/jbc.m004014200>.

Lee, S., Nambi, R.W., Won, S., Katya, K., y Bai, S.C. 2016. Dietary selenium requirement and toxicity levels in juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture* 464: 153-158. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.06.027>.

Li, J.-G., Zhou, J.-C., Zhao, H., Lei, X.-G., Xia, X.-J., Gao, G., y Wang, K.-N. 2011. Enhanced water-holding capacity of meat was associated with increased Sepw1 gene expression in pigs fed selenium-enriched yeast. *Meat Science* 87(2): 95-100. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.019>.

Lin, Y.H., Wang, H.Y y Shiau, S.Y. 2009. Dietary nucleotide supplementation enhances growth and immune responses of grouper, *Epinephelus malabaricus*. *Aquaculture Nutrition* 15(2), 117-122. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2007.00561.x>.

Liu, G.X., Jiang, G.Z., Lu, K.L., Li, X.F., Zhou, M., Zhang, D.D. y Liu, W.B. 2016a. Effects of dietary selenium on the growth, selenium status, antioxidant activities, muscle composition and meat quality of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*. *Aquaculture Nutrition* 23(4): 777-787. Doi: <https://doi.org/10.1111/anu.12444>.

Liu, Z., Qu, Y., Wang, J. Y Wu, R. 2016b. Selenium Deficiency Attenuates Chicken Duodenal Mucosal Immunity via Activation of the NF-kb Signaling Pathway. *Biological Trace Element Research*, 172(2): 465-473. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0589-8>.

Liu, K., Wang, X. J., Ai, Q., Mai, K., y Zhang, W. 2010. Dietary selenium requirement for juvenile cobia, *Rachycentron canadum* L. *Aquaculture Research* no-no. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02562.x>.

Lobanov, A.V., Hatfield, D.L. y Gladyshev, V.N. 2008. Reduced reliance on the trace element selenium during evolution of

- mammals. *Genome Biology* 9(3): R62. Doi: <https://doi.org/10.1186/gb-2008-9-3-r62>.
- Lobanov, A.V., Hatfield, D.L. y Gladyshev, V.N. 2009. Eukaryotic selenoproteins and selenoproteomes. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) General Subjects* 1790(11): 1424-1428. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2009.05.014>.
- Lothrop, A.P., Ruggles, E.L y Hondal, R.J. 2009. No selenium required: reactions catalyzed by mammalian thioredoxin reductase that are independent of a selenocysteine residue. *Biochemistry* 48(26): 6213-6223. Doi: <https://doi.org/10.1021/bi802146w>.
- Ma, Y.L., Lindemann, M.D., Pierce, J L., Unrine, J.M. y Cromwell, G.L. 2014. Effect of inorganic or organic selenium supplementation on reproductive performance and tissue trace mineral concentrations in gravid first-parity gilts, fetuses, and nursing piglets. *Journal of Animal Science* 92(12): 5540-5550. Doi: <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7590>.
- Mahan, D.C. y Peters, J.C. 2004. Long-term effects of dietary organic and inorganic selenium sources and levels on reproducing sows and their progeny. *Journal of Animal Science* 82(5): 1343-1358. Doi: <https://doi.org/10.2527/2004.8251343x>.
- Maldonado, J.A., DoNascimento, C., Usma, O., Herrera, E.E., y García Melo, J.E. 2020. *Biodiversidad de los peces de agua dulce en Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá D.C.
- Mansour, A. T.-E., Goda, A. A., Omar, E. A., Khalil, H.S. y Esteban, M.Á. 2017. Dietary supplementation of organic selenium improves growth, survival, antioxidant and immune status of meagre, *Argyrosomus regius*, juveniles. *Fish & Shellfish Immunology* 68: 516-524. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.07.060>.
