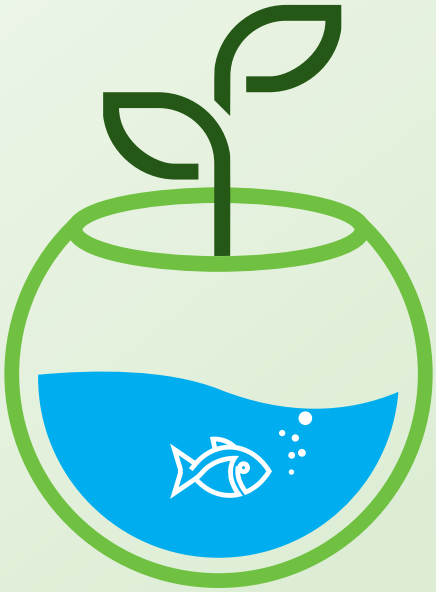


FUNDAMENTOS DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN ACUICULTURA INTENSIVA

- 2018 -

GOBIERNO DE COLOMBIA
MINAGRICULTURA
AUNAP
AUTORIDAD NACIONAL DE ACUICULTURA Y PESCA
"Acuicultura y Pesca con Responsabilidad"
FFCC
Fundación Fauna Caribe Colombiana

In memoriam para el amigo Hermes Orlando Mojica Benítez

Si usted empezó a leer este texto por aquí, está haciendo lo correcto. Este libro va a pasar por muchas manos durante muchos años, y quien empiece a leerlo por este punto, hará justicia a su calidad y trascendencia. Pasarán centurias y el conocimiento aquí entregado servirá para mejorar la calidad de vida de muchas personas, desencadenará una serie de sucesos que necesariamente tendrán que influir en la vida de ellas para bien. Todo, porque fue hecho por quienes pusieron su empeño y dedicación, su experiencia y amor en la redacción, como una contribución a cambiar el mundo. Así lo hizo el biólogo marino Hermes Mojica Benítez. Esos sentimientos que hay detrás de algo frío como un libro técnico, tienen el peso de los seres humanos que intervinieron en él. Y es importante saberlo y reconocerlo. Hacer esto es darle el carácter sagrado que debe tener todo conocimiento que va dirigido a lograr que el mundo gire. Cosas como esas las comprendió este gran profesional, quien no alcanzó a ver esta obra salir a la luz, pero que tuvo muy claro en su vida que cada cosa que se hace es por el bien de quien lo necesita. Por eso la dedicó a esto, a lograr conocer, interpretar y sobre todo entregar conocimiento y amor muchas veces a costa de sí mismo y sus sueños personales. Algo así elevó su espíritu y logró elevar el espíritu de la humanidad en un grado más, como hacen los grandes hombres, aquellos que pasan a la historia porque tocan la fibra de muchísimas personas para generar un cambio positivo, como fin último de la vida.

No es necesario en éste párrafo hablar de su carrera. En la actualidad su currículum, su vida, sus logros, opiniones y esperanzas están difundidas en el amplio y alterno mundo digital. Basta con buscar su nombre. De nada vale el conocimiento puro, si no hay un vehículo que maneje el lenguaje de lo cotidiano con los hombres del campo, con los profesionales de las oficinas, con los científicos y la gente del común. Él, Hermes Mojica Benítez, lo hizo durante su vida, y ese conocimiento que entregó estuvo siempre tocado con la magia de la humanidad, de la sonrisa y la generosidad, que sembró inquietud y apego por el saber entre estudiantes, profesionales, alumnos y campesinos relacionados y no relacionados con este sector vital de la economía mundial. En ese sentido, marcó huella, y usted ahora, sabiendo esto, lo va a recordar, lo va a citar, va a investigar sobre él, y aprender en la posteridad lo que enseñó, y así mismo, pensará en el respeto que merecen también, todos y cada uno de los autores que intervienen aquí y que tuvieron el privilegio de conocerlo, y entonces, cada cosa que aprenda, practique o consulte de ésta obra, tendrá la trascendencia y el sentido que nuestro amigo siempre quiso.

Enrique Torres Quevedo
Biólogo Marino

EDITORES:

HERMES ORLANDO MOJICA BENÍTEZ
MIGUEL ANGEL LANDÍNES PARRA
DAVID FELIPE RIVAS SÁNCHEZ

OFICINA DE GENERACION DEL CONOCIMIENTO Y LA INFORMACION -OGCI



GOBIERNO
DE COLOMBIA

AUNAP
AUTORIDAD NACIONAL
DE ACUICULTURA Y PESCA

"Acuicultura y Pesca con Responsabilidad"

2018

AUTORIDAD NACIONAL DE ACUICULTURA Y PESCA –AUNAP

NICOLAS DEL CASTILLO PIEDRAHITA
Director General

WILBERTO ANGULO VIVEROS
Jefe (e) Oficina de Generación del Conocimiento y la Información –OGCI

Comité Editorial: Hermes Orlando Mojica Benítez, David Felipe Rivas Sánchez; Miguel Ángel Landines Parra

Diseño y Diagramación:
Fundación Fauna Caribe Colombiana, Wilfred Mantilla.

CITAR COMO:

• Documento completo: Mojica B, H, O,. M, A. Landínes P y David F. Rivas S (Eds) 2018, Fundamentos de Innovación En Fundamentos de innovación Tecnológica en Acuicultura Intensiva. Oficina de Generación del Conocimiento y la Información, Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca AUNAP ©, 270 p

• Capítulo o aparte del documento: (Autores) 2018. (Nombre del capítulo o aparte del documento). En: Fundamentos de Innovación Tecnológica en Acuicultura Intensiva. Oficina de Generación del Conocimiento y la Información, Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca AUNAP ©, pp. xx-xx

ISBN: 978-958-56718-7-4

Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca AUNAP ©
El diseño, diagramación ye impresión de este documento se publicó en el marco del Contrato No. 234 de 2018 entre la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca AUNAP y la Fundación Fauna Caribe Colombiana - FFCC

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión del contenido de este documento para fines educativos u otros fines no comerciales, sin previa autorización del titular de los derechos de autor, si y solo si se reconocen los créditos de instituciones, autores. Editores y fuentes de información que participaron o se tuvieron en cuenta para la elaboración de este documento.

La información presentada en este documento es responsabilidad exclusiva de los autores y no compromete la posición general de la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca AUNAP o la Fundación Fauna Caribe Colombiana - FFCC

COMITÉ EDITORIAL

HERMES ORLANDO MOJICA BENÍTEZ Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca AUNAP, Oficina de Generación del Conocimiento y la información

MIGUEL ANGEL LANDINES PARRA, Facultad de medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad nacional de Colombia

DAVID FELIPE RIVAS SÁNCHEZ Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca AUNAP, Oficina de Generación del Conocimiento y la información

INDICE

CAPITULOS

Pag.

Capítulo I: Generalidades
Miguel Ángel Landines Parra **8**

Capítulo II: Sistemas de Recirculación en Acuicultura (SRA)
Sergio Zimmermann **18**

Capítulo III: Fundamentos De Acuaponía
Hermes Orlando Mojica Benítez **52**

Capítulo IV: Cultivo intensivo de camarón blanco (Litopenaeus vannamei) con tecnología de biofloc (BFT)
Anselmo Miranda-Baeza;
José Alberto Huerta-Rábago
Jesús Alberto Lizárraga-Armenta **92**

Capítulo V: Cultivo intensivo de Tilapia con Tecnología Biofloc -BFT
Jorge Alejandro Medina Motta **115**

Capítulo VI: Calidad del Agua en Sistemas Cerrados de Acuicultura
Jaime Fernando González Mantilla **150**

Capítulo VII: Fundamentos De Nutrición Sustentable En Acuicultura
Diego Alberto Rodríguez Avella
Miguel Ángel Landinez Parra **171**

Capítulo VIII: Energías Alternativas Para La Acuicultura Intensiva
Ing Michele Sonego **216**

Capítulo IX: Elementos para la Formulación y Evaluación de Proyectos
Sandra Mariana Amaya Pérez **245**

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

Miguel Ángel Landines Parra
Zootecnista, Ph. D.
Profesor Asociado Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
E-mail: malandinezp@unal.edu.co



Acuapónicos La Mariana (Tenjo-Cundinamarca). Foto: Miguel Landines

En los últimos tiempos, el concepto de utilización racional del agua ha cobrado vigencia y gran relevancia dentro de los sistemas productivos de todo el mundo. Actividades antropogénicas como la urbanización de los campos, minería y contaminación de los cuerpos de agua, entre otros, sumados a la tala de bosques y deforestación incontrolada, incluso en zonas de páramo, han contribuido al deterioro de las fuentes hídricas y al déficit en el abastecimiento de agua, situación que ha disparado las alarmas respecto a la disponibilidad futura del vital líquido, el cual en algunas regiones ya es en extremo escaso.

Por otro lado, la acuicultura como actividad generadora de alimento y responsable en buena medida de la seguridad alimentaria del planeta, debe utilizar agua para sus procesos productivos, surgiendo así un reto para que dicha generación no vaya en contravía con la conservación del recurso más preciado para la vida: el agua. Por

ende, dentro de la acuicultura moderna, el reto fundamental es su correcta utilización, la cual se logra entre otros factores disminuyendo el consumo, promoviendo la reutilización del recurso y minimizando las descargas contaminantes a los efluentes. En buena medida, dichos parámetros se logran al utilizar sistemas de recirculación de agua (SRA), los cuales optimizan el uso del agua, al tiempo que mejoran los rendimientos productivos del sistema acuícola. Es así como surgen los procesos productivos sostenibles, en los que el protagonista fundamental tiene que ser el agua y dentro de los cuales debe primar el concepto de utilización racional, que garantice la generación de alimento de manera sostenible.

En acuicultura tal concepto pareciera difícil de incorporar, pues se trata de cultivar organismos acuáticos, cuyo medio de vida obviamente es el agua, lo cual por supuesto exige su utilización. No obstante, gracias a las nuevas tecnologías y al creciente interés por el uso adecuado del agua, ha sido posible implementar sistemas productivos en los cuales se minimiza su uso, se reutiliza y se garantiza la misma o mejor productividad que en sistemas tradicionales que tienen elevado consumo de agua.

Por todo lo anterior, se hace indispensable que se implementen tales tecnologías para poder generar alternativas sostenibles de producción de alimento, cuyo pilar base sea el uso racional del agua. Dichas tecnologías tienen como principio fundamental la reutilización del agua, lo cual entre otros aspectos garantizará la captación de esta por una única vez, pues con un adecuado manejo se podría utilizar de manera indefinida.

Según Kumar y Cripps (2012), debido a la preocupación por el agua hoy en día la acuicultura tiene una pobre imagen, por lo cual debe implementar sistemas sostenibles que permitan su desarrollo a largo plazo. Los sistemas de recirculación de agua (SRA) (Figura 1), serían una opción para que se desarrollara, pues incluyen procesos para reutilizar el agua y reducir su consumo (Odd-Ivar Lekang, 2013). Timmons y Ebeling (2010) resaltan los SRA, como una alternativa para la acuicultura moderna, mientras que Boyd y McNevin (2015) señalan que dichos sistemas permiten mayor producción por volumen y mejoran la eficiencia del uso del agua. Adicionalmente, son útiles en regiones con poca disponibilidad de agua y en áreas donde no hay tierra para estanques o su adquisición es muy costosa. Tal característica posibilitaría la práctica de la acuicultura en cualquier lugar, independientemente de la disponibilidad del agua.



Figura 1. Sistema de Recirculación de Agua (SRA) para la reproducción de tilapia (Granja Pisciaqua S.A.S, Tibacuy-Cundinamarca). Foto: Julián Alvarado

En tal sentido, Lucas y Southgate (2012) incorporan el término "acuicultura del desierto" definiéndola como la producción de organismos acuáticos en zonas áridas o con pobre suministro de agua, en las que valiéndose de las tecnologías sostenibles se puede realizar acuicultura. Todo ello gracias a que los SRA, reutilizan el agua incorporando oxígeno disuelto y eliminando sólidos en suspensión, compuestos nitrogenados y dióxido de carbono, lo que en teoría permite que el agua sea reincorporada al proceso de manera casi que perpetua.

Adicionalmente, mediante la utilización de estos sistemas se minimizan las emisiones contaminantes a los efluentes y se pueden implementar sistemas de bioseguridad que garanticen la inocuidad del producto final (Summerfelt y Vinci, 2008), aspecto muy importante pues en los sistemas intensivos tradicionales puede haber exposición a patógenos, mientras que en los SRA su control puede ser más eficiente (Aruety *et al*., 2016). Por otro lado, los SRA son una alternativa para el cultivo de especies de difícil adaptación (Drengstig y Bergheim, 2013), y permiten la incorporación de nuevas especies, manejándolas de manera controlada y eficiente (Orellana *et al*., 2014), aspecto de vital importancia a la hora de prevenir fugas y tener control estricto del plantel productivo.

Bunting (2013), presenta a los SRA de Europa, Norte América y Asia como las mejores alternativas para la acuicultura, incluso en zonas urbanas, dejando claro que la experiencia latinoamericana es limitada con algunos desarrollos importantes en Brasil (Kubitza, 2006) y México (Barraza *et al.,* 2009) y, con incipientes esfuerzos en nuestro país. En el capítulo II se explicarán los fundamentos del sistema para propender por su futuro desarrollo en Colombia.

Una vez entendida la finalidad y el funcionamiento del SRA, es importante señalar que gracias a su implementación se pueden manejar otras alternativas para el uso racional del agua, como la acuaponía y la tecnología de biofloc (BFT). La acuaponía incorpora al SRA, el cultivo de hortalizas o cualquier otro vegetal (Rakocy, 2003). Dicho sistema va desde el más simple en granja casera (Bernstein, 2011), hasta el más complejo, con articulación de varios cultivos (Buzby *et al*., 2016), incluso se ha sofisticado permitiendo la producción de peces, plantas y bacterias nitrificantes, las cuales conviven en un "ecosistema" equilibrado que permite el desarrollo de los productos de manera armónica (Suhl *et al*., 2016). En la actualidad la acuaponía es considerada como un sistema innovador de producción inteligente y sostenible que puede desempeñar un papel crucial en la sostenibilidad ambiental y socioeconómica de las ciudades del futuro (Lampreia dos Santos, 2016). En las figuras 2 a 5 se pueden apreciar ejemplos de sistemas acuapónicos, cuya temática se profundizará en al capítulo III.



Figura 2. Sistema acuapónico NFT (Acuapónicos La Mariana, Tenjo-Cundinamarca). Foto: Miguel Landines



Figura 3. Sistema acuapónico con substrato sólido (Acuapónicos La Mariana, Tenjo-Cundinamarca). Foto: Miguel Landines



Figura 4. Sistema acuapónico con raíz flotante (Unidad de Acuicultura Sostenible, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá). Foto: Miguel Landines



Figura 5. Sistema acuapónico con raíz flotante (Unidad de Acuicultura Sostenible, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá). Foto: Miguel Landines

Por otro lado, según Hernández y Pérez, (2014) la acuicultura debe mejorar sus procesos, para lograr un uso efectivo y sostenible de los recursos, siendo el BFT una buena alternativa, pues permite el aprovechamiento integral del agua y sus agregados, dentro de un sistema cerrado y sin recambio de agua. Choo *et al*. (2017), reportan que la BFT tiene efectos benéficos, sobre la calidad del agua, la alimentación y el control de enfermedades, gracias a que ofrece una solución para evitar descargas indeseables de nutrientes al medio ambiente. De hecho, el agua residual se puede convertir en biomasa microbiana, que se podría utilizar como nueva fuente de alimento (Khatoon, *et al*., 2016).

Adicionalmente, aunque esta tecnología generalmente es utilizada en fase de crecimiento, también se puede utilizar en reproductores (Ekasarie *et al*., 2016), en los cuales también es benéfica. Sin embargo, según Zhu *et al*. (2016) el uso de BFT tendría una desventaja por acumulación de Sólidos Suspendidos Totales en el fondo de los tanques, inconveniente que se solucionaría incorporando un SRA al sistema BFT. Tal metodología sería complementaría y de todos modos iría en armonía con lo que se pretende abordar en el presente texto.

Las Figuras 6 a 8 muestran ejemplos del sistema biofloc, cuyos parámetros serán abordados en los capítulos IV (cultivo de camarón) y V (cultivo de tilapia).



Figura 6. Sistema de biofloc para el levante de alevinos de tilapia (Granja El Nogal. Espinal-Tolima). Foto: Miguel Landines



Figura 7. Sistema de aireación tipo 'splash' en tanque de biofloc (Granja El Nogal. Espinal-Tolima). Foto: Miguel Landines



Figura 8. Tilapia en sistema de biofloc (Granja Pezquin, Yaguará-Huila). Foto: Miguel Landines

Con base en lo anterior, el presente texto pretende presentar los principales aspectos de la acuicultura en sistemas de recirculación de agua (SRA), Acuaponía y Biofloc (BFT) como una herramienta para la implementación de modelos de producción sostenible en el país. El documento se complementa con aspectos relacionados con la calidad de agua en sistemas de producción intensivos y fundamentos de nutrición de peces, así como la alternativa de uso de la energía solar y algunos elementos para la formulación y evaluación de proyectos en acuicultura.

BIBLIOGRAFÍA

● Aruety, T., Brunner, T., Ronenb, Z., Gross, A., Sowers, K., Zilberget, D. (2016). Decreasing levels of the fish pathogen *Streptococcus iniae* following inoculation into the sludge digester of a zero-discharge recirculating aquaculture system (RAS). Aquaculture, 450: 335-341.

● Barraza, C., Aguirre, G., López, D. (2009). Sistemas de producción de acuacultura con Recirculación de agua para la región norte, noreste y noroeste de México. Rev. Quinta Época, 25: 117-130.

● Bernstein, S. 2011. Aquaponic Gardening: A step-by-step guide to raising vegetables and fish together. New Society Publishers. 222 p.

● Boyd, C., McNevin, A. 2015. Aquaculture, Resource use, and the Environment. Wiley Blackwell. 366 p.

● Bunting, S. (2013). Sustainable urban and peri-urban aquaculture. In: Principles of Sustainable Aquaculture Promoting social, economic and environmental resilience. Routledge. 168-193.

● Buzby, K., Waterland, N., Semmens, K., Lin, L. (2016). Evaluating aquaponic crops in a freshwater flow-through fish culture system. Aquaculture, 460: 15-24.

● Choo, H., Marlowe, C., Caipang, A. (2015). Biofloc technology (BFT) and its application towards improved production in freshwater tilapia culture. Aacl bioflux, 8 (3): 363-368.

● Drengstig, A., Bergheim, A. (2013). Commercial land-based farming of European lobster (Homarus gammarus L.) in recirculating aquaculture system (RAS) using a single cage approach. Aquacultural Engineering, 53: 14-18.

● Ekasarie, J., Suprayudi, M., Wiyoto, W., Hazanah, R., Lenggara, S., Sulistiani, R., Alkahfi, M., Zairin Jr, M. (2016). Biofloc technology application in African catfish fingerling production: The effects on the reproductive performance of broodstock and the quality of eggs and larvae. Aquaculture, 464: 349-356.

● Hernández, M. Pérez, C. (2014). Sustainable Aquaculture Techniques. AVEEVA Records. 269 p.

● Khatoon, H., Banerjee, S., Yuan, G., Haris, N., Ikhwanuddin, M., Ambak, A., Endut, A. (2016). Biofloc as a potential natural feed for shrimp postlarvae. International Biodeterioration y Biodegradation, 113: 304-309.

● Kubitza, F. (2006). Sistemas de Recirculação: Sistemas fechados com tratamento e reuso da água. Panorama da aqüicultura, 95: 15-22.

● Kumar, M., Cripps, S. (2012). Environmental Aspects. In: Aquaculture, Farming Aquatic Animals and Plants. Wiley Balckwell. 98-120.

● Lampreia dos Santos, M. (2016). Smart cities and urban areas-Aquaponics as innovative urban agriculture. Urban Forestry y Urban Greening, 20: 402-406.

● Lucas, J., Southgate, P. (2012). Aquaculture; Farming Aquatic Animals and Plants. Second edition. Wiley Balckwell. 643 p.

● Odd-Ivar Lekang, L. (2013). Aquaculture Engineering. Second edition. Wiley Balckwell. 433 p.

● Orellana, J., Waller, U., Wecker, B. (2014). Culture of yellowtail kingfish (Seriola lalandi) in a marine recirculating aquaculture system (RAS) with artificial seawater. Aquacultural Engineering, 58: 20-28.

● Rakocy, J. (2003). An Integrated Fish and Field Crop System for Arid Areas. In: Ecological Aquaculture: The Evolution of the Blue Revolution. Blackwell Science. 265-286.

● Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganza, W., Jobse, S., Scheibe, G., Uwe Schmidt, B. (2016). Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production inaquaponics vs. conventional hydroponics. Agricultural Water Management, 178: 335-344.

● Summerfelt, S., Vinci, B. (2008). Better Management Practices for Recirculating Aquaculture Systems. In: Environmental Best Management Practices for Aquaculture. Blackwell Publishing Ltd. 389-426.

● Timmons, M., Ebeling, J. (2010). Recirculating Aquaculture. 2nd edition. USDA. 489 p.

● Zhu, S., Shi, M., Ruan, Y., Guo, X., Yea, Z., Hana, Z., Denga, Y., Liu, G. (2016). Applications of computational fluid dynamics to modeling hydrodynamics in tilapia rearing tank of Recirculating Biofloc Technology system. Aquacultural Engineering, 74: 120-130.

CAPÍTULO II
SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN EN ACUICULTURA

Sergio Zimmermann
Zimmermann Aqua Solutions (Norway)
E-mail: sergio@sergiozimmermann.com



Finca de tilapia y camarón con sistema en estanques de tierra extensivos a semi-intensivos, con recirculación del agua (sedimentador abajo, compartimiento con chicana en el lado derecho inferior y canal de retorno con aireación). Foto: Fernando Huerta

1. **INTRODUCCIÓN**

Los flujos de recursos en una economía circular pueden ayudar a disminuir el uso de los recursos que cada vez son más escasos, a reducir la producción de residuos y a limitar el consumo de energía. En un mundo con un creciente aumento de la demanda de agua limpia y alimentos sanos, la economía en un modelo lineal ya no es más adecuada, dado que las sociedades modernas no pueden construir un futuro bajo un modelo de “tomar-hacer-descartar”. El movimiento hacia un sistema sostenible desde el punto de vista medioambiental es necesario a través de un pensamiento circular y de ciclo de vida para preservar los muchos recursos naturales finitos (Comisión Europea, 2015; International Water Association, 2016) y el agua como un recurso valioso, debe ser tratado con respeto y manejado con métodos para conservarlo, poniendo en acción el concepto de economía circular de la reutilización.

La acuicultura tradicional deposita los desechos directamente en la naturaleza,

aportando altos niveles de nitrógeno y fósforo al medio natural, lo que representa una amenaza para la salud humana, el bienestar de los peces y camarones y el medio ambiente. Las frecuentes enfermedades que se presentan en los peces de cultivo y la creciente demanda de la población por una acuicultura limpia, sostenible y amigable con el medio ambiente con mayores y más eficientes controles, aumento en previsibilidad y repetitividad de las actividades, están acarreando a una serie de cambios estructurales en la actividad acuícola que toman en cuenta el tratamiento de aguas y residuos a través de sistemas cerrados de recirculación en acuicultura (SRA) (RAS – sigla del inglés Recirculating Aquaculture Systems) y el aprovechamiento de los residuos como nutrientes. La reutilización parcial o total del agua de los cultivos acuáticos ha generado una serie de SRA en tierra, sin sombra de duda la innovación más importante de esta actividad en las últimas décadas.

La recirculación se basa en el movimiento del agua a través de diversos tanques, estanques o piscinas de diferentes tamaños, donde el agua recircula de un compartimiento a otro y es parcial o totalmente reutilizada y dependiendo de la intensidad del cultivo, se puede simplemente recircular el agua en estanques rústicos más extensivos hasta semi-intensivos o hacer el uso de biofiltros sofisticados, compartimientos con bioflóculos, filtros, geo-membranas, y métodos de tratamientos diversos en sistemas más intensivos y super-intensivos (Figura 1), utilizando cualquier especie cultivada en acuicultura convencional como peces, camarones, almejas, etc. La tecnología de recirculación se utiliza hoy en día principalmente en las pisciculturas tropicales, pero por cuestiones de bioseguridad, está presentando un enorme crecimiento en la camaronicultura marina, especialmente en las fases iniciales (maternización). También hay un gran interés a en recircular aguas en la salmonicultura, pero en bajas temperaturas los microorganismos filtrantes no son muy eficientes, lo cual incrementa mucho los costos de los biofiltros y estructuras adicionales.



Figura 1. Sistema de recirculación en estanques con geomembrana en formato de chicana y concentración de los animales en tanques de concreto en ambiente más intensivo y controlado. Fotos: Sergio Zimmermann

Visto desde el punto de vista ambiental, la demanda limitada de agua limpia en la recirculación es beneficiosa, dado que el agua se ha convertido en un recurso limitado en muchas regiones; además, el uso restricto del agua hace con que sea mucho más fácil y más barato eliminar los nutrientes excretados por los peces con un volumen de agua descargada mucho menor que el que se descarga de una granja tradicional, por consiguiente la recirculación en acuicultura puede ser considerada una forma de producir pescado a un nivel comercialmente viable, más respetuosa con el medio ambiente, donde los desechos del cultivo (nutrientes) generados por los peces pueden ser reutilizados como fertilizantes en cultivos agrícolas, en la producción de biogás o como nutrientes para otros organismos acuáticos como camarones o plantas terrestres en hidroponía (esta combinación de acuicultura e hidroponía es denominada Acuaponía).

La recirculación puede llevarse a cabo a diferentes intensidades, dependiendo de la cantidad de agua recirculada o reutilizada. La mayoría de las granjas que practican sistemas de recirculación son intensivas y super-intensivas y generalmente instaladas dentro de edificios sofisticados algunas veces aislados en invernaderos, con prácticamente cero recambios de agua, en comparación con otros sistemas menos intensivos y más sencillos donde la recirculación es parcial demandando más recambios. En diferentes escalas, la acuicultura continental se presenta como una solución sostenible y positiva a la demanda creciente por alimentos acuáticos, pero aún tiene deficiencias en la gestión de residuos generados en la producción, por lo que hay una serie de movimientos significativos hacia prácticas más sostenibles como la implementación de sistemas acuícolas de recirculación limpios (Clean-RAS) que maximizan la reutilización de agua de cultivo, minimizando o eliminando los niveles de contaminantes que se descargan al medio ambiente que se complementa con el uso de proteínas alternativas (por ejemplo, soya) en las dietas de acuicultura para especies omnívoras como las tilapias y camarones en algunos SRA, debido a que las proteínas de origen animal como las provenientes de pescados y mariscos son insostenibles. El tratamiento y reutilización de los efluentes de tilapias y salmones para su reutilización en cultivos de camarones o hidropónicos es muy importante para reducir significativamente los costos operacionales y hacer estas producciones más sostenibles y económicamente factibles.

El término “descarga cero” es cada vez más popular y frecuentemente en los sistemas de recirculación en acuicultura, especialmente en la acuicultura tropical, pero aún no es muy utilizado o está ausente en los sistemas comerciales de climas templados, y aunque es posible evitar toda descarga de los lodos y agua de cualquier granja, el tratamiento de aguas residuales es a menudo un asunto costoso para recuperar por completo la calidad del agua. Lo más interesante, es el hecho de que el uso limitado de agua da un enorme beneficio para la producción dentro de la granja de cultivo, mientras que la piscicultura tradicional es totalmente dependiente de condiciones externas como la temperatura del agua la fuente de captación, la limpieza y calidad de la misma, los niveles de oxígeno disuelto, presencia de malas hierbas y hojas que

derivan aguas arriba bloqueando las pantallas de entrada, etc., en un sistema de recirculación, estos factores externos se eliminan total o parcialmente, dependiendo del grado de recirculación y la construcción de la planta. La recirculación permite al acuicultor controlar completamente todos los parámetros de la producción y sus habilidades para operar el sistema de recirculación son tan importantes como la capacidad para cuidar los peces. El control de parámetros como la temperatura, el pH, niveles de oxígeno disuelto, alcalinidad, dureza, productos nitrogenados, etc., proporciona condiciones estables y óptimas para los peces u organismos de cultivo, lo que significa menos estrés y mejor crecimiento. Estas condiciones estables resultan en un patrón de crecimiento previsible que permite al productor predecir con precisión cuando los peces habrán alcanzado una cierta etapa o tamaño, permitiendo elaborar un plan de producción preciso y el tiempo exacto en que el pescado estará listo para la venta, lo que favorece la gestión general de la granja y fortalece la capacidad de comercializar el producto de manera competitiva. O sea, la recirculación torna el sistema productivo más estable, no necesariamente óptimo, y con eso, los resultados productivos son más positivos. El uso del agua y un dispositivo para descargar nutrientes/lodo siempre deben ser parte de la planificación de la granja en la solicitud de permisos de cultivo.

Otro instrumento de apoyo a la estabilidad del sistema es la aplicación continua de probióticos (bacterias acido lácticas y bacilos con características metabólicas especiales que favorecen la salud intestinal), biorremediadores (bacilos esporulados) y zooplancton (artemias, rotíferos y copépodos). Dichas aplicaciones mejoran significativamente los parámetros productivos o variables zootécnicas como la ganancia de peso, de longitud, conversión alimenticia y tasa de crecimiento específico. Sumado a eso, la adición de aditivos estratégicos en los sistemas de recirculación prácticamente elimina el impacto negativo de los agentes patógenos, dado que las enfermedades invasivas del entorno o ya presentes en el sistema se reducen por la ocupación previa de los espacios con bacterias amigables, especialmente por el uso limitado del agua externa de recambio o reposición del evaporado, En muchos sistemas de recirculación no tienen ningún problema con enfermedades de ningún tipo, y el uso de medicinas se reduce significativamente para el beneficio de la producción y el medio ambiente, comparado con la piscicultura tradicional donde el agua se toma de un río, un lago o del mar aumentando el riesgo de introducir más y más enfermedades. Cambiar de la acuicultura tradicional a la recirculación hace más fáciles las cosas, pero al mismo tiempo requiere habilidades nuevas y mayores. Para tener éxito en este tipo muy avanzado de acuicultura se requiere capacitación y educación.

2. CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES DE LOS SISTEMAS

2.1. Granjas Extensivas a Semi-Intensivas

Los sistemas de recirculación más extensivos hasta los semi-intensivos, evolucionaron en las dos últimas décadas con la colaboración decisiva de los profesionales Fernando

Huerta, Hernan Zambrano y Jorge Chavés, especialmente en las granjas de camarón del continente Latinoamericano. Recientemente, Huerta y Jory (2017) describen los progresos en términos de utilización de bioflóculos bacterianos y movimiento de agua con muy bajas tasas de recambio, describiendo que los modelos de producción en las Américas se basan en estanques grandes (de 5 a 10 hectáreas) almacenados con 10-30 PLs/m^2 (densidades medianas de siembra), en instalaciones por encima de la línea de marea alta que incluyen una estación de bombeo y canales de distribución de agua y reservorios, utilizando alimentos acuícolas comercialmente formulados y la aplicación de varios inóculos bacterianos para mejorar la calidad del agua. Debido a las crecientes preocupaciones por la bioseguridad, los fertilizantes orgánicos (en su mayoría estiércol y subproductos agrícolas) ampliamente utilizados en el pasado fueron sustituidos y se avanzó en la recirculación de agua mediante la conversión de algunos estanques en embalses y la implementación de la reutilización máxima de agua. En la figura 2, una vista aérea de una granja adaptada que muestra una unidad de sedimentación, estanques de producción y un depósito.



Figura 2. Finca de tilapia y camarones con sistema en estanques de tierra semi-intensivos, con la conversión de parte de la finca en sistema de recirculación del agua (unidad de sedimentación con chicana). Foto: Fernando Huerta

Huerta y Jory (2017) describen los pasos implicados en la conversión de una finca camaronera convencional a recirculación (Figura 2). Primero se hace una evaluación topográfica con un registro de los volúmenes y tiempos de residencia de agua en cada unidad de producción, proyectando los requerimientos para la sedimentación de sólidos en suspensión y el movimiento/recirculación del agua alrededor de la granja,

con sus beneficios inherentes (oxigenación del agua, promoción de la degradación aeróbica del lodo, entre otros). De acuerdo con los autores, mientras algunas granjas son más adecuadas que otras para la recirculación, la mayoría de las granjas se puede convertir en sistemas de recirculación al menos en un grado significativo y de alguna forma homogeneizar la calidad del agua, promocionar la desestratificación, desgasificación y el incremento de los niveles de oxígeno disuelto. Para su conversión, se requiere sacrificar algunos estanques para construir una o más unidades de sedimentación, desnitrificación, aireación, etc. Los autores proponen que las unidades de sedimentación deben tener un área superficial equivalente al 10% del área total de estanques, y a menudo son al menos dos veces más profundas que los estanques de producción, presentando un tiempo de retención hidráulica de dos a tres días, con un porcentaje de recirculación típico de 10 a 20%. No hay una reducción en los costos totales de energía para operar una granja, pero cambia la forma de utilización, con más énfasis en mover y homogeneizar el agua alrededor de la granja en lugar de bombear agua nueva para volver a liberarla como efluente al medio ambiente.

Zimmermann (2017) presenta los beneficios de la integración de más de una especie acuícola en sistemas de recirculación semejantes los explicados con camarones marinos como principal especie, donde la introducción de tilapias en el sistema incrementa la sobrevivencia y ganancia de peso de los camarones y disminuye la presencia de enfermedades causadas directa o indirectamente por elevadas concentraciones de *Vibrios*. Es posibles que la mucosa de tilapias o su promoción de algas verdes, en especial las *Chlorellas*, combatan directamente u ocupen los sitios de los *Vibrios*. En sistemas de recirculación más extensivos se recomienda dedicar instalaciones para producir/multiplicar enmiendas bacterianas (bio-remediadores) que se deben aplicar en el recirculador/estanques de manera regular, preferencialmente todos los días, convirtiendo todo el volumen de agua de la granja en un “biofloc estático”, basado en movimiento horizontal del agua, sin la fuerte aireación vertical característica de los sistemas clásicos de bioflocs.

Una granja semi-intensiva de camarón con sistema de recirculación tiene numerosos efectos benéficos, Huerta y Jory (2017) listan algunos de sus beneficios: (1) sistemas muy respetuosos con el medio ambiente (poco o cero efluentes); (2) reducción significativa de los sólidos en suspensión y las demandas de oxígeno biológico y químico debido a la mejora de la calidad del suelo y la acción bacteriana; (3) reducción marcada en olores y sabores indeseables por cianobacterias y hongos debido a la exclusión competitiva; (4) incremento en la eficiencia de bombeo debido a los niveles de bombeo más bajos; (5) el tiempo de inactividad entre ciclos de producción se reduce; (6) no hay necesidad de fertilización orgánica o inorgánica; (7) los requisitos de aireación mecánica para los sistemas más intensivos a menudo se pueden reducir significativamente, dado que la recirculación promueve niveles más altos de oxígeno disuelto; (8) aumento de la bioseguridad debido al bombeo mínimo de agua nueva desde el exterior (exclusión de patógenos y vectores) entradas mínimas de contaminantes y la estabilidad ambiental resultante (oxígeno disuelto, salinidad,

pH, comunidades bacterianas, otras); (9) dentro del sistema, reduce los niveles de estrés en el camarón cultivado y su susceptibilidad a enfermedades; (10) apoya la supervivencia y el crecimiento del camarón; (11) mejor pigmentación de los animales en la cosecha y la productividad general. Sin embargo, los mismos autores listan algunas limitaciones importantes: (1) los costos iniciales de reconversión y construcción son altos; (2) las operaciones requieren un alto nivel de conocimiento técnico por parte del personal dedicado; (3) la dependencia de bombeo es muy alta, en algunos casos se pueden necesitar hasta 24 horas; (4) pueden haber algunas limitaciones en la capacidad y opciones de bombeo, dependiendo de las características de los estanques originales y su distribución; (5) se requieren insumos significativos que impliquen en las adiciones bacterianas y para mantener el equilibrio iónico del agua durante las estaciones lluviosas.

2.2. Granjas Intensivas a Superintensivas

Para caracterizar los sistemas se recirculación de intensivos a superintensivos, se ha utilizado como base la publicación intitulada: “A guide to recirculation aquaculture, an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems, escrito por Bregnballe, recientemente publicado por la FAO (Bregnballe, 2015). Diversos datos e informaciones, sobre todo relativos a los cultivos en ambiente tropical fueran cambiados de acuerdo con la experiencia práctica del autor.

En un sistema de recirculación es necesario tratar el agua continuamente para eliminar los productos de desecho excretados por los peces, y añadir oxígeno para mantener los peces vivos y en buen estado de salud. En general el agua fluye, en sistemas más extensivos, de la salida de los tanques de peces a un estanque “sedimentador” o “recirculador”, y en sistemas más intensivos a un filtro mecánico y luego a un filtro biológico antes de ser aireado y despojado de dióxido de carbono y devuelto a los tanques de peces.

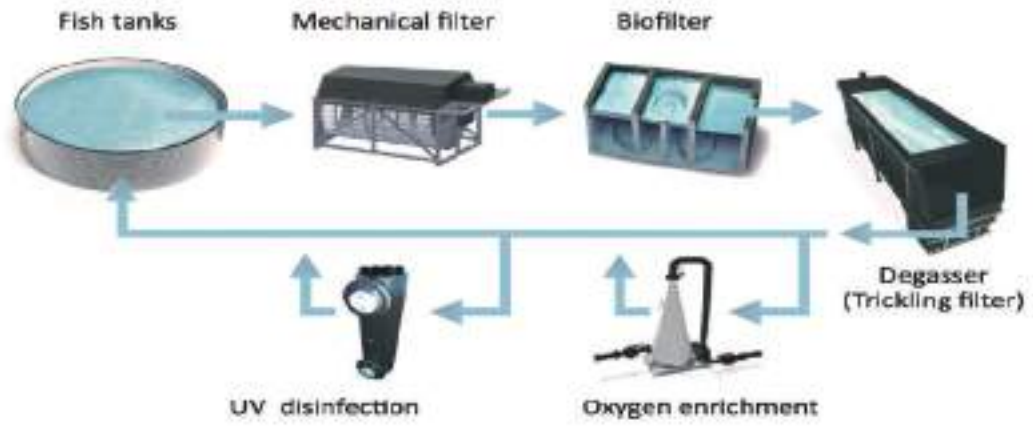


Figura 3. Principales componentes de un sistema de tratamiento de agua típico de una granja acuícola intensiva. Fuente: FAO, Bregnballe (2015).

Cuando se aplica bioflóculos, se puede tener los mismos en los recirculadores, en el propio estanque de cultivo, o también se puede substituir el biofiltro por una unidad de biofloc.

Como se puede observar en la Figura 3, otros dispositivos pueden ser adicionados a un SRA, los más comunes son la oxigenación con oxígeno puro, generadores de nano-burbujas, luz ultravioleta o desinfección de ozono, regulación automática del pH, fraccionador de espuma, intercambio de calor, desnitrificación, etc. Los peces y camarones requieren alimentación varias veces al día, y si no tienen acceso al biofloc (alimento fresco/vivo) en su estanque de engorde, la ración debe ser seca en un sistema de recirculación, la cual luego de consumida y digerida, es utilizada en el metabolismo como suministro, para el crecimiento y otros procesos fisiológicos. El oxígeno (O_2) entra a través de las branquias, y es requerido para producir energía y para descomponer la proteína, generando dióxido de carbono (CO_2) y el amoniaco (NH_3) como productos de desecho, en general de manera discontinua. El alimento no digerido es excretado en el agua como heces, llamado sólidos (SS) y materia orgánica y el dióxido de carbono y el amoniaco se excretan de las branquias al agua. Así, los peces consumen oxígeno y alimento, y como resultado el agua del sistema se contamina con sobras de alimento, heces, dióxido de carbono y amoniaco.

En un SRA una alta tasa de absorción (o bajo factor/tasa de conversión alimenticia – FCA) es beneficiosa, ya que esto minimizará la cantidad de productos de excreción, reduciendo así el impacto en el sistema de tratamiento de agua. En un sistema bien planeado, todo el alimento añadido debe ser consumido manteniendo las sobras de alimento en un mínimo. El FCA que describe cuántos kilos de alimento se utilizan para la producción de un kilo de pescado, se mejora en los sistemas más tecnificados, logrando mayor rendimiento en la producción y menor impacto en el sistema de filtro.

El medio ambiente en las unidades productivas (piscinas o tanques) debe satisfacer las necesidades de los peces y camarones, tanto en lo que respecta a la calidad y dinámica del agua como en el diseño del tanque. La elección correcta del diseño del tanque, el tamaño, la forma, la profundidad del agua y la capacidad de auto-limpieza, etc., pueden tener un impacto considerable en el rendimiento de la especie cultivada y en el sistema de recirculación. Si el hábito de los peces es más asociado al fondo, como los turbot/flounder/lenguados (flat-fish), o los camarones marino (*L. vannamei)* y de agua dulce del género *Macrobrachium*, la necesidad de área de superficie interna del tanque (substratos artificiales) es más importante, y la profundidad del agua y la velocidad de la corriente de agua se puede bajar, mientras que especies pelágicas como las tilapias, cachamas, carpas y los salmónidos (truchas, salmón, dorada) se beneficiarán de volúmenes de agua más grandes y con mayor velocidad de flujo. Cuanto más oscura es la musculatura de los peces, como es el caso de los atunes y salmones, mejores rendimientos se obtienen a mayores velocidades de agua.
En tanques circulares o cuadrados con esquinas cortadas (octogonal), el agua se mueve en un patrón circular haciendo que toda la columna de agua del tanque se

mueva alrededor del centro y como las partículas orgánicas tienen un tiempo de residencia relativamente corto de unos pocos minutos, dependiendo del tamaño del tanque, debido a este patrón hidráulico se da un efecto de auto limpieza. Una entrada vertical con ajuste horizontal es una manera eficiente de controlar la corriente en dichos tanques. En un *raceway*, la hidráulica no tiene ningún efecto positivo sobre la eliminación de las partículas. Por otro lado, si la carga de peces en un tanque es eficientemente manejada, el efecto de auto-limpieza del tanque, dependerá más de la actividad de los peces que del diseño o hidrodinámica del mismo. La inclinación del fondo del tanque tiene poca o ninguna influencia sobre el efecto de auto limpieza, pero es importante porque facilita el drenaje completo cuando se vacíe el tanque para transferencias o cosechas.

Los tanques circulares ocupan más espacio en comparación a los *raceway*, aumentando los costos de construcción. Al cortar las esquinas de un tanque cuadrado se puede convertir en un tanque octogonal y se obtendrá una mejor utilización del espacio logrando los mismos efectos hidráulicos positivos que en un tanque circular; sin embargo, la construcción de tanques grandes siempre es más favorable en tanques circulares porque son menos costosos y su diseño más sólido.

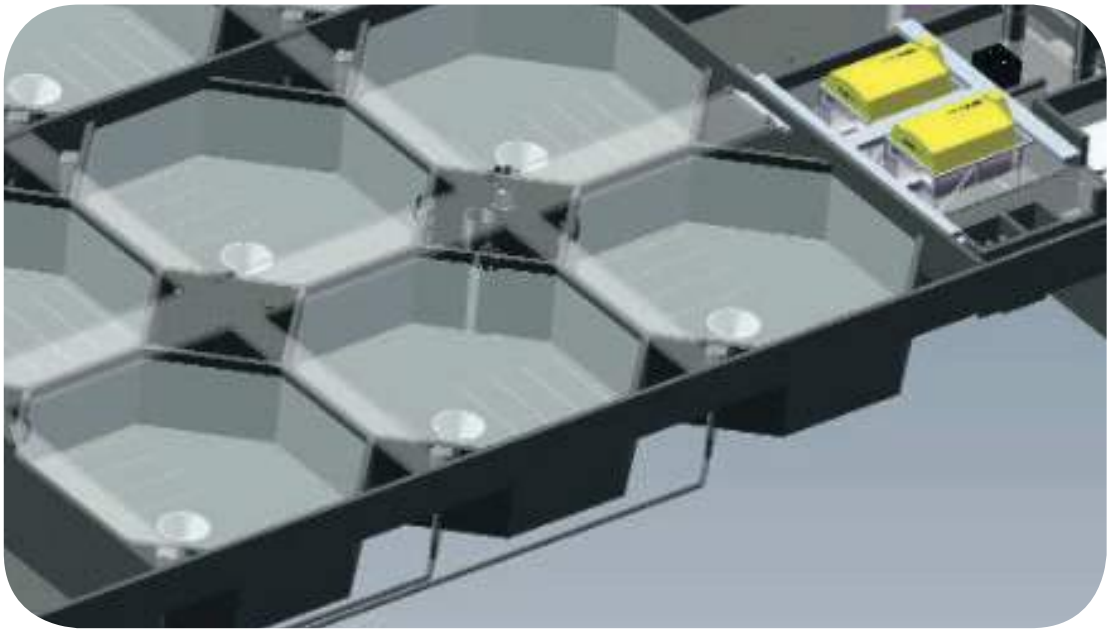


Figura 4. Ejemplo de tanques octogonales que economizan espacio y mantienen buenos efectos hidráulicos de circulación del agua. Fuente: FAO, Bregnballe (2015).

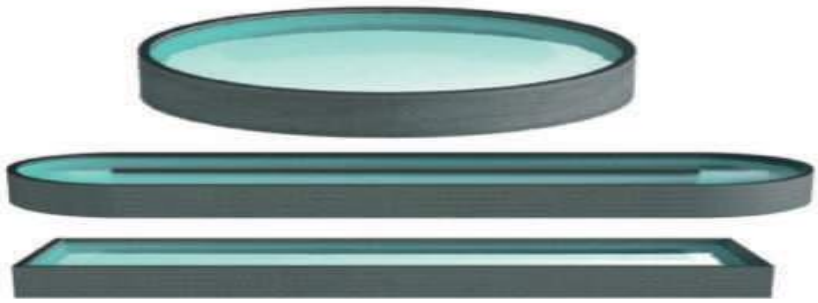


Figura 5. Tanque circular, raceway en forma de D en las extremidades y Raceway. Fuente: FAO, Bregnballe (2015).

En un raceway, el contenido de oxígeno será siempre más alto en la entrada y menor en la salida, generando entornos diferentes según la distribución de los peces a lo largo del sistema, por lo cual es recomendable colocar el oxímetro en el área con más baja concentración de oxígeno, casi siempre cerca de la salida. El gradiente de oxígeno hará que la regulación de este parámetro sea más difícil, dado que el tiempo que transcurre entre el ajuste en la entrada hasta el momento en que se mide en la salida puede ser de hasta una hora, situación que puede hacer que el oxígeno suba y baje todo el tiempo en lugar de fluctuar alrededor del nivel seleccionado.

Las salidas de los tanques deben ser construidas para la remoción óptima de las partículas de desecho, estar equipadas de pantallas con tamaños de malla adecuados y que permitan de manera fácil la recolección de los peces muertos durante las rutinas diarias de trabajo.

El uso de diferentes tecnologías tiene un impacto en el tratamiento del agua y la eliminación de residuos. Esto se puede ver en el siguiente gráfico tomado de la presentación de AquaCircle:

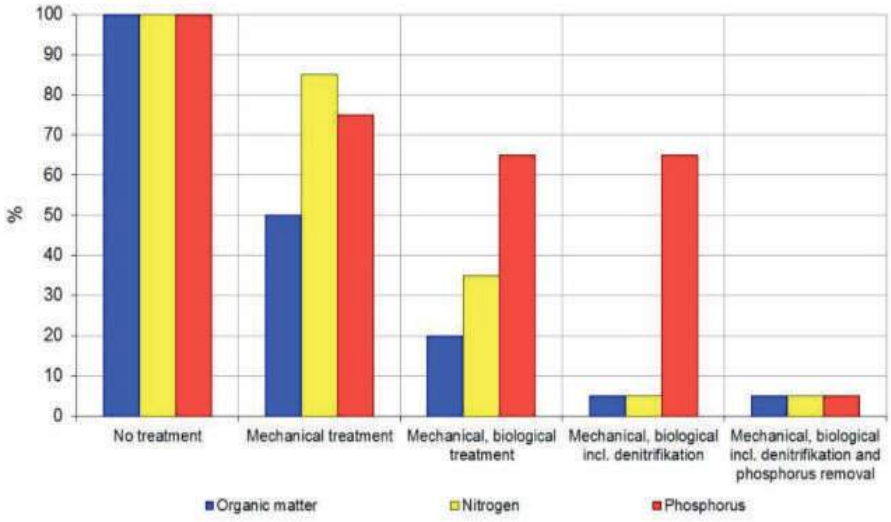


Figura 6. Efectos de diferentes técnicas de tratamiento del agua en la eliminación de residuos en sistemas de recirculación acuícolas. Fuente: AquaCircle (Heldbo J., Short introduction to Denmark and prospects of Danish aquaculture, 2015).

A medida que se incrementan los tratamientos, la reducción en nitrógeno (N), fósforo (P) y materia orgánica (MO) es más y más efectiva. Existe una diferencia significativa en el porcentaje de volumen de residuos de N, P y MO cuando los sistemas incluyen desnitrificación y eliminación de fósforo. También muestra que, a pesar de que el tratamiento mecánico y biológico ayuda a disminuir los niveles de N, P y MO, todavía hay un alto porcentaje que puede afectar la calidad del agua y la descarga o reutilización de la misma. Normalmente, las instalaciones en SRA se construyen con varios dispositivos de tratamiento de agua para contener y aislar cualquier enfermedad que pueda ocurrir, permitiendo su rápido tratamiento (Heldbo J., 2015).

En los SRA típicamente se presenta: la (1) filtración mecánica (eliminación de sólidos), (2) tratamiento biológico; (3) control de gases: inyección de oxígeno/desgasificación de CO_2; (4) ajuste de pH por control de alcalinidad; (5) eventual control de patógenos - UV/dosis de ozono; y (5) gestión de residuos/lodos.

2.2.1. Filtración mecánica

La filtración mecánica del agua de salida de los tanques de peces ha demostrado ser la solución más práctica para la eliminación de los residuos orgánicos. Casi todos los SRA intensivos filtran el agua de salida de los tanques con filtros o de arena tipo piscina o más recientemente en un filtro de tambor rotativo hecho con malla metálica con aperturas de 40 a 100 micras donde el lodo es concentrado y removido con un sistema de micro-raspado (el agua a filtrar entra en el tambor, y se filtra afuera a través de las telas filtrantes del tambor rotatorio, donde los sólidos quedan atrapados y se elevan al área de retrolavado por la rotación del tambor. El agua de las boquillas de enjuague es pulverizada desde el exterior de los elementos filtrantes, y el material orgánico rechazado es lavado de los elementos de filtro a una bandeja de concentración del lodo que fluye junto con el agua por gravedad fuera del filtro y sale de la unidad para el tratamiento de aguas residuales externas o retorna al tanque de cultivo en bioflóculos.

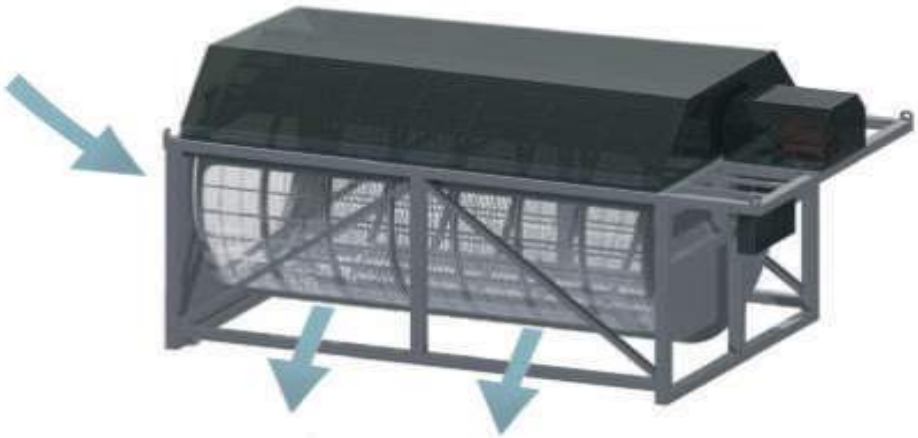


Figura 7. Filtro de Tambor. Fuente: FAO, Bregnballe (2015).

2.2.2. Tratamiento biológico

No toda la materia orgánica se elimina en el filtro mecánico, las partículas más finas, algunas algas y bacterias pasan junto con compuestos disueltos como fosfato y nitrógeno. El fosfato es una sustancia inerte, sin efecto tóxico, pero el nitrógeno en forma de amoniaco libre (NH_3) es tóxico y necesita ser transformado en el biofiltro a nitrato inofensivo. La descomposición de materia orgánica y amoniaco es un proceso biológico llevado a cabo por bacterias en el biofiltro. Las bacterias heterotróficas oxidan la materia orgánica consumiendo oxígeno y produciendo dióxido de carbono, amoniaco y lodo. Las bacterias nitrificantes convierten el amoniaco en nitrito y finalmente en nitrato. La eficiencia de la biofiltración depende principalmente de la temperatura del agua y del nivel de pH (alcalinidad) en el sistema. Para alcanzar una tasa de nitrificación aceptable, la temperatura del agua debe mantenerse entre 10 y 35°C (óptima alrededor de 32°C) y los niveles de pH entre 7,8 y 8,2. La temperatura del agua dependerá en gran medida de las especies cultivadas o de la adición de un intercambiador de calor, ajustándola para alcanzar la mejor tasa de nitrificación, pero adecuada para proporcionar niveles óptimos para el crecimiento de los peces; sin embargo, la regulación del pH en relación con la eficiencia del biofiltro es importante, dado que un nivel de pH más bajo reduce la eficiencia del biofiltro, por lo tanto, el pH debe mantenerse cerca de 8,0 para alcanzar una alta tasa de nitrificación bacteriana. Por otro lado, el aumento del pH dará lugar a una cantidad creciente de amoniaco libre (NH_3), que aumentará el efecto tóxico. El objetivo es, por lo tanto, encontrar el equilibrio entre estos dos objetivos opuestos de ajustar el pH. Algunos autores recomiendan como intervalo de ajuste recomendado para el pH de 7 hasta 7,5.

Dos factores principales afectan el pH en el sistema de recirculación de agua: (1) la producción de CO_2 de los peces, del biofloc y del biofiltro; y (2) el ácido producido por el proceso de nitrificación. El CO_2 se elimina por aireación del agua, con lo que se produce la desgasificación, proceso que se puede realizar de varias maneras como se describe más adelante. El proceso de nitrificación produce ácido (H +) y el pH disminuye, demandando la adición de una base como cal, bicarbonato de sodio o hidróxido sódico (NaOH).

Los peces excretan una mezcla de amoniaco y amonio (Nitrógeno Total Amoniacal (TAN o NTA) = (amonio (NH_4^+) + amoniaco (NH_3)), donde el amoniaco constituye la parte principal de la excreción y su concentración en el agua depende del nivel de pH. En general, el amoniaco es tóxico para los peces de aguas templadas a niveles superiores a 0,02 mg/L, y 0,2 mg/L para las especies tropicales. Los niveles de pH más bajos minimizan el riesgo de exceder los límites de amoniaco tóxico de 0,02-0,2 mg/L, pero se recomienda que el acuicultor alcance un nivel de pH mínimo de 7 para alcanzar una mayor eficiencia del biofiltro como se explicó anteriormente. En los sistemas de bioflóculos los límites de amoniaco son mucho más elevados, hasta más de 10 veces, tal vez porque en este sistema, el sistema inmune de los peces está optimizado.

El nitrito (NO_2^-) se forma en la etapa intermedia del proceso de nitrificación y es tóxico para los peces de aguas templadas a niveles superiores a 2,0 mg/L y a 5 mg/L para los peces tropicales. Si los peces en un sistema de recirculación están jadeando en busca de aire, aunque la concentración de oxígeno sea buena, una alta concentración de nitrito puede ser la causa. A altas concentraciones, el nitrito es transportado desde las branquias hacia la sangre de los peces, obstruyendo la absorción de oxígeno, pero con la adición de sal al agua a tan sólo 0,3 ‰, la absorción de nitrito se inhibe. Por esta razón y por cuestiones de osmorregulación (o sea, economía de energía en el punto isoosmótico, para mantener sales o agua en su cuerpo), en la mayoría de los SRA, se mantienen salinidades entre 3,0-12 ‰, que también ayudan en la prevención de los parásitos más comunes (protozoarios y monogenóides), hongos (saprolegniosis), enfermedades en las branquias y diversas necrosis/columnariosis.

El nitrato (NO3-) es el producto final del proceso de nitrificación, y aunque se considera inofensivo, altos niveles (por encima de 180 mg/L) son frecuentes en los SRA y parecen tener un impacto negativo en el crecimiento y la conversión alimenticia. Cuando el recambio de agua de recirculación o del sedimentador se mantiene muy bajo, el nitrato se acumulará y se alcanzarán niveles inaceptables; sin embargo se puede evitar la acumulación aumentando el caudal de recambio de agua en recirculación y adición de agua nueva para diluir los nitratos a un nivel que no cause problemas.

Dado que el objeto principal de la recirculación sustentable es el ahorro de agua, en tales circunstancias, las concentraciones de nitratos pueden reducirse mediante la desnitrificación. En condiciones normales en climas templados, un consumo de agua de más de 300 litros por kg de alimento utilizado es suficiente para diluir la concentración de nitrato, y en climas tropicales esta demanda de agua por kg de alimento puede ser reducida a 50 litros. Si no hay esta disponibilidad diaria de agua nueva de 300-500 L/kg de alimento para renovación, entonces se debe considerar adicionar en el sistema la desnitrificación. Las bacterias desnitrificadoras más predominantes se llaman *Pseudomonas*, y es un proceso anaeróbico (sin oxígeno, en una cámara o compartimiento anaeróbico) donde se reduce el nitrato al nitrógeno atmosférico. De hecho, este proceso elimina el nitrógeno del agua hacia la atmósfera (N_2), por lo que la carga de nitrógeno en el ambiente circundante se reduce. El proceso requiere una fuente orgánica (carbono), por ejemplo alcohol de madera (metanol) que se puede añadir a una cámara de desnitrificación o también el lodo colectado en el filtro mecánico. En términos prácticos, se necesitan 2,5 kg de metanol por cada kg de nitrato (NO_3-N) desnitrificado. Muy a menudo, la cámara de desnitrificación está equipada con medios de biofiltro diseñados con un tiempo de residencia de cerca de 4 horas. El flujo debe ser controlado para mantener la concentración mínima de oxígeno de salida en 1 mg/L, dado que si el oxígeno se agotada completamente, se producirá mucho gas sulfuro de hidrógeno (H_2S), que es extremadamente tóxico para los organismos acuáticos y ocasiona mal olor (huevo podrido). El acúmulo de lodos en la cámara puede ser muy elevado, y la unidad tiene que ser retro-lavada normalmente una vez por semana.

