

# Papel del Carotenoide Astaxantina en la Nutrición de Especies Acuáticas

Samuel P. Meyers

Professor Emeritus, Department of Food Science/ Oceanography & Coastal Sciences  
Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803

---

## Resumen

El significativo papel de los carotenoides, principalmente del oxicarotenoide astaxantina (3,3'-dihidroxi- $\beta$ , $\beta$ -caroteno-4, 4'-diona) en la pigmentación y nutrición de una variedad de especies de crustáceos y peces es de interés global en la acuicultura. La función particular de la astaxantina, el principal pigmento natural presente en los salmónidos, en los procesos metabólicos críticos está recibiendo gran atención. Dado que las especies acuáticas son incapaces de sintetizar carotenoides *de novo*, la astaxantina o precursores apropiados deben ser suministrados en la dieta o estar presentes en los alimentos naturales del sistema de cultivo. Trabajos japoneses iniciales sobre rutas carotenoides en camarones peneidos, como *Penaeus japonicus*, han documentado la importancia de la astaxantina en el metabolismo de crustáceos. Otros estudios relacionados con la astaxantina de crustáceos son citados, resaltando el problema de "camarón azul" con *Penaeus monodon*. Algunos de los papeles biológicos y nutricionales de importancia que han sido atribuidos a la astaxantina, entre otros, son su función como una provitamina A, sus fuertes propiedades antioxidantes, junto con un papel nutricional en la primera alimentación en dietas para acuicultura y en la fecundidad de reproductores. Una similitud en la actividad antioxidante de la astaxantina y la vitamina E ha sido demostrada, sugiriéndose que la astaxantina debería ser considerada como una "supervitamina E". Numerosos ensayos alimenticios han sido realizados con salmónidos, incluyendo el papel de la astaxantina en la absorción, transporte y retención, así como las relaciones del coeficiente de digestibilidad con el metabolismo de lipoproteínas y otras funciones fisiológicas. Investigaciones con otros peces están demostrando que los carotenoides dietarios juegan un papel importante en la reproducción y la respiración. Varias pruebas alimenticias han mostrado que el suplemento de carotenoides en la dieta mejora la eficiencia alimenticia, acelera la tasa de crecimiento y mejora la sobrevivencia larvaria. El importante papel de la astaxantina en procesos trofodinámicos acuáticos naturales también es discutido en este trabajo.

## Introducción

A nivel internacional se ha incrementado la atención sobre las propiedades químicas y biológicas de los carotenoides, especialmente su papel en el metabolismo humano y prevención de enfermedades (Krinsky 1994). Los carotenoides han mostrado que protegen las células de los efectos de compuestos oxidantes y peroxidantes (Kurshize et al. 1990), así como juegan un importante papel en el incremento de la respuesta inmune. La reactividad de carotenoides con radicales libres y estados de excitación del oxígeno, tales como el oxígeno "singlet", está igualmente bien documentada, indicando su papel como antioxidantes naturales efectivos (Burton 1989).

Meyers, S. P. .2000. Papel del carotenoide astaxantina en nutrición de especies acuáticas. pp 473-491 pp. En: Civera-Cerecedo, R., Pérez-Estrada, C.J., Ricque-Marie, D. y Cruz-Suárez, L.E. (Eds.) Avances en Nutrición Acuícola IV. Memorias del IV Simposium Internacional de Nutrición Acuicola. Noviembre 15-18, 1998. La Paz, B.C.S., México.

Las primeras investigaciones sobre la astaxantina dietética en acuicultura se dirigieron hacia la pigmentación muscular con comparativamente poca información detallada sobre las actividades biológicas que afectan las funciones metabólicas. Entre los animales, la astaxantina es la xantofila mas ampliamente distribuida, seguida por la luteína y la zeaxantina. Actividades relacionadas con carotenoides en especies cultivadas en la acuicultura, especialmente en salmónidos (Torrissen et al. 1989), han sido estudiadas por numerosos investigadores y son resumidas en varias publicaciones (Meyers 1994; Shahidi et al. 1998). Estas incluyen las funciones propuestas como un antioxidante, provitamina A e inductor inmunológico, junto con un papel en la reproducción y participación en larvas o en dietas de primera alimentación de peces (Craik 1985; Grung et al. 1993). Papeles fisiológicos para los carotenoides, especialmente astaxantina, han sido propuestos en el desarrollo de huevos de salmónidos y otros peces marinos (Craik 1985; Grung et al. 1993). Los estudios también se han enfocado a la relación de la astaxantina en el metabolismo lipoproteico y otros procesos fisiológicos. Incluida en las funciones propuestas para la astaxantina, ha sido la formación de cadenas epóxicas que actúan como reservas de oxígeno bajo condiciones anóxicas. Gran parte de las investigaciones de excelencia sobre la astaxantina en la acuicultura han sido de los científicos noruegos involucrados en el cultivo del salmón del Atlántico. Otras investigaciones han demostrado el papel de la astaxantina oxicarotenoide (3, 3'-dihidroxi B,B caroteno 4, 4' diona) en procesos tróficos marinos que involucran la transferencia de  $\beta$ -caroteno a astaxantina por medio de la alimentación zooplanctónica en crustáceos (Ringleberg 1980). Se debe prestar atención que la astaxantina es uno de los pigmentos mas distribuidos y característicos de animales acuáticos, representando cerca del 99% del total de carotenoides presentes en salmónidos silvestres (Bjerkeng et al. 1992; Storebakken y No 1992). Los Investigadores han observado que la utilización de astaxantina dietética para pigmentación de la carne del salmón del Atlántico y la trucha arco iris raramente excede del 10-15%. Esto es atribuido a la pobre asimilación en el tracto intestinal, y por la pobre retención, menos del 50% de la astaxantina es absorbida.

Aparte de este papel demostrado en la pigmentación de la carne, se ha incrementado la atención sobre las actividades biológicas de la astaxantina en peces, con la mayoría de las investigaciones dirigidas al salmón del Atlántico y la trucha arco iris. En esta revisión (Torrissen 1989) se prestó atención a la esencialidad de carotenoides para salmónidos y la similitud de acción de la astaxantina, comparable a la de las vitaminas A y E. Numerosos estudios usando compuestos marcados con  $^{14}\text{C}$  en pruebas de alimentación en salmónidos demostraron la función de la astaxantina en varios procesos metabólicos especialmente su asociación con el metabolismo de la vitamina A.

La distribución de carotenoides y las vías metabólicas han sido revisadas extensamente (Goodwin, 1984). El interés en el efecto de los carotenoides sobre metabolismo de crustáceos, sobrevivencia y crecimiento está incrementando rápidamente. Esto es particularmente relevante en vista de los primeros trabajos donde los carotenoides, principalmente la astaxantina, mostraron ser responsables de coloraciones corporales deseables en *Penaeus japonicus* (Tanaka et al. 1976). Otros estudios con *P. monodon* han sido agregados a nuestra información sobre el efecto de la astaxantina sobre especies de crustáceos de importancia comercial.

Existen diferencias en las vías metabólicas de la astaxantina en crustáceos y peces herbívoros y carnívoros, incluyendo salmónidos. Trabajos con salmónidos han mostrado su incapacidad para sintetizar astaxantina *de novo*, careciendo la capacidad para oxidar 3,3

dihidroxicarotenoides y para absorber  $\beta$ -caroteno dietario. Por lo tanto, estos peces requieren de una fuente de astaxantina en la dieta, la cual es subsecuentemente depositada, principalmente en la forma libre no esterificada, en la carne del salmón y las formas esterificadas en la piel y ovarios.

La astaxantina es el carenoide predominante en crustáceos decápodos, combinado en una relación particular con proteínas para formar un complejo carotenoproteína, tal como la crustacianina. Además a las vías metabólicas reconocidas, estos animales también pueden depositar la astaxantina directamente en su exoesqueleto como complejos de proteínas libres, mono-, y diéster. Estudios recientes han revelado la mas alta tasa de sobrevivencia con dietas suplementadas con astaxantina, en comparación con las que contenían  $\beta$ -caroteno o harina de algas. Los problemas nutricionales específicos han mostrado que están relacionados con una deficiencia de astaxantina en la dieta.

### **Naturaleza y Estructura Química de los Carotenoides**

Los carotenoides son pigmentos solubles en grasas, también conocidos como lipocromos, y son uno de los grupos de pigmentos naturales marinos más importantes y ampliamente distribuidos. En la naturaleza los carotenoides son producidos vía una ruta isoprenoide compartida con diversos compuestos químicos como ácidos grasos esenciales, esteroides, y vitaminas A, D, E y K. Dentro de las varias clases de colorantes naturales, los carotenoides están entre los agentes pigmentadores más extendidos y estructuralmente diversos. Ellos tienen casi una distribución universal, encontrándose en las bacterias y algas más primitivas hasta plantas con flores altamente desarrolladas, y mamíferos. Los carotenoides pueden ser generalmente divididos en dos grupos. Uno son los carotenos hidrocarbonados altamente insaturados mientras que el segundo grupo son las xantofilas. Los últimos son derivados oxigenados de carotenos y contienen uno o más grupos oxigenados substituyendo sitios particulares en el anillo terminal.