- Mariotti, M., Ridge, P.G., Zhang, Y., Lobanov, A.V., Pringle, T.H., Guigo, R. y Gladyshev, V.N. 2012. Composition and Evolution of the Vertebrate and Mammalian Selenoproteomes. *PLoS ONE* 7(3): e33066. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033066>.
- Markley, R.L., Restori, K.H., Katkere, B., Sumner, S.E., Nicol, M.J., Tyryshkina, A., Nettleford, S.K., Williamson, D.R., Place, D. E., Dewan, K.K., Shay, A.E., Carlson, B. A., Girirajan, S., Prabhu, K.S. y Kirimanjeswara, G.S. 2021. Macrophage Selenoproteins Restrict intracellular replication of *Francisella tularensis* and are essential for host immunity. *Frontiers in immunology* 12:701341. Doi: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.701341>.
- Medina Cruz, D., Mi, G. y Webster, T.J. 2018. Synthesis and characterization of biogenic selenium nanoparticles with antimicrobial properties made by *Staphylococcus aureus*, methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), *Escherichia coli*, and *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Biomedical Materials Research Part A* 106(5): 1400-1412. Doi: <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36347>.
- Monteiro, D.A., Rantin, F.T. y Kalinin, A.L. 2009. The effects of selenium on oxidative stress biomarkers in the freshwater characid fish matrinxã, *Brycon cephalus* exposed to organophosphate insecticide Folisuper 600 BR® (methyl parathion). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* 149(1): 40-49. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2008.06.012>.
- Nettore, I.C., De Nisco, E., Desiderio, S., Passaro, C., Maione, L., Negri, M. y Macchia, P.E. 2017. Selenium supplementation modulates apoptotic processes in thyroid follicular cells. *BioFactors* 43(3): 415-423. Doi: <https://doi.org/10.1002/biof.1351>.
- Norambuena, F., Estevez, A., Bell, G., Carazo, I. Y Duncan, N. 2012. Proximate and fatty acid compositions in muscle, liver and gonads of wild versus cultured broodstock of Senegalese sole (*Solea senegalensis*). *Aquaculture* 356-357: 176-185. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.05.018>.
- National Research Council (NRC). 2011. *Nutrient requirements of fish and shrimp*. The National Academies Press, Washington.
- Pacini, N., Abete, M.C., Dörr, A.J.M., Prearo, M., Natali, M. y Elia, A.C. 2012. Detoxifying response in juvenile tench fed by selenium diet. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 33(1): 46-52. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2011.10.004>.
- Pacitti, D., Lawan, M.M., Sweetman, J., Martin, S.A.M., Feldmann, J. y Secombes, C.J. 2015. Selenium supplementation in fish: a combined chemical and biomolecular study to understand selenoproteome expression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *PLoS ONE* 10(5): e0127041. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127041>.
- Pádua, S., Ranzani Paiva, M., Tavares-Dias, M. y Egami, M.I. 2013. Métodos para Análise Hematológica em Peixes. EDUEM, Lisboa.
- Papp, L.V., Lu, J., Holmgren, A., y Khanna, K.K. 2007. From selenium to selenoproteins: synthesis, identity, and their role in human health. *Antioxidants & Redox Signaling* 9(7): 775-806. Doi: <https://doi.org/10.1089/ars.2007.1528>.
- Penglase, S., Hamre, K., Rasinger, J. D. y Ellingsen, S. 2014.