Los biofiltros se construyen típicamente usando medios plásticos o cerámicos, dando una alta superficie por m^3 de biofiltro. Las bacterias crecen como una película delgada en los medios, ocupando una superficie extremadamente grande. El objetivo de un biofiltro bien diseñado es llegar a una superficie tan alta como sea posible por m^3 sin empaquetar el biofiltro, de forma que no se obstruya con materia orgánica perjudicando su funcionamiento. Por lo tanto, es importante tener un alto porcentaje de espacio libre para que pase el agua y tener un buen flujo global a través del biofiltro junto con un procedimiento de retro-lavado o retorno suficiente. Dichos procedimientos de retro-lavado deben llevarse a cabo a intervalos suficientes una vez por semana o mes dependiendo de la carga del filtro. El aire comprimido se utiliza para crear turbulencia en el filtro por el cual se extrae la materia orgánica. El biofiltro se desvía mientras se lleva a cabo el procedimiento de retro-lavado, y el agua sucia en el filtro se drena y se descarga antes de que el biofiltro se conecte de nuevo al sistema.



Figura 8. Filtro biológico (biofiltro) de flujo ascendente. Fuente: FAO, Bregnballe (2015).

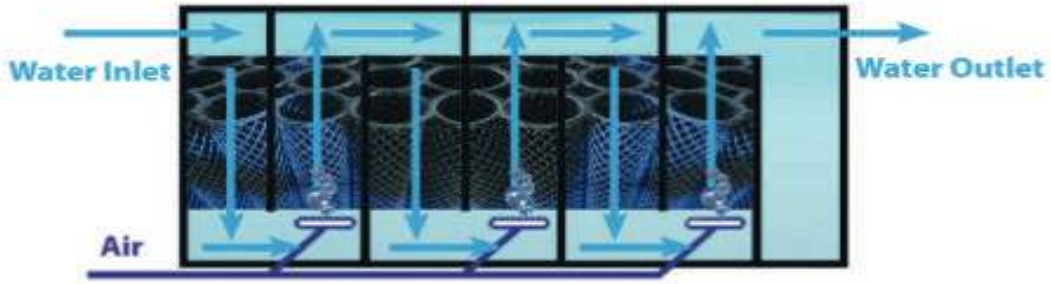


Figura 9. Filtro biológico de lecho en movimiento y biofiltros con media fijo (abajo). Fuente: FAO, Bregnballe (2015).

Los biofiltros utilizados en sistemas de recirculación pueden ser diseñados como: (1) filtros de lecho fijo o (2) filtros de lecho móvil. Todos los biofiltros utilizados en la recirculación hoy funcionan como unidades sumergidas bajo el agua. En el filtro de lecho fijo, el material plástico es fijo y no se mueve. El agua corre a través de los medios como un flujo laminar para hacer contacto con la película bacteriana. En el filtro de lecho móvil, el medio plástico se mueve alrededor del agua dentro del biofiltro por una corriente creada por el bombeo en el aire. Debido al movimiento constante de los medios, los filtros de lecho móvil pueden ser empacados a mayor densidad que los filtros de lecho fijo, alcanzando así una mayor tasa de rotación por m^3 de biofiltro. Sin embargo, no hay diferencia significativa en la tasa de rotación calculada por m^2 (superficie de filtro) dado que la eficacia de la película bacteriana en cualquiera de los dos tipos de filtro es más o menos la misma. El filtro de lecho fijo actúa también como una unidad de filtración mecánica fina que elimina el material orgánico microscópico y deja el agua muy clara, por lo que se eliminan partículas orgánicas finas cuando estas sustancias se adhieren a la película bacteriana, mientras que el filtro de lecho móvil no tendrá el mismo efecto por que la turbulencia constante del agua hará imposible cualquier adhesión.

Ambos sistemas de filtro se pueden utilizar en el mismo sistema, o pueden combinarse; utilizando el lecho móvil para ahorrar espacio y el lecho fijo para beneficiarse del efecto adherente. Existen varias soluciones para el diseño final de los sistemas de biofiltros dependiendo del tamaño de la finca, de las especies a cultivar, de los tamaños de los peces, etc.

2.2.3. Desgasificación, aireación y extracción

Antes de que el agua vuelva a los tanques de los peces, los gases acumulados, que son perjudiciales para ellos, deben ser removidos. Este proceso de desgasificación se lleva a cabo por aireación del agua, y el método se denomina a menudo extracción. El agua contiene dióxido de carbono (CO_2) de la respiración de los peces y de las bacterias en el biofiltro en concentraciones altas, pero también hay presencia de nitrógeno libre (N_2). La acumulación de dióxido de carbono y los niveles de gas nitrógeno puede tener efectos perjudiciales sobre el bienestar y el crecimiento de los peces. Bajo condiciones anaerobias, se puede producir ácido sulfhídrico (H_2S), especialmente en sistemas de agua salada, un gas extremádamente tóxico para los peces, que puede causar mortalidades incluso en bajas concentraciones si se genera en el sistema.

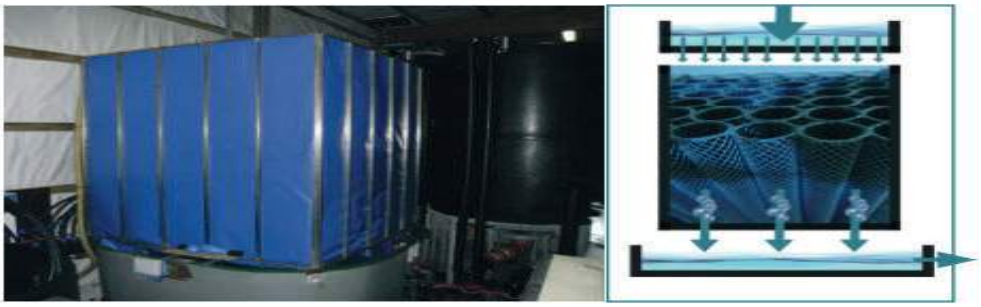


Figura 10. Filtro de escurrimiento (“Percolador”) típico. Fuente: FAO, Bregnballe (2015).

La aireación puede lograrse bombeando aire en el agua por lo que el contacto turbulento entre las burbujas de aire y el agua expulsa los gases. Esta aireación sumergida hace posible mover el agua al mismo tiempo, por ejemplo si se utiliza un sistema de pozo de aireación; sin embargo, el sistema de pozo de aireación no es tan eficiente para eliminar gases como el sistema de filtración por goteo (o de torre), también denominado desgasificador. En el sistema de goteo, los gases se eliminan mediante el contacto físico entre el agua y los medios de plástico apilados en una columna. El agua se conduce a la parte superior del filtro sobre una placa de distribución con orificios, y se vierte por los medios de plástico para maximizar la turbulencia y el contacto, el llamado proceso de separación.

2.2.4. Oxigenación

El proceso de aireación del agua, que es el mismo proceso físico que la desgasificación o extracción, agregará algo de oxígeno al agua a través del intercambio simple entre los gases en el agua y los gases en el aire dependiendo del nivel de saturación del oxígeno en el agua. El equilibrio de oxígeno en agua es 100% de saturación. Cuando el agua vuelve de los tanques de peces, el contenido de oxígeno se ha reducido, por lo general hasta el 70%, y el contenido se reduce aún más en el biofiltro. La aireación de esta agua típicamente traerá la saturación hasta cerca del 90%, en algunos sistemas se puede alcanzar el 100%. Sin embargo, a menudo se prefiere una saturación de oxígeno superior al 100% en el agua de entrada a los tanques de peces para tener suficiente oxígeno disponible para un crecimiento de peces alto y estable. Los niveles de saturación por encima del 100% requieren un sistema que utilice oxígeno puro.



Figura 11. Cono de oxigenación para incorporar oxígeno puro en alta presión con un sensor (probe) para medir la saturación del oxígeno en el agua. Fuente: FAO, Bregnballe (2015).

El oxígeno puro es a menudo suministrado a los tanques de cultivo en forma de oxígeno líquido, pero también puede ser producido en la granja a través de un generador de oxígeno. Existen varios mecanismos para alcanzar la sobre saturación con contenido de oxígeno de 200-300% de oxígeno en el agua. Normalmente se utilizan sistemas de cono de oxígeno de alta presión o sistemas de oxígeno de cabeza baja, tales como plataformas de oxígeno. El principio es el mismo.



Figura 12. Plataforma de oxígeno para disolver oxígeno puro a baja presión. Fuente: FAO, Bregnballe (2015).

El agua y el oxígeno puro se mezclan bajo presión, lo que permite que el oxígeno se introduzca al agua. En el cono de oxígeno la presión se logra con una bomba que crea una alta presión típicamente alrededor de 1,4 bar en el cono, pero bombear agua a presión en el cono de oxígeno consume mucha electricidad. En la plataforma de oxígeno la presión es mucho menor, típicamente hasta aproximadamente 0,1 bar, y el agua es simplemente bombeada a través de la caja mezclando agua y oxígeno. La diferencia en los dos tipos de sistemas, es que el cono de oxígeno utiliza sólo una parte del agua circulante para el enriquecimiento de oxígeno y lograr saturación superior al 100% en el agua de entrada a los tanques de cultivo, mientras que la plataforma de oxígeno se utiliza para el flujo de recirculación principal a menudo en combinación con el bombeo general de agua de recirculación en el sistema.



Figura 13. Sistema de tratamiento Ultra-Violeta, cerrado (instalación en tuberías) y abierto (instalado en canales). Fuente: FAO, Bregnballe (2015).

Cualquiera que sea el método utilizado, el proceso debe controlarse con la ayuda de

la medición de oxígeno y la mejor forma de hacerlo es medirlo después del sistema de oxigenación a presión atmosférica normal, mediante el uso de una sonda de oxígeno y en una cámara de medición que puede ser suministrada por el proveedor. Esto hace que la medición sea más fácil que si se hiciera bajo presión, ya que la sonda deberá limpiarse y calibrarse de vez en cuando.

2.2.5. Luz ultravioleta

La desinfección UV funciona aplicando luz en longitudes de onda que destruyen el ADN de los microorganismos. En la acuicultura está dirigida a las bacterias patógenas y los organismos unicelulares, tratamiento que se ha utilizado con fines médicos durante décadas y no afecta a los peces, pues el tratamiento UV del agua se aplica fuera de la zona de producción de ellos. Es importante entender que las bacterias crecen tan rápidamente en la materia orgánica que controlar su número en las granjas piscícolas tradicionales tiene un efecto limitado. El mejor control se logra con una filtración mecánica eficaz que se combina con una bio-filtración completa para eliminar eficazmente la materia orgánica del agua de proceso, lo cual permite que la radiación UV funcione eficientemente.

La dosis UV se puede expresar en varias unidades diferentes. Uno de los más utilizados es el micro vatio-segundos por cm^2 ($\mu Ws/cm^2$). La eficiencia depende del tamaño y especie de los organismos y de la turbidez del agua. Con el fin de controlar las bacterias y los virus, el agua necesita ser tratada con aproximadamente 2.000 a 10.000 $\mu Ws/cm^2$ para eliminar el 90% de los organismos, los hongos necesitarán de 10.000 a 100.000 y los pequeños parásitos de 50.000 a 200.000 $\mu Ws/cm^2$. La iluminación UV utilizada en la acuicultura debe trabajar bajo el agua para dar la máxima eficiencia, las lámparas instaladas fuera del agua tendrán poco o ningún efecto debido a la reflexión de la superficie del agua.

2.2.6. Ozono

El uso de ozono (O_3) en la piscicultura ha sido criticado porque el efecto de la sobredosificación puede causar lesiones graves a los peces y en las granjas ubicadas en recintos cerrados, el ozono también puede ser perjudicial para las personas que trabajan en el área, dado que pueden inhalarlo demasiado. Por lo tanto, la correcta dosificación y control de la carga junto con una ventilación adecuada son cruciales para alcanzar un resultado positivo y seguro.

El tratamiento con ozono es una manera eficaz de destruir organismos no deseados por la fuerte oxidación de materia orgánica y organismos vivos. En la tecnología de tratamiento de ozono, las micropartículas se descomponen en estructuras moleculares que se unirán de nuevo y formarán partículas más grandes como una forma de floculación donde los sólidos suspendidos que son microscópicos y por ende demasiado pequeños para ser capturados, pueden ser retirados del sistema en lugar de pasar a través de los diferentes tipos de filtros del sistema de recirculación. Esta tecnología también se conoce como “pulido de agua”, ya que deja el agua más

clara y libre de los sólidos en suspensión y de posibles bacterias adheridas a estos. Esto es especialmente adecuado en sistemas de incubación y larvicultura, que son sensibles a micro partículas y bacterias en el agua.

El tratamiento con ozono también puede utilizarse cuando el agua de entrada a un sistema de recirculación necesita ser desinfectada. Vale la pena mencionar que en muchos casos el tratamiento UV es una buena y segura alternativa al ozono.

2.2.7. Regulación del pH

El proceso de nitrificación en el biofiltro produce ácido, por lo que el nivel de pH se reducirá. Para mantener un pH estable se debe añadir una base al agua. En algunos sistemas se instala una estación de mezcla de cal o bicarbonato de sodio que se gotean mezclados en agua en el sistema y estabilizan así el pH. Otra opción es un sistema de dosificación automático regulado por un medidor de pH con un impulso de retroalimentación a una bomba de dosificación. Con este sistema es preferible usar hidróxido de sodio (NaOH), ya que es fácil de manejar y hace el sistema más sencillo de mantener. El hidróxido de sodio es una base fuerte que puede quemar severamente los ojos y la piel. Deben tomarse precauciones de seguridad y usar gafas y guantes mientras se manejan este y otros ácidos y bases fuertes.

2.2.8. Regulación de la temperatura del agua

Mantener una temperatura de agua óptima en el sistema de cultivo es muy importante, dado que la tasa de crecimiento del pez está directamente relacionada con la temperatura del agua. El ingreso de agua nueva al cultivo es una forma bastante simple de regular la temperatura de un día a otro cuando esta sobrepasa los niveles óptimos para la especie. En un sistema de recirculación de en sitios cerrados, el calor se acumulará lentamente en el agua, por la energía en forma de calor que se libera del metabolismo de los peces y sobre todo de la actividad bacteriana en el biofiltro y también por el calor de la fricción en las bombas, sopladores y el uso de otras instalaciones en las que también se acumulará. Por lo tanto, las altas temperaturas en el sistema son a menudo un problema en un sistema intensivo de recirculación, las cuales se pueden controlar mediante el ajuste de la cantidad de agua fría fresca de entrada en el sistema (semi-abierto o agua de reposición del evaporado) y regular la temperatura de una manera sencilla.

Si el sistema es cerrado, y el enfriamiento por el uso de agua de entrada es limitado, se puede usar una bomba de calor para enfriar el agua circulante dentro de la granja. La bomba de calor utilizará la cantidad de energía que normalmente se pierde en el agua de descarga o en el aire que sale de la granja. También se puede reducir el costo de calentamiento/enfriamiento recuperando la energía mediante el uso de un intercambiador de calor. La energía en el agua de descarga de la granja se transfiere al agua fría de entrada o viceversa, pasando ambas corrientes al intercambiador de calor donde el agua caliente de la salida perderá energía y calentará el agua fría del producto, sin mezclar las dos corrientes. También en el sistema de ventilación se puede montar un intercambiador de calor para el aire utilizando la energía del

aire saliente y transfiriéndolo al aire en circulación, reduciendo así la necesidad de calentamiento de manera significativa.

En climas fríos el calentamiento del agua puede ser necesario, con calor proveniente de cualquier fuente como una caldera de petróleo o gas pero independientemente de la fuente de energía, el sistema de calefacción debe estar conectado a un intercambiador de calor para calentar el agua recirculada. Las bombas de calor son una solución de calentamiento amigable con el medio ambiente y pueden utilizar energía para la calefacción desde el océano, un río, un pozo o el aire. Se pueden incluso utilizar para transferir la energía de un sistema de recirculación a otro, y de ese modo calentar un sistema y enfriar otro.

2.2.9. Bombas

Se utilizan diferentes tipos de bombas para hacer circular el agua del proceso en el sistema. El bombeo requiere normalmente una cantidad sustancial de electricidad, bajas alturas, cambios de elevación y el uso de bombas eficientes y correctamente instaladas para mantener los costos de funcionamiento al mínimo.
La elevación del agua debe realizarse preferentemente sólo una vez en el sistema de recirculación, por lo que el agua debe fluir después por gravedad a través de todo el sistema hasta el sumidero. Las bombas se colocan con más frecuencia delante del sistema de biofiltro y el desgasificador donde comienza el proceso de preparación del agua. En cualquier caso, las bombas deben colocarse después de la filtración mecánica para evitar romper los sólidos procedentes de los tanques de peces.

El cálculo de la altura de elevación total para el bombeo es la suma del levantamiento real altura y las pérdidas de presión en los recorridos de tuberías, curvas de tubería y otros accesorios. Esto también se llama la cabeza dinámica. Si el agua es bombeada a través de un biofiltro sumergido antes de caer a través del desgasificador, una contrapresión del biofiltro también tendrá que ser contabilizado. Los detalles sobre mecánica de fluidos y bombas no están descritos en este capítulo.

Como se mencionó, a altura total de elevación del bombeo, corresponde a la sumatoria de la elevación real y las pérdidas de presión; sin embargo, en la mayoría de los sistemas de recirculación intensiva la altura es de 2-3 metros, lo que hace que el uso de bombas de baja presión y elevado caudal sea más común, bombeando el flujo principal alrededor. El proceso de disolución de oxígeno puro en el agua de recirculación requiere el uso de bombas centrífugas, dado que estas bombas son capaces de crear la alta presión requerida en el cono. En algunos sistemas, donde la altura de elevación es muy baja, el agua es conducida sin el uso de bombas, inyectando aire en los tanques de aireación lo que permite que la desgasificación y el movimiento del agua se realicen en un solo proceso; sin embargo, la eficacia de la desgasificación y el movimiento del agua no es necesariamente mejor que la del bombeo de agua por encima del desgasificador y la eficiencia de los pozos de aireación en términos de consumo de energía y eficiencia de desgasificación es menor que cuando se utilizan

bombas de elevación y extracción o de percolación.

2.2.10 Monitoreo, control y alarmas

La piscicultura intensiva requiere una estrecha vigilancia y control de la producción con el fin de mantener condiciones óptimas para los peces en todo momento. Las fallas técnicas pueden resultar fácilmente en pérdidas sustanciales, y las alarmas son instalaciones vitales para asegurar la operación.

En granjas con mayor tecnificación se utilizan sistemas de control central que monitorean y controlan los niveles de oxígeno, temperatura, pH, niveles de agua y las funciones motoras y cuando alguno de los parámetros sale de los valores preestablecidos, un proceso automatizado intentará resolver el problema y si esto no ocurre, una alarma será activada. Dispositivos de alimentación automática también pueden ser integrados al sistema de control central, para que en el momento de la alimentación se proporcione una dosis más alta de oxígeno a medida que aumenta su consumo durante la alimentación

3. SELECCIÓN DE ESPECIES

No es fácil recomendar cual especie se debe cultivar en sistemas de recirculación, especialmente con la cantidad de especies nativas y exóticas disponibles en la región. Por tratarse de un sistema prácticamente cerrado y/o con limitado intercambio con el medio ambiente y bioseguro, la autorización de cualquier especie nativa o de otra cuenca, así como de las especies exóticas no debería ser un problema relevante, pero a pesar de ello, algunos países del continente no cuentan con políticas claras ni racionales al respecto.

Son muchas las especies candidatas y muchos factores influyen en el éxito de una acuicultura en recirculación rentable. Por ejemplo, los costos locales de construcción, el costo y la estabilidad del suministro de electricidad, disponibilidad de personal calificado, etc. Sin embargo, se deben tener en cuenta dos cuestionamientos: (1) ¿se consideró si la especie de pez/camarón seleccionada tiene la capacidad de funcionar bien en una instalación de recirculación?; y (2) ¿hay un mercado con un precio lo suficientemente alto en volúmenes grandes para esta especie que pueda hacer rentable el proyecto?
La primera pregunta puede responderse de una manera relativamente simple: Desde un punto de vista biológico, cualquier especie íctica cultivada con éxito en la acuicultura convencional puede ser fácilmente cultivada en recirculación y como se ha anteriormente mencionado, el ambiente dentro de la piscifactoría de recirculación puede ajustarse a las necesidades exactas de las especies cultivadas. La tecnología de recirculación en sí no es limitante y el pez crecerá igual o mejor, dado que una unidad de recirculación mantiene las condiciones ambientales más constantes. Si va a funcionar desde un punto de vista económico la situación es más incierta, debido a que depende de las condiciones de mercado, las inversiones, los costos

de producción y la capacidad de la especie de crecer rápidamente. Peces con tasas de crecimiento más bajas, tales como los de agua fría, se hacen muy difíciles de producir en recirculación con una cosecha anual que justifique la inversión hecha en las instalaciones. Si las condiciones del mercado son favorables para una especie determinada, el sistema de recirculación dependerá en gran medida de la competencia con otros productores que producen en sistemas tradicionales, que además no se limita a los productores locales, pues el comercio de pescado es un negocio global al igual que la competencia, por ejemplo, las tilapias cultivadas en China afectan la producción interna Colombiana, la trucha cultivada en Polonia compite en Noruega con el bagre de Vietnam y con el salmón producido en las granjas de Noruega. Hoy en día los peces son fácilmente distribuidos en todo el mundo a bajo costo.

El concepto danés de granjas super-intensivas de truchas y salmones en recirculación es un buen ejemplo de un sistema entrando en un segmento de precio relativamente bajo con peces de tamaño pequeño; sin embargo, es necesario que estos sistemas de producción estén diseñados para volúmenes de producción por encima de 1.000 toneladas, para que sean competitivos. En el futuro cercano, se espera la implementación de grandes proyectos de recirculación con especies de clima frio en algunas áreas tropicales como en la Florida en Estados Unidos, cultivando salmones en instalaciones terrestres que actualmente se realiza en jaulas marinas, por razones ambientales y estratégicas. La foto siguiente muestra cómo será la granja de salmones de Platina Seafood – Atlantic Sapphire Brand – una inversión de US$ 350 millones en el sur de Miami.



Figura 14. Granja superintensiva de salmones (100% en tierra). Fuente: https://www.undercurrentnews.com/2015/12/09/platina-re-launches-danish-land-farmed-salmon-in-us/

Proyectos de recirculación utilizando tilapia son los más comunes (Zimmermann y Fitzsimmons, 2004), y desde el año 2000 ya se han vuelto rentables en sistema de biofloc con cero recambio (100% cerrados), como el de las siguientes fotos, ambas en Kurdistan en Iraq. En la primera foto se observan desde arriba los bioreactores (tanques) con y sin invernaderos en construcción, y un estanque sedimentador o recirculador de aguas en posición perpendicular. En la segunda foto vista interna del invernadero con iluminación nocturna y separador para incrementar el movimiento horizontal de aguas.



Figura 15. Sistema 100% cerrado con tilapias en Kurdistan. Foto: Sergio Zimmermann



Figura 16. Recirculador en Bioflóculos Mixotróficos con engorde de Carpas y Tilapias en Kurdistan, Iraq. Foto: Sergio Zimmermann

Cabe mencionar que, para los organismos más jóvenes, de talla comercial pequeña o de valor elevado, el uso de la recirculación es mucho más interesante, porque los peces pequeños crecen proporcionalmente más rápido y por lo tanto son adecuados para sistemas controlados y junto a los de mercado más selecto, tienen más valor por peso/unidad, por lo tanto, son particularmente adecuados para un ambiente más controlado y predecible.

4. **BIOFLÓCULOS**

La tecnología de recirculación y reaprovechamiento de aguas basada en Bioflóculos (popularizada en la última década por la sigla BFT del inglés “Biofloc Technology”) puede ser considerada una de las innovaciones más importantes de la acuicultura en las últimas décadas. Esta técnica está basada en la producción de microorganismos *in situ* que desempeñan tres papeles principales: (i) mantenimiento de la calidad del agua, por la absorción de compuestos orgánicos y nitrogenados, generando proteína microbiana y reduciendo la necesidad de intercambios de agua en los tanques de cultivo; (ii) nutrición, aumentando la viabilidad de los organismos cultivados y reduciendo el factor de conversión alimenticia (FCA) y por consiguiente una disminución de los costos de los concentrados - reducción a las bajísimas tasas de alimentación con “raciones ecológicas” - bajos niveles de fósforo y nitrógeno; y (iii) competencia de bio-remediadores, disminuyendo la presencia de agentes patogénicos.
En esta modalidad de producción bio-segura, es posible que no haya recambios de agua más allá de la reposición del volumen evaporado, y los agregados (bioflóculos) son una rica fuente nutritiva de alimento fresco (vivo) disponible las 24 horas del día, debido a una interacción compleja entre la materia orgánica, sustrato físico y una gran variedad de microorganismos, presentando una composición nutritiva muy semejante a una harina de pescado de mediana calidad (Zimmermann y Fitzsimmons, 2004). Esta productividad natural desempeña un papel preponderante en el reciclaje de nutrientes y en mantener la calidad del agua en una igualmente deseada economía circular.

En una revisión sobre el tema, Emerenciano *et al*. (2017) caracterizan la técnica de cultivo con bioflóculos como intensiva, con unas biomasas mínimas de 300 g/m^2 para peces y camarones, donde es necesario el movimiento continuo del agua para inducir la formación de macro-agregados (flóculos) y el mantenimiento de una relación carbono: nitrógeno del orden de 12-20: 1. Según los autores, el enfoque sostenible de este sistema se basa en la alta producción en pequeñas áreas con innumerables beneficios como mejora de las tasas de crecimiento, disminución del factor de conversión alimenticia (FCA) hasta un 50% comparada a los cultivos convencionales y, por consiguiente, disminución de los costos asociados en la alimentación (Avnimelech, 2015).

Los bioflóculos son utilizados en América Latina tanto comercial como experimentalmente desde hace más de dos décadas, con tilapias (Zimmermann y Fitzsimmons, 2004; Avnimelech, 2007; Zimmermann, 2017b), camarones marinos (Burford *et al*, 2003; Zimmermann y Fitzsimmons, 2004), bien como en los cultivos de carpas, bagres, pacú, cachamas (Poleo *et al*., 2011), y paiche/arapaima (Zimmermann, 2017). En sistemas cero efluentes, cultivos de tilapias de 500-800 gramos resultan en biomasas de 6-12 kg/m^3 en ciclos de 5-8 meses, y con camarones marinos de 12-20 gramos se obtiene 1-3 kg/m^3 en ciclos de 90-120 días. Por supuesto estas biomasas pueden triplicar o cuadruplicar cuando parte del lodo es removido (1-3% de renovación del

volumen total diariamente). Emerenciano *et al*. (2017) presentan en su revisión una tabla con rangos de los parámetros de calidad del agua que deben ser monitoreados continuamente en los cultivos con biofloc, como temperatura, oxígeno disuelto (DO), pH/alcalinidad, salinidad, sólidos totales en suspensión (TSS, menos de 500 mg/L) y sedimentos (1-25 ml/L). La comprensión de los parámetros de calidad del agua y sus interacciones son cruciales para el correcto desarrollo y mantenimiento del ciclo de producción en este sistema, y mantener los intervalos óptimos de seguridad genera más crecimiento y mejoras en la salud animal, evitando las mortalidades.

Hay una infinidad de tipos de bioflocs, dependiendo del grupo de microbios predominante en el sistema. Los tres tipos principales son heterotróficos (dominado por bacterias), autotrófico o mixotrófico (predominando bacterias y algas) y foto-autotrófico (mayoría son algas), dependiendo de la manipulación de las relaciones C: N:P del sistema a través del alimento de los peces, las fertilizaciones en el agua de cultivo, y el consecuente direccionamiento del grupo de microbios dominante. La relación carbono-nitrógeno más recomendada está en el rango de 12-20:1 para garantizar la presencia y crecimiento de la población de bacterias. La relación N:P (normalmente se utilizan valores de nitrato y ortofosfato), está relacionada al tipo de alga predominante (comunidad autotrófica), por ejemplo, clorofitas - familia de las Clorofíceas - versus cianófitas - familia de las Cianofíceas).

La estabilidad del biofloc y un consiguiente cambio mínimo del agua, hasta de cero (Zimmermann y Fitzsimmons, 2004), depende de la interacción dinámica entre las comunidades microbianas de bacterias, algas, levaduras, ciliados, hongos, protozoarios, nematodos, rotíferos, copépodos, etc., que ocurren naturalmente. Estos consorcios de microorganismos participan en el reciclaje de materia orgánica y productos nitrogenados como parte de la compleja cadena alimenticia (que incluyen también las especies cultivadas), ayudando a mantener la calidad del agua y produciendo un alimento suplementario de alto valor. Desde el punto de vista nutricional y de calidad de los peces y camarones, bien como en términos de efluentes mínimos (o cero), el biofloc autotrófico parece ser el más recomendado, aunque sea el más difícil de mantener estable. Las relaciones de mutualismo y comensalismo ocurren entre los grupos de microorganismos, por ejemplo, bacterias-bacterias o bacterias-micro-algas, etc., y en los cultivos de peces y camarones con poco cambio de agua, se producen en las superficies de las paredes y tuberías, complejas bio-películas (bio-filmes) donde coexisten bacterias heterotróficas y nitrificantes. Los iones inorgánicos son atraídos hacia la superficie de estas bio-películas y las superficies sólidas del sustrato, promoviendo considerable nitrificación (Timmons *et al*., 2002). Algunas cepas bacterianas tienen un efecto positivo sobre el crecimiento de micro-algas no sólo para especies planctónicas, si no también en especies anexas o bentónicas (Fukami *et al*., 1997). Los polisacáridos extracelulares de diatomeas bentónicas pueden ser utilizados por organismos heterotróficos como fuente de carbono (Bruckner *et al*., 2008). En un estudio con isótopos estables, Burford *et al*. (2004) estimaron una retención diaria de nitrógeno del 18-29% en el camarón obtenido a partir de biota

del biofloc, mientras que Avnimelech y Kochba (2009) encontraron cerca del 25% de asimilación para tilapia, utilizando la misma técnica. Tanques con biofloc en elevadas concentraciones (biorreactores) pueden también substituir los biofiltros (en este caso sin el caro sustrato o media de plástico) en sistemas de recirculación más intensivos.