Los carotenoides contienen de 3 a 11, o más enlaces dobles conjugados y pueden estar presentes en numerosas formas Z-isoméricas o en todas las formas E. La última es considerada como la forma nativa mientras los varios Z-isómeros son considerados como artefactos. Bjerkeng et al. (1997) notaron que la composición de estereoisómeros de la astaxantina dietética puede influenciar la capacidad de absorción y biodisponibilidad de la astaxantina total; probablemente por incrementar la carga micelular intestinal de astaxantina total.

Los carotenoides están estructuralmente relacionados a la vitamina A y  $\beta$ -caroteno, el último siendo la principal fuente de vitamina A para los animales. Ambos, natural o a través de la síntesis química, el  $\beta$ -caroteno puede ser considerado como un componente básico para muchas reacciones químicas. Este consiste de 40 átomos de carbono ordenados en dos anillos  $\beta$ -ionone conectados por una cadena de dobles enlaces conjugados representando el cromóforo el cual es responsable del color típico carenoide. En peces y camarones, los carotenoides C40-xantófilos son por mucho los más importantes (Figura 1). Las formas mono-, di-, y poli bicíclicas de hidroxicarotenoides y cetocarotenoides son los mas relevantes en nutrición de animales acuáticos. El primero incluye pigmentos tales como  $\beta$ -criptoxantina, luteína, y zeaxantina, los cuales son los pigmentos carotenoides más comunes de los ingredientes alimenticios convencionales aparte del carenoide hidrocarbano simple  $\beta$ -caroteno.

A pesar de su distribución universal y su extensa abundancia en una variedad de animales acuáticos, los carotenoides son sintetizados *de novo* solamente por plantas y algunos microorganismos. Por lo tanto, los animales dependen del suplemento de carotenoides en una dieta exógena para abastecer sus requerimientos nutricionales metabólicos. En contraste con las plantas, la distribución cuantitativa y cualitativa de carotenoides en animales acuáticos es principalmente el resultado de los hábitos dietéticos especie específicos, características de absorción, y de las actividades metabólicas de transformación. Los animales a menudo demuestran un marcado grado de selectividad en la absorción específica de carotenoides o en la transformación metabólica de ellos. Los tipos de pigmentos absorbidos y las tasas específicas de absorción pueden variar considerablemente entre familias o especies.

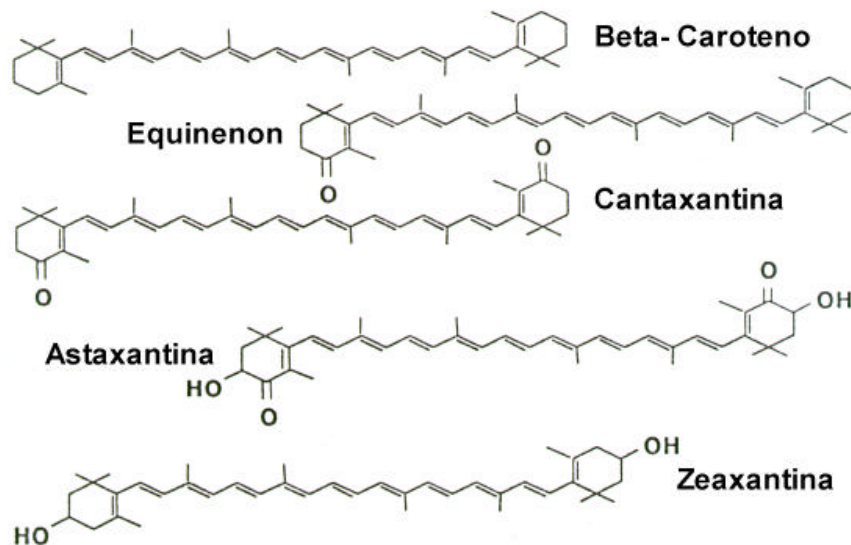


Figura 1. Estructura de algunos carotenoides comunes en peces.

La capacidad para convertir los carotenoides dietarios en astaxantina por los organismos marinos cae dentro de tres categorías generales (Meyers y Chen 1982; Figura 2).

1. Aquellos que no pueden oxidar el anillo  $\beta$ -ionone y deben ingerir derivados oxigenados específicos como astaxantina para su depósito (salmón, trucha, sea bream, red sea bream) son llamados *salmónidos* o del tipo "sea bream".
2. Aquellos que pueden oxidar las posiciones 4 y 4' del anillo  $\beta$ -ionone y pueden convertir la zeaxantina de la dieta a astaxantina, depositando la mayoría de los carotenoides dietarios inalterados (goldfish, carpa roja, fancy red carp, golden-yellow carp) son llamados del tipo *carpa*.
3. Aquellos que pueden oxidar las posiciones 3 y 3' y 4 y 4' del anillo  $\beta$ -ionone del  $\beta$ -caroteno y pueden convertir  $\beta$ -caroteno, zeaxantina o intermedios a astaxantina (la mayoría de los crustáceos) son llamados del tipo *crustáceos*.

Una gran variedad de animales marinos son particularmente ricos en carotenoides, con cantaxantina y astaxantina siendo los pigmentos carotenoides más extendidos y característicos de animales acuáticos (Bjerkeng et al. 1992; Storebakken y No 1992).

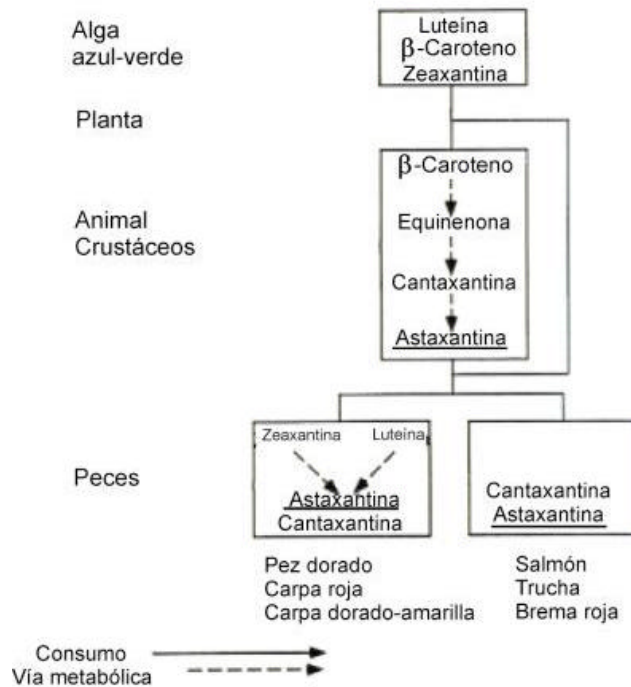


Figura 2. Carotenoides y pigmentación en especies acuáticas.

### Carotenoides en Crustáceos

El papel de los carotenoides en la nutrición de crustáceos ha sido revisada recientemente (Meyers y Latscha 1997), y algunos aspectos selectos son reportados en el presente trabajo. La mayoría de los crustáceos contienen carotenoides en alguna combinación en el caparazón, así como en los ojos, sangre, huevos, hepatopáncreas y ovarios. Los pigmentos aislados de varias clases de crustáceos son usualmente la astaxantina, β-caroteno, equineonona y cantaxantina. Estos pueden ser de procedencia dietética directamente o derivados por transformación metabólica de algún carotenoide de la dieta (Figura 3). La ruta biosintética del metabolismo de carotenoides en crustáceos parece ser una secuencia oxidativa, iniciando con el β-caroteno de origen dietario involucrando hidroxi-carotenoides o ceto-carotenos como intermediarios. Estos, se convierten, y dan como resultado astaxantina y ésteres de astaxantina, eventualmente como grupos prostéticos de carotenoproteína. La ruta metabólica desde β-caroteno hasta astaxantina ha sido establecida para varias especies de crustáceos. La astaxantina ha sido descrita como el producto final más frecuente del metabolismo de carotenoides en crustáceos (Katayama et al. 1972). La composición de pigmentos del camarón

adulto *Penaeus japonicus* ha sido analizada (Katayama et al. 1972; Katagiri et al. 1987) estableciendo astaxantina como el principal pigmento. Tanaka et al. (1976) encontraron a la astaxantina como el pigmento más importante en el caparazón y órganos internos de siete especies de crustáceos, incluyendo *Penaeus orientalis*. Otros carotenoides aislados incluyendo  $\beta$ -caroteno, equinenona, cantaxantina, luteína, zeaxantina, 3-hidroxi-cantaxantina, y 3,3-dihidroxi-caroteno.