- Selenium status affects selenoprotein expression, reproduction, and F1 generation locomotor activity in zebrafish (*Danio rerio*). *British Journal of Nutrition* 111(11): 1918–1931. Doi: <https://doi.org/10.1017/S000711451300439X>.
- Penglase, S., Hamre, K., Sweetman, J.W. y Nordgreen, A. 2011. A new method to increase and maintain the concentration of selenium in rotifers (*Brachionus* spp.). *Aquaculture* 315(1-2): 144-153. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.09.007>.
- Petrujkčić, B.T., Šefer, D.S., Jovanović, I.B., Jovičin, M., Janković, S., Jakovljević, G. y Anderson, R.C. 2014. Effects of commercial selenium products on glutathione peroxidase activity and semen quality in stud boars. *Animal Feed Science and Technology* 197: 194-205. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.09.001>.
- Pohlentz, C. y Gatlin, D. M. 2014. Interrelationships between fish nutrition and health. *Aquaculture* 431: 111-117. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.02.008>.
- Prieto, M., Atencio, V. y Pardo, S. 2015. *El bagre blanco Sorubim cuspicaudus y su potencial en Acuicultura*. Fondo editorial Universidad de Córdoba, Montería.
- Qazi, I., Angel, C., Yang, H., Pan, B., Zoidis, E., Zeng, C.J. y Zhou, G.B. 2018. Selenium, Selenoproteins, and Female Reproduction: A Review. *Molecules* 23(12): 3053. Doi: <https://doi.org/doi:10.3390/molecules23123053>.
- Ramírez-Espitia, E.J., Hurtado-Giraldo, H. y Gómez-Ramírez, E. 2020. Anatomía general, histología y morfometría del sistema digestivo del pez *Pterophyllum scalare* (Perciformes: Cichlidae). *Revista de Biología Tropical* 68(4): 1371-1383. Doi: <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68i4.40393>.
- Ramos, S.J., Faquin, V., Almeida, H.J. de, Ávila, F.W., Guilherme, L. R. G., Bastos, C.E.A. y Ávila, P.A. 2011. Selenato e selenito na produção, nutrição mineral e biofortificação com selênio em cultivares de alface. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo* 35(4): 1347-1355. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400029>.
- Ren, X., Wang, S., Zhang, C., Hu, X., Zhou, L., Li, Y. y Xu, L. (2020). Selenium ameliorates cadmium-induced mouse leydig TM3 cell apoptosis via inhibiting the ROS/JNK /c-jun signaling pathway. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 192: 110266. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110266>.
- Ribeiro, A.R.A., Ribeiro, L., Saele, Ø., Hamre, K., Dinis, M.T. y Moren, M. 2012. Selenium supplementation changes glutathione peroxidase activity and thyroid hormone production in Senegalese sole (*Solea senegalensis*) larvae. *Aquaculture Nutrition* 18(5): 559-567. Doi: <https://doi.org/doi:10.1111/j.1365-2095.2011.00911.x>.
- Rider, S.A., Davies, S.J., Jha, A.N., Fisher, A.A., Knight, J. y Sweetman, J.W. 2009. Supra-nutritional dietary intake of selenite and selenium yeast in normal and stressed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Implications on selenium status and health responses. *Aquaculture* 295(3-4): 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.07.003>.
- Ruales, D., Carlos A. y Vásquez Torres, W. 2010. Transporte iónico en el epitelio branquial de peces de agua dulce. *Revista Lasallista de Investigación* 7(1): 85-99.
- Ryan-Harshman, M. y Aldoori, W. 2005. Health benefits of selected vitamins. *Canadian family physician Medecin de famille canadien* 51(7): 965–968.
- Saffari, S., Keyvanshokoo, S., Zakeri, M., Johari, S.A., Pasha-Zanoosi, H. y Mozanzadeh, M.T. 2018. Effects of dietary organic, inorganic, and nanoparticulate selenium sources on growth, hemato-immunological, and serum biochemical parameters of common carp (*Cyprinus carpio*). *Fish Physiology and Biochemistry* 44(4): 1087-1097. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10695-018-0496-y>.
- Schomburg, L. y Schweizer, U. 2009. Hierarchical regulation of selenoprotein expression and sex-specific effects of selenium. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects* 1790(11): 1453-1462. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2009.03.015>.
- Schram, E., Pedrero, Z., Cámara, C., van der Heul, J. W. y Luten, J.B. 2008. Enrichment of African catfish with functional selenium originating from garlic. *Aquaculture Research* 39(8): 850-860. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.01938.x>.
- Schrauzer, G.N. y Surai, P.F. 2009. Selenium in human and animal nutrition: resolved and unresolved issues. A partly historical treatise in commemoration of the fiftieth anniversary of the discovery of the biological essentiality of selenium, dedicated to the memory of Klaus. *Critical Reviews in Biotechnology* 29(1) 2-9. Doi: <https://doi.org/10.1080/0738855090272826>.
- Schwarz, K. y Folz Scott, C.M. 1957. Selenium as an integral part of factor 3 against dietary necrotic liver degeneration. *Journal of the American Chemical Society* 1957 79 (12): 3292-3293. Doi: <https://doi.org/10.1021/ja01569a087>.
- Skugor, S., Jørgensen, S., Gjerde, B. y Krasnov, A. 2009. Hepatic gene expression profiling reveals protective responses in Atlantic salmon vaccinated against furunculosis. *BMC Genomics*