5. ACUAPONÍA

La acuaponía es un sistema multitrófico de agricultura integrada que combina la producción de peces y plantas hidropónicas en recirculación donde el agua de los tanques de peces enriquecida con nutrientes es utilizada para el crecimiento de las plantas (Rakocy, 1989). Es un proceso natural reducido, sin suelo, que se puede encontrar en lagos, estanques y ríos. Usar desperdicios de pescado como fertilizante para cultivos es una práctica antigua, existiendo reportes del cultivo de plantas y peces juntos en arrozales hace más de mil quinientos años en la antigua China (Coche, 1967), pero los ejemplos más conocidos son las “islas estacionarias” instaladas en lagos poco profundos de Centroamérica como en La Chinampas Azteca en 1150-1350 AC (Turcios y Papenbrock, 2014). Las plantas crecen utilizando los nutrientes excretados de los peces, y tanto los peces como las plantas pueden cosecharse para el consumo. A finales de los años 70 y principios de los 80, los investigadores del New Alchemy Institute North Carolina State University (EE. UU.) desarrollaron la base de la acuaponía moderna (Love *et al*., 2014) y el ejemplo más conocido se estableció en la Universidad de las Islas Vírgenes (UVI) en 1980 (Rakocy, 1989). Aún innovadora y muy utilizada en pequeña escala en todo el mundo; todavía no ha sido ampliamente industrializada por estar limitada en términos de automatización, pero tiene un gran potencial en reducir el impacto de la producción de peces y plantas en el medio ambiente por cerrar el ciclo de nutrientes (Zimmermann, 2017).

Los sistemas de acuaponía se conectan perfectamente con la economía circular. La interconexión de los procedimientos acuícolas e hidropónicos permite abordar algunas de las deficiencias de los respectivos sistemas, lo que representa un método prometedor de producción sostenible de alimentos. La acuaponía se puede considerar un sistema de producción agrícola sostenible con respecto a la definición de Lehman *et al*. (1993), que definen la agricultura sostenible como **un proceso que no agota los recursos no renovables que son esenciales para la agricultura con el fin de mantener las prácticas agrícolas**. Francis *et al*. (2003) agregan que la producción agrícola sostenible se puede lograr al asemejarse a los ecosistemas naturales y “**diseñar sistemas que cierren los ciclos de nutrientes**”, que es una de las principales características de la acuaponía y de una **economía circular**.

Así como en el interior de un biofiltro de un sistema de recirculación intensivo o en una unidad de biofloc, los sistemas acuapónicos deben ser capaces de mantener semejantes comunidades microbianas que se involucran en el tratamiento de aguas residuales y su solubilización. Como anteriormente fue mencionado, el amonio (NH_3) excretado en la orina y en las branquias de los peces se puede acumular a

niveles tóxicos si no se retira del sistema. Un de los componentes microbianos más importantes es el consorcio de bacterias nitrificadoras autotróficas establecida en las superficies de los biofiltros, en general como una bio-película de superficie sólida dentro del sistema acuapónico, por ejemplo, con la nitroso-bacteria *Nitrosomonas* sp. y las nitro-bacterias *Nitrospira* sp. y *Nitrobacter* sp. El amonio del sistema se convierte en nitrito (NO_2^-) por nitroso-bacterias, antes de ser transformada en nitrato (NO_3^-) por las nitro-bacterias (Tyson *et al*., 2008). En la mayoría de los sistemas acuapónicos es necesaria una unidad específica de biofiltración donde hay una nitrificación más intensiva. El producto final de esta conversión bacteriana, el nitrato, menos tóxico para los peces y es la principal fuente de nitrógeno para el crecimiento de las plantas hidropónicas (Rakocy *et al*., 2006).

Un punto crucial en los sistemas acuapónicos es la estabilización del pH, que es crítico para todos los organismos incluyendo peces, plantas y microorganismos. El pH óptimo para cada componente vivo es diferente, la mayoría de las plantas necesitan un valor entre 6 y 6,5 para optimizar la absorción de nutrientes; sin embargo, peces como la Tilapias logran mejor rendimiento de crecimiento con pH entre 7,0 y 9,0, y las bacterias presentan una eficiencia de nitrificación aumentando linealmente en 13% por unidad de pH dentro de un rango de pH entre 5,0 y 9,0, con la mayor actividad de los oxidantes de amonio entre 7,8 y 8,2.

Las transferencias minerales de la acuicultura para la hidroponía respaldan el reciclaje eficiente de nutrientes, mientras que la recirculación del agua reduce su desperdicio (Turcios y Papenbrock, 2014). Los sistemas hidropónicos de alto rendimiento requieren una cantidad considerable de macro y micronutrientes de origen orgánica y mineral, lo que genera elevado consumo de energía (para producción y transporte) y uso de recursos finitos (por ejemplo, fósforo y petróleo). Además, en sistemas sin recirculación, la eliminación intermitente de cantidades considerables de agua rica en nutrientes conduce a un alto consumo de agua, así como a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (Gagnon *et al*., 2010). El intercambio regular de agua realizado en sistemas acuícolas convencionales no es necesario en acuaponía, con un consumo de agua por debajo de 50 l/kg de pescado producido (Zimmermann, 2017) contra 5.000 l/kg para bovinos (Dalsgaard *et al*., 2013). En acuaponía, el nitrato en exceso se usa para la producción valiosa de plantas en lugar de eliminarse en forma gaseosa en unidades de desnitrificación (como la producción de un metano barato|).

Las soluciones hidropónicas contienen proporciones bien establecidas de macro (C, H, O, N, P, K, Ca, S y Mg) y micro (Fe, Mn, B, Zn, Cu y Mo) minerales requeridos por las plantas terrestres. Se agregan a la fórmula 12 de estos 15 elementos, la excepción es tres de los elementos orgánicos C, H, y O, que están disponibles desde el aire y el agua. Los nutrientes provenientes de la acuicultura contienen excreciones branquiales, orina y heces de los peces en las formas solubles y compuestos orgánicos sólidos que son solubilizados hasta la forma iónica en el agua para ser asimilados por las

plantas. Para sostener un adecuado crecimiento de la planta, es necesario supervisar las concentraciones y proporciones de los macro y micronutrientes. Periódicamente es necesario adicionar y ajustar estas concentraciones, por ejemplo, el hierro es frecuentemente bajo en los residuos acuícolas (Rakocy *et al*., 2006). En este caso específico, una medida de bajo costo es colocar en el sistema de recirculación una pieza de hierro como un candado oxidado (Fitzsimmons, 2010 - Comunicación Personal) para ajustar los niveles de este mineral en el sistema. Zimmermann (2017) ha analizado comparativamente la proporción de los principales elementos (orgánicos, macro, meso y micro) de las superficie terrestre, de las plantas terrestres, de las plantas terrestres en sistemas hidropónicos y de las plantas acuáticas (Figura 17). Con raras excepciones (sodio, potasio, y azufre), la proporción de los 15 elementos esenciales es casi la misma. El sodio en algas es considerado un macro-elemento, pero en las plantas terrestres es un meso a micro-elemento. El opuesto pasa con el azufre, un macro-nutriente para plantas terrestres, pero bajo condiciones hidropónicas y para algas es considerado un micro-elemento. El potasio parece ser con el hierro un de los elementos más demandados bajo las condiciones hidropónicas, sobrepasando el nitrógeno en algunos cultivos.

Elementos	Sup.-Terrestre	Plantas-Terrestres	Plantas-Hidroponicas	Plantas-Acuaticas
Organicos	Hidrogenio	Oxigenio	Oxigenio	Oxigenio
96%	Oxigenio	Hidrogenio	Carbono	Hidrogenio
	Carbono	Carbono	Hidrogenio	Carbono
	Nitrogenio	Nitrogenio	Potassio	Nitrogenio
Macro	Calcio	Fosforo	Nitrogenio	Sodio
2,9%	Magnésio	Potassio	Calcio	Fosforo
	Silica	Calcio	Fosforo	Calcio
Meso	Cloro	Magnesio	Magnésio	Potassio
0,8%	Sodio	Azufre	Ferro	Magnesio
-	Fosforo	Ferro	Zinco	Ferro
-	Ferro	Sodio	Manganes	Silica
Micro	Potassio	Manganes	Boro	Manganes
>-0,5%	Azufre	Silica	Cobre	Cobre
	Cobre	Cloro	Selenium	Zinco
	Zinco	Cobre	Cloro	Azufre
	Boro	Zinco	Sodio	Cloro
	Manganes	Boro	Azufre	Boro

Figura 17. Comparación de la proporción de los principales elementos en la superficie terrestre, de las plantas terrestres, plantas terrestres en condiciones de hidroponía y de las plantas acuáticas (algas verdes).

Según Rakocy (2012), a pesar de que los sistemas acuapónicos no están completamente comprobados teniendo en vista de la efectividad de su costo o sus capacidades técnicas, el concepto de acuaponía es prometedor para contribuir a la producción de alimentos sostenibles tanto a nivel rural como urbano y al mismo tiempo disminuir la contaminación del medio ambiente y la necesidad de recursos.

En una acuaponía típica los elementos minerales disponibles para el crecimiento de las plantas en solución son menos concentrados que en una hidroponía tradicional (con solución de fertilizantes químicos) pero de acuerdo con Zimmermann (2017), en proporciones muy semejantes. Delaide (2017) llama atención que una parte importante de los nutrientes acuícolas se pierde en el sistema acuapónico, probablemente a través del derrame de lodo, pero en sistemas 100% cerrados eso prácticamente no ocurre (Zimmermann, 2017). Tal hecho conduce a la necesidad de mineralizar y reintroducir los lodos en el sistema, determinando la consistencia del crecimiento de la planta y la proporción de elementos minerales que se reciclan en los sistemas acuapónicos.

La acuaponía consume y descarga menos agua que los sistemas agrícolas convencionales de producción de peces (acuicultura) y plantas (hidroponía), por lo tanto, requieren menos energía y presentan más sostenibilidad. Para determinar si la acuaponía puede asegurar un crecimiento constante de la planta en comparación con los sistemas químicos convencionales, Delaide (2017) en Holanda y el autor de este capítulo en Florida han comparado el crecimiento de la albahaca (ambos), lechuga (ambos) y maracuyá (solamente Zimmermann, 2017) entre: (1) una solución acuapónica, (2) una solución hidropónica y (3) una solución acuapónica complementada con fertilizantes comerciales (en el caso de Zimmermann, 2017, fertilizante “slow-release”) y la utilización de aguas de lluvia o de pozo bajo en condiciones controladas. En los dos estudios, el rendimiento de mineralización del lodo se ha explorado en reactores aeróbicos y anaeróbicos simples, resultando en un crecimiento similar entre acuaponía y solución hidropónica, pero con un crecimiento significativamente más elevado (40% de aumento de masa fresca) en una solución acuapónica complementada con fertilizantes. En ambos estudios las concentraciones más bajas de elementos minerales no afectaron negativamente el crecimiento de las plantas y un aumento de las concentraciones de los elementos, mejoró el crecimiento en acuaponía en comparación con la hidroponía convencional. La conclusión es que los microorganismos y la materia orgánica disuelta pueden haber desempeñado un papel importante para promover el crecimiento de las raíces de las plantas y los brotes en la acuaponía. El análisis de los balances masivos de elementos minerales mostró que una parte importante de los elementos se acumulaba en los lodos, y dependiendo del manejo (100% cerrado o con desecho de lodos), se perdían nutrientes por el derrame de agua y lodo. Sin embargo, en sistemas de recirculación 100% cerrados como en el estudio de Zimmermann (2017), con la digestión del lodo en el sitio, ha demostrado una total recuperación de los elementos en forma disponible para las plantas. Con respecto a estos resultados, se sugiere que una acuaponía en circuito 100% cerrado, sin descargas de agua y nutrientes mejora el crecimiento de las plantas. Delaide (2017) sugiere más investigaciones experimentales sobre el proceso de mineralización del lodo acuícola, y si se necesita de un tratamiento posterior. Además, evaluar el crecimiento de la planta en los efluentes diluidos.

6. ACUAMIMETISMO (AQUAMIMICRY O BIOMIMICRY)

El acuamimetismo es una nueva técnica de recirculación de cultivos acuícolas en bajas densidades, basada prácticamente en alimentos vivos naturales, creada en el Asian Institute Technology (AIT) de Tailandia. Sus creadores la definen como "la intersección de la biología acuática y la tecnología que imita la naturaleza de los ecosistemas acuáticos para crear organismos vivos (incluso bioflóculos) para el bienestar de los animales acuáticos en desarrollo". La idea es combinar el cultivo sostenible e intensivo, recreando la biodiversidad natural en estanques artificiales, o sea, mimetizar la apariencia y la composición del agua natural que incluye microalgas y zooplancton y con ello garantizar la sustentabilidad ambiental de los cultivos, en especial para el camarón y sobre todo para combatir sus frecuentes enfermedades. La tecnología, que fue desarrollada por un grupo de camaroneros tailandeses coordinados por Veerasun Prayotamornkul, ha permitido en los últimos años producir camarones libres de enfermedades mediante la imitación del hábitat natural del camarón, y con adiciones limitadas de alimentos artificiales, por ejemplo, 1-3 ppm (1-3 kg/1000 m^3/día) de salvado de arroz fermentado para la promoción del zooplancton natural (especialmente copépodos y rotíferos) y un consecuente bioflóculo reducido de 1-3 ml/l. El acuamimetismo ya está siendo replicado con éxito en Tailandia, Vietnam, China, Corea, Indonesia, Malasia, India y Bangladesh.

Esta modalidad de recirculación depende de la generación de alimento vivo dentro del sistema de cultivo, el cual imita la situación natural en los ecosistemas acuáticos, donde los peces y camarones crecen de forma natural. El sistema no contamina debido a que todos los desechos son convertidos en alimento vivo y el sistema es cerrado. El acuamimetismo se basa en la biomimética, "que es un enfoque que busca soluciones sostenibles a los desafíos humanos imitando modelos y estrategias validadas con el tiempo por la naturaleza. El objetivo es crear productos, procesos y políticas que estén bien adaptados a la vida en la Tierra". La acuicultura en sus diferentes sistemas de cultivo, trata de imitar la naturaleza, y la nueva orientación del acuamimetismo busca incluir el enfoque eco-sistémico en los sistemas de cultivo acuícolas. Sin el alimento artificial, los ciclos de cultivo en este sistema son más largos hasta casi el doble de tiempo, pero los camarones alcanzan tallas más grandes y sobrevivencias elevadas (señal de bienestar), habiendo una compensación en su precio final también por tema de producción orgánica, sostenible, economía circular con cero efluentes.

7. CONCLUSIONES

La prevalencia de numerosas enfermedades que afectan a la industria de la acuicultura ha motivado el desarrollo de diversas tecnologías de recirculación discutidas en este capítulo. Algunas incluyen una mayor intensificación y costos, pero con un grado más elevado de bioseguridad y la utilización de animales libres de patógenos específicos. Otras se dedican a adaptar de manera sencilla la acuicultura tradicional en piscinas excavadas al aire libre a un sistema un poco más seguro, ambientalmente amigable.

De hecho, en los sistemas tradicionales de estanques, la acumulación continua de sedimentos y el consiguiente deterioro de la calidad del agua incentivan el desarrollo de patógenos. La promoción del crecimiento de bio-remediadores y algas, sea en biofloc o través de bombeos horizontales puede ayudar a mantener la calidad del agua, pero a veces puede ser difícil de manejar, y estos sistemas son propensos a fluctuaciones de pH y oxígeno disuelto que pueden estresar a los animales. La adición de carbono en sistemas de recirculación facilita la multiplicación de bacterias benéficas, pero el exceso lleva al acúmulo de materia orgánica y lodo nocivos a los animales y al medio ambiente. La tecnología de biofloc ha sido exitosa en todo el mundo, pero los costos operativos pueden ser significativamente mayores para mantener los flóculos en suspensión constante y el mantenimiento de bajos niveles de lodo requiere mucho conocimiento. La acuaponía tiene un gran futuro adelante, pero es necesario automatizar esta actividad para tornarla más comercial. Otro enfoque en recirculación potencialmente más equilibrado que los anteriores entre el uso de microalgas, bacterias y biofloc es el aquamimetismo, que es muy semejante a un sistema de bioflóculos autotróficos con poca alimentación artificial.
Un sistema de recirculación bien conducido puede reducir significativamente o eliminar la necesidad de recambios de agua, tornándose en un proceso más amigable ambientalmente y al mismo tiempo ofrecer mayor bioseguridad y bienestar a los animales en cultivo. En sistemas de recirculación bien conducidos se alcanza una estabilización en calidad del agua y las fluctuaciones diarias del pH y de oxígeno disuelto se minimizan, se evita la necesidad de antibióticos porque hay una dominancia de bacterias, algas y zooplancton que tienen efecto sinérgico pre- y probiótico.

El éxito de los sistemas de recirculación más actuales incluyen la disminución del factor de conversión alimenticia, la minimización a prácticamente cero del cambio de agua y la convivencia con las principales enfermedades (perdidas económicas casi nulas). Se cree que una variedad de factores contribuye, como una mejor nutrición del animal, reduciendo el estrés asociado con la fluctuación de la calidad del agua y minimizando las condiciones ambientales favorables a los patógenos. Las nuevas técnicas de recirculación permiten que la acuicultura crezca para un enfoque ecológico, sostenible y bio-seguro.

8. BIBLIOGRAFÍA

● Avnimelech Y, Kochba M. (2009). Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in bio floc tanks, using 15 N tracing. Aquaculture. 2009; 287(1):163–168.

● Avnimelech Y. (2009). Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bioflocs technology ponds. Aquaculture. 2007; 264:140–147.

● Avnimelech Y. (2015). Biofloc Technology – A Practical Guide Book. 3rd ed. The World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, United States. 2015.

● Bregnballe, J. (2015). A guide to recirculation aquaculture, an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. Publication of Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and EUROFISH International Organization. ISBN 978-92-5-108776-3

● Bruckner CG, Bahulikar R, Rahalkar M, Schink B, Kroth PG. (2008). Bacteria associated with benthic diatoms from Lake Constance: phylogeny and influences on diatom growth and secretion of extracellular polymeric substances. Applied and Environmental Microbiology. 2008;74 (24):7740–7749.

● Burford MA, Thompson PJ, McIntosh RP, Bauman RH, Pearson DC. (2003). Nutrient and microbial dynamics in high-intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize. Aquaculture. 2003; 219:393–411.

● Coche, A. G. (1967). Fish culture in rice fields a world-wide synthesis. *Hydrobiologia* 1967, 30, 1–44.

● Dalsgaard, J.; Lund, I.; Thorarinsdottir, R.; Drengstig, A.; Arvonen, K.; Pedersen, P. B. (2013). Farming different species in RAS in Nordic countries: Current status and future perspectives. *Aquac. Eng.* 2013, 53, 2–13

● Delaide, B. (2017). A study on the mineral elements available in aquaponics, their impact on lettuce productivity and the potential improvement of their availability (PhD). Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Bélgica. 100 p.

● Emerenciano, M.G.C; Martínez-Córdova, L.; Martínez-Porchas, M.; Miranda-Baeza, A. (2017). Biofloc Technology (BFT): A Tool for Water Quality Management in Aquaculture, Water Quality, Prof. Hlanganani Tutu (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/66416. Available from: https://www.intechopen.com/books/water-quality/biofloc-technology-bft-a-tool-for-water-quality-management-in-aquaculture

● European Commission. (2015), December 2th. *Circular Economy. Closing the loop. From Waste to Resources.* Retrieved from European Commission: https://ec.europa.eu/commission/publications/waste-resources_en

● Francis, C.; Lieblein, G.; Gliessman, S.; Breland, T. A.; Creamer, N.; Harwood, R.; Salomonsson, L.; Helenius, J.; Rickerl, D.; Salvador, R.; Wiedenhoeft, M.; Simmons, S.; Allen, P.; Altieri, M.; Flora, C.; Poincelot, R. (2003). Agroecology: The Ecology of Food Systems. *J. Sustain. Agric*., 22: 99–118.

● Fukami K, Nishijima T, Ishida Y. (1997). Stimulative and inhibitory effects of bacteria on the growth of microalgae. Hydrobiologia. 1997; 358:185–191.

● Gagnon, V.; Maltais-Landry, G.; Puigagut, J.; Chazarenc, F.; Brisson, J. (2010). Treatment of Hydroponics Wastewater Using Constructed Wetlands in Winter Conditions. *Water, Air, Soil Pollut.* 2010, 212: 483–490.

● Heldbo, J. (2015), July 15th. Short introduction to Denmark and prospects of Danish aquaculture. AquaCircle.

● Huerta, F. D; Jory, D. E. Retrofitting shrimp farms to recirculating systems. *Advocate* (2017), November. https://www.aquaculturealliance.org/advocate/retrofitting-shrimp-farms-recirculating-systems/.

● International Water Association. (2016). *Water Utility Pathways in a Circular Economy.* Retrieved from International Water Association: http://www.iwa-network.org/water- utility-pathways-circular-economy-charting-course-sustainability/

● Lehman, H.; Clark, E. A.; Weise, S. F. (1993). Clarifying the definition ofSustainable agriculture. *J. Agric. Environ. Ethics* 1993, 6: 127–143.

● Love, D. C.; Fry, J. P.; Genello, L.; Hill, E. S.; Frederick, J. A.; Li, X.; Semmens, K. (2014). An international survey of aquaponics practitioners. *PLoS One* 2014, 9: e102662.

● Poleo G, Aranbarrio JV, Mendoza L, Romero O. (2011). Cultivo de cachama blanca en altas densidades y en dos sistemas cerrados. Brazilian Journal of Agricultural Research (PAB). 2011; 46 (4): 429–437.

● Rakocy, J. E. (1989). *Island Perspectives*. pp. 5–10

● Rakocy, J. E. (2012). Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture. In; Wiley-Blackwell, pp. 344–386.

● Rakocy, J. E.; Masser, M. P.; Losordo, T. M. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics- integrating fish and plant culture. *Srac Publ. - South. Reg. Aquac. Cent.*: 1–16.

● Timmons, M.B., J.M. Ebeling, F.W. Wheaton, S. T. Summerfelt, and B.J. Vinci. (2002). Recirculating Aquaculture Systems, 2nd edition. Northeastern Regional Aquaculture Center. Publication No. 01-002. Cayuga Aqua Ventures. Ithaca, NY. 769 pp.

● Turcios, A. E.; Papenbrock, J.(2014). Sustainable treatment of aquaculture effluents-What can we learn from the past for the future? *Sustain.* 6: 836–856.

● Tyson, R. V; Simonne, E. H.; Treadwell, D. D.; White, J. M.; Simonne, A. (2008). Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. *HortScience* 43: 719–724.

● Zimmermann, S. Fitzsimmons, K. (2004). Tilapicultura Intensiva, in Tópicos Especiais em Piscicultura de Água Doce Tropical Intensiva (eds. Cyrino, J.E.P.; Urbinati, E.C.; Fracalossi, D.M.; Castagnolli, N.), Sociedade Brasileira de Aqüicultura e Biologia Aquática. TecArt, São Paulo, Brazil. p. 239-266.

● Zimmermann, S. (2016). Possíveis benefícios do muco de tilápias em sistemas de recirculação de camarões marinhos. Revista da ABCC, Ano XVIII, numero 2, Novembro de 2016, p. 88-91.

● Zimmermann, S. (2017). O desenvolvimento de um sistema aquapônico comercial num sistema integrado de cultivo de tilápias e camarões, com o estudo do equilíbrio de macro e micro-nutrientes. Palestra proferida na XV Feira Nacional do Camarão (FENACAM). Natal, Brasil, 15-18 de Novembro de 2017.

● Zimmermann, S. (2017). O melhoramento genético de tilápias em Sistema de Bioflocos no Brasil. Revista da ABCC, Ano XIX, numero 2, Novembro de 2017, p. 79-81.

CAPÍTULO III
FUNDAMENTOS DE ACUAPONÍA

Hermes Orlando Mojica Benítez
Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca
Oficina de Generación del Conocimiento y la Información -OGCI
E-mail: hermes.mojica@aunap.gov.co

Sistema piloto de acuaponía (Unidad de Acuicultura Sostenible, Universidad Nacional de



Colombia, Bogotá). Foto: Miguel Landines

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tradicional de la acuicultura en aguas continentales o interiores, tradicionalmente se ha desarrollado en grandes extensiones de tierra y con el uso no controlado de agua que retorna al medio natural sin tratamiento, causando impactos negativos en los ecosistemas receptores. Como una alternativa para minimizar estos impactos negativos de la piscicultura, la acuaponía permite cultivar diferentes especies de aguas frías o cálidas en sistemas súper intensivos y en espacios reducidos, aprovechando los efluentes para generar otros productos como los vegetales de hoja,

flor o frutos, minimizar el impacto ambiental y el consumo de agua, convirtiéndola en un sistema de producción sostenible.

Los sistemas acuícolas integrados de producción intensiva como la acuaponía son prometedores para una producción sostenible, dado que requieren menos aporte de nutrientes en relación con la producción que generan, reutilizando dichos nutrientes, disminuyendo las descargas y permitiendo el desarrollo de plantas con peces. En estos sistemas, la producción de peces y plantas debe estar equilibrada con la recuperación de nutrientes, una baja recirculación de agua y la acumulación mínima de estos (Endut *et al*., 2010). Los sistemas intensivos y los integrados necesitan operar a máxima capacidad, por lo cual demandan gran cantidad de insumos y requieren de altas densidades de peces para que la operación técnica y económica sea estable y rentable (Pickens, 2015)

La acuaponía es una es una alternativa tecnológica de cultivo sustentable (García *et al*., 2005; Bernath, 1996) que integra la acuicultura con la hidroponía para obtener organismos acuáticos (en este caso peces) y hortalizas, integrando un solo sistema de producción. Un Sistema de Recirculación en Acuicultura (SRA) con hidroponía, en donde se aprovecha que los peces durante su desarrollo y crecimiento liberan al agua gran cantidad de desechos que aportan la mayoría de los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas y que son liberados y concentrados en el tanque de cultivo de los peces (Somerville *et al*., 2014). A través de procesos físicos, químicos y biológicos, los desechos liberados por los peces son transformados en nitratos y minerales para las plantas y estas a su vez pueden actuar como un biofiltro.

La acuaponía permite producir alimentos para consumo humano y animal, aprovechando los metabolitos derivados de la alimentación de especies y se constituye en una alternativa tecnológica sustentable (Rakocy *et al*., 2006). A los cultivos de peces se les suministran alimentos concentrados en diferentes niveles de proteína, desde 45% en carnívoros como la trucha arcoíris (*Onchorynchus mykiss*), hasta 20% en especies omnívoras de aguas cálidas como la tilapia *Oreochromis* sp. y la cachama blanca *Piaractus brachypomus*. Los residuos generados sólidos y líquidos provenientes de la actividad metabólica (heces, orina, respiración y restos de alimentos), son acumulables en el sistema llegando a deteriorar su calidad en cortos períodos de tiempo por el alto contenido de sólidos suspendidos, nitrógeno amoniacal total (amonio y amoniaco) y fósforo, que en determinados valores son tóxicos para los organismos de cultivo.

El SRA como componente primario de la acuaponía, debe contar con un caudal de agua determinado para mantener el aporte de oxígeno requerido para los procesos biológicos del cultivo de peces y la eliminación de los residuos generados, así como para el tratamiento y conversión a nutrientes requeridos para los vegetales a través de la hidroponía y para ello, el agua de drenaje del cultivo de peces recibe tratamiento a través de sedimentadores y biofiltros. El SRA debe garantizar la estabilidad y

equilibrio de los parámetros fisicoquímicos más importantes que alteran la calidad del agua como el oxígeno, nitrógeno amoniacal total (NAT), dióxido de carbono, sólidos en suspensión, pH y temperatura, etc., durante todo el ciclo de cultivo y en los rangos adecuados para la sobrevivencia y crecimiento de los peces, y el aporte de los nutrientes para los vegetales.

1. HISTORIA DE LA ACUAPONÍA

Escalante (2001) citado por Giro, 2008, remonta la historia de la acuaponía a Jan Van Helmont en 1600, quien creyó haber probado que| las plantas obtenían sus nutrientes del agua, otros autores mencionan que los Aztecas en México hacia el año 1.000 D.C., fueron pioneros de la acuaponía para uso agrícola, cultivando plantas en balsas o islas agrícolas llamadas chinampas que construían sobre la superficie los lagos de poca profundidad con material de dragado (Zugravu *et al.*, 2017). En el sur de China, Indonesia y otros países del lejano oriente, se usaban sistemas de cultivo acuapónicos. El concepto de usar desechos generados por los peces como fertilizante de plantas ha estado presente desde la existencia de las primeras civilizaciones en Suramérica y en Asia, pero la acuaponía como sistema de producción se abre camino con el desarrollo de la hidroponía que desarrolla el Dr. William Gericke en la Universidad de California en 1929 y posteriormente, a finales de los 70's, con las investigaciones del New Alchemy Institute, utilizando métodos de permacultura para acuicultura y la combinación de hidroponía con acuicultura.