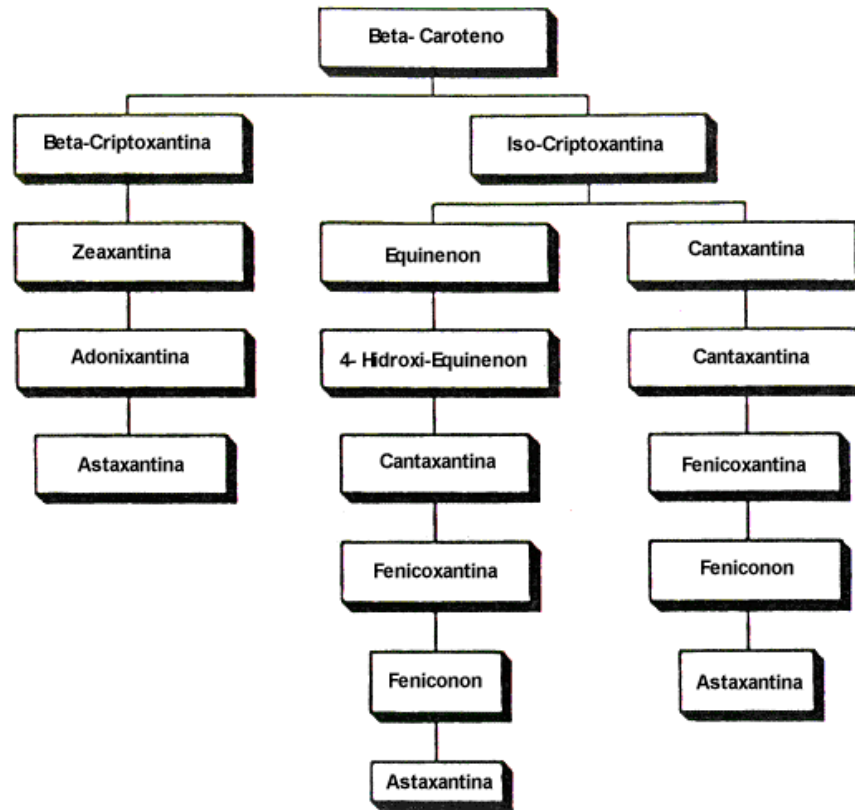


Figura 3. Vía metabólica de carotenoides en camarón.

Diferentes experimentos han mostrado una mortalidad significativa de adultos de camarón alimentados con una dieta libre de carotenoides, en comparación con individuos que recibieron una dieta suplementada con carotenoides. Yamada *et al.* (1990) reportaron una tasa de sobrevivencia de 91.4% para individuos de *P. japonicus* dando una dieta suplementada con astaxantina (100 mg/kg), comparado con una tasa de sobrevivencia de 85.7% para el grupo control. Lo más importante, después de 4 semanas de crecimiento, se observó una mayor tasa de sobrevivencia (91.3%) para el camarón alimentado con astaxantina comparado con una sobrevivencia de 51.7% para la dieta no suplementada.

Desde nauplio hasta los estadios postlarvales, los crustáceos encuentran precursores de astaxantina en las reservas vitelinas, además de otras fuentes tal como algas y *Artemia* (Petit et al. 1991). Estos investigadores, en estudios de la ontogenia del metabolismo de carotenoides en *P. japonicus*, hipotizaron un almacenamiento de astaxantina en los huevos de crustáceos, sugiriendo un posible papel para los carotenoides en la reproducción y durante los estadios de desarrollo embrionario y post embrionario. Mientras que la astaxantina es depositada en su forma libre en larvas, se encuentra principalmente en forma esterificada hasta el estadio P20. La capacidad para metabolizar precursores de pigmentos apareció en los estadios postlarvales y fue ligado al desarrollo de rutas metabólicas de oxidación y esterificación de carotenoides.

Una variedad de factores, por ejemplo, embriogénesis, ciclo sexual, muda, colores de fondo, y control hormonal, afectan la cantidad y distribución de carotenoides en crustáceos. El incremento en el tamaño del animal puede diluir el contenido del carotenoide si la cantidad de este en el alimento es insuficiente en relación al crecimiento. El efecto de las variaciones metabólicas circadianas sobre patrones de pigmentos carotenoides también ha sido estudiado en varias especies de crustáceos (Valin et al. 1989).

Yamada *et al.* (1990) examinaron el efecto de carotenoides dietarios, por ejemplo,  $\beta$ -caroteno, astaxantina y cantaxantina, sobre la pigmentación de *Penaeus japonicus*, con las tres fuentes de carotenoides depositadas en el tejido de crustáceos como ésteres de astaxantina. Las concentraciones totales de carotenoides y ésteres de astaxantina, después de 8 semanas, en crustáceos alimentados con alimento suplementado con astaxantina fueron significativamente mayores que en aquellos animales alimentados con alimentos suplementados con  $\beta$ -caroteno o cantaxantina. Las concentraciones totales de carotenoides y astaxantina después de 8 semanas aumentaron con los niveles de pigmentos dietarios arriba de 200 ppm.

Los estudios (Negre-Sadargues et al. 1993) de utilización de carotenoides sintéticos, por ejemplo, astaxantina y cantaxantina, por *Penaeus japonicus* revelaron una acumulación de la astaxantina dietaria en el integumento (caparazón y epidermis) y hepatopáncreas. Otras investigaciones (Petit 1993) de estadios postlarvales de *P. japonicus* demostraron que la eficiencia de agotamiento de carotenoides depende del grado de evolución postlarval. La suplementación de la dieta con astaxantina reduce el período de desarrollo postlarval, "por medio de inducción de variaciones cuantitativas de hormonas de la muda."

Trabajos sobre la composición en carotenoides en el exoesqueleto de *Penaeus monodon* (Okada et al. 1994) reportan a la astaxantina como el principal carotenoide, representando el 86-98% del total de los carotenoides. Camarones cultivados acumularon principalmente monoésteres de astaxantina en su exoesqueleto, convirtiendo todos los precursores a astaxantina hasta que cierto nivel de carotenoides (8 mg/100 g) fue alcanzado. Fue postulado que *P. monodon* puede necesitar almacenar carotenoides, principalmente astaxantina libre, para formar carotenoproteína. Cuando el camarón recibe suficiente astaxantina libre, el exceso de carotenoides dietarios es acumulado como ésteres de astaxantina u otros carotenoides tales como  $\beta$ -caroteno.

La astaxantina y ésteres de astaxantina son los pigmentos primarios en el langostino, *Macrobrachium rosenbergii* (Maugle et al. 1980). Las evidencias sugieren que *M. rosenbergii* puede convertir  $\beta$ -caroteno en astaxantina vía isocriptaxantina, equinenona, y cantaxantina. La ablación del pedúnculo ocular afecta el depósito y el metabolismo de carotenoides, a través de

la aceleración del ciclo de la muda (Maugle et al. 1980; Castillo y Negre-Sadargues 1991). D'Abramo et al. (1983) en trabajos con juveniles de langosta Americana, *Homarus americanus*, estableció la efectividad de  $\beta$ -caroteno dietario, equinenona, y cantaxantina en la producción de astaxantina carotenoide en tejido primario. Los niveles de pigmentación producidos por esos precursores de astaxantina fue relacionado con el producto final astaxantina. El uso de extractos de desechos de acocil (crawfish), rico en astaxantina, fue efectivo como una fuente de pigmentos carotenoides. Desy et al. (1995) en estudios del metabolismo de carotenoides en estadios de desarrollo tempranos de la langosta Europea, *Homarus gammarus*, observaron una rápida disminución de la concentración de pigmento inmediatamente después del desove. La astaxantina libre representa la mayor cantidad de carotenoides en los embriones no eclosionados mientras que los estadios de larva, postlarva y juveniles exhibieron el patrón carotenoide típico en el cual predominan las formas esterificadas de astaxantina.

La hipodermis y el exoesqueleto de los crustáceos presenta del 60%, a cuando mucho el 90%, del pigmento presente. Durante los procesos fisiológicos, tal como muda o maduración, cantidades significativas de pigmentos pueden ser relocalizadas en otros tejidos como la hemolinfa, glándula del intestino medio, gónada y huevos. Sin embargo, la coloración del cuerpo de los crustáceos es principalmente dependiente de la presencia cualitativa y cuantitativa de pigmentos en los cromatóforos epidérmicos y la capa pigmentada del exoesqueleto epidérmico. La astaxantina en crustáceos está presente en la naturaleza en la forma libre, esterificada a ácidos grasos de cadena larga, o asociadas con proteínas formando carotenoproteínas. Las tres formas son encontradas en crustáceos.

Particular atención ha sido dada al papel de las carotenoproteínas y su composición en crustáceos, especialmente la carotenoproteína azul y la crustacianina del caparazón de la langosta, *Homarus gammarus* (Nur-E-Borhan et al. 1995). La proteína crustacianina es un compuesto de alto peso molecular conteniendo cerca de 16 moléculas de astaxantina, reversiblemente dissociables por remoción del grupo prostético, en cerca de 16 subunidades. La alfa-crustacianina ha sido usada como un modelo en estudios de la interacción entre carotenoides y proteínas asociadas.