10(1): 503. Doi: <https://doi.org/10.1186/1471-2164-10-503>.

Stewart, A.R., Grosell, M., Buchwalter, D. B., Fisher, N.S., Luoma, S.N., Matthews, T. y Wang, W. X. 2010. Bioaccumulation and trophic transfer of selenium. In: Chapman, P.M. Editorial. *Ecological assessment of selenium in the aquatic environment*. SETAC in collaboration with CRC Press, Boca Raton.

Surai, P.F. 2020. Antioxidants in Poultry Nutrition and Reproduction: An Update. *Antioxidants* 9(2): 105. Doi: <https://doi.org/10.3390/antiox9020105>.

Takahashi, L.S., Biller-Takahashi, J.D., Mansano, C. F. M., Urbinati, E. C., Gimbo, R. Y. y Saita, M. 2017. Long-term organic selenium supplementation overcomes the trade-off between immune and antioxidant systems in pacu (*Piaractus mesopotamicus*). *Fish & Shellfish Immunology* 60: 311-317. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.11.060>.

Valdelamar Villegas, J. C., García Pacheco, L. C. ., Cuadro Alzamora, S. M. ., Torres Benítez, J. D., & Arciniegas Suárez, C. A. . (2020). Uso de la ictiofauna para la evaluación de la condición ecológica y ambiental de un complejo cenagoso en el Caribe colombiano. *Intropica* 15(2): 144-154. Doi: <https://doi.org/10.21676/23897864.3553>.

Vázquez, D. 2018. Un vistazo biofísico-funcional a los sistemas redox tiorredoxina y glutarredoxina. *Revista Citecsa* 10(16) 17-31.

Velasco-Garzón, J.S. y Gutiérrez-Espinosa, M.C. 2019. Aspectos nutricionales de peces ornamentales de agua dulce. *Revista Politécnica* 15(30): 82-93: Doi: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n30a8>.

Velasco-Santamaría, Y. y Corredor-Santamaría, W. 2011. Nutritional requirements of freshwater ornamental fish: a review. *Revista MVZ Córdoba* 16(2): 2458-2469.

Vinchira, J.E, Wills, G.A. y Muñoz, A.P. 2014. Desempeño productivo, composición y biodisponibilidad relativa de selenio en tilapia nilótica -*Oreochromis niloticus*- suplementada con selenio orgánico e inorgánico. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia* 61(2): 186-202. Doi: <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v61n2.44681>.

Vinchira, J.E. y Muñoz-Ramírez, A.P. 2010. Selenio: nutriente objetivo para mejorar la composición nutricional del pescado cultivado. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia* 57(1): 59-75.

Wang, L., Xiao, J.X., Hua, Y., Xiang, X.W., Zhou, Y.F., Ye, L. y Shao,

Q.J. 2019. Effects of dietary selenium polysaccharide on growth performance, oxidative stress and tissue selenium accumulation of juvenile black sea bream, *Acanthopagrus schlegelii*. *Aquaculture* 503: 389-395. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.01.033>.

Wang, L., Zhang, X., Wu, L., Liu, Q., Zhang, D. y Yin, J. 2018. Expression of selenoprotein genes in muscle is crucial for the growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets supplemented with selenium yeast. *Aquaculture* 492: 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.03.054>.

Wang, K.Y., Peng, C.Z., Huang, J.L., Huang, Y.D., Jin, M.C. y Geng, Y. 2013. The pathology of selenium deficiency in *Cyprinus carpio* L. *Journal of Fish Diseases* 36(7): 609-615. Doi: <https://doi.org/10.1111/jfd.12030>.

Wischhusen, P., Arnaudguilhem, C., Bueno, M., Vallverdu, G., Bouyssiere, B., Briens, M.B. y Mounicou, S. 2021. Tissue localization of selenium of parental or dietary origin in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fry using LA-ICP MS bioimaging. *Metallomics* 13(2): mfaa008. Doi: <https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfaa008>.

Xiong, X., Lan, D., Li, J., Lin, Y. y Li, M. 2017. Selenium supplementation during in vitro maturation enhances meiosis and developmental capacity of yak oocytes. *Animal Science Journal* 89(2): 298-306. <https://doi.org/10.1111/asj.12894>.

Yepes-Blandón, J.A. y Botero-Aguirre, M. 2018. Ácidos grasos poliinsaturados en la reproducción de peces: algunos Aspectos fisiológicos y endocrinológicos. *Orinoquia* 22(1): 68-79. Doi: <https://doi.org/10.22579/20112629.483>.

Zhou, X., Wang, Y., Gu, Q. y Li, W. 2009. Effects of different dietary selenium sources (selenium nanoparticle and selenomethionine) on growth performance, muscle composition and glutathione peroxidase enzyme activity of crucian carp (*Carassius auratus gibelio*). *Aquaculture* 291(1-2), 78-81. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.03.007>.

Zhu, L., Han, D., Zhu, X., Yang, Y., Jin, J., Liu, H., y Xie, S. 2016. Dietary selenium requirement for on-growing gibel carp (*Carassius auratus gibelio* var. CAS III). *Aquaculture Research*, 48(6):2841-2851. doi:10.1111/are.13118.

Zoidis, E., Seremelis, I., Kontopoulos, N. y Danezis, G. 2018. Selenium-Dependent Antioxidant Enzymes: Actions and Properties of Selenoproteins. *Antioxidants* 7(5): 66. Doi: <https://doi.org/10.3390/antiox7050066>.