A comienzos de los 80's otras instituciones académicas norteamericanas y europeas aportaron al desarrollo de esta tecnología (Love *et al.*, 2014; Somerville *et al.*, 2014) y de esta forma, de una acuaponía básica sin apoyo de tecnología, se avanzó hacia los sistemas modernos de producción basados en recirculación. En los años 80's y 90's se lograron avances importantes en el diseño del sistema, se incluyó la biofiltración y se generó conocimiento científico en las relaciones óptimas entre peces y plantas, permitiendo que aparecieran los sistemas cerrados o de recirculación para facilitar la reutilización del agua y el aprovechamiento de los nutrientes aportados por los desechos de los peces en el crecimiento de las plantas. Esta combinación facilitó desarrollar acuicultura integrada y promocionó los sistemas hidropónicos para la cría de peces y cultivo de hortalizas que hoy se conoce como acuaponía, la cual se comenzó a percibir como una metodología nueva de producción de alimentos. Uno de los líderes de la industria en investigación y desarrollo en acuaponía es James Rakocy, reconocido investigador en acuaponía en la Universidad de las Islas Vírgenes (Estados Unidos de América), quién ha venido perfeccionando un sistema de cultivo acuapónico por más de 25 años, estudiando relaciones y cálculos vitales para maximizar la producción de peces y vegetales en un ecosistema equilibrado. Paralelamente, en Australia, Wilson Lennard ha avanzado en cálculos claves y planes de producción para otros tipos de sistemas acuapónicos; en Canadá, Nick Avidov, demostró que las unidades de acuaponía tenían una producción significativamente superior de tomates y pepinos cuando se alcanzaban algunos niveles óptimos de

nutrientes, mientras que en Bangaldesh, el investigador Mohammad Abdus Salam de la Universidad Agrícola de Bangladesh, promovió la agricultura de subsistencia a escala doméstica con acuaponía.

En la década del 90, se empezaron a obtener datos más concretos y aplicables a producciones comerciales de acuaponía, donde se utilizan lechos con diferentes sustratos, como arena o grava (Rakocy, 1999). Así también, se lograron importantes avances tecnológicos en los SRA que han despertado el interés por la acuaponía en todo el mundo con la perspectiva de incrementar los ingresos, aprovechando productos de desecho generados en la acuicultura (Rakocy, 1999). Esto ha ido convirtiendo a la acuaponía en una alternativa importante para la sostenibilidad de la acuicultura, evitando la generación de vertimientos que causan impactos negativos en las fuentes receptoras y favoreciendo la generación de otros ingresos y que hacen más económica y rentable la producción.

2. AVANCES TECNOLÓGICOS DE LA ACUAPONÍA

Los sistemas de producción hidropónicos y los SRA de manera independiente, han demostrado ser productivos y comercialmente viables; sin embargo, no son lo suficientemente sostenibles, lo que ha hecho que los productores y los consumidores se interesen en la acuaponía como un sistema potencialmente más eficiente (Mullins *et al*., 2015), con alto nivel de bioseguridad y bajo riesgo de contaminación externa. Además, no requiere del uso de productos químicos para el control de plagas ni adición permanente de fertilizantes.

Hoy, la acuaponía comercial no ha tenido el desarrollo esperado y ello ha conducido a que muchos emprendimientos hayan fracasado, tal vez por la baja disponibilidad y accesibilidad a materias primas como concentrados para peces, la oferta de materiales para la infraestructura, costos de producción altos en zonas donde la energía eléctrica es muy costosa e inestable, acceso a un mercado que se ve afectado por la temporalidad en la producción y la inestabilidad en los precios como el de la piscicultura (Somerville *et al*., 2014). Tampoco se cuenta con suficiente personal calificado en esta área del conocimiento y hay pocos expertos en diseño, implementación y evaluación de los riesgos que se combinan en el uso la acuaponía como sistema de producción.

La tecnología en acuaponía se ha venido mejorando y adaptando a distintas condiciones relacionadas con el clima, las especies de cultivo, regulaciones legales, costos de producción, entre otras; sin embargo, sigue siendo un sistema relativamente nuevo de producción con muy pocos expertos y centros de investigación en todo el mundo que certifiquen una amplia experiencia. Actualmente, en muchos países la acuaponía se encuentra en vías de crecimiento y experimentación, debido a las limitaciones en el uso el agua y sus fuertes regulaciones. Los sistemas acuapónicos domésticos de baja escala son muy utilizados en Australia (Diver, 2006) y es común encontrar sistemas configurados para funcionar en espacios reducidos de aproximadamente

dos metros cuadrados, con sistemas domésticos diseñados para utilizar poca mano de obra y de mucho tiempo para su manejo. Los sistemas domésticos se pueden utilizar con fines ornamentales usando un acuario para crear un sistema acuapónico, mediante la adición de un componente hidropónico

Entre los promotores de sistemas de acuaponía que han tenido mejor desarrollo, se destacan “S and S AquaFarm”, quienes cultivan tilapias y diversas hortalizas en sistemas de lechos sólidos (arlita o arcilla expandida), la Universidad de las Islas Vírgenes (UVI), que desarrolla cultivo de tilapias y varias especies de hortalizas en sistemas de balsas flotantes, Murray Hallam que desarrolla el cultivo de perca plateada y Murray Cod, que combina varios tipos de plantas en lechos de grava, junto a cultivos de trucha arcoíris.

3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS E LA ACUAPONÍA

La acuaponía al igual que otros sistemas de producción ofrece grandes ventajas que incluyen la reducción de uso del agua, reutilización prolongada de la misma, disminución de costos de producción por la integración de la producción de organismos acuáticos con la producción de plantas, disminución de los efluentes de producción y recuperación de la calidad del agua.

Las ventajas de los sistemas acuapónicos son:

● Consumo mínimo de agua, permitiendo ahorrar hasta el 90% de su volumen total en el sistema, gracias la recirculación y obligando a reponer solamente las pérdidas por evaporación.

● No requiere de suelo, en un espacio pequeño, se producen verduras y peces con alta calidad e inocuidad y se puede usar tierras no cultivables como desiertos, suelos degradados o islas saladas y arenosas.

● No requiere fertilizantes externos para los vegetales, los productos (peces y vegetales) se producen a partir de una fuente de nitrógeno de alimento de los peces, descartando en buena medida las soluciones hidropónicas nutritivas o los fertilizantes agrícolas.

● Es un sistema de producción de alimentos sostenible e intensivo, con un rendimiento superior al del cultivo hidropónico y al de la agricultura tradicional (una vez se ha estabilizado).

● Permite oportunidades de producción con una amplia variedad de especies de organismos acuáticos de agua dulce como tilapias, trucha, carpa; peces ornamentales; vegetales de hoja, de fruto y algunas plantas ornamentales con flores.

● Ofrece un mayor nivel de bioseguridad y menor riesgo de contaminantes externos, dado que el manejo se realiza generalmente en un invernadero lo cual permite una mayor productividad durante todo el año y minimiza la presencia de plagas y enfermedades.

● No genera vertimientos, los residuos de los peces no se eliminan como en otros sistemas de producción en acuicultura y tampoco son expulsados al medio natural evitando así la eutrofización por el exceso de materia orgánica liberada al medio.

● Los parámetros ambientales y de calidad de agua son más fáciles de monitorear y controlar.

● Permite tener mayores rendimientos y control de la producción, menores pérdidas y poco desperdicio.

● Se reduce la mano de obra, limitándola al trasplante y la cosecha, y puede incluir todos los géneros y edades.

● Otorga la posibilidad de producir cerca de los centros de consumo, facilitando el acceso a los materiales de construcción e insumos y a los mercados. Adicionalmente, facilita la producción familiar y/o comercial de alimentos.

Sin embargo, como cualquier sistema productivo, la acuaponía también tiene desventajas, entre las que se destacan una necesidad de bombeo para la recirculación, aumento de los costos de producción de los peces en comparación con el cultivo tradicional por el consumo de energía eléctrica en el bombeo y la aireación y el hecho de que su factibilidad económica aún no está probada en algunos casos (Lazur y Britt, 1997).

Otras desventajas de un sistema acuapónico son:

● Dependiendo de la escala de producción, se requiere de un SRA, que es una tecnología costosa y compleja en su implementación y manejo.

● Es un sistema de producción más complicado que los cultivos en suelo, debido a que los procesos de piscicultura, biofiltración e hidroponía no se controlan por separado y requieren de un balance de masa correcto para no afectar ninguno de los tres componentes, pues si alguna parte del sistema falla, todo el sistema puede colapsar.

● Requiere un suministro confiable de electricidad las 24 horas del día para circular el agua y proveer aireación, incrementando los gastos operativos.

● Se encuentra limitado a los requerimientos superpuestos de las especies (peces y

plantas), por lo que tiene restricciones geográficas y no se recomienda para lugares en donde los peces y las plantas cultivadas no pueden alcanzar sus óptimos rangos de temperatura.

● Requiere de personal calificado en manejo de peces, bacterias, calidad de agua y producción de plantas.

● Las opciones de manejo son reducidas en comparación con la acuicultura independiente o la hidroponía.

● La administración diaria es obligatoria, los errores o accidentes pueden causar un colapso catastrófico del sistema.

4. ACUAPONÍA (Acuicultura + Hidroponía)

La palabra acuaponía se origina de la asociación de la acuicultura con la hidroponía o cultivo de plantas sin suelo e implica la integración de la producción hidropónica vegetal con la acuicultura en un sistema bio-integrado. Dicho sistema integra la producción hidropónica de plantas ornamentales, culinarias o medicinales, con los sistemas de recirculación de la acuicultura (Chalmers, 2004; Salam *et al*., 2013; Khater *et al*., 2015; Hassan, 2013), en un conjunto de tecnologías agrícolas sostenibles. De esta manera se combinan las características de la piscicultura intensiva en un sistema de recirculación de agua con las de la hidroponía (Jordan *et al*., 2018) en la cual el agua y los nutrientes se reutilizan (Reyes *et al*, 2016). Esto genera un sistema único en el que los peces u otros organismos acuáticos y los vegetales se benefician el uno al otro.

El principio básico de la acuaponía radica en el aprovechamiento de la energía del sistema. Los desechos orgánicos producidos por los organismos acuáticos cultivados son metabolizados por bacterias mediante un proceso de mineralización y nitrificación que los transforma en nutrientes disueltos como nitratos, fosfato y minerales. Eventualmente, estos sirven como fuente de alimento para las plantas y a su vez, estas actúan como filtro de esas sustancias, retirándolas del agua que retornan al cultivo de peces.

El sistema acuapónico ensamblado a través de un SRA debe ser diseñado para el crecimiento de altas densidades de peces en pequeños volúmenes de agua reutilizada muchas veces, después de un tratamiento adecuado para la eliminación de residuos tóxicos, generando subproductos adecuados para el crecimiento de vegetales. Estos sistemas se componen de tanques para el crecimiento de los peces u otros organismos acuáticos, sedimentador o clarificador, mineralizador, dispositivos de filtración (mecánica y/o biológica), desgasificador y camas de crecimiento para plantas. Lo anterior se complementa con un sistema de bombeo de agua de retorno, biofiltros y un sistema de aireación tanto para los peces, como para los vegetales. Estos componentes deben estar acoplados de tal manera que el agua, junto con los

desechos generados por los peces, pase por todos los dispositivos y a la vez que libere los nutrientes, adquiera una calidad adecuada para los peces.

La acuicultura es definida es por la FAO (2003) como el cultivo de organismos acuáticos en áreas continentales o costeras implicando intervenciones en el proceso de crianza para mejorar la producción. Por otro lado, la hidroponía tiene origen en las palabras griegas ***hidro*** que significa agua y ***ponos*** que significa trabajo, o sea *trabajo en agua*. La FAO define a la hidroponía como una técnica de producción agrícola en la que se cultiva sin suelo, en sustrato inerte incorporando los nutrientes requeridos por las plantas para su desarrollo y producción son en el riego.

En cualquier emprendimiento de acuicultura, los peces u organismos acuáticos, se ven afectados por una serie de variables físicas, químicas y biológicas. De su adecuado control y manejo, depende el éxito de la producción (Figura 1)

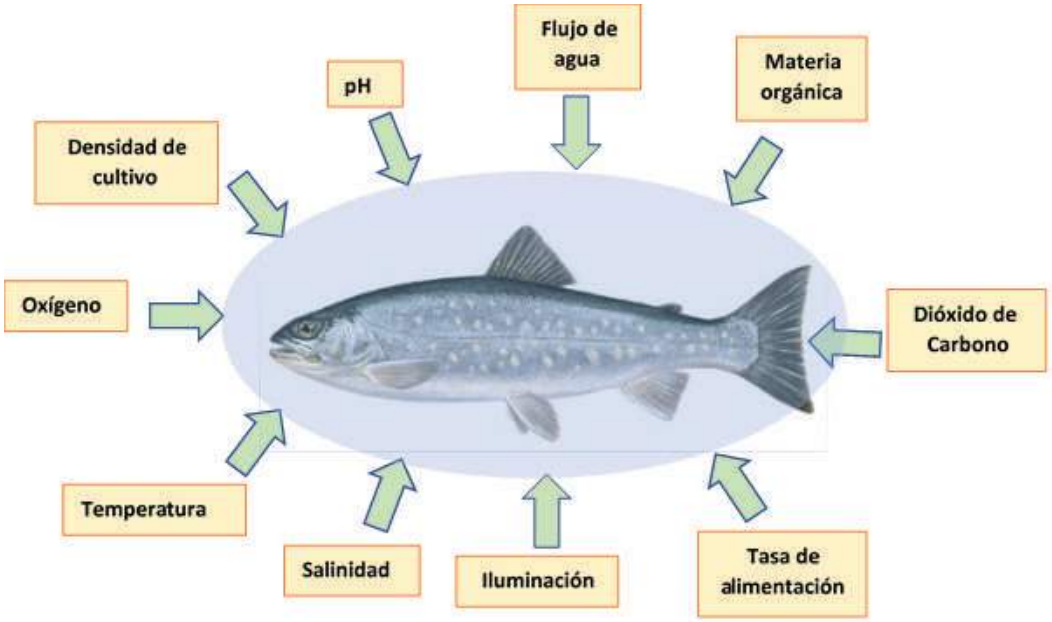


Figura 1. Parámetros que afectan el crecimiento y el bienestar de los peces (Modificado de Bregnballe, 2015)

En hidroponía se requiere de la aplicación de fertilizantes minerales para suministrar a las plantas los nutrientes necesarios. Sin embargo, en los sistemas de acuaponía se aprovecha el agua disponible del efluente de los peces rica en nutrientes para el crecimiento de ellas (Goddek *et al*, 2015). Este sistema de cultivo parte de la condición previa de que sus raíces mantengan contacto permanente con los nutrientes.

De acuerdo con las recomendaciones de Somerville *et al.* (2014) en el manual de acuaponía de pequeña escala de FAO, los sistemas de acuaponía deben seguir las siguientes siete reglas:

1. Procurar el uso de tanques circulares de geomembrana o fibra de vidrio inertes, con fondos planos o cónicos que son duraderos y fáciles de limpiar.

2. Utilizar bombas de agua y de aire con capacidad suficiente para garantizar aireación y circulación adecuadas, es decir buen movimiento y altas concentraciones de oxígeno disuelto en el agua que mantengan sanos a los peces, bacterias y plantas. La energía eléctrica es una variable importante en los costos de producción, por lo que se recomienda una adecuada selección de las bombas y considerar el uso de fuentes de energía alternativas como la energía fotovoltaica siempre que sea posible.

3. Monitorear los parámetros de agua permanentemente haciendo uso de los mejores equipos disponibles. Principalmente, se debe procurar mantener niveles de oxígeno disuelto que sean superiores a 5 mg/L, niveles de pH entre 6 y 7, temperaturas (dependiendo de la especie de pez) entre 18 y 30 °C y niveles de nitrógeno total y alcalinidad del agua dentro de los niveles óptimos contemplados en la literatura

4. La densidad de cultivo en los estaques de cultivo dependerá del tipo de proyecto a realizar, sin exceder de 20 kg/m^3 cuando se está iniciando y manteniendo un área de crecimiento para las plantas no tan extensa. Densidades altas producen más alimentos en el mismo espacio, pero su gestión es más compleja.

5. Dado que los peces deben ser alimentados todos los días y en diferentes horarios se pueden generar residuos de alimento que no se consumen. Estos deben ser retirados del estanque 30 minutos después de la alimentación pues se pueden descomponer dentro del sistema, consumir el oxígeno disuelto, causar enfermedades o generar subproductos tóxicos. Es importante el ajuste de la ración diaria de alimento a suministrar y evitar la sobrealimentación.

6. Se deben alternar vegetales con períodos cortos de crecimiento como los de hoja, con plantas de períodos más largos como los tomates, los pepinos, los pimentones o las berenjenas. También es recomendable hacer una replantación continua de hortalizas de hoja tierna como lechugas entre plantas de fruto que son de mayor tamaño, lo cual proporciona sombra natural. En sistemas más industriales generalmente se manejan los vegetales en monocultivo.

7. El escalonamiento de la producción, tanto de plantas como de peces, puede favorecer cosechas continuas de todos los productos (peces y hortalizas) y el mantenimiento del sistema en equilibrio constante entre peces y plantas. Se debe asegurar el suministro confiable y constante de plantas y peces para el manejo den los lotes.

5. COMPONENTES DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO

Los Sistemas de Recirculación en Acuicultura (SRA) deben cumplir con cinco operaciones unitarias básicas para llevar a cabo el reciclado y reacondicionamiento del agua; sin embargo, en acuaponía se deben adicionar los dispositivos de mineralización y el sistema hidropónico así:

- Circulación
- Remoción de sólidos
- Biofiltración (Nitrificación)
- Desgasificación
- Aireación/oxigenación

5.1. Recirculación

El SRA, por ser un sistema cerrado, está conectado por el agua que recircula desde el tanque de peces, pasando por el circuito de filtración y desgasificación, para retornar nuevamente a los tanques de cultivo de peces. Esa operación requiere de bombas para impulsar el agua en el circuito de recirculación y de sopladores de aire que mantengan los niveles de oxígeno en los niveles adecuados para los peces y el biofiltro (Malone, 2013).

La aireación y el bombeo generan los más altos costos por consumo de energía eléctrica, por lo cual el diseño del sistema debe contemplar bombas de baja cabeza de agua y alto caudal. Las tasas de flujo utilizadas en recirculación que varían con la tasa de alimento diario suministrado deben ser de bajo consumo de energía al igual que los aireadores, y garantizando el cumplimiento de los requerimientos del SRA.

5.2. Remoción de sólidos:

La principal fuente de desechos en un SRA son los alimentos no consumidos, las excretas de los peces y organismos como bacterias, hongos y algas que se desarrollan en el sistema; esta materia orgánica se acumula, disminuyendo los niveles de oxígeno disuelto por efecto de la descomposición, produciendo dióxido de carbono y amoniaco y puede llegar a formar depósitos como lodo en el fondo de los tanques de cultivo, ocasionando descomposición anaeróbica y produciendo metano y sulfuro de hidrógeno de alta toxicidad para los peces (Masser *et al*., 1992; Rakocy y Losordo, 2006).

Los sólidos se descomponen rápidamente en partículas finas como fragmentables (> 100 µm), sólidos suspendidos totales (1 a 100 µm), coloides (0,1 a 1 µm) o sólidos disueltos, además de una gran fracción de materia orgánica conocida como sólidos suspendidos volátiles (Malone, 2013). Esto sólidos deben eliminarse del sistema de recirculación lo más rápido posible, por lo que el diseño de un SRA debe tener en cuenta los requisitos de caudal requerido en los tanques de cultivo en relación con los dispositivos de tratamiento de agua para evitar la acumulación de sólidos y mantener el oxígeno disuelto en concentración óptima (Losordo y Hobbs, 2000).

Los sólidos particulados se retiran usando clarificadores y/o filtros mecánicos, los sólidos disueltos con filtros biológicos y los gases como el CO_2 mediante aireadores o percoladores, y se complementa con equipos de producción de oxígeno para aumentar las concentraciones de oxígeno por encima de la saturación (Tucker *et al*., 2008).

Entre los dispositivos de filtración mecánica más comunes para la eliminación de sólidos en acuicultura, están los tanques de sedimentación (que se basan en la separación por gravedad), los separadores de turbulencia o hidrociclones (que realizan una separación más rápida de las partículas y se basan la sedimentación centrífuga), los filtros de micro pantallas (que se basan en la retención de partículas por tamizado); y los filtros de lecho granulares porosos (que retienen los sólidos durante en el paso de agua a través del medio en el que se depositan, filtran los sólidos (Mirzoya *et al*., 2010).

La remoción de sólidos en suspensión constituye una parte fundamental del SRA y la acuaponía, pues se debe evitar que los sólidos en suspensión alcancen las raíces de las plantas y por taponamiento, impidan la absorción de nutrientes. Dependiendo del componente hidropónico utilizado, la retención de sólidos puede llevarse a cabo mediante un filtro mecánico y los sólidos sedimentables se pueden retirar a través de un sedimentador o clarificador y con el uso de filtros mecánicos eliminar sólidos suspendidos.

5.3. Biofiltración

La biofiltración se basa en un proceso químico llamado nitrificación mediante el cual las bacterias convierten el amoniaco en nitrito y luego en nitrato. Generalmente ocurre sobre las superficies de contacto del agua con medios sólidos de grandes áreas de superficie con muy buena aireación, donde se fijan las bacterias nitrificantes (Mullins *et al*., 2015). En este proceso los microorganismos en un sustrato dado, degradan biológicamente los efluentes. En la acuicultura, el nitrógeno amoniacal es el componente principal de los efluentes, se genera como resultado de la ingestión de alimento por los peces, los cuales excretan varios productos nitrogenados residuales en la orina y las heces y también por difusión e intercambio iónico a través de las branquias en la respiración.

Si no son removidos o tratados, los residuos pueden llegar a causar problemas de toxicidad por aumento en los niveles de amoniaco no ionizado y potenciado cuando hay elevación del pH. También se pueden generar problemas por aumento en niveles de nitritos, que se dan cuando el pH disminuye en los SRA y, por aumento en niveles de nitratos, que también pueden ser tóxicos. Para el proceso de la remoción del nitrógeno amoniacal, es importante contar con un filtro biológico que es una estructura de poco volumen, pero con una gran superficie de contacto en donde se alojan las bacterias necesarias para la degradación de desechos metabólicos a través de un proceso de nitrificación por sucesiva oxidación del amoniaco a nitrito en primera instancia y posteriormente, a nitrato útil para el crecimiento de vegetales.

En acuaponía, la fuente de nutrientes son los desechos metabólicos generados por los peces al alimentarse, solamente un 35 a 40% del alimento consumido es asimilado y transformado en carne, mientras que el resto (60-65%), se excreta hacia la columna de agua (Jchapell *et al*., 2008) y a través del biofiltro colonizado por bacterias nitrosomonas, se incorpora al proceso de nitrificación. Mediante este, se transforma el nitrógeno amoniacal total (NAT) como desecho metabólico en nitrito (NO_2^-), menos tóxico para los peces, y con la presencia de otras bacterias del género *Nitrobacter*, el nitrito es oxidado a nitrato (NO_3^-), compuesto asimilable por las plantas. La cantidad de NAT generada diariamente en los tanques de peces del sistema de acuaponía, está directamente relacionada con la cantidad de alimento que se les suministre, y el biofiltro debe tener la capacidad adecuada para degradar esa cantidad de desechos metabólicos durante el tiempo de retención que da la recirculación, y por consiguiente el número de plantas que se pueden sembrar y sostener en el sistema acuapónico, estará supeditado a la cantidad de nitrato que se produce.

Un biofiltro de cama fluidiza está conformado por un lecho fluido de arena suspendida y movida por una corriente de agua que desfila de manera ascendente. Estas tienen una gran área de superficie para el desarrollo de la biopelícula y cada partícula de arena que se suspende en la columna de agua frota suavemente los granos de arena adyacentes y abrasando los posibles excesos de biopelícula. Los reactores de lecho móvil (MBR) usan trozos de plástico (de 1/4 a 1/2 pulgada o de 6 a 13 mm), que proporcionan superficies protegidas para películas fijas y son colocados tanques con suministro constante de aireación. Son de diseño robusto y fáciles de operar, pero requieren de suficiente inyectado en la cama para mantener el lecho en movimiento, lo que ayuda a proporcionar de aireación y desgasificación al SRA.

5.4. Desgasificación

La desgasificación es un proceso similar a la aireación, pero se utiliza para eliminar el CO_2 y otros gases del SRA y aunque el CO_2 es un gas altamente soluble, contrario a lo que ocurre con el oxígeno, en un SRA se debe tener presente que la respiración tanto de los peces como de las bacterias del sistema, producen grandes cantidades de este, con consecuencias graves si el SRA está mal diseñado y no tiene un balance de masas adecuado. La desgasificación se debe realizar previo al retorno del agua a los tanques de peces, y generalmente se realiza mediante aireación del agua eliminando la acumulación de dióxido de carbono y nitrógeno para evitar los efectos perjudiciales en el bienestar y crecimiento de los peces (Bregnballe, 2015).

Hasta hace pocos años, los sistemas acuapónicos se manejaban con bajas densidades de cultivo y se basaban en la aireación como el medio principal de suministro de oxígeno (Timmons *et al*., 2002); sin embargo, con la intensificación de los cultivos la cantidad de CO_2 que se produce es alta y es necesario removerlo a través de turbulencia producida por inyección de grandes cantidades de aire o mediante el uso de filtros percoladores fáciles de construir y operar o de columnas desgasificadoras con aire en contracorriente a través de placas difusoras, contactores de burbuja de

flujo descendente o torres de atomización entre otros .

6. MODELOS DE PRODUCCIÓN EN ACUAPONÍA

6.1. Sistema de Recirculación en Acuicultura (SRA)

Reducir al máximo la descarga de nutrientes al medio ambiente es una exigencia, tanto desde el punto de vista de los costos de una empresa, como del mejor manejo medio ambiental. Cuando se pretende intensificar la producción piscícola, se presenta escasez de agua o su calidad es variable, la temperatura no es óptima, se quiere minimizar el riesgo sanitario, controlar la producción, disminuir y controlar las emisiones e impactos al medio natural y ahorrar energía, los sistemas de recirculación en acuicultura (SRA), son una alternativa de producción muy viable.

Bregnballe (2015), define la recirculación de la acuicultura como una tecnología para cultivar peces u otros organismos acuáticos reutilizando el agua en la producción mediante el uso de filtros mecánicos y biológicos que garanticen la recuperación de la calidad de agua en un sistema cerrado, donde la reposición de agua es mínima o inexistente. Cada SRA debe incluir los dispositivos necesarios para contener los peces en cultivo, eliminar los desechos sólidos mediante filtros mecánicos, eliminar los residuos nitrogenados disueltos usando filtros biológicos, mantener el recambio de agua por recirculación, asegurar una temperatura estable y airear el agua si es necesario.

En un SRA el agua circula a través de un sistema cerrado con un pequeño recambio que generalmente no supera el 10% del volumen total que debe ser reemplazado diariamente. En el SRA se mantienen los parámetros de calidad de agua como temperatura, oxígeno disuelto, pH, alcalinidad, salinidad, sólidos totales, productos nitrogenados (amoniaco, amonio, nitrito y nitrato) y dióxido de carbono entre otros, monitoreados y controlados periódicamente y en niveles óptimos para el crecimiento de los organismos acuáticos cultivados en altas densidades.

Para el éxito en la implementación de las tecnologías para acuicultura basadas en recirculación, se deben tener en cuenta aspectos claves como la sedimentación o clarificación, la biofiltración y la desgasificación en una circulación de agua cerrada con una adecuada aireación (Malone, 2013). Los sólidos deben eliminarse del sistema de recirculación a través de un proceso de clarificación. Los compuestos orgánicos disueltos y el amoniaco se eliminan mediante un proceso de biofiltración. El sistema debe proporcionar la circulación entre el tanque y los componentes del biofiltro, y finalmente los gases disueltos (oxígeno y dióxido de carbono) deben volver a equilibrarse mediante procesos de aireación y desgasificación.
La adición del componente hidropónico a un SRA, permite filtrar y eliminar la materia orgánica o desechos generados del cultivo, de tal manera que esta se mantiene limpia para los peces; sin embargo, un sistema de acuaponía comercial debe depurar el efluente a través de un biofiltro antes de llegar a las plantas, utilizando bacterias

que metabolizan los desechos de los peces, generando principalmente nitratos que las plantas asimilan junto con otros minerales para su crecimiento, terminando de purificarla antes retornarla al cultivo de peces.

6.2. Unidades de Cultivo

La unidad de cultivo es un componente importante en SRA dado que es el entorno de crecimiento de los peces y su diseño debe incluir la función de autolimpieza, concentrando los desechos hacia los puntos de drenaje. Los tanques circulares deben ser fáciles de manejar, proporcionar una calidad de agua relativamente uniforme y generar los patrones de flujo de agua uniformes que se requieren para concentrar y eliminar los sólidos. Existen muchas formas de tanques, rectangulares, cuadrados, circulares y ovalados, estos últimos con drenaje central que hace más fácil su limpieza en la recirculación, comparados con los rectangulares y cuadrados (Lee *et al*., 2013).

La elección del tamaño de las unidades de cultivo (tanques) depende de la densidad final propuesta, que es el soporte principal de la estabilidad del sistema, pues con ella se controla la tasa de alimentación y de esta dependen todos los diseños del SRA (Malone, 2013). Por ello, la tasa de alimentación que se determine, afectará el consumo de oxígeno, la producción de residuos y el caudal de recambio de agua (Timmons *et al.*, 2002).

6.3. Sistemas de Producción hidropónica en Acuaponía

Diferentes técnicas para la fijación de las plantas se usan en acuaponía, pero las más utilizadas son: a) técnica de la película nutritiva o Nutrient Film Technique (NFT), b) camas de medios con sustrato o lecho inorgánico (Grow Bed), y c) raíz flotante (Raft System) o balsas flotantes, también conocido como cultivo en aguas profundas o Deep Water Culture (DWC) (Rakocy *et al*., 2006; Danaher, 2013; Engle, 2015; Goddek *et al*., 2015; Pickens *et al*., 2016; Johnson, 2016). Estos sistemas y sus variantes se pueden implementar en el interior de edificios, en invernaderos, o al aire libre, sin protección o parcialmente cubiertos con malla polisombra, techo de polietileno o de plástico.