Las carotenoproteínas están ampliamente distribuidas en invertebrados, especialmente en crustáceos, y presentes en varios tejidos tales como huevos, ovarios y el integumento (Zagalsky et al. 1991). En estudios sobre la composición de lípidos y ácidos grasos del hepatopáncreas y músculo de *Penaeus japonicus*, Muriana et al. (1993) caracterizaron la carotenoproteína azul del camarón. La astaxantina fue el grupo prostético cromóforo de la carotenoproteína, siendo el principal pigmento presente.

Las concentraciones totales de carotenoides encontrados en *Caridae* y *Penaeidae* están dentro del rango de 60 mg/kg o cuando mucho 499 mg/kg. Este último ha sido observado en algunos miembros de *Penaeidae*, sin embargo, las diferencias interespecificas pueden ser tan grandes como 300%. La mayoría de los especímenes silvestres de especies de peneidos involucrados en el cultivo de camarón están en el rango de 80 a 200 mg/kg de carotenoides totales en el cuerpo. La composición cualitativa está relacionada con el grupo y la especie. La vasta mayoría de los crustáceos decápodos se caracterizan por una predominante acumulación de astaxantina, representando el 65-98% del contenido total de carotenoides en el tejido; el restante 2% en *P. monodon* puede ser atribuido a varios carotenoides amarillos a rojos los cuales representan productos transitorios del metabolismo carotenoide (Latscha, 1991).



La astaxantina aparece roja mientras absorbe luz cerca de los 470 nm. La configuración de la molécula carotenoide puede ser alterada a tal grado, que sus longitudes de onda de absorbancia se extienden a las regiones azul, verde, amarillo y café, dando lugar a todos los colores específicos que caracterizan los crustáceos vivos y algunos peces. Los diferentes complejos de astaxantina-proteína absorben la luz a mayores longitudes de onda, consecuentemente formando una variedad de otros colores dependiendo de la concentración de astaxantina presente.

### Funciones de los Carotenoides Dietarios

Una variedad de factores modifican la función de la astaxantina. Su eficiencia de deposición en salmónidos está cercanamente asociada con el metabolismo de lípidos o con otros componentes específicos que promueven la absorción. Otros factores que afectan el depósito de astaxantina en salmónidos son la tasa de alimentación, madurez sexual y factores genéticos y ambientales. Ha sido mostrado que la astaxantina está ligada a diferentes lipoproteínas de acuerdo a los estados fisiológicos del pez y a la densidad de la fracción lipoproteína. En el simposium de 1991 sobre alimentación y nutrición de peces en Francia, evidencias fueron dadas demostrando las interacciones metabólicas entre la astaxantina, los ácidos grasos poliinsaturados dietarios y la vitamina E en dietas para el salmón del Atlántico. Los coeficientes de digestibilidad para astaxantina se incrementan con los niveles de lípidos dietarios, resultando en un mayor depósito de carotenoides en la carne.

Estudios de varios isómeros de astaxantina indican que la composición estereoisomérica de la astaxantina dietaria puede influenciar la capacidad de absorción y biodisponibilidad de la astaxantina total. Investigaciones actuales comprenden estudios sobre los mecanismos de absorción y transporte de diferentes isómeros de astaxantina y los factores que gobiernan su capacidad de absorción en salmónidos (Figura 4). Los trabajos han mostrado que la absorción intestinal de la astaxantina fue facilitada por los niveles altos de grasa en la dieta.

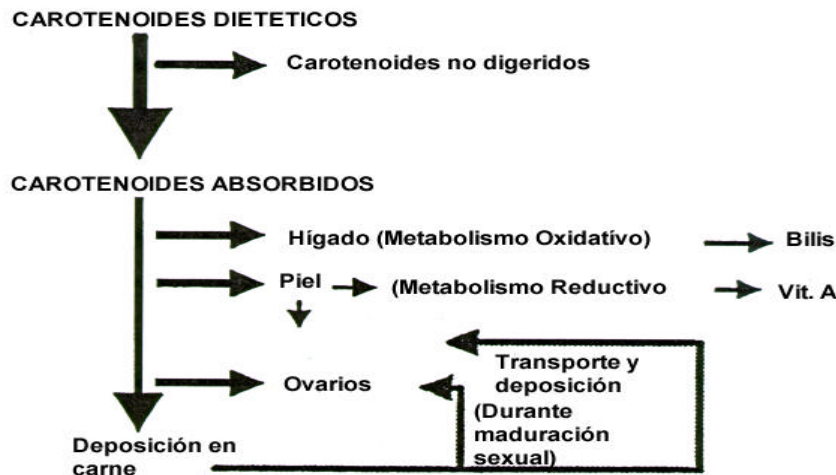


Figura 4. Metabolismo de carotenoides, astaxantina y cantaxantina en salmónidos.

Los estudios en Noruega sobre la primera alimentación del salmón del Atlántico han indicado que la presencia de astaxantina fue el factor principal que afectó el crecimiento, sobrevivencia, y concentración de vitamina A de los alevines. Los peces alimentados con una dieta a base de caseína sin suplemento de astaxantina (15 mg/Kg) mostraron 18% de sobrevivencia comparado con una mayor sobrevivencia del 90% de los peces alimentados con dietas con astaxantina. Se encontró que la astaxantina tiene un efecto sobre la concentración de la vitamina A de este carotenoide en huevos de salmónidos indicando un mayor potencial de función de provitamina A comparado con  $\beta$ -caroteno durante el período de primera alimentación. No se encontró interacción entre la astaxantina y la vitamina A en relación al crecimiento, sobrevivencia o concentración de vitamina A en peces. Pobres tasas de crecimiento y baja sobrevivencia fueron observadas en grupos alimentados con dietas sin astaxantina, incluyendo al grupo alimentado con una dieta con suficiente vitamina A. Se concluyó que la astaxantina fue esencial para los alevines de salmón durante el primer período de alimentación.

### **Pigmentación**

Un conspicuo papel de los carotenoides es su influencia sobre la pigmentación, la cual es el resultado de la absorción y depósito de carotenoides oxigenados derivados de las dietas. El color rosa a rojo de la carne de los salmónidos anádromos (*Salmo spp.*, *Onchorhynchus spp.*, *Salvelinus spp.*) es una de las características que distinguen a estos peces. Hatlen et al. (1998) en estudios con concentraciones de carotenoides y color de los filetes del charr del ártico, *Salvelinus alpinus* (L.), alimentado con astaxantina, notó varios factores químicos, por ejemplo, proporciones relativas de diferentes carotenoides depositados/abundancia relativa de constituyentes celulares interactuando con los carotenoides y la presencia de otros compuestos coloridos, o enmascaradores de color. Así, silvestres o cultivados, los peces deben estar pigmentados para reunir las preferencias del consumidor (Torrissen et al. 1989). El depósito de astaxantina ha mostrado variar en diferentes estadios de vida de peces, por ejemplo, la trucha arco iris (Bjerkeng et al. 1992). Además la retención de carotenoides en salmónidos puede depender sobre una variedad de factores, incluyendo la talla y especie de pez, la fuente de carotenoides y la concentración dietaria de carotenoides (Choubert y Storebakken 1989).

La importancia del color en la preferencia del consumidor también es vista para el "red seabream o brema roja" (*Chrysophrys major*), extensivamente cultivado en Japón. Seabream silvestre tiene un atractivo color rosa o rojo brillante el cual se desvanece y llega a ser grisáceo o negro en cautiverio. Un fenómeno similar ocurre en el crustáceo *Penaeus monodon* que normalmente está coloreado de verde olivo a castaño el cual asume un color no natural azulado (conocido como enfermedad o síndrome del "camarón azul") bajo ciertas condiciones de cultivo. Después de cocinado, el camarón llega a ser naranja-amarillo pálido en vez de la coloración roja brillante del camarón silvestre.

Howell y Matthews (1991) reportaron una decoloración ("enfermedad azul") del camarón tigre cultivado, *Penaeus monodon*, atribuido a una deficiencia nutricional en carotenoides. Los mayores carotenoides presentes en el exoesqueleto del *P. monodon* silvestre fueron la astaxantina, ésteres de astaxantina y  $\beta$ -caroteno. Los especímenes "azules" tuvieron una concentración total de carotenoides de 4.3-7 ppm (principalmente la astaxantina) comparado con 26.3 ppm de carotenoides totales en el exoesqueleto del camarón silvestre. Normalmente el camarón cultivado pigmentado presenta una concentración similar de carotenoides totales. Se propuso que la biosíntesis o depósito de carotenoides puede ser adversamente afectado por una pobre nutrición lipídica.