6.3.1. Sistema de Solución Nutritiva Recirculante (NFT)

Es una técnica hidropónica que consiste en una pequeña lámina de agua que corre sobre un canal o un tubo, esta lámina contiene todos los nutrientes disueltos necesarios para el crecimiento vegetal y circula sobre las raíces desnudas de las plantas. Fue desarrollado en la década de los 60 por el Dr. Allan Cooper, en Inglaterra y desde esa época, este sistema se ha utilizado principalmente a la producción de hortalizas de hoja (lechuga, acelga, espinaca, etc.) a mediana y gran escala con alta calidad de producción en invernaderos (Figura 2).

Goddek *et al*. (2015), mencionan para el NFT algunas ventajas como el flujo de agua constante que solo requiere de un tanque sumidero pequeño, es de fácil limpieza y

mantenimiento, requiere solamente un volumen de agua bajo y la infraestructura es ligera y adaptable a cualquier sistema agrícola, y como desventajas, encuentran que es un sistema muy costoso por los materiales que se requieren, es inestable por la poca agua que maneja, requiere obligatoriamente de un biofiltro separado y presenta bajos rendimientos en vegetales de hoja como la lechuga.



Figura 2. Cultivo de lechuga en sistema NFT. (Acuapónicos La Mariana, Tenjo-Cundinamarca). Foto: Miguel Landines

Los canales utilizados en hidroponía en NFT son de plástico y tienen un ancho que varía entre tres y seis pulgadas en tubos de PVC (Pickens *et al*., 2016) o canaletas de 10 a 15 cm de ancho y 5 a 6 cm de profundidad, en las que se cortan los agujeros separado de 20 o 30 cm y se instalan con una pendiente del 1%. La longitud de los tubos es generalmente de 6 m y las canaletas no miden más de 20 a 30 m de largo para evitar el agotamiento excesivo de oxígeno, a menos que se suministre aireación donde se colocan las plantas. Las plántulas se siembran generalmente en pequeñas macetas de malla de plástico llena de algún material inerte, dejando la parte superior de las raíces en el aire mientras la parte inferior sumergida en el agua bien aireada.

6.3.2. Sistema de raíz flotante o cama profunda

El sistema de raíz flotante (Figura 3), también llamado de cama profunda o sistema de balsa flotante, consiste en contenedores generalmente rectangulares de hasta de 40 cm de altura, elaborados en diferentes materiales como fibra de vidrio, plástico negro de invernadero, geotextiles o cualquier revestimiento no tóxico de baja densidad como el polietileno (LDPE). En estos se coloca una balsa flotante de poliestireno con orificios para sostener a las plantas por medio esponjas o vasos plásticos ranurados (Rakocy *et al*., 2006; Danaher, 2013; Pickens *et al*., 2016). El contenedor mantiene circulando una columna de agua de aproximadamente 30 cm de altura que transporta

los nutrientes y las raíces de las plantas están en contacto con la solución nutritiva y aireación permanente que suministra oxígeno para maximizar la absorción de nutrientes y evitar la asfixia radicular.

El sistema de raíz flotante tiene varias ventajas incluyendo el hecho de que requiere menos infraestructura, el flujo de agua permanente y las raíces se desarrollan en un ambiente natural, y el tanque sumidero requerido es más pequeño que en los otros sistemas (Goddek *et al*, 2015; Johnson, 2016); sin embargo, las raíces están permanentemente expuestas a organismos dañinos comunes en los sistemas de acuicultura (Rakocy *et al*., 2006), se requiere de un biofiltro separado, su infraestructura para la hidroponía es pesada y se necesita de un volumen grande de agua con suficiente aireación para las raíces (Goddek *et al*, 2015; Johnson, 2016).

Las balsas se pueden adquirir en el mercado de acuerdo con la planta a cultivar, a un costo que puede ser inferior al 50% en comparación con un sistema NFT y de durabilidad mucho mayor. Lo más práctico es hacer los agujeros del mismo tamaño (5 - 7 cm) sobre el panel de poliestireno (Mullins *et al*., 2015), el espacio entre los orificios depende de la planta a cultivar, pero se recomienda construirlos con una separación entre 13 cm y 20 cm. Las balsas son ampliamente utilizadas en acuaponía a mediana y larga escala para la producción de hortalizas de hoja y hierbas culinarias y aromáticas, con la ventaja de que las hojas protegen el agua de la luz solar directa y mantienen la temperatura más estable, lo cual favorece principalmente los cultivos en zonas tropicales (Rakocy *et al*., 2006).



Figura 3. Cultivo en balsa o cama flotante. (Unidad de Acuicultura Sostenible, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá). Foto: Miguel Landines

6.3.3. Sistema de camas de medios (sustrato sólido)

El lecho de cultivo está basado en un canal lleno de algún tipo de sustrato inerte como escoria de carbón, arcilla expandida, perlita, piedra pómez, grava, etc., que actúa como medio de soporte para las plantas y de sustrato microbiano para bacterias nitrificantes favoreciendo la biofiltración. El agua se suministra con un determinado patrón de flujo que puede ser temporizado para asegurar una nutrición y aireación secuencial a los vegetales (Goddek *et al*., 2015; Diver, 2006).

En sistemas sencillos de acuaponía, las camas de medios favorecen la nitrificación, debido a que el medio sirve como sustrato para la fijación de bacterias nitrificantes, ayuda en la retención de sólidos y sirve de mineralizador por la gran variedad de microflora que coloniza. Esto favorece la recuperación de la calidad el agua que se recircula a los tanques de peces (Tomalá *et al*., 2014).

Sustratos orgánicos como paja, corteza, algas, aserrín y turba, minerales como arena, grava, perlita, vermiculita, bolas de cerámica, cenizas rojas/negras y lana de roca y sintéticas como bolas de arcilla expandida, poliestireno o poliuretano), mantienen las raíces de las plantas bien aireadas promoviendo una rápida absorción de nutrientes y favorece la nitrificación. Por ello, son usados en acuaponía de baja escala, actuando además como biofiltro y eliminador de sólidos, retención de humedad y parte de la solución nutritiva.

Las camas de medios son adecuadas para cultivo de plantas de fruto que requieren buen sostén por su peso (pepino, tomate, pimentón, etc.) o para especies rastreras o con tubérculos como los zapallos, melones, cebollas, remolachas, zanahorias, etc., soportan bien las raíces evitando que las plantas se caigan y evitan la deficiencia de nutrientes. El espesor para soportar plantas de fruto debe tener 30 cm, mientras que para verduras pequeñas de hoja verde entre 15 y 20 cm de profundidad es suficiente (Somerville *et al*, 2014) (Figura 4).



Figura 4. Cultivo de tomate en lecho sólido. (Acuapónicos La Mariana, Tenjo-Cundinamarca). Foto: Miguel Landines

7. BALANCE DE MASAS DEL SRA

Parte del éxito de un SRA se soporta en el dimensionamiento correcto de cada uno de los dispositivos del sistema. Un equipo sobredimensionado puede resultar muy costoso, pero si por el contrario el diseño no es adecuado, el sistema no podrá mantener las condiciones óptimas para la producción de los peces y es por ello por lo que el primer paso en el diseño de un SRA es la determinación de la máxima capacidad de carga y con ella la tasa máxima de alimentación (Parker *et al*., 2012). Con esos parámetros de cultivo obtenidos, se recomienda calcular el caudal mínimo requerido para que cada variable (oxígeno disuelto, productos nitrogenados, CO_2, etc.) dependiente del alimento desperdiciado y los subproductos del metabolismo, sea mantenido dentro de rangos seguros. La recirculación de agua es el mecanismo de transporte de oxígeno en niveles óptimos a los tanques de cultivo de peces y para el retiro de los desechos que producen los peces dentro del tanque, en esta ruta, el balance de masas en el SRA debe garantizar que el suministro de alimento a peces y los diferentes parámetros de calidad del agua estén bien balanceados. Para ello se debe calcular la tasa de flujo o caudal de recambio requerido, de manera que se mantengan los parámetros de calidad de agua en las concentraciones máximas tolerables o por debajo de ellas, acorde con el diseño del sistema.

El balance de masas en un SRA identifica la cantidad de una sustancia que entra y sale del proceso, identificando la concentración de cada uno de los parámetros del sistema de cultivo. Las cantidades de cada compuesto, se pueden calcular como la diferencia entre las entradas y salidas de cada sustancia controlada y su acumulación o depleción dentro del sistema se tienen en cuenta dentro del cálculo en el balance de masas. Cada uno de los parámetros (oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, Amonio, CO_2, sólidos, etc.) tienen rangos críticos para la sobrevivencia y estabilidad del cultivo, es importante y recomendable calcularlos de manera individual y determinar los rangos para asegurar que en la operatividad del sistema, cada parámetro se debe mantener por debajo de su valor tolerable dentro del sistema en operación con el flujo máximo (Timmons *et al*., 2002), lo cual permite que el mantenimiento de un parámetro cualquiera a determinado flujo, pueda mantener la concentración de otro dentro de los niveles mínimos, y es por ello que el balance de masa permite balancear el transporte de ingresos de un determinado parámetro en el tanque de cultivo y el transporte de salida.

Timmons *et al*. (2002; 2013), proponen la siguiente ecuación, donde "**X**" se refiere a cualquier parámetro a evaluar (oxígeno, amoniaco, sólidos suspendidos, dióxido de carbono, etc.), asumiendo que el estanque esta homogeneizado y en condición estable.

Transporte de ingreso de "X" + Producción de "X" = Transporte de salida "X"

$$\mathbf{Q_1 C_2 + Q_0 C_0 + P = Q_0 C_1 + C_1 Q_1} \quad (1)$$

Donde:

Q_0 = Flujo que pasa a través del tanque de cultivo (m^3/día)
Q_1 = Flujo que es recirculado diariamente (m^3/día)
C_0 = Concentración de ingreso de un parámetro **X** al tanque (mg/L)
C_1 = Concentración de un parámetro **X** en el tanque de cultivo (mg/L)
C_2 = Concentración salida de un parámetro **X** (mg/L)
P = tasa de producción de un parámetro **X** en el tanque de cultivo (kg/día)
El cálculo pretende balancear el transporte de ingreso de un parámetro en particular dentro del estanque de cultivo y el transporte de salida, permitiendo determinar el nivel mínimo disponible para el crecimiento de los peces y se mide como volumen por tiempo o masa por tiempo (kg/s, galones por minuto GPM, litros/minuto (lpm), etc.).

Cuando todo el volumen de agua del sistema se recircula, es decir que no hay descarga, el caudal de ingreso Q_0 es igual a caudal de salida Q_1 y por ello es muy importante determinar la concentración de cada variable de la calidad de agua que sale del sistema de tratamiento (biofiltro, desgasificador de CO_2 sedimentador, etc.) para poder determinar el flujo de masa entrante de cada variable. (Timmons *et al*, 2002). La ecuación quedará así:

$$\mathbf{Q_1 C_2 + P = + Q_1 C_1} \qquad \textbf{(}2\text{)}$$
$$\mathbf{Q\ (C2 - C1) = -P}$$

En el caso del balance de masa de oxígeno disuelto, se debe tener claro que este parámetro, está influenciado por la altitud (msnm) y la temperatura del agua. Para determinar la concentración en el agua, es necesario conocer los valores medios de estas dos variables, así:

$$C_{\text{saturación}} = \frac{132}{(T^\circ\,^\circ F)^{0,625}} X \frac{760}{760 + \frac{\text{Altitud (ft)}}{32,8}}$$

El balance de masas se calcula principalmente sobre oxígeno disuelto, amonio - nitrógeno, dióxido de carbono y los sólidos suspendidos totales (SST), que son los cuatro parámetros más importantes que se deben controlar en el manejo de un SRA, de tal manera que aseguren la sobrevivencia y crecimiento de los peces. Los cuatro parámetros deben estar bien balanceados y para ello se calcula la tasa de flujo requerida, mediante la ecuación del balance de masas (2), que asegure mantener los parámetros por debajo de los valores máximos y el sistema se opere a la tasa de flujo más alta calculada para los cuatro y controlar el parámetro de calidad de agua más restrictivo del sistema, permitiendo que los demás parámetros estén por debajo de los niveles tolerables con este flujo seleccionado.

Balance de masa para oxígeno

La producción de oxígeno (-P) en el sistema, corresponde a la sumatoria del consumo de oxígeno por los peces y las bacterias y es equivalente a 0,5 kg de oxígeno medido como producción negativa, bajo las siguientes consideraciones:

- Los peces consumen 0,25 kg de O_2 por cada kg de alimento suministrado
- Las bacterias heterotróficas consumen 0,12 kg O_2 por kg de alimento
- Las bacterias nitrificantes consumen 0,13 kg O_2 por kg de alimento

$$P_{O2} = \frac{\text{0,25 kg O2 consumidos por peces}}{\text{kg alimento}} + \frac{\text{0,12 kg O}_2\text{ consumidos por bacterias heterotrofas}}{\text{kg alimento}} + \frac{\text{0,13 kg O2 consumidos por bacterias nitrificantes}}{\text{kg alimento}}$$

El balance de masa para oxígeno de acuerdo con la ecuación (2)

$$Q_1 C_2 + P = + Q_1 C_1$$
$$Q (C_2 - C_1) = -P$$
$$Q (C_1 - C_2) = P$$

Dónde: $C_2 = C_1 + TE (C_{saturación} - C_1)$
C_1 = Concentración de ingreso
C_2 = Concentración de salida
TE = Eficiencia del tratamiento
C_{sat} = Concentración de saturación
-P= Producción (consumo de O_2)

Un cálculo más preciso de la concentración de saturación del oxígeno y que es adaptable a otros gases como nitrógeno y dióxido de carbono, se expresa en la ecuación (4)

$$C_{saturación}\, O_2 = 1000K\beta X ((P_{PB} - P_{VA})/760) \quad (4)$$

Donde:
K= Relación entre el peso molecular y el volumen (mg/ml) = 1,4293
β = Coeficiente de bunsen para un gas "*i*"; L7L-atm
X = Fracción molar del gas, adimensional = 0,20946
P_{PB} = Presión barométrica, mm Hg
P_{VA} = Presión de vapor de agua en mm Hg

El cálculo de la Presión Barométrica (**P_{PB}**) a la altura determinada para el proyecto.

$$P_{PB} = 10^a$$
$$a = 2{,}8808 \frac{h}{19748}$$

h = altitud

*Calculo de la Presión de Vapor de Agua ($\mathbf{P_{VA)}}$, teniendo en cuenta que para temperatura en °C,

Ao = 4, 7603 y T es la temperatura °C

$$P_{VA} = A_o e^{0,0645T}$$

$$P_{VA} = 4,7603\ e^{(0,0645*28)}$$

PVA = 28,97 mm Hg

*Cálculo del Coeficiente de Bunsen (β) para el oxígeno, donde K_1, A_1, A_2 y A_3 son constantes de solubilidad de gas y para oxígeno son iguales a **1,42903**; **-58,3877**; **85,7070** y **23,8439** respectivamente y T es la temperatura en °K (°C **+** 273,15) (Timmons *et al.*, 2013).

$$\beta = K_o\ (22.263)$$

$$K_o = exp[A_1 + A_2\,(100/T) + A_3\,ln(T/100)]$$

La concentración de saturación de oxígeno calculada para el sistema es la siguiente:

$$\mathbf{C_{saturación}\ O_2 = 1000K\beta X\ ((P_{PB} - P_{VA})/760)}$$

Con la información obtenida de las anteriores ecuaciones se calcula la concentración de salida:

$$\mathbf{C_2 = C_1 + TE\ (C_{sat} - C_1)}$$

C_1 = C_2 = Concentración salida cuando toda el agua es recirculada

El caudal de recirculación requerido para cubrir las necesidades de oxígeno del sistema, teniendo en cuenta que el caudal de entrada es igual al caudal de salida dado recirculación del 100%, es:

$$\mathbf{Q_1\ C_2 + P = + Q_1\ C_1\ (2)}$$

$$\mathbf{Q\ (C2 - C1) = -P}$$

Balance de masa para Nitrógeno Amoniacal Total (NAT)

La producción de NAT en un cultivo de peces, está relacionada con el suministro de alimento diario y se expresa así:

$$\mathbf{P_{NAT} = F\ x\ PC\ x\ 0,092}$$

Dónde: F = kg de alimento suministrado; PC = % de proteína cruda y 0,092 es una constante basada en aproximaciones que equivale a:

0,092 = **0,16** (16% de nitrógeno en la proteína) x **0,80** (80% del nitrógeno es asimilado x **0,80** (80% del nitrógeno asimilado es excretado) x **0,90** (90 % del nitrógeno es excretado como NAT y 10% como urea).

La concentración de salida $\mathbf{C_2}$ del NAT se determina como:

$$\mathbf{C_2 = C_1 + TE\ (C_{mejor} - C_1)}$$

El caudal de recirculación requerido para mantener el NAT del sistema en condiciones seguras de acuerdo con la ecuación (2) es:

Q (C1-C2) = P

Balance de masa para SST

La producción de sólidos suspendidos totales (SST) en el sistema propuesto se determina por la cantidad de alimento suministrado a los peces, teniendo en cuenta que por cada kg de alimento se generan 250 g de sólidos, y se calcula bajo la siguiente ecuación:

$\mathbf{P_{SST}}$ **= 0,25 kg** x **1 kg** de alimento suministrado con base en materia seca

La concentración de salida $\mathbf{C_2}$ de los SST

$$\mathbf{C_2 = C_1 + TE\ (C_{mejor} - C_1)}$$

El caudal de recirculación requerido para mantener el NAT del sistema en condiciones seguras de acuerdo con la ecuación (2) es:

Q (C1-C2) = P

Balance de masa para Dióxido de Carbono CO_2

La tasa de producción de CO_2 se relaciona con el consumo de oxígeno, siendo 1,375 la fracción de los pesos moleculares de los dos gases (44/32), donde 1 mol de Carbono (44 g de carbono) y 1 mol de oxígeno (32 g de oxígeno), el valor corresponde a los gramos de CO_2 producidos por cada gramo de O_2 que se consume en el sistema.

Teniendo en cuenta que, por cada gramo de oxígeno consumido, se generan 1,375 g de CO_2, y si el consumo de oxígeno estimado para el sistema es de **0,5 kg** O_2/día por cada kg de alimento suministrado, entonces la producción de CO_2 se calcula como:

PCO_2 = 1**,375 g** de CO_2 producidos por cada **g** de oxígeno consumido
PCO_2 = 0,5 kg O_2 x kg de alimento x 1**,375 g**
PCO_2 = 0,6875 kg de CO_2/kg alimento = **687,5 g**

La concentración de salida $\mathbf{C_2}$ del CO_2 se da como:

$$\mathbf{C_2 = C_1 + TE\ (C_{mejor} - C_1)}$$

El caudal de recirculación requerido para mantener el CO_2 del sistema en condiciones seguras de acuerdo con la ecuación (2) es:
Q (C1-C2) = P

8. CALIDAD DE AGUA EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Los parámetros de calidad del agua de mayor importancia en un SRA, son el oxígeno disuelto, el pH, la temperatura, la alcalinidad, el dióxido de carbono (CO_2), el amoniaco, el nitrito y los sólidos suspendidos, todos estos interrelacionados en reacciones físicas, biológicas y químicas complejas, por lo que requieren de un monitoreo constante y ajustes para mantenerlos en los niveles aceptables para la viabilidad al sistema de producción en su integralidad (Nazar, *et al*., 2013; Masser *et al*., 1999).

El agua es la principal exigencia en cualquier tipo de producción en acuicultura, esta debe ser de buena calidad y en la cantidad adecuada para el funcionamiento de las instalaciones. Su origen puede ser superficial proveniente de ríos, arroyos o lagos o subterránea extraída de pozos profundos. La calidad debe garantizar un medio ambiente acuático estable y adecuado a la especie de cultivo en los diferentes factores físicos, químicos y biológicos.

Con respecto a la calidad de agua en acuaponía, las plantas requieren 16 elementos químicos divididos en macronutrientes (N, K, Ca, Mg, P, S) y micronutrientes (Cl, Cu, Mn, Fe, Zn, Co, Mo, Ni) al igual que sodio y silicio, importantes para el crecimiento de algunos peces, como la tilapia y el crecimiento de varias plantas, como el tomate (Peterhans, 2015) y estos minerales son liberados al agua a partir de los sólidos en el proceso de mineralización.

Los principales parámetros de calidad de agua son los siguientes.

8.1. Oxígeno disuelto.

El oxígeno es el más importante y más crítico parámetro para el crecimiento y desarrollo de los peces. En peces de aguas cálidas, una concentración de oxígeno por encima de 5 mg/L, permitirá que los peces que se alimenten mejor, crezcan más rápido y con mínimos riesgos sanitarios, presentándose una relación inversa entre el consumo de oxígeno y el peso corporal, es decir que, a menor peso, mayor consumo de oxígeno (Valbuena y Cruz, 2006). El oxígeno es un importante indicador de la estabilidad del sistema acuapónico y cambia con las tasas de suministro de alimento al sistema (Palm *et al*., 2014). Una disminución en su concentración puede ser la primera causa de la mayoría de las mortalidades (Stone *et al*., 2013), pues es el soporte de la respiración de los peces y de los procesos microbianos y de la degradación de los desechos nitrogenados como el amoniaco (Brazil, 2006), más si se tiene en cuenta que la velocidad con que se eliminen los sólidos del sistema, tiene un gran impacto en la cantidad de oxígeno que se consume (Losordo y Hobbs, 2000). En sistemas de recirculación, Timmons y Ebeling (2013), relacionan el consumo de

oxígeno con la tasa de alimentación de los peces y recomiendan tener en cuenta un consumo de oxígeno de 0,5 kg por cada kg de alimento suministrado que corresponde a 0,25 kg de O_2/kg de alimento consumido por los peces, 0,12 kg de O_2/kg alimento que consumen las bacterias nitrificantes y 0,13 kg de O_2/kg de alimento que consumen las bacterias heterotróficas. En la mayoría de los SRA de aguas frías, se opera con concentraciones de oxígeno por encima de 8 ppm y en aguas cálidas entre 5 a 6 ppm cuando se manejan altas cargas de peces, por lo cual el sistema de aireación debe tener la capacidad de suministrar todo el oxígeno en el sistema cada 20 a 30 minutos, acorde con la máxima tasa de alimentación (Malone, 2013). Con ello se mantiene el sistema en condiciones ideales para el bienestar de los peces, plantas y microbios.

8.2. Temperatura

La temperatura es un parámetro físico que regula de procesos vitales para los organismos vivos y después del oxígeno disuelto, es el factor más determinante en la viabilidad de los sistemas de recirculación para acuicultura. Afecta las propiedades químicas y físicas de otros varios parámetros físicos, la evaporación y solubilidad de gases e influye sobre los procesos metabólicos como la respiración, alimentación, crecimiento, comportamiento y reproducción, actividad bacteriana. La temperatura tiene un efecto positivo sobre la tasa metabólica de los organismos, sin embargo, se presenta una relación directamente proporcional entre la temperatura y el oxígeno, lo que significa que cuando la temperatura del agua se incrementa el consumo de O_2 por los peces aumenta (Valbuena y Cruz, 2006) y la solubilidad disminuye, condiciones a tenerse encuentra cuando se seleccionan los peces y la variedad de vegetales, de manera que se deben propender por cultivos con requisitos de temperatura similares, como por ejemplo, tilapia y albahaca. Igualmente, se debe tener en cuenta que los cultivos de vegetales en sistema de raíz flotante mantienen más estable el calor mejor que los sistemas NFT que eliminan calor por las tuberías (Mullins *et al*., 2015). La relación entre las plantas y los peces, la temperatura y los niveles de oxígeno del agua, son factores determinantes cuando se diseña un SRA y en su operación, si se quiere optimizar la producción de vegetales y peces, disminuir el recambio de agua y también la acumulación y recuperación de nutrientes, disminuyendo los impactos (Endut *et al*., 2010).

8.3. pH

El pH indica el grado de acidez o basicidad del agua y se mide como la cantidad relativa de iones H+ en solución y se expresa en una escala que varía entre 0 y 14 con un valor neutral de 7; por encima de 7 el agua es básica y por debajo de 7 es ácida (Stone *et al*., 2013). La mayoría de los peces de cultivo se desarrollan en un rango de pH entre 6,5 y 8,5, pudiendo tolerar una amplia variación de niveles desde 5,5 hasta 10 (Mullins *et al*., 2015).

El pH regula procesos biológicos mediados por enzimas (ej. fotosíntesis, respiración), la disponibilidad de nutrientes esenciales, limita el crecimiento microbiano en muchos ecosistemas (ej. NH_4^+, $PO4^{-3}$ y Mg_2^+) y controla la relación entre la forma ionizada y

no ionizada del amoniaco y los nitritos, influye en la toxicidad del ácido sulfhídrico y la movilidad de metales pesados como cobre, cadmio zinc y aluminio, que pueden ser tóxicos para muchos microorganismos y para las especies de cultivo. En el diagrama de Troug de la figura 5 (Campos, 2013) se presentan los rangos de pH necesarios para la asimilación de nutrientes en plantas, pero por regla general, a valores de pH entre 5,5 y 7 se encuentra la mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas, y por fuera de este rango, las formas en que se encuentran esos nutrientes, generalemte no son absorbidos por las raíces (Gilzans, 2007, citado por Campos, 2013).

Se presenta un conflicto sobre los valores del pH óptimo en los sistemas acuapónicos, debido a que las bacterias nitrificantes, los peces y las plantas difieren en los niveles óptimos de este parámetro (Harmon, 2005). En hidroponía, la disponibilidad de nutrientes para los vegetales es mayor en rangos de pH ácidos (5,5-6,5), en los biofiltros la actividad de bacterias nitrificantes es más eficiente en pH básico (7,5-9) y los peces tienen un amplio rango de tolerancia a pH (6,5-8,5).

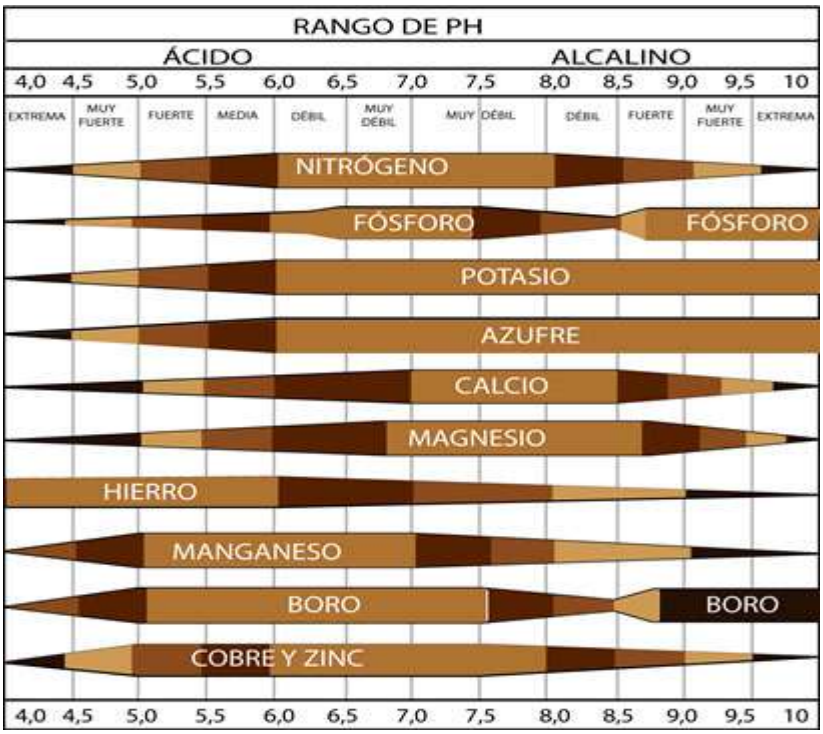


Figura 5. Diagrama de Troug. Rango de los valores de pH para que la asimilación de los nutrientes de la mayoría de las plantas es de 5,5 a 7,5 con un óptimo de 6,5 a 7,0. Fuente imagen: http://hydroenv.com.mx

La mayoría de los SRA depende de la eficiencia de la nitrificación en los biofiltros los cuales tienen niveles de pH que varían de 7,0 a 9,0. Una disminución del pH puede proporcionar condiciones poco favorables para la degradación de los desechos de los peces (Pickens, 2015). Las diferentes bacterias tienen rangos óptimos de pH para su desempeño, *Nitrobacter* sp: 7,5; *Nitrosomonas* sp: 7,0-7,5 y *Nitrospira* sp: 8,0-8,3,

por lo que el valor de pH ideal para el sistema debe estar entre 6,8 y 7,0 (Goddek *et al*., 2015). Un valor de pH por debajo 6,8 inhibe a las bacterias, afectando el proceso de nitrificación (Masser *et al*., 1992; Eding *et al*., 2015) y aunque el rango de pH que permite una óptima nitrificación esta entre 7 y 9, algunos estudios muestran que la eficiencia es mayor cuando está más cerca de 8. Aun así, los vegetales hidropónicos se desarrollan mejor en rangos de pH entre 5,8 a 6,2 siendo aceptables variaciones de 5,5 a 6,5 que no afectan la absorción de nutrientes esenciales como hierro, cobre, boro, zinc y manganeso, los cuales están menos disponibles para las plantas a un pH superior a 7. Por el contrario, la solubilidad del magnesio, fósforo, molibdeno y calcio se disminuye cuando el pH es inferior a 6,0 (Masser *et al*., 1999; Rakocy *et al*., 2006; DeLong y Losordo, 2012).