Chien y Jeng (1992) examinaron el efecto de las fuentes de pigmento, por ejemplo,  $\beta$ -caroteno de harina algal (*Dunaliella salina*), y astaxantina, y regímenes de alimentación sobre la pigmentación de *Penaeus japonicus*. De estas, la astaxantina fue el pigmento más efectivo con óptima coloración de camarón ocurriendo en dietas conteniendo 100 mg/100 g alimento. Las tasas más altas de sobrevivencia ocurrieron con camarones alimentados con dietas suplementadas con astaxantina. Una correlación positiva entre las tasas de sobrevivencia y óptima concentración de pigmento en el tejido del camarón sugirió una función del carotenoide como una reserva de oxígeno intracelular, permitiendo a los crustáceos sobrevivir bajo condiciones hipóxicas comunes en los ambientes de los estanques de cultivo.

*Penaeus monodon* en muchos sistemas de cultivo intensivos palidece en color o se vuelve "azul", comparado con el color verdoso oscuro normal del camarón silvestre. Aunque este síndrome de camarón azul ha sido a menudo descrito como una enfermedad, esto es más parecido a una manifestación de deficiencia de carotenoides dietarios (Howell y Matthews 1991) junto con factores ambientales adversos de estrés tales como suelo y calidad del agua pobres. En camarones, esta deficiencia de carotenoides es asociada con el crecimiento, características de la muda, e incapacidad de la síntesis de carotenoides *de novo*.

### **Propiedades Antioxidantes**

Thompson et al. (1995) mostraron que la ingestión de vitamina A dietaria afecta aspectos de inmunidad humoral o mediada por células en el salmón del Atlántico. Dado que los peces, como todos los animales, carecen de la capacidad de síntesis *de novo* de vitamina A, todo el requerimiento de vitamina A debe ser suministrado en la dieta. Esto puede ocurrir directamente por la adición de vitamina A a la dieta o indirectamente a través del metabolismo de carotenoides precursores tal como la astaxantina.

Entre otros efectos importantes de los carotenoides, tienen una muy alta afinidad secuestradora de radicales tóxicos de oxígeno los cuales resultan, principalmente, de la peroxidación de lípidos, pero los cuales también son generados durante el gasto respiratorio de los fagocitos. Esta propiedad ha conducido a la astaxantina a ser descrita como poseedora de actividad de "super-vitamina E" (Miki, 1991).

Las propiedades antioxidantes de la astaxantina también pueden ser importantes para el metabolismo. Las evidencias también sugieren que la astaxantina y otros carotenoides son importantes en la protección de la peroxidación de los lípidos de la membrana (Kurashige et al., 1990). Christiansen et al. (1995a) mostraron que los niveles de vitaminas antioxidantes A, E, y C se incrementaron en el salmón del atlántico alimentado con una dieta suplementada con astaxantina en comparación con peces alimentados con una dieta libre de astaxantina.

El papel de los antioxidantes en especies acuáticas es de importancia considerable en vista de los altos niveles de ácidos grasos poliinsaturados presentes en muchos peces. La actividad antioxidante de la astaxantina ha recibido considerable atención, especialmente su correlación con la presencia de vitamina E. El  $\alpha$ -tocoferol ha sido largamente reconocido como un importante antioxidante lípido-soluble. El  $\beta$ -caroteno es extremadamente eficiente secuestrador de oxígeno simple (singlet) y es clasificado como un antioxidante preventivo. Las evidencias sugieren que el papel de carotenoides en la captura de especies oxígeno activo es tan importante como el papel que esos compuestos juegan como moléculas de provitamina A.

Investigadores han reportado más altas tasas de descomposición de la astaxantina en la carne de salmónidos con el incremento de los niveles de vitamina E dietaria. En su trabajo de revisión de 1989 sobre las actividades biológicas de carotenoides en peces, Torrissen postuló una similitud en la acción de compuestos de astaxantina con alpha-tocoferol (vitamina E) y el retinol (vitamina A), y sugirió que la astaxantina debería ser considerada entre las vitaminas solubles en grasas, notablemente para los salmónidos. Miki (1991) en Japón observó que la astaxantina fue aproximadamente 10 veces más fuerte que otros carotenoides, incluyendo el  $\beta$ -caroteno, en términos de actividad antioxidante y 100 veces mayor que el alpha-tocoferol. La astaxantina también mostró fuerte actividad como un inhibidor de la peroxidación de lípidos mediada por formas activas de oxígeno.

La oxidación de lípidos es considerada como productor de peróxidos lipídicos los cuales son especies de oxígeno reactivo que son más descompuestos a otros radicales conteniendo oxígeno. Especies de oxígeno reactivo atacan casi todos los componentes celulares tales como proteínas, lípidos y membranas. Así, el mejoramiento del potencial defensivo de peces cultivados contra el estrés oxidativo es muy importante. Los carotenoides, junto con el tocoferol, han sido observados en la lipoproteína del suero de peces y se piensa protegen a las lipoproteínas de la oxidación con otros antioxidantes circulantes.

Los carotenoides pueden ser caracterizados por su capacidad para interactuar con especies de oxígeno químicamente reactivas llamadas "oxígeno singlet", el cual participa en reacciones oxidativas las cuales pueden deteriorar o destruir importantes partes celulares, incluyendo membranas, enzimas y ácidos nucleicos (DNA). Los carotenoides son capaces de capturar especies de radicales libres tal como oxígeno singlet ( $^1O_2$ ) así como oxígeno triplete ( $^3O_2$ ). El  $\beta$ -caroteno es reconocido como un antioxidante lipídico, por ej. una trampa de radicales libres y secuestrador de oxígeno singlet que causa peroxidación lipídica y fotosensitividad. El efecto protector de los lípidos por  $\beta$ -caroteno se complementa con efecto protector de la vitamina E, dependiendo del contenido de oxígeno del tejido. El incremento de las investigaciones con  $\beta$ -caroteno están demostrando su papel metabólico como un antioxidante vitamínico benéfico en protección contra la toxicidad inducida químicamente.

Como previamente se hizo notar (Miki 1991), la astaxantina mostró fuerte actividad inhibidora de peroxidación lipídica mediada por formas activas de oxígeno, y fue propuesta para ser una "super vitamina E." Otros estudios (Palozza y Krinsky 1992), han también documentado el papel de la astaxantina como un antioxidante extremadamente eficiente. Las evidencias sugieren que la astaxantina y otros carotenoides son importantes en la protección de los lípidos de las membranas contra la peroxidación (Miki 1991; Oshima et al. 1993). Los carotenoides también son activos en la transferencia de calcio a través de la membrana, sirviendo como reservorios de oxígeno en la cadena respiratoria neuronal, de esta manera protegiendo a tejidos sensibles y compuestos reactivos del daño debido a la oxidación. Los carotenoides son ahora considerados para la función de antioxidantes durante el transporte en la hemolinfa y dentro de los huevos, protegiendo los nutrientes y tejidos embrionarios del daño oxidativo. Teraro (1989) encontró que la cantaxantina y astaxantina fueron los antioxidantes más efectivos que el  $\beta$ -caroteno en la estabilización de radicales libres. Otros estudios (Kurashige et al. 1990) mostraron la función de la astaxantina como un potente antioxidante, *in vivo* e *in vitro*, en la inhibición de peroxidación lipídica.

### Aspectos de Desarrollo

Los salmónidos absorben y depositan en el músculo carotenoides oxigenados tales como la astaxantina y la cantaxantina durante el crecimiento. En la maduración sexual, el pigmento es movilizado y transferido a la piel en machos y a los huevos en las hembras (Figura 5). Comparando el depósito de astaxantina y cantaxantina en la trucha arco iris, ha sido demostrado que la astaxantina es depositada mas eficientemente en la carne de la trucha, principalmente debido a su absorción preferente en el tracto digestivo. Los reportes sobre transporte de astaxantina en sangre del salmón del Atlántico han demostrado que la astaxantina esta asociada con la fracción proteínica del plasma y que la albúmina es la mayor proteína de transporte de astaxantina. Los investigadores han examinado como la astaxantina es absorbida, metabolizada y transportada a los tejidos y órganos blanco en salmónidos. El carotenoide es reducido a la zeaxantina y metabolizado a vitamina A. La absorción ocurre en el intestino donde el carotenoide es convertido a vitamina A, principalmente en la pared intestinal. La astaxantina es transportada en la sangre por lipoproteínas, siendo el hígado el mayor órgano metabólico. En una madurez sexual, el compuesto es transferido de la carne a la piel y gónadas. Recientemente, Nakano et al. (1995) examinaron las características bioquímicas del hígado y la sangre en la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) alimentada con una dieta suplementada con levadura roja (*Phaffia rhodozyma*) o astaxantina sintética. Datos basados sobre índices hepatosomáticos y transaminasa glutámico-oxaloacética del suero, tan bien como la cantidad peróxido lipídico en suero, demostraron que esos suplementos carotenoides afectaron la salud de los peces por mejoramiento de la función del hígado y el incremento del nivel potencial defensivo contra el estrés oxidativo.

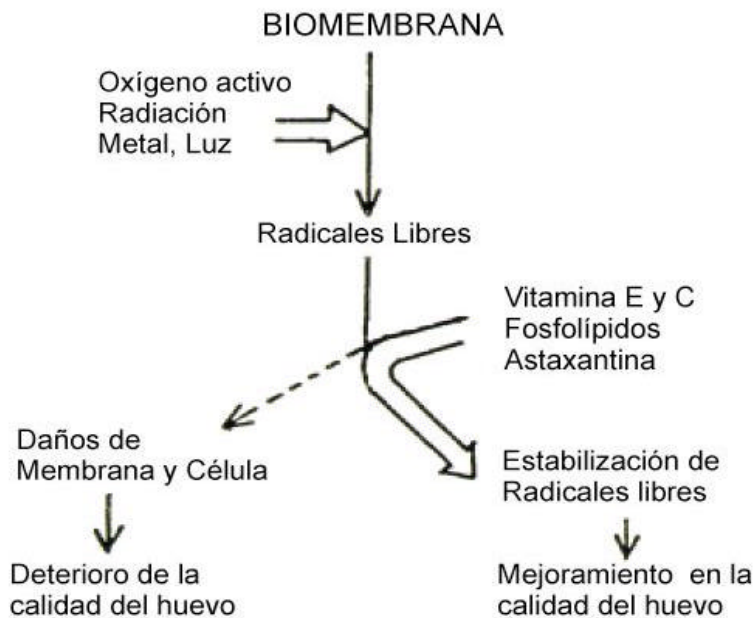


Figura 5. Posible papel de la astaxantina en el mejoramiento de la calidad de huevos del red seabream.

Las evidencias se están acumulando para apoyar la hipótesis de que la astaxantina y otros carotenoides tienen un papel importante en el metabolismo del salmón del Atlántico y otras especies de peces. Estudios recientes (Christiansen y Torrissen, 1996) indicaron que la astaxantina funciona como provitamina A para juveniles del salmón del Atlántico. El almacén de vitamina A corporal se incrementó en los peces alimentados con dietas que contenían astaxantina. Hubo una tendencia a una mayor sobrevivencia en los grupos alimentados con dietas conteniendo astaxantina cuando se compararon con peces alimentados con dietas no suplementadas. Al-Khalifa y Simpson (1988) mostraron que la astaxantina es convertida a vitamina A en la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) que son deficientes en vitamina A. Una relación dosis-respuesta entre el contenido de astaxantina en la dieta y el contenido de vitamina A de peces ha sido observada durante el período de primera alimentación del salmón del Atlántico (Christiansen et al., 1995b). Crecimiento reducido y alta mortalidad fueron observados en los peces alimentados con dietas bajas en astaxantina. Los resultados de estudios de Thompson et al. (1995) sugieren que la vitamina A o su precursor, astaxantina, es requerida para mantener ciertos aspectos del sistema inmune de la trucha arco iris. Un esfuerzo de provitamina A de la astaxantina también ha sido reportada en otras especies de peces (Kalsuyama y Matsuno, 1988). Además la adición de la astaxantina a la dieta del salmón del Atlántico (parr/smolt) ha mostrado elevar los niveles de las vitaminas antioxidantes retinol, tocoferol y ácido ascórbico en el hígado cuando es comparada con peces alimentados con una dieta sin suplementación de astaxantina (Christiansen et al., 1995a).

Estudios con la primera alimentación del salmón (Christiansen et al. 1994) han indicado la presencia de astaxantina dietaria como un factor primario que afecta la sobrevivencia, crecimiento y concentración de vitamina A de los alevines. Esto último de nuevo sugiere una función de provitamina A para la astaxantina. Se encontró que la astaxantina es esencial para alevines durante el período de primera alimentación. Otros investigadores han demostrado el efecto de la astaxantina y de ingredientes dietarios que contienen astaxantina, tales como la harina de krill, en dietas para reproductores de peces y en la subsecuente sobrevivencia de alevines. Estudios adicionales han documentado la efectividad de la astaxantina como un componente dietario en dietas para reproductores del red seabream (Watanabe y Miki 1993).

Los carotenoides también influyen en el sistema endocrino, en relación al desarrollo gonadal, y maduración, fertilización, eclosión, viabilidad y crecimiento en peces y crustáceos (Latscha 1990). Miki et al. (1982) reportaron sobre la composición de carotenoides en los ovarios de crustáceos seleccionados, documentando la notable concentración de astaxantina o esteres de astaxantina. Christiansen y Torrissen (1995) fracasaron en encontrar una relación entre el contenido de astaxantina de los huevos del salmón del Atlántico y las tasas de sobrevivencia desde la incubación hasta la eclosión. Tampoco las tasas de sobrevivencia desde la eclosión a la primera alimentación correlacionaron con el contenido de astaxantina de los huevos en el sentido de que huevos descoloridos se comportaron tan bien como los altamente pigmentados.

Cada vez existe más evidencia experimental que sugiere que los carotenoides son nutrientes requeridos por los animales acuáticos. Esto es además documentado en un extenso conjunto de evidencia científica que hace hincapié en el papel vital de los carotenoides en la fisiología y sobre toda la salud animal. La similitud en funciones de la astaxantina y la cantaxantina, comparadas con el alfa-tocoferol (vitamina E) y el retinol (vitamina A) han llegado a sugerir que esos dos carotenoides deberían ser considerados como vitaminas liposolubles. Si de acuerdo a Hendrick et al. (1994), "un compuesto dietario requerido en cierto estadio del ciclo de vida es considerado un nutriente", entonces la astaxantina puede ser considerada un nutriente para el salmón del Atlántico.

Aparte del obvio papel en la pigmentación, mucha atención está siendo prestada a las actividades biológicas de la astaxantina en animales acuáticos, siendo la mayoría de las investigaciones enfocadas al salmón del Atlántico y a la trucha arco iris. Varias funciones específicas y críticas en el metabolismo y la reproducción han sido propuestas desde la década pasada.

Torrissen y Christiansen (1995) concluyeron sobre la esencialidad de los carotenoides para los salmónidos, y notaron similitud en la acción de la astaxantina, comparable a la de las vitaminas A y E. Otros estudios, usando substratos de marcadores con  $^{14}\text{C}$  en pruebas de alimentación con salmónidos, han demostrado la función de la astaxantina en varios procesos metabólicos tan bien como su asociación con el metabolismo de la vitamina A. Entre la diversidad de funciones fisiológicas observadas, la actividad de provitamina A de los carotenoides con anillos de  $\beta$ -ionona como la astaxantina es de gran importancia.

Christiansen *et al.* (1996) demostraron un efecto de la astaxantina dietaria sobre el crecimiento, estatus de antioxidantes, química sanguínea e inmunidad en el salmón del Atlántico. Los peces alimentados con una dieta sin suplementación de astaxantina mostraron claros signos de desnutrición, incluyendo apetito y crecimiento pobres. Además, se encontraron mayores concentraciones de retinol (10 veces) en el músculo e hígado de peces alimentados con dieta suplementada con astaxantina. El estudio mostró que la interacción entre las vitaminas antioxidantes y la astaxantina pudiera ser una importante función de la astaxantina. En los inicios, Christiansen *et al.* (1994) observaron un efecto de ahorro de vitamina A de la astaxantina en el salmón del Atlántico que fue iniciado con dietas a base de caseína. Estudios de alimentación con juveniles del salmón del Atlántico (Christiansen y Torrissen 1996) revelaron un incremento en la sobrevivencia de peces alimentados con dietas que contenían astaxantina. Los peces requirieron astaxantina como fuente de vitamina A, pero además, el requerimiento de astaxantina dietaria incrementó cuando los juveniles aumentaron de tamaño. En estudios de primera alimentación en peces del salmón del Atlántico, Christiansen y Torrissen (1995b) encontraron una concentración de astaxantina dietaria mínima necesaria de 5.1 mg kg<sup>-1</sup> para lograr el máximo crecimiento y sobrevivencia durante el período de la primera alimentación. Además, una baja biodisponibilidad de vitamina A palmitato y acetato sugieren una función de provitamina A para la astaxantina durante ese mismo período.

Estudios recientes sobre huevos de bacalao silvestre y cultivado han mostrado que la astaxantina es el mayor carotenoide. La distribución isomérica de la astaxantina en los huevos reflejaron la composición isomérica de la dieta. Cuando la astaxantina y cantaxantina estaban presentes en la dieta, la astaxantina fue depositada preferencialmente. Otros trabajos han mostrado una composición carotenoide y distribución isomérica de la astaxantina de los huevos de bacalao comparable a la encontrada en la fuente alimenticia de crustáceos zooplanctónicos.

### **Ecosistemas acuáticos**

Desde hace tres décadas, se estableció que la astaxantina es el carotenoide más común en invertebrados marinos, notablemente en el zooplancton. Desde 1964, la astaxantina fue identificada como el mayor componente de los pigmentos en 70 especies de copépodos. En análisis de isómeros de astaxantina de crustáceos, incluidos algunos que son importantes fuentes de alimento para el salmón silvestre, la astaxantina libre y esterificada fueron encontradas como los únicos carotenoides presentes. Los cinco crustáceos examinados

contuvieron una mezcla de los tres isómeros de astaxantina. Los estudios de copépodos (principalmente del género *Calanus*) y eufausidos (referidos como "krill") han repetidamente demostrado la presencia de astaxantina como predominante o único, carotenoide.