8.4. Alcalinidad y Dureza

La alcalinidad se determina como la concentración total de bases en el agua, expresada en mg/L de carbonato de calcio equivalente ($CaCO_3$) y está representado por iones carbonato (CO_3^{-2}) y bicarbonato (HCO_3^{-}), los cuales son responsables de la capacidad amortiguadora del pH en el agua. Es decir, aguas con mayor concentración de bases (bicarbonato + carbonato) tienen una mayor capacidad de amortiguamiento natural y cambios menos drásticos en el pH (Masser *et al*., 1999). Las bases comunes presentes en estanques de peces incluyen carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, fosfatos y bromatos (Wurts y Durborow, 1992) y son la fuente principal de carbono inorgánico para las bacterias autótrofas en la nitrificación. Cada gramo de NAT oxidado a nitrato consume 7,04 g de alcalinidad, por lo que se requiere mantener la concentración de alcalinidad de carbonatos por encima de 40 mg/L de $CaCO_3$ para garantizar el proceso de nitrificación (Wik *et al*., 2009).

La dureza se define como la concentración de iones de calcio, magnesio, estroncio y bario, y se expresa en mg/L de $CaCO_3$ equivalente. La presencia de este tipo de iones en el agua suele ser de origen natural y de acuerdo a la cantidad presente, pueden definir si las aguas son blandas (0 – 75 mg/L), moderadamente duras (76 – 150 mg/L), duras (151 – 300 mg/L) y muy duras, por encima de 300 mg/L. El problema de las aguas duras se centra en la formación de precipitados insolubles de carbonatos e hidróxidos que al depositarse sobre tuberías y equipos pueden causar problemas de funcionamiento en calderas de vapor, intercambiadores de calor, filtros, etc. Los valores de dureza aceptables están entre 50 y 150 mg/L de $CaCO_3$ (Stone *et al*., 2013).

8.5. Compuestos Nitrogenados (Amoniaco/Nitrito/Nitrato)

El nitrógeno es uno de los elementos químicos más importantes para la vida de los seres acuáticos, forma parte de las proteínas, los ácidos nucleicos, los pigmentos y otros compuestos y las necesidades fisiológicas de nitrógeno de los peces son satisfechas en pequeñísimas cantidades, dejando excedentes que se convierten en desechos nitrogenados que se deben retirar del SRA, debido a que su descomposición ocasiona alta toxicidad, en especial si se trata del amoniaco y los nitritos, y en

menor escala de los nitratos. Los peces en particular producen y excretan varios desechos por difusión a través de las branquias y también por la orina y las heces, más la descomposición de materia orgánica proveniente de material vegetal y de las proteínas de alimento no consumido y peces muertos (Hassan, 2013). Masser *et al*. (1999), calcularon que, por cada 50 kg de alimento suministrado a los peces, se producen 1,1 kg de nitrógeno amoniacal que debe ser convertido en nitrito y este a su vez en nitrato durante la nitrificación. Los mismos autores también determinaron que dada su toxicidad, el nitrógeno puede llegar a convertirse en uno de los principales problemas en la gestión de los SRA.

El amoniaco, el nitrito y el nitrato son productos derivados del nitrógeno, altamente solubles en agua, contaminantes y en ciertos niveles tóxicos para los peces y otros organismos. El Nitrógeno amoniacal total (NAT) en agua lo conforman el amoniaco no ionizado, NH_3 y amonio ionizado, NH_4+ y las concentraciones presentes de cada una de estas formas está en función del pH, la temperatura y la salinidad (Ebeling *et al*., 2006).

La cantidad de amoniaco no ionizado en un sistema SRA depende del pH y la temperatura del agua y debido a que es un compuesto altamente tóxico, en concentraciones por debajo de 0,06 ppm, el crecimiento de los peces se vuelve lento y llega a afectar los tejidos de especies como el bagre. Su monitoreo debe ser diario y si se detecta acumulación en el sistema, puede indicar que el biofiltro no funciona adecuadamente (Masser *et al*., 1992; Durborow *et al*., 1997).

El nitrito es un producto tóxico para los peces, causando la enfermedad conocida como sangre marrón, debida al color que se produce cuando la hemoglobina sanguínea normal entra en contacto con el nitrito y forman un compuesto llamado metahemoglobina, que no permite el transporte del oxígeno adecuadamente, ocasionando que los peces reaccionen como si estuvieran sin oxígeno (Masser *et al*., 1999; Robert *et al*., 1997). El grado de toxicidad del nitrito varía con la especie de pez, siendo más tolerantes las especies de escama como tilapias, truchas, etc., que las de cuero como el bagre, que son muy sensibles (Masser *et al*.,1999).
El nitrato es el producto final de la nitrificación, es de baja toxicidad si la concentración no supera las 300 ppm y por lo general no se acumula cuando el recambio está entre 5 y 10% en el SRA, haciendo que se produzca algún grado de desnitrificación dentro del sistema, manteniendo la concentración por debajo del nivel tóxico (Masser *et al*., 1992; Rakocy *et al*., 2006). En un SRA, este elemento no es tóxico cuando los niveles son mayores a 200 mg/L (DeLong y Losordo, 2012); por otro lado, el nitrato es alimento para las plantas y poco tóxico para peces como los bagres del género *Pangasius* y para tilapia, quienes toleran una amplia gama de parámetros ambientales, pueden vivir con alimentos versátiles y son especies de peces de crecimiento rápido (Salam *et al*., 2013). En el bagre del canal (*Ictalurus punctatus*), el 50% de los peces muere en 96 h cuando la concentración supera los 6200 mg/L de NO_3-N, aunque algunas investigaciones sugieren que la exposición prolongada a 200 mg/L, puede disminuir

la respuesta inmune de algunas especies. Esto está estrechamente relacionado con la velocidad de alimentación y la eficiencia de la utilización de alimentos (Tyson *et al*., 2011).

8.6. Dióxido de Carbono (CO_2)

El dióxido de carbono (CO_2) es altamente soluble en el agua, llegando a encontrarse en concentraciones de 0,48 mg/L en agua pura a 25°C (Boyd, 1982), pero puede alcanzar concentraciones problemáticas en SRA operados de manera intensiva, debido a que altas concentraciones de dióxido de carbono que alcanzan rangos de 50 a 100 mg/L, reducen el pH y provocan que las bacterias nitrificantes no funcionen, dando como resultado incrementos en la concentración de amoniaco y nitrito (Malone, 2013). Por lo tanto, dicho parámetro debe ser controlado con aireación fuerte en el agua después de la biofiltración, por agitación de la superficie o pasando el agua del cultivo a través de columnas de aireación (Brazil, 2006). La mayor parte del dióxido de carbono disuelto en aguas superficiales depende de la respiración, el intercambio de gases con la atmósfera y la fotosíntesis; tal como reporta Timmons (2002), el dióxido de carbono es tóxico para los peces porque reduce la capacidad de la sangre para transportar oxígeno. A medida que la concentración de CO_2 aumenta en el agua, también aumenta su nivel en la sangre. Sin embargo, los niveles de seguridad de operación del CO_2 dependen de la especie, el estado de desarrollo y la calidad global del agua; para el caso de tilapia las concentraciones de CO_2 pueden ser de 60 mg/L, sin mostrar efectos adversos, mientras que para trucha, valores de 9 a 30 mg/L son asumidos como seguros.

El dióxido de carbono es producido por la respiración de los peces y las bacterias en el sistema y puede acumularse en los SRA, a menos que se elimine física o químicamente. Para obtener un buen crecimiento de los peces en los tanques, la concentración de dióxido de carbono libre debe mantenerse por debajo de 20 mg/L (Masser *et al*., 1992; Nazar *et al*., 2013) y el principal mecanismo de eliminación de los excesos es a través de medios de desgasificación por intercambio de gases, bien sea por exposición del agua directamente al aire en cascadas o inyectando aire al sistema (Nazar *et al*., 2013).

El CO_2 liberado durante la respiración, reacciona con el agua produciendo ácido carbónico (H_2CO_3) lo cual disminuye el pH ($H_2O + CO_2 = H_2CO_3 = H^+ + HCO_3^-$) (Masser *et al*., 1992; Wurts y Durborow, 1992). El CO_2 disuelto mantiene el equilibrio con el ácido carbónico (H_2CO_3), reduciendo efectivamente el pH de la solución y es por ello que el proceso de nitrificación que libera ácido, requiere concentraciones altas de alcalinidad para conservar el pH y la concentración de carbonatos. Esto mantiene el SRA en los límites del diseño y en estrecho equilibrio de las condiciones e insumos ambientales (Guerdat *et al*., 2010).

8.7. Sólidos Totales (Sedimentables, Suspendidos, Disueltos)

Los sólidos totales agrupan partículas que conforman los sólidos sedimentables >100

µm, los sólidos suspendidos no sedimentables <100 µm y los sólidos disueltos <1 µm (Timmons *et al*., 2013) o sólidos fragmentables (>100 µm), sólidos suspendidos totales (1 a 100 µm), coloides (0,1 a 1 µm) o sólidos disueltos (Malone, 2013), generados por el alimento no ingerido, partículas finas de alimento, heces de los organismos bajo cultivo, algas o películas bacterianas desprendidas de los biofiltros, se acumulan en cualquier sistema de acuicultura, constituyendo los desechos sólidos y es prioritario eliminarlos del sistema lo más rápido posible (Masser *et al*., 1992; Van Rijn, 1996). La categoría de sólidos suspendidos totales (TSS) está conformada por una fracción de materia orgánica que se denomina sólidos suspendidos volátiles (VSS) y son los que promueven el crecimiento bacteriano, asociado con la calidad del agua y los problemas de mal olor (Malone, 2013).

El mal manejo de los sólidos suspendidos es el principal problema para la calidad del agua, dado su alto impacto en el rendimiento de los componentes de un SRA, principalmente en el biofiltro que se ve afectado directamente si los sólidos suspendidos no se eliminan eficientemente, disminuyendo su área de superficie específica para la cantidad y la viabilidad de las bacterias nitrificantes requeridas (Brazil, 2006). Igualmente, los sólidos facilitan el crecimiento de bacterias heterotróficas que compiten con las bacterias nitrificantes (Nazar *et al*., 2013) y si la concentración de sólidos se incrementa dentro del sistema, se alteran los parámetros fisicoquímicos del agua, causando estrés a los peces y a las bacterias oxidantes de nitrito (Malone y Pfeiffer, 2006). Una gestión inadecuada de los sólidos potencia una competencia entre las bacterias heterótrofas y autotróficas, afectando el rendimiento de los biofiltros e incrementando los valores de amoniaco en el agua (Brazil, 2006).

Los sólidos sedimentables son los sólidos causantes de la turbidez del agua y generalmente en menos de una hora llegan al fondo del tanque, se diferencian de los sólidos suspendidos porque estos no llegan al fondo del tanque, lo que obliga a contar con otro tipo de tratamientos no convencionales para retirarlos. La permanencia de sólidos en el sistema produce descomposición que demandará oxígeno del sistema y liberará amoniaco adicional, además de otros gases tóxicos como el sulfuro de hidrógeno (Masser *et al*., 1992).

8.8. Salinidad

La salinidad es la concentración total de iones disueltos en el agua que influyen en el bienestar, el ritmo de crecimiento y tasa de mortalidad en el cultivo de peces. Se expresa como gramos por litro (g/L) o partes por mil (ppt). El agua de mar contiene aproximadamente 35 g/L de sal, y su concentración de sales refleja el clima, la geografía y las condiciones hidrológicas del entorno, puede aumentar la salinidad por el efecto de la evaporación o disminuir por el aporte de agua dulce de ríos que desembocan al mar o por las precipitaciones. Gran parte de los peces de agua dulce se reproducen y crecen en salinidades de 4 a 5 ppt y la tilapia roja *Orochromis* sp., soporta más de 20 ppt, creciendo bien en agua salada (Popma y Masser, 1999).

9. LOS PECES EN ACUAPONÍA

Los SRA son utilizados para cultivos súper intensivos de organismos que toleran condiciones de altas densidades y de enfermedades comunes en organismos acuáticos cultivados, por lo que su selección debe hacerse sobre especies con buen crecimiento, tolerancia a los compuestos nitrogenados y rusticidad en el manejo. Varias especies de peces han registrado excelentes tasas de crecimiento en unidades de acuaponía que incluyen las tilapias, la carpa común, la carpa plateada, la carpa herbívora, bagres, trucha arcoíris, salmón, bacalao y lubina negra entre las principales. Los peces que son potencialmente cultivables en sistemas acuapónicos en Colombia son la tilapia (*Oreochromis* sp.), la cachama blanca (*Piaractus brachypomus*), la cachama negra (*Colossoma macropomum*) y el yamú (*Brycon amazonicus*), especies omnívoras de aguas cálidas y rusticas en su manejo. En aguas frías alto andinas, la trucha arcoíris (*Onchorhynchus mikyss*).

Las especies de plantas y peces que pueden ser cultivadas en sistemas acuapónicos son variadas; sin embargo, la combinación entre uno y otro deberá ser seleccionada con precaución a la hora de realizar la operación, considerando que los requerimientos de calidad de agua como temperatura y pH sean similares, con ello los resultados de la operación serán los mejores.

10. LAS PLANTAS EN ACUAPONÍA

En general cualquier planta puede adaptarse a los sistemas acuapónicos (Ramírez *et al*., 2017). Más de 60 diferentes especies de vegetales con requisitos nutricionales de bajos a medios, se adaptan a estos sistemas (Schmautz *et al*., 2016) y son muchas las especies vegetales que se utilizan popularmente en acuaponía, incluyendo plantas de hojas, flores o de frutos (Rakocy *et al*., 2006; Rakocy, 2007), con mejor respuesta de los vegetales de hojas verdes, destacándose la lechuga, la albahaca, el cilantro, la espinaca, la acelga, el apio y el perejil; además de aromáticas como la menta, la hierbabuena y el orégano; y de fruto, como el tomate, el pepino cohombro, los pimentones, el ají, los fríjoles y los guisantes (Somerville *et al*., 2014) y otras especies con potencial como la okra, la col china, la col rizada, el tomillo, el eneldo, las cebolletas, el cebollino, el taro, los berros, la rúgula; algunas flores comestibles, flores ornamentales y pequeños árboles (Graber y Junge, 2009; Engle, 2015; Mullins *et al*., 2015).

Algunas especies de plantas presentan mayor demanda de nutrientes y requieren de sistemas acuapónicos más complejos y bien equilibrados para un balance de masas adecuado, entre ellos los vegetales de fruto como tomates, pimientos, calabaza, frijoles, guisantes y pepinos (Chalmers, 2004). El tamaño del componente hidropónico en acuaponía está directamente relacionado con la biomasa de cultivo de los peces en los tanques que determina la cantidad de alimento diario y el nivel de proteína a suministrar, con lo que se estima la cantidad de deshechos que se generan y la concentración de los nutrientes en los efluentes (Diver, 2006; Mateus, 2009).

11. INFRAESTRUCTURA Y EQUIPOS

La acuaponía es un SRA combinado con un sistema hidropónico, compartiendo varios componentes comunes y esenciales por lo que la infraestructura y el equipamiento deben asegurar el funcionamiento integral. Estos incluyen los tanques para el cultivo de peces, un filtro mecánico, un mineralizador, un biofiltro, un desgasificador y los contenedores hidropónicos. Asimismo, requieren de energía para el bombeo de recirculación del agua a través de tuberías y de aireadores que proporcionan el oxígeno necesario para asegurar el crecimiento de los peces, el funcionamiento del biofiltro y del agua que transporta los nutrientes requeridos para el cultivo de los vegetales. El diseño del sistema de acuaponía debe establecer previamente el tamaño de los tanques para el cultivo de los peces, el tamaño y tipo de filtros, mineralizador, biofiltros, el tipo de sistema hidropónico a utilizar, desgasificador y/o sumidero, y tipo de equipos para oxigenar y bombear el agua (Parker *et al*., 2012).

11.1. Tanques de peces

Los tanques para el cultivo de los organismos acuáticos y deben tener condiciones adecuadas para la sobrevivencia y el crecimiento de los animales, por lo que en la elección del tanque es muy importante considerar la forma, el material y la capacidad de auto limpiarse. La forma del tanque más recomendada por expertos es la circular con fondos planos o ligeramente inclinados hacia el centro (5%), aunque cualquier forma es funcional. Los tanques circulares con drenaje central permiten que el agua circule de manera concéntrica uniforme y facilita el transporte de desechos sólidos hacia el centro del tanque para su remoción.

La evolución de los SRA ha favorecido el uso de tanques circulares debido a su naturaleza estructural e hidrodinámica, que facilita la eliminación de los sólidos en suspensión mediante una pequeña recirculación que permite acumular sólidos en el centro del tanque, en donde las velocidades radiales son más bajas. Los tanques rectangulares no son muy usados por que el movimiento de sólidos es muy deficiente y en estanques largos se pueden ocasionar problemas de calidad del agua por la acumulación sólidos en el fondo. Sin embargo, estos son un 20% más eficientes en la utilización del espacio que los tanques circulares y su cosecha es más fácil (Malone, 2013).

11.2. Filtros mecánicos

Las partículas suspendidas que se encuentran en un SRA son de varios tamaños, desde unas micras (µm) hasta varios centímetros, se distribuyen a diferentes densidades y en distintas zonas de la columna de agua. La elección del mecanismo para la remoción de los sólidos depende principalmente del tamaño y peso que presenten las partículas y en primera instancia la separación de los desechos flotantes, posteriormente el método de decantación o sedimentación para sólidos de gran tamaño (>100 µm), y a través de mecanismos de filtración mecánica se separan partículas menores a 100 µm.

Hay muchos tipos de filtros mecánicos, incluida la sedimentación en tanques, los clarificadores de flujo radial y los filtros deflectores (Somerville *et al*., 2014) y cada uno de ellos puede ser utilizado de acuerdo con la cantidad de desechos sólidos generados que deben eliminarse. La eficiencia de los dispositivos de eliminación de sólidos varía con las características del efluente (desechos sólidos y agua tratada), el tiempo de retención de sólidos y la tasa de consumo de agua (Rakocy *et al*., 2006).

El caudal más alto de recirculación obtenido en el balance de masas a partir de los parámetros equilibrados permite el cálculo del volumen de sedimentación. Teniendo en cuenta que el proceso de sedimentación requiere entre 15 y 30 minutos, la retención hidráulica estimada en el sedimentador es de 20 minutos, pero por seguridad el volumen del dispositivo se incrementa en 20%.

Los tanques de sedimentación funcionan por efecto de la gravedad, aprovechando las diferencias de densidad entre las partículas sólidas y el agua, su forma puede ser circular o rectangular con relación largo ancho para los rectangulares de 4:1 a 8:1 y la profundidad mínima de la columna de agua por arriba de 1,2 m y un cono en el fondo que permita la acumulación del sedimento.

Los filtros de tambor rotativo utilizan es una estructura en forma de tambor, donde su periferia está compuesta de mallas sólidas en acero inoxidable, para capturar todos los sólidos sedimentables y sólidos suspendidos mayores que las perforaciones en la cara interior de las placas filtrantes. Se utilizan mallas finas de 20 a 60 micras, cuya función es retener partículas de mayor tamaño. El tambor gira lentamente (3 a 8 rpm) transportando las impurezas fuera del agua y una rampa de enjuague ubicada en la parte superior del tambor limpia continuamente las placas para evacuar los residuos en el canal de salida de los lodos (Malone, 2103).

11.3. Mineralizador

Es el proceso a través del cual los sólidos son descompuestos por los microorganismos, liberando al agua nutrientes inorgánicos importantes para el crecimiento de las plantas, de tal manera que la mineralización aporta al sistema varios nutrientes esenciales. Si no hay suficientes sólidos para mineralizar, es necesario suplementarlos y esto conlleva a mayores costos operativos en la producción y hace más compleja la gestión del sistema (Rakocy *et al*., 2006).

El mineralizador anaeróbico debe tener un tiempo de retención hidráulica entre 5 y 10 minutos, con una media de 7,5 minutos y teniendo en cuenta el mayor caudal del balance de masa, se determina el volumen del tanque de mineralización, con un incremento del 20% por seguridad. Para el efectivo funcionamiento del mineralizador, se propone el uso de malla de gallinero de 19 mm a razón de 185 m^2 x m^3. Para la mineralización aeróbica, se requiere una retención de 3 a 7 días con un promedio de 5 días y teniendo en cuenta que la producción de sólidos sedimentables es de 8 litros por kg de alimento entonces:

$P_{Sólidos\ sedimentables}$ = Kg alimento/día x 8 litros

11.4. Biofiltros

En cultivos a grandes escalas comerciales se utilizan con mayor frecuencia biofiltros granulares con lechos fluidizados (expandidos) y de bolas o cuentas flotantes (expandibles) y filtros percoladores (emergidos). Sin embargo, el mercado ofrece una gran variedad de biofiltros con diferentes especificaciones (Timmons *et al*., 2002; Guerdat *et al*, 2010; Maolne, 2013).

Para el cálculo del biofiltro se tienen en cuenta las necesidades de oxígeno disuelto del sistema (**PO_2**), el caudal de agua más alto determinado en el balance de masa y la producción diaria de NAT (kg NAT/día), un recambio superior a 3 veces por hora, una fracción de nitrificación de 30% y una tasa de remoción volumétrica de NAT de 350 g de NAT/m^3/día acorde con lo recomendado por Malone y Beecher (2000), en Timmons *et al*. (2002).

Para el sistema propuesto se seleccionó un biofiltro de gránulos flotantes, basado en la tasa de alimentación. Las ecuaciones de cálculo son:

Volumen de soporte ($V_{soporte}$) es:

$$V_{soporte} = (1-I_s)\ \frac{P_{NAT}}{VTR}$$

$$VTR = (1-I_s)\ x\ P_{NAT}$$

Donde:
P_{NAT} = Producción de NAT por los peces
I_s = Carga de diseño de NAT o fracción de nitrificación in situ (1 mg/L en engorde)
VTR = Tasa de remoción volumétrica de NAT (g NAT/m^2/día)

El volumen de material filtrante se da por la relación área volumen (m^2/m^3) del medio filtrante y la cantidad necesaria de este material se obtiene de la relación entre el área del filtro y el área superficial específica del material (SSA) así:

$V_{biofiltro}$ = $A_{biofiltro}$/SSA (Área superficial específica)

La sección transversal del biofiltro se determina como:
TCH = Tasa de Carga Hidráulica

11.5. Medios de cultivo hidropónico

Como ya se mencionó, existen 3 modelos de cultivos vegetales desarrollados en sistema acuapónico, partiendo de la base general de un SRA, la técnica del film nutritivo (o NFT, de las siglas en inglés "*Nutrient Film Technique*"); cultivo de aguas profundas

(o balsas flotantes) y lechos de sustratos, cada uno con características diferentes y con ventajas y desventajas de uno respecto del otro y la selección dependerá del tipo de producción y los recursos económicos invertir.

11.6. Desgasificador y/o Sumidero

Como sumidero, se utiliza un tanque que recoge el agua en la parte más baja del sistema después de pasar por el cultivo hidropónico. Usualmente el agua llega hasta allí por gravedad por lo que se ubica en la parte más baja del proyecto y se complementa con una bomba para devolver el agua a los estanques de cultivo. El tamaño del desgasificador debe tener una capacidad de retención equivalente al 25% del tanque mineralizador.

11.7. Bombas y aireadores

El movimiento del agua es fundamental para mantener todos los organismos vivos en la acuaponía y el agua fluye a través de todo el sistema desde los peces hasta las camas de cultivo, pasando por el sedimentador, filtro mecánico, mineralizador, biofiltro y después de nutrir las plantas debe retornar a los tanques de peces. Es una actividad que no se puede detener, pues el efecto más inmediato será una drástica baja de oxígeno disuelto y acumulación de desechos en los tanques, incrementando el NAT dado que tampoco serían eficientes los dispositivos como el filtro mecánico y el biofiltro, los cuales podrían sufrir daños y morir en pocas horas; adicionalmente, las camas de cultivo de plantas se volverán anóxicas y los sistemas NFT se secarían.

Un adecuado sistema de aireación asegura el oxígeno disuelto que los peces requieren para su sobrevivencia y crecimiento, y las plantas se benefician con aireación dado que mantiene las raíces oxigenadas. El tamaño del equipo de aireación debe estar acorde con las necesidades de oxígeno del proyecto y debe asegurar aireación en cada uno de los dispositivos, tanques de peces, filtros, camas de cultivo de plantas, sumidero, etc.; asimismo, debe funcionar 24 horas.

Una forma de determinar la cantidad de plantas que se pueden producir en un sistema de acuaponía se relaciona con la cantidad de alimento suministrado. Puntualmente, se recomienda para efectos de cálculo, una relación de 60 g de alimento por cada m^2 de vegetales de hoja y de 80 g de alimento por m^2 de plantas de fruto en producciones a pequeña escala, con una densidad de cultivo para vegetales de hoja de 20 a 25 plantas/m^2 y 4 a 6 de plantas de fruto por m^2.

El área requerida de cultivo hidropónico para sistema de cama flotante y lecho sólido se determina como:

$A_{Lechuga}$ (m^2) = kg de alimento/día X 0,06 kg /m^2 de cultivo = **m^2** de lechuga
A_{Tomate} (m^2) = kg de alimento día x 0,8 kg /m^2 de cultivo = **m^2** de tomate

En sistema NFT, las plantas se siembran linealmente, distanciadas de 20 a 30 cm, dependiendo del tipo de vegetal a cultivar.

12. COSTOS

La economía de los sistemas acuapónicos depende de las condiciones del sitio y los mercados específicos. Sería inexacto hacer generalizaciones radicales porque los costos de los materiales, los costos de construcción, los costos de operación y los precios de mercado varían según la ubicación. Por ejemplo, un sistema tropical al aire libre sería menos costoso de construir y operar que un sistema de invernadero de ambiente controlado en un clima templado. Sin embargo, el potencial económico de los sistemas acuapónicos parece prometedor según los estudios con el sistema UVI en las Islas Vírgenes y en Alberta, Canadá. El sistema UVI es capaz de producir aproximadamente 11000 libras de tilapia y 1400 cajas de lechuga u 11000 libras de albahaca anualmente. Se han desarrollado presupuestos empresariales para la producción de tilapia combinados con lechuga o albahaca.

$$V_{soporte} = A_{biofiltro} \frac{Q_{tanque}}{TCH}$$

13. BIBLIOGRAFÍA

● Bernath, J. (1996). Some scientific and practical as-pects of production and utilisation of oregano in central Europe. Proceedings of the IPGRI International Workshop on Oregano CIHEAM, Padulosi, S. (ed.) Italy

● Brazil, B. L. (2006). Performance and operation of a rotating biological contactor in a tilapia recirculating aquaculture system. *Aquacultural engineering*, 34(3): 261-274.

● Bregnballe, J. (2015). A guide to recirculation aquaculture: an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) And EUROFISH International Organisation, 110 P

● Buzby, K. M., y Lin, L. S. (2014). Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output.

● Campos-Pulido, R. 2013. Evaluación de siete tipos de vegetales herbáceas cultivadas en acuaponía usando el efluente del cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus x O. aureus*) en condiciones salobres. Tesis de maestría en ciencias, agroecosistemas tropicales, Colegio de postgraduados, Veracruz (México), 92 p.

● Chalmers, G. A. (2004). Aquaponics and food safety. *Lethbridge, Alberta April*.

● DeLong, D. P., y Losordo, T. (2012). *How to Start a Biofilter*. Southern Regional

Aquaculture Center.

● Danaher, J. (2013). Phytoremediation of aquaculture effluent using integrated aquaculture production systems (Doctoral dissertation).

● Diver, S. (2006). Aquaponics - Integration of Hydroponics with Aquaculture. ATTRA – National Sustainable Agriculture Information Service. North Carolina: 1-28.

● Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Nik, W. W., y Hassan, A. (2010). A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource technology*, 101(5): 1511-1517.

● Eding E.H., Kamstra A., Verreth J.A.J., Huisman E.A. y Klapwijk A. (2006) Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: a review. Aquacultural Engineering 34: 234–260.

● Engle, C.R., (2015). Economics of Aquaponics. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication No. 5006.

● FAO. (2016). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. Roma. 224 pp.

● Giro, A. (2008). Evaluación del rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa L.*) cultivada en un sistema acuapónico, realizado en la Empresa Agrícola Santa Agustina Xolhuitz, Nuevo San Carlos, Retalhuleu (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos, Nuevo San Carlos, Guatemala.

● Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K.V., Jijakli, H., y Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7 (4): 4199-4224.

● Graber, A., y Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246 (1-3): 147-156.

● Guerdat, T. C., Losordo, T. M., Classen, J. J., Osborne, J. A., y DeLong, D. P. (2010). An evaluation of commercially available biological filters for recirculating aquaculture systems. *Aquacultural engineering*, 42 (1): 38-49

● Harmon, T. S. (2005). The Role of" Auqaponics" in Recirculating Aquaculture Systems. *International Journal of Recirculating Aquaculture*, 6 (1): 12.

● Hassan, M. S. S. (2013). *Fabrication of Aquaponic Dry Gravel Plantation System for*

Tomato Plant (Doctoral dissertation, UMP). University Malaysia Pahang. 24 p.

● Jchappell, J. A., Brown, T. W., y Purcell, T. (2008). A demonstration of tilapia and tomato culture utilizing an energy efficient integrated system approach. In *From the pharaohs to the future. Eighth International Symposium on Tilapia in Aquaculture. Proceedings. Cairo, Egypt, 12-14 October 2008* (pp. 23-32). AQUAFISH Collaborative Research Support Program.

● Jeremy M. Pickens, J.M., Danaher J. y Wells D. (2016). Greenhouse Crops and Cropping Systems for Commercial Aquaponics. SRAC Publication No. 5009: 1-7.

● Jordan, R. A., Geisenhoff, L. O., Oliveira, F. C. D., Santos, R. C., y Martins, E. A. (2018). Yield of lettuce grown in aquaponic system using different substrates. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 22 (1): 27-31.