En vista de la amplia y demostrada ocurrencia de astaxantina en niveles tróficos acuáticos, con su depósito en peces carnívoros tales como los salmónidos, las evidencias sugieren fuertemente su función crítica como un antioxidante natural en dichos ecosistemas. Este papel resulta el más evidente en vista de la presencia de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga en algas marinas, por el depósito de estos compuestos lábiles en el zooplancton, así como los altos requerimientos de energía (grasas) en los salmónidos. Ese tipo de lípidos son naturalmente susceptibles a la oxidación debido a que son altamente insaturados.

La existencia de cadenas alimenticias acuáticas como los sistemas tróficos intermareales deben ser consideradas en estudios de las relaciones entre el alimento del ambiente, la dieta y la producción animal final. La información que se genera en investigaciones sobre transferencia de carotenoides y actividades de alimentación de invertebrados en aguas marinas costeras tiene una aplicación relevante en el cultivo de camarón, con su combinada entrada orgánica y de nutrientes del alimento suplementario y de la productividad natural del estanque. Mediciones *in situ* de la transferencia de carotenoides y su significancia en la pigmentación de copépodos calanoideos ha sido estudiada extensamente. Mientras que diferentes tipos de zooplancton metabolizan los carotenoides por diversas vías, todas esas vías coinciden en la astaxantina y sus esteroides. Los carotenoides (por ej., la astaxantina) de zooplancton marino no pueden ser sintetizados *de novo*, pero dependen de la asimilación de un precursor el cual sirve como un patrón para su producción. En crustáceos, el precursor principal es el  $\beta$ -caroteno.

Ringelberg (1980) presenta esquemáticamente una vía de carotenoides de algas hacia astaxantina y esteroides de astaxantina, los mayores constituyentes de la pigmentación en el zooplancton. Se sugirió que la vía biosintética más probable del metabolismo de carotenoides en crustáceos es una secuencia oxidativa, comenzando con  $\beta$ -caroteno de origen algal. Los productos finales de astaxantina y esteroides de astaxantina ocurren como grupos prostéticos de carotenoproteínas y lipocarotenoproteínas.

## SUMARIO

Mucha información está siendo generada sobre los carotenoides en acuicultura, aparte de su bien conocido papel como agentes pigmentantes. De especial mención son los estudios sobre las actividades biológicas del oxycarotenoide astaxantina en salmónidos. El papel de la astaxantina como un antioxidante metabólicamente activo es particularmente relevante en términos de fisiología animal acuática.

Los mayores beneficios de las dietas fortificadas con astaxantina pueden ser especialmente importantes en estadios tempranos de desarrollo de peces y crustáceos, así como bajo condiciones de cultivo intensivo, donde los factores de estrés probablemente juegan un papel significativo.

La comprobación de la actividad de los carotenoides en las funciones inmunes animales acentúa la necesidad de realizar estudios sobre los aspectos benéficos de usar dietas fortificadas con carotenoides, en especies acuáticas cultivadas bajo condiciones



potencialmente estresantes. La relación entre esto último y el desarrollo de patógenos oportunistas y pérdida de resistencia a las enfermedades necesita un análisis cuidadoso. Esto tiene particular relevancia en cultivo intensivo de crustáceos donde niveles de oxígeno menores a los óptimos pueden ocurrir, resultando en varios grados de anoxia. Como se mencionó, el síndrome del camarón azul de *P. monodon* (Howell y Matthews 1991; Chein y Jeng 1992) es un ejemplo de tales asociaciones.

Las investigaciones de Noruega notan la significancia de la astaxantina sobre el sistema inmune y resistencia a enfermedades del salmón del Atlántico durante la primera alimentación. La Astaxantina en dietas para reproductores de peces juega un papel en la subsecuente sobrevivencia de los alevines de salmónidos. En Japón, Watanabe y Miki (1993) en estudios de dietas para reproductores de red seabream (*Pagrus major*), encontraron que el desove y la calidad de los huevos fue grandemente mejorado con el uso de krill crudo en la dieta para los reproductores. Esto fue atribuido a la fracción liposoluble conteniendo fosfatidilcolina y astaxantina. La suplementación de dietas de harina de pescado con 2 mg de astaxantina sintética mejoró la calidad de los huevos, mismo que se reflejó en la productividad final. No se encontraron carotenoides en huevos producidos por reproductores que fueron alimentados con la dieta control y con dietas con  $\beta$ -caroteno. Los niveles de astaxantina necesarios en la dieta varían significativamente ya que los requerimientos nutricionales están en función de los estadios del ciclo de vida de peces. Otra consideración está relacionada con el uso cada vez mayor de alimentos acuícolas con alto contenido de lípidos (energía), con énfasis en posibles correlaciones entre niveles lipídicos y el metabolismo de carotenoides. Mientras que la completa función biológica de la astaxantina en peces es aún desconocida, los estudios de Christiansen (1996) indican claramente que este carotenoide tiene un importante papel durante los estadios tempranos del ciclo de vida del salmón del Atlántico. Más investigación es requerida para determinar si otros carotenoides pueden reemplazar a la astaxantina en varios procesos metabólicos, así como también estudios sobre la evolución de la astaxantina y las vitaminas antioxidantes A, C y E durante el desarrollo embrionario y de alevines.

Otros estudios recientes sobre la astaxantina y nutrición de peces incluyen investigaciones de variabilidad en cambios de concentración en suero durante la maduración sexual, biodisponibilidad de isómeros de astaxantina y metabolismo de  $^{14}\text{C}$ -astaxantina. Esos últimos estudios han mostrado en el salmón del Atlántico que la fracción plasmática de la sangre contiene la porción más grande de la radioactividad, asociada con una proteína con similar peso a la albúmina. Esto puede anticipar que más investigaciones de este tipo sobre el metabolismo intermediario de astaxantina revelarán información adicional relevante sobre el papel de éste y otros carotenoides en la nutrición de peces.

Las dietas para larvas acuáticas deben ser formuladas para asegurar la adecuada suplementación nutricional con carotenoides, específicamente astaxantina. Una variedad de fuentes, naturales y sintéticas, de este carotenoide se han identificado. Atención cuidadosa en el cultivo de crustáceos debe ser dada a la potencialmente estresante transferencia de los animales desde larvas, o estadios de primera alimentación, a los sistemas de engorda, y los efectos de la suplementación con la astaxantina necesaria para reducir las mortalidades, y de esta manera permitir el incremento en el crecimiento postlarval. Evidencias de diversas fuentes sobre los efectos de factores de estrés sobre la resistencia a enfermedades e inmunidad de peces en los estadios tempranos de desarrollo sostienen esas observaciones.

## Referencias:

- Al-Khalifa, A.S. and K.L. Simpson. 1988. Metabolism of astaxanthin in the rainbow trout (*Salmo gairdneri*). Comp. Biochem. Physiol. 91B: 563-568.
- Bjerkeng, B., T. Storebakken, and T. Liaaen-Jensen, S. 1992. Pigmentation of rainbow trout from start feeding to sexual maturation. Aquaculture 108: 333-346. Bjerkeng, B., M.
- Folling, S. Lagocki, T. Storebakken, J.J. Olli, and N. Alsted. 1997. Bioavailability of all E-astaxanthin and z-isomers of astaxanthin in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Aquaculture 159: 63-82.
- Burton, G.W. 1989. Antioxidant action of carotenoids. J. Nutrition 119: 109-111. Castillo, R. and G. Negre-Sadargues. 1991. Effect of eyestalk ablation on the metabolism of carotenoid pigments of the hermit crab *Clibanarius erythropus* Laibelle (1818) (Crustacea Decapoda Anoroura) Comp. Biochem. & Physiol. 99B: 187-192.
- Chien, Y.M. and S.C. Jeng. 1992. Pigmentation of kurama prawn, *Penaeus japonicus* Bates, by various pigment sources and levels and feeding regimes. Aquaculture 102: 333-346.
- Chouber, G. and T. Storebakken. 1989. Dose response to astaxanthin and canthaxanthin pigmentation of rainbow trout fed various dietary carotenoid concentrations. Aquaculture 81: 69-77.
- Christiansen, R. 1996. The effects of astaxanthin on the early life stages of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). Ph.D. Dissertation. University of Bergen, Norway. 328 pp-
- Christiansen, R. and O.J. Torrissen. 1996. Growth and survival of Atlantic salmon, *Salmo salar* L. fed different dietary levels of astaxanthin. Juveniles: Aquaculture Nutrition 2: 55-62.
- Christiansen, R., O. Lie, and O.J. Torrissen. 1994. Effect of astaxanthin and vitamin A on growth and survival of Atlantic salmon fry, *Salmo salar* L. Aquaculture Fish. Management 25: 903-914. -
- Christiansen, R., O. Lie, and O.J. Torrissen. 1995b. Growth and survival of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., fed different dietary levels of astaxanthin: First-feeding fry. Aquaculture Nutrition 1: 189-198.
- Christiansen, R., J. Glette, O. Lie, O.J. Torrissen, and R. Waagbo. 1995a. Antioxidant status and immunity in Atlantic salmon, *Salmo salar* L., fed semi-purified diets with and without astaxanthin supplementation. J. Fish Diseases 18: 317-328. Craig, J.C.A. 1985. Egg quality and egg pigment content in salmonid fishes. Aquaculture 47: 61-88.
- D'Abramo, L.R., N.A. Baum, C.E. Bordner, and D.E. Conklin. 1983. Carotenoids as a source of pigmentation in juvenile lobsters fed a purified diet. Can. J. Fish. Aquatic Science 40: 699-704.
- Desy, M.H., G. Negre-Sadargues, R. Castillo, and J.P. Trilles. 1995. Evolution of carotenoid metabolic capabilities during the early development of the European lobster *Homarus gammarus* (Linne 1758). Comp. Biochem. Physiol. Goodwin, T.W. 1984. Biochemistry of the carotenoids. In: The Physiology of Crustacea. Vol. 1. Chapman & Hall, London. 356 pp.
- Grung, M., Y.S. Svendsen, and S. Liaaen-Jensen. 1993. The carotenoids of eggs of wild and farmed cod (*Gadus morhua*). Comp. Biochem. Physiol. 106B: 237-242.
- Hatlen, B., M. Tabling, and B. Bjerkeng. 1998. Relationship between carotenoid concentration and colour of filets of Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.), fed astaxanthin. Aquaculture Research 29: 191-202.
- Houlihan, D.F. and C.J. Secombes. 1994. Effect of dietary vitamin A intake on the immunocompetence of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). Fish Physiol. Biochem. 12: 513-523.
- Howell, B.V. and A.D. Matthews. 1991. The carotenoids of wild and blue disease affected farmed tiger shrimp (*Penaeus monodon*, Fabricus). Comp. Biochem. Physiol. 98B: 375-379.
- Katagira, K., Y. Kashima, T. Maoki, and Matsuma. 1987. Occurrence of pirardixanthin derivatives in the prawn *Penaeus japonicus*. Comp. Biochem. Physiol. 87B: 161-163.
- Katayama, T., T. Katama, and C.O. Chichester. 1972. The biosynthesis of astaxanthin in the prawn, *Penaeus japonicus* Bate (Part 11). Intern. J. Biochem. 3: 363-368.
- Krinsky, J.I. 1994. The biological properties of carotenoids. Pure Appl. Chem. 66: 1003-1010.
- Kurshize, M., E. Okimasu, E. Inoue, and K. Utsuma. 1990. Inhibition of oxidative injury of biological membranes by astaxanthin. Physiol. Chem. Phys. Med. NMR 22: 27-38. Latscha, T. 1990. Carotenoids-their nature and significance in animal feeds. F. Hofmann-La Roche, Ltd. Basel, Switzerland. 110 pp.
- Maugle, P., T. Kamata, S. McLem, K.I. Simpson, and T. Katayama. 1980. The influence of eyestalk ablation on the carotenoid composition of juvenile *Macrobrachium rosenbergii*. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 46: 901-904.

- Meyers, S.P.** 1994. Developments in world aquaculture, feed formulations, and the role of carotenoids. *Pure & Appl. Chem.* 66: 1069-1076.
- Meyers, S.P. and T. Latscha.** 1997. Carotenoids in crustacean nutrition. *In* Crustacean Nutrition: Advances in World Aquaculture, Vol. 6. (D. Abramo, D. Conklin and D. Ageuyama, eds.) World Aquaculture Society: 164-193, Baton Rouge, Louisiana.
- Meyers, S.P. and H.M. Chen.** 1982. Astaxanthin and its role in fish culture. *In* Proc. Warmwater Fish Culture Workshop (R.R. Stickney and S.P. Meyers, eds.) World Mariculture Society Special Publ. 3: 153-165.
- Miki, W.** 1991. Biological functions and activities of animal carotenoids. *Pure Appl. Chem.* 63: 141-146.
- Muriana, F.J.G., V. Ruiz-Gaterrez, M.L. Gallardo, and M.I. Minguez-Mosgurea.** 1993. A study of the lipid and carotenoprotein in the prawn, *Penaeus japonicus*. *J. Biochem.* 114: 223-229.
- Nakano, T., M. Tosa, and M. Takeuchi.** 1995. Improvement of biochemical features in fish health by red yeast and synthetic astaxanthin. *J. Agric. Food Chem.* 43: 1510-1573.
- Negre-Sadargues, G.R., H. Castillo, S. Petit, R.G. Sanes, J.C.G. Martinez, Milicus, G. Choubert, and J.P. Trilles.** 1993. Utilization of synthetic carotenoids by the prawn *Penaeus japonicus* reared under laboratory conditions. *Aquaculture* 1 10: 151-159.
- Nur-E-Borhan, S., S. Okada, T. Wantabe, and K. Yamaguchi.** 1995. Carotenoproteins from the exoskeleton and the muscular epithelium of the black tiger prawn *Penaeus monodon*. *Fisheries Sciences* 60: 337-343.
- Okada, S., S.A. Nur-E-Borhan, and K.Y. Yamaguchi.** 1994. Carotenoid composition in the exoskeleton of commercial black tiger prawn. *Fisheries Sciences* 60: 213-215.
- Oshima, S., F. Ojima, H. Sokamoto, Y. Ishiguro, and J. Terao.** 1993. Inhibitory effect of  $\beta$ -carotene and astaxanthin on photosynthesized oxidation of phospholipid bilayers. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* 39: 607-615.
- Palozza, P. and N.I. Krinsky.** 1992. Antioxidant effects of carotenoids in vitro and in vivo: An overview. *Methods Enzymol.* 213: 403-421.
- Petit, H., S. Sance, G. Negre-Sadargues, R. Castillo, and J.P. Trilles.** 1991. Ontogeny of carotenoid metabolism in the prawn *Penaeus japonicus* Bate 1888 (Crustacea Penaeidae). A qualitative approach. *Comp. Biochem. Physiol.* 99B: 667-671.
- Ringleberg, J.** 1980. Aspects of red pigmentation in zooplankton, especially copepods. *In* Kerfoot, W.C. (ed.) *Evolution Ecology of Zooplankton Communities*. Univ. of New Hampshire, Hanover. pp. 91-97.
- Shahidi, et al.** 1998. Carotenoid pigments in seafoods and aquaculture. *Crit. Rev. Food Sci.* 38: 1-67.
- Storebakken, T. and H.K. No.** 1992. Pigmentation of rainbow trout. *Aquaculture* 95: 289-295.
- Tanaka, Y., H. Matsuguchi, T. Katayama, K.L. Simp'gon, and C.O. Chichester.** 1976. The biosynthesis of astaxanthin. XVI. The carotenoid in crustacea. *Comp. Biochem. Physiol.* 54B: 391-393.
- Terao, J.** 1989. Antioxidant activity of  $\beta$ -carotene-related carotenoids in solutions. *Lipids* 24: 659-661.
- Thompson, I., G. Choubert, D.F. Houlihan, and C.J. Secombes.** 1995. The effect of dietary vitamin A and astaxanthin on the immunocompetence of rainbow trout. *Aquaculture* 133: 91-102.
- Torrissen, O.J. and R. Christiansen.** 1995. Requirements for carotenoids in fish diets. *J. Appl. Ichthyol.* 11: 225-230.
- Torrissen, O.J., R.W. Hardy, and K.D. Shearer.** 1989. Pigmentation of salmonids Carotenoid deposition and metabolism. *CRC Crit. Rev. Aquat. Sci.* 1: 209-225.
- Valin, A., R. Castillo, G. Negre-Sadargues, and R. Lenel.** 1987. Quantitative aspects of carotenoid pigment circadian variations in the crayfish *Astacus eplodactylus*. *Biochem. Systematics & Ecology* 15: 607-610.
- Watanabe, T. and W. Miki.** 1993. Astaxanthin: An effective dietary component for red seabream broodstock. *In* Kauschik, S.J. and P. Luquet, eds. *Fish Nutrition in Practice*. IVth Intern. Symposium on Fish Nutrition and Feeding. INRA Les Colloques 61: 27-36.
- Yamada, S., Y. Tanaka, M. Sameshima, and Y. Ito.** 1990. Pigmentation of prawn (*Penaeus japonicus*) with carotenoids. 1. Effect of dietary astaxanthin, betacarotene and canthaxanthin on pigmentation. *Aquaculture* 87: 323-330.
- Zagelsky, P.F., E.E. Eliopoulos, and J.B.C. Findlay.** 1991. The lobster carapace carotenoprotein and crustacyanin. *Biochemical J.* 274: 79-83.