● Khater, E. S. G., Bahnasawy, A. H., Shams, A. E. H. S., Hassaan, M. S., y Hassan, Y. A. (2015). Utilization of effluent fish farms in tomato cultivation. *Ecological engineering*, 83: 199-207.

● Lazur, A. M., y Britt, D. C. (1997). *Pond recirculating production systems*. Southern Regional Aquaculture Center. *SRAC Publication* (455).

● Lee, J., Loo, J., Chuah, Y., Tang, P., Tan, Y., y Wong, C. (2013). The design of a culture tank in an automated recirculating aquaculture system. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2 (2): 67-77.

● Losordo, T. M., y Hobbs, A. O. (2000). Using computer spreadsheets for water flow and biofilter sizing in recirculating aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*, 23 (1-3): 95-102.

● Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., y Semmens, K. (2014). An international survey of aquaponics practitioners. *PloS one*, 9 (7): e102662.

● Malone, R. F., y Pfeiffer, T. J. (2006). Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural engineering*, 34 (3): 389-402.

● Malone, R. (2013). Recirculating Aquaculture Tank Production Systems. *A review of Current Design Practice. Southern Regional Aquaculture Center. SRAC Publication*, (453): 1-10.

● Masser, M. P., J. Rakocy, and T. M. Losordo. (1992). Recirculating aquaculture tank production system. *Management of recirculating systems*. Publication No. 452.

Southern Regional Aquaculture Center, Stoneville, Mississippi, USA.

● Masser, M. P., James Rakocy, J., Thomas, M., y Losordo, T. M. (1999). Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: An Overview of Critical Considerations. *SRAC Publication*, (452).

● Masser, M. P., Rakocy, J., y Losordo, T. M. (2000). *Recirculating aquaculture tank production systems*. Southern Regional Aquaculture Center.

● Mateus, J. (2009). Acuaponía: hidroponía y acuacultura, sistema integrado de producción de alimentos. *RED hidroponía. Boletín*, (44): 7-10.

● Mirzoyan, N., Tal, Y., y Gross, A. (2010). Anaerobic digestion of sludge from intensive recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 306 (1-4): 1-6.

● Mullins, B. Nerrie, and T. D. Sink. (2015). Principles of Small-Scale Aquaponics. Southern Regional Aquaculture Center Publication Number 5007.

● Nazar, A. A., Jayakumar, R., y Tamilmani, G. (2013). Recirculating aquaculture systems. Mandapam Regional Centre of CMFRI. 6 p.

● Palm, H. W., Seidemann, R., Wehofsky, S., y Knaus, U. (2014). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part I: system design, chemo-physical parameters and general aspects dissertation. AACL Bioflux, 7 (1): 20-32.

● Parker, M., DeLong, D., Dunning, R. D., Losordo, T. M., y Hobbs, A. O. (2012). A Spreadsheet Tool for the Economic Analysis of a Recirculation Tank System. *Southern Regional Aquaculture Center. Publication*, (456).

● Pickens, J. (2015). Integrating effluent from recirculating aquaculture systems with greenhouse cucumber and tomato production (Doctoral). Auburn University 112 p.

● Peterhans, T. (2015). Aquaponic nutrient model, Thesis project Biobased Chemistry and Technology, Waswningen University, 41p.

● Popma, T., y Masser, M. (1999). Tilapia, life history and biology-Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication.

● Rakocy, J. (1999). Aquaculture engineering - The status of aquaponics, part 1. *Aquaculture magazine*, 25 (4): 83-88.

● Rakocy, J. E.; Losordo, T. M. and Masser, M. P. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: integrating fish and plant culture. Southern Region Aquaculture Center Publication. Virgin Islands. 4541-16 pp.

● Rakocy, J. E., Masser, M. P., y Losordo, T. M. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics- integrating fish and plant culture. *SRAC publication*, 454: 1-16.

● Rakocy, J. (2007). Ten guidelines for aquaponic systems. *Aquaponics J*, 1: 14-17.

● Ramírez, D., Sabogal, D., Jiménez, P., y Giraldo, H. H. (2017). La acuaponía: una alternativa orientada al desarrollo sostenible. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, *4*(1-2), 32-51.

● Reyes-Flores, M., Sandoval-Villa, M., Rodríguez-Mendoza, N., Trejo-Téllez, L. I., Sánchez-Escudero, J., y Reta-Mendiola, J. (2016). Concentración de nutrientes en efluente acuapónico para producción de *Solanum lycopersicum L*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, (17): 3.

● Robert, M. D., David, M. R., y Martin, W. B. (1997). Ammonia in Fish Ponds. *SRAC Publication*, (463), 16-22.

● Salam, M. A., Asadujjaman, M., y Rahman, M. S. (2013). Aquaponics for improving high density fish pond water quality through raft and rack vegetable production. World *Journal of Fish and Marine Sciences*, 5 (3): 251-256.

● Salam, M. A., Jahan, N., Hashem, S., y Rana, K. M. S. (2015). Feasibility of tomato production in aquaponic system using different substrates. *Progressive Agriculture*, 25: 54-62.

● Schmautz, Z., Graber, A., Mathis, A., Griessler Bulc, T., y Junge, R. (2015). Tomato production in aquaponic system: Mass balance and nutrient recycling. *Aquaculture Europe*, 15.

● Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., y Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, (589).

● Stone, N. M., Shelton, J. L., Haggard, B. E., y Thomforde, H. K. (2013). *Interpretation of water analysis reports for fish culture*. Southern Regional Aquaculture Center.

● Timmons M.B., Ebeling J.M., Wheaton F.W, Summerfelt S.T. y Vinci B.J. (2002).

Sistemas de Recirculación para la Acuicultura. Editado por Fundación Chile. Santiago Chile. 741 p.

● Timmons, M.B., and Ebeling, J.M. (2013). Recirculating aquaculture 3rd ed. Ithaca, NY, Ithaca Publishing Company, LLC Northeastern Regional Aquaculture Center publication No. 401-2013, 788 p.

● Tomala, D., Chavarria, J., y Angeles, B. (2014). Evaluation of oxygen consumption rate of Colossoma macropomum regarding the body weight and water temperature. *Latin American Journal Of Aquatic Research*, 42 (5): 971-979.

● Tucker, C. S., Hargreaves, J. A., y Boyd, C. E. (2008). *Better management practices for freshwater pond aquaculture* (pp. 151-226). Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA.

● Tyson, R. V., Treadwell, D. D., y Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21(1): 6-13.

● Valbuena-Villarreal, R. D., y Cruz-Casallas, P. E. (2006). Efecto del peso corporal y temperatura del agua sobre el consumo de oxígeno de tilapia roja (*Oreochromis* sp). *Orinoquia*, 10 (1): 10-19.

● Van Rijn, J. (1996). The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture - A review. *Aquaculture*, 139 (3-4): 181-201

● Wik, T. E., Lindén, B. T., y Wramner, P. I. (2009). Integrated dynamic aquaculture and wastewater treatment modelling for recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 287 (3-4): 361-370.

● Wurts, W. A., y Durborow, R. M. (1992). Interactions of pH, carbon dioxide, alkalinity and hardness in fish ponds.

● Zugravu, G. A., Kamel, K. I., Rahoveanu, M. M. T., Coada, M. T., Petrea, S. M., Bandi, A. C., y Chihaia, I. A. Risk in Contemporary Economy.

CAPÍTULO IV

CULTIVO INTENSIVO DE CAMARÓN BLANCO *(Litopenaeus vannamei)* CON TECNOLOGÍA DE BIOFLOC (BFT)

Anselmo Miranda-Baeza, Ph. D.
Universidad Estatal de Sonora (UES)
E-mail: anselmo.miranda@ues.mx

José Alberto Huerta-Rábago, M. Sc.
Programa de Maestría en Sistemas de Producción Biosustentables, UES
E-mail: huerta_a27@hotmail.com

Jesús Alberto Lizárraga-Armenta, M. Sc.
Universidad Estatal de Sonora (UES)
E-mail: jesus.lizarraga@ues.mx



Producción de *Litopenaeus vannamei* en sistema de BFT. Foto: Anselmo Miranda-Baeza

1. **INTRODUCCIÓN**

Recientemente, en todo el mundo, se han registrado severas pérdidas económicas que afectan a las empresas dedicadas al cultivo de camarón, los factores son múltiples, pero destacan los siguientes: manejo inadecuado de efluentes en granjas, diseminación de enfermedades (bacterianas y virales) y aumento en el precio de los insumos para la elaboración de alimentos. Los acuicultores requieren de manera urgente explorar nuevas tecnologías de cultivo basadas en los avances biotecnológicos. Entre éstas alternativas se encuentran los sistemas hiper-intensivos (cultivos en biofloc). La tecnología de cultivo en biofloc (BFT) se fundamenta en el aprovechamiento de consorcios microbianos diversos para controlar los niveles de compuestos nitrogenados tóxicos y transformar el exceso de materia orgánica en alimento vivo de alta calidad.

Los sistemas hiper-intensivos se caracterizan por tener un mínimo volumen de recambio de agua, además de mantener un mínimo contacto con el medio externo, ya que se desarrollan en estanques cubiertos con concreto o con polietileno de alta densidad, los cuales se encuentran dentro de invernaderos y casas sombra. Una de las principales ventajas que tienen estos sistemas, es el manejo de protocolos de bioseguridad y la optimización de recursos escasos como tierra, agua y alimento peletizado (Ray *et al*., 2011). Los sistemas hiper-intensivos permiten un ahorro de agua de hasta 40 veces comparados con los sistemas tradicionales (Sampaio *et al.,* 2010) y de 24 veces en sistemas de recirculación de agua (Poleo *et al.,* 2011).

En granjas comerciales, las densidades de siembra de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) pueden variar entre 200-400 ind/m^2 sin que haya un efecto adverso en la supervivencia (que puede llegar al 90%). En el Noroeste de México existen algunas empresas que realizan cultivos a nivel comercial en éstos sistemas, los resultados indican que se pueden obtener hasta 40 ton/ha/ciclo (en algunos casos hasta 50).

A pesar de todas las ventajas mencionadas, las granjas comerciales que utilizan el sistema de biofloc, deben contar con estrictos protocolos de monitoreo, además de tener personal capacitado para su operación. El objetivo del éste capítulo es mencionar los principios generales de los cultivos en biofloc así como las instalaciones requeridas, por tal motivo no es un documento que analiza con profundidad todos los procesos, los cuales se pueden investigar en diversos artículos científicos. La información presentada es solo una guía, basada en experiencias propias obtenidas tanto en laboratorio como en granjas comerciales, así como en las experiencias de otros investigadores. Se recomienda que las empresas y a los técnicos tengan una capacitación previa y realicen pruebas piloto comerciales, previo a la operación de las granjas comerciales.

2. ASPECTOS BÁSICOS DEL BIOFLOC

2.1. Formación de los bioflóculos y sus características biológicas

La formación de los bioflóculos se lleva a cabo principalmente por la ausencia de recambio de agua, y mediante la manipulación de la relación carbono: nitrógeno (C: N) en el cultivo. El objetivo principal es promover el desarrollo de bacterias heterotróficas, nitrificantes y otros microorganismos. Si se desea un biofloc de tipo mixotrófico a heterotrófico, es necesaria la adición de fuentes de carbono externas. En un apartado posterior se mencionará éste punto con más detalle. Los sistemas BFT requieren aireación vigorosa, la cual ayuda a mantener la elevada tasa respiratoria de bacterias, ciliados, protozoarios y zooplancton, así como de los organismos cultivados, al mismo tiempo que permite que la materia orgánica se mantenga suspendida en la columna de agua, impidiendo su sedimentación (Poleo *et al*., 2011).

Cuando la relación C: N es óptima para el crecimiento de bacterias heterótrofas, estas son capaces de metabolizar la materia orgánica generada dentro del sistema y permiten el desarrollo de otros organismos superiores. Los conglomerados microbianos abundantes en bacterias heterótrofas remueven mayor cantidad de nitrógeno amoniacal (Martínez-Córdova *et al*., 2015). Se ha demostrado que el desarrollo de bioflóculos permite mantener los niveles de compuestos tóxicos dentro de los recomendados para el cultivo de camarón blanco.

El desarrollo de los bioflóculos involucra interacciones físicas, químicas y biológicas entre la materia orgánica y sustrato físico. Las bacterias y las microalgas son los primeros colonizadores y representan la base para el desarrollo de los bioflóculos, así como para la proliferación del resto de la microbiota.

1.2. Comunidades bacterianas

2.2.1. Bacterias heterótrofas

Las bacterias heterótrofas utilizan fuentes de carbono como principal sustrato metabólico. La materia orgánica de desecho, es la fuente de carbono y de nitrógeno, la cual es convertida en biomasa bacteriana de alto valor nutricional, ésta biomasa a su vez sirve como fuente potencial de alimento para los detritívoros. Se ha reportado que las bacterias heterótrofas son capaces de metabolizar iones inorgánicos derivados del nitrógeno (NH_3, NO_2) por éste motivo la adición de carbono externo puede reducir el amonio tóxico en el agua, mientras que la población de bacterias crece exponencialmente. Sin embargo, no son capaces de mantener el proceso de nitrificación, el cual es benéfico en el largo plazo, debido a que la materia orgánica es su mayor fuente de energía (Prosser, 2007). La cantidad de bacterias heterótrofas es variable y está en función de la edad del cultivo, así como de la relación C: N utilizada. Algunos autores como Otoshi *et al*. (2009) han reportado niveles puntuales

de bacterias heterótrofas de hasta 3,9 x 10^8 cel/ml en cultivos super-intensivos de *L. vannamei.* En granjas comerciales de biofloc se han obtenido niveles de 65,3 x 10^6 UFC/ml en la fase de maternización (Espinoza-Barrón, 2016) y en la etapa de engorde final de 1,0 a 3,5 x 10^7 UFC/ml mediante la técnica de siembra en placas (Figura 1).

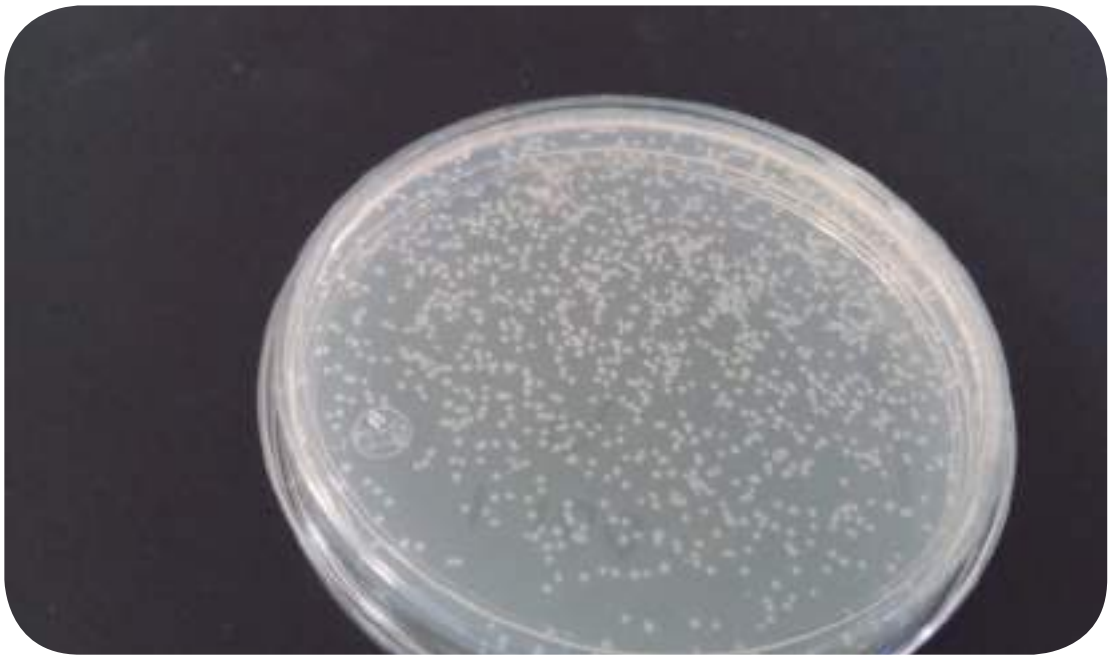


Figura 1. Placas de agar marino con colonias de bacterias heterótrofas provenientes de un cultivo de camarón en biofloc. Foto: Anselmo Miranda-Baeza.

2.2.2. Bacterias nitrificantes

Estas bacterias incluyen dos grupos principales, las cuales tienen un alto nivel de especialización, las oxidantes de amonio y las oxidantes de nitrito. Las bacterias oxidantes de amonio obtienen su energía catabolizando amoniaco no ionizado a nitrito e incluyen bacterias de los géneros *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus* y *Nitrosovibrio*; las bacterias oxidantes de nitrito oxidan el nitrito a nitrato, e incluyen bacterias de los géneros *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*, *Nitrospina* (Timmons *et al*., 2002; Huerta-Aldaz *et al*., 2012). Estudios recientes de secuenciación masiva para el estudio de las comunidades bacterianas en biofloc indican que existen otras especies, que pueden jugar un papel importante en la nitrificación dentro de los sistemas BFT (Huerta-Rábago, 2017).

Por cada molécula de dióxido de carbono asimilado, aproximadamente 30 moléculas del ion amonio y 100 moléculas de nitrito deben ser oxidadas; debido a la gran cantidad de iones amonio y nitrito que son necesarios para asimilar el dióxido de carbono, éstas bacterias tienen una tasa de crecimiento muy baja (Gerardi, 2002). Por tal motivo los biofiltros requieren un proceso de maduración, periodo en el cual

ocurre la colonización de bacterias heterótrofas, oxidantes de amonio y oxidantes de nitritos (McGraw, 2002; Timmons *et al*., 2002). En cierta forma los bioflóculos tienen el mismo proceso. Existen medios de cultivo específicos para el cultivo de bacterias nitrificantes, sin embargo, se deben proporcionar condiciones adecuadas y esperar hasta 7 días para que las colonias sean visibles y puedan contabilizarse. Huerta-Rábago (2014) determinó concentraciones de bacterias nitrificantes entre 39 y 62 a x 10^6 UFC/ml, en un cultivo de tilapia en biofloc con relación C: N de 9:1 (a los 30 días de cultivo). Mientras que Espinoza-Barrón (2016) estimó entre 65 y 77 x 10^6 UFC/ml en una granja comercial de camarón blanco en biofloc, durante la fase final de la maternización (30 días) utilizando la misma relación C: N.

Bacterias del género *Vibrio*

Algunas bacterias del género *Vibrio* han sido reconocidas como los principales patógenos en acuicultura, ya que son responsables de generar varias enfermedades en moluscos, peces y crustáceos; estas se presentan desde los cultivos larvarios hasta las fases de crecimiento final (Thompson *et al*., 2004). Las bacterias tipo *Vibrio* se convierten en patógenos oportunistas cuando se rompe el equilibrio en las comunidades bacterianas presentes en los cultivos acuícolas (Aguilera-Rivera *et al*., 2014). En los camarones, las especies de *Vibrio* más peligrosas son *V*. *harveyi*, *V*. *parahaemolyticus*, *V*. *alginolyticus*, *V*. *anguillarum*, *V*. *vulnificus* y *V*. *esplendidus*; estas son capaces de colonizar el hepatopáncreas de los camarones, lo que resulta en bajas tasas de crecimiento, altos factores de conversión de alimento y mortalidad de los organismos (Vieira *et al*., 2009). En los cultivos en biofloc se encuentran en el agua en concentraciones variables. En una granja comercial de Sonora, México los niveles de colonias amarillas variaron entre 50 y 5500 UFC/ml (con niveles de 2000 a 3000 entre los días 20 a 70 del cultivo); mientras que las colonias verdes estuvieron entre 1 y 800 UFC/ml, los menores niveles se registraron del día 40 al 80 del periodo de cultivo (Figura 2).



Figura 2. Placas de agar TCBS con colonias de bacterias tipo *Vibrio* provenientes de un cultivo de camarón en biofloc. Foto: Anselmo Miranda-Baeza.

2.3. Otros microorganismos presentes en el biofloc

Además de las bacterias y de las microalgas, existen diversos microorganismos que se desarrollan en los sistemas de biofloc. La estabilidad de estos cultivos depende de una interacción altamente dinámica entre las comunidades de bacterias, microalgas, hongos (levaduras), protozoarios, nematodos, rotíferos, etc. (Figura 3). Estos se desarrollan de manera natural y aparecen en el sistema en función de la edad del cultivo (Monrroy-Dosta *et al.*, 2013). En éste capítulo el tema no se tratará con más detalle, al respecto, Emerenciano *et al.* (2017) presentan una descripción detallada de las características y de los roles que tienen los microorganismos presentes en el biofloc.



Figura 3. Microfotografía de biofloc, en la cual se observan diversos microorganismos (bacterias, ciliados, protozoarios, microalgas y levaduras) asociados a los bioflóculos. Foto: Anselmo Miranda-Baeza.

2.4. Los bioflóculos como suplemento alimenticio del camarón

Una vez que los bioflóculos han sido formados y tienen una concentración entre 5 y 15 ml/l, sirven de suplemento alimenticio para los organismos en cultivo. La ingestión activa ha sido demostrada mediante estudios que analizan el tracto intestinal de camarón blanco (Viau *et al*., 2012); asimismo, se ha demostrado mediante el uso de isótopos estables que los organismos cultivados pueden incorporar los nutrientes de los bioflóculos a su tejido, representando entre el 18 y 29% del total (Burford *et al*., 2004).

El ajuste de la razón C: N permite el desarrollo de diversos tipos de bioflóculos, en el cual se presentan diferentes proporciones de fitoplancton (cianobacterias, diatomeas, clorofitas y cianofitas), ciliados, flagelados, rotíferos y nematodos, entre otros. Indistintamente del tipo de bioflóculos, los agregados aportan proteínas, lípidos y carbohidratos (Martínez-Córdova *et al*., 2015) que permiten que los organismos mayores los aprovechen en todo momento, ya que se encuentran permanentemente en suspensión en la columna de agua. Los resultados obtenidos en diversos estudios demuestran que la productividad natural tiene un efecto positivo en supervivencia, crecimiento, ganancia de peso, consumo de alimento y factor de conversión alimenticia del camarón (Wasielesky *et al*., 2006; Emerenciano *et al*., 2011; Becerra-Dórame *et al*., 2011).

Emerenciano *et al*. (2012) indicaron que los análisis proximales de los bioflóculos desarrollados en cultivos de camarón *L. vannamei* y *F. duorarum* tienen un buen aporte de proteína 26,3%, 18,4% y 25%, respectivamente. La composición de nutrientes de los bioflóculos suele variar entre cultivos debido a los organismos que se desarrollan en ellos (Ekasari *et al*., 2010). Los estudios de Crab *et al*. (2010) han resaltado la importancia que tiene la fuente de carbono en el desarrollo de los bioflóculos, sugiriendo que éste es el principal factor que influye en el contenido de proteínas, lípidos y cenizas. Otros estudios han observado que la edad del cultivo también influye en la composición de los bioflóculos (Schveitzer *et al*., 2013; López-Elías *et al.,* 2015).

Por otro lado, autores como Azim y Little (2008) y Megahed (2010), han comparado la composición de los bioflóculos desarrollados en cultivos de tilapia y camarón, respectivamente, con diferente contenido de proteína en el alimento peletizado (de 24 y 35% para tilapia y de 16 a 31% para camarón) y López-Elías *et al*. (2015) con diferentes contenidos de harina de pescado en la dieta, sin encontrar diferencia significativa en el contenido de proteínas y lípidos de los agregados. Los estudios mencionados concluyen que la calidad nutricional de los bioflóculos puede ser independiente del contenido de proteína, así como del origen de los ingredientes presentes en los alimentos peletizados.

Ballester *et al*. (2010) estudiaron el efecto de la reducción de nivel de proteína (25, 20, 35, 40 y 45%) en alimento para juveniles de *Farfantepenaeus paulensis* cultivado con bioflóculos, sin observar efectos significativos en el desarrollo y respuesta productiva del camarón. Incluso los bioflóculos se han aprovechado para producir harina. Kuhn *et al*. (2010) utilizaron la harina procedente de bioflóculos desarrollados en un cultivo de tilapia como ingrediente de dietas de camarón, reduciendo el contenido de harina de pescado sin efectos negativos en el desarrollo de los crustáceos. Estos estudios resaltan la importancia que tiene el alimento vivo al complementar las dietas formuladas, logrando una mayor variedad de nutrientes que se reflejan en los parámetros productivos.

Diversas investigaciones se han encaminado a evaluar los perfiles de ácidos grasos y aminoácidos de los bioflóculos, con el fin de verificar si son adecuados para satisfacer los requerimientos nutricionales de peces y camarones. En conjunto, los microorganismos, presentes en el biofloc tienen buen perfil de aminoácidos y ácidos grasos (Emerenciano *et al.,* 2017). En un estudio reciente de Moreno-Arias *et al.* (2018) se encontró que la relación de aminoácidos esenciales (A/E) del biofloc fue superior a 0,98 en 7 de los AA y solo en dos de ellos se encontró deficiencia (arginina y lisina).

En cuanto al contenido de ácidos grasos esenciales, Emerenciano *et al*. (2012) estudiaron dicho perfil, encontrando un importante aporte nutricional para el desarrollo gonadal de los camarones (*L. vannamei*). Por otro lado, Ekasari *et al.* (2010) han resaltado el efecto que tiene la fuente de carbono (al comparar glucosa y glicerol) sobre el contenido de ácidos grasos n-3 y n-6 en los bioflóculos, así como la mayor producción de ácido docosahexaenóico (DHA) en bioflóculos desarrollados en agua salada en comparación con los desarrollados en agua dulce. Por otro lado Moreno-Arias *et al.* (2018) reportaron que el biofloc tiene un alto contenido de ácidos grasos C16:0 con valores de 29,80 a 34,95 g 100 g^{-1} y 18:1-cis (n−9) en un intervalo de 11,52 a 17,39 g 100 g^{-1}; mientras que los ácidos grasos esenciales estuvieron representados principalmente por 18:2-cis(n−6) con valores de 5,28 a 7,29 g 100 g^{-1} y 20:5(n−3) variando de 3,69 a 4,28 g 100 g^{-1}.

2.5 El biofloc como fuente de probióticos e inmunoestimulantes.

Se ha observado que mantener una comunidad de bacterias benéficas en los cultivos hiper-intensivos, puede disminuir la cantidad de bacterias patógeno tipo *Vibrio* e incluso contribuyen a mejorar el estatus inmunológico, como lo demostró Aguilera-Rivera *et al.* (2014) en un cultivo de *L. vannamei*. La experiencia en granjas comerciales e incluso en bioensayos en laboratorio indica que las bacterias tipo *Vibrio* siempre están presentes en los sistemas, sin embargo la abundancia de bacterias heterótrofas benéficas inhibe la proliferación de éste género (Huerta-Rábago, 2014).

Las enzimas que forman parte de la pared extracelular de ciertos microorganismos que son ingeridos por los camarones pueden conferirle características favorables para la digestión de ingredientes, este tema ha sido motivo de estudios recientes como los de Xu y Pan (2012); Xu *et al*. (2013) y Moreno-Arias *et al.* (2017) en los cuales se reportó una mejoría en la actividad enzimática digestiva (proteasa, amilasa, celulasa y lipasa) en diferentes órganos (glándula digestiva, estómago e intestino) del camarón cultivado (*L. vannamei*) con bioflóculos, en comparación con los cultivados en agua clara. De manera similar, se observó un incremento en la actividad enzimática digestiva (proteasas, amilasa y lipasa) en un grupo de poslarvas de camarón al ser tratadas con un aditivo a base de bacterias probióticas, lo cual además tuvo efectos benéficos en la supervivencia (Zhou *et al*., 2007).

Estos resultados sugieren que los microorganismos que conforman los bioflóculos tienen un efecto positivo en la actividad enzimática digestiva de *L. vannamei* facilitando

la digestibilidad y absorción del alimento. Los organismos cultivados en un sistema de biofloc operado adecuadamente crecerán sanos y con excelente apariencia (Figura 4).



Figura 4. Ejemplares de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) cultivados en una granja comercial en sistema de biofloc. Foto: Anselmo Miranda-Baeza.

2.6. Calidad del agua

Temperatura y salinidad

El camarón es poiquilotermo, por lo tanto la temperatura influye de manera directa sobre su metabolismo. La mayoría de los peneidos pueden encontrarse en temperaturas entre 18 y 35°C, así como salinidades de 1 a más de 50‰ porque son eurihalinos. Las temperaturas óptimas para el cultivo de camarón blanco se están entre 28 y 30°C.

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en el agua es uno de los parámetros más importantes en el cultivo de camarón; el grado de solubilidad de este gas depende principalmente de la temperatura y de la salinidad. La concentración mínima de oxígeno disuelto que puede ser tolerada el camarón varia con la talla y con el tiempo de exposición (Boyd,

1989). En general el nivel óptimo de oxígeno disuelto debe mantenerse por encima de 5 mg/L; sin embargo en la práctica se ha demostrado que los camarones pueden vivir en niveles de hasta 2 mg/L por cortos periodos de tiempo. En las granjas de biofloc se recomienda que los niveles mínimos sean superiores a 4 mg/L, aunque se pueden presentar concentraciones de hasta de 3,0 mg/L después de la alimentación o de la adición de fuentes de carbono.

pH

El pH es una medida de la concentración de iones de hidrógeno, que indica si el agua es ácida, neutra a básica. Algunos intervalos que son señalados como óptimos para el cultivo de camarón varían de 8,0 a 9,0. Este parámetro es de gran importancia en el cultivo hiper-intensivo de camarón. Para que las bacterias nitrificantes puedan desarrollarse en los bioflóculos y desempeñar su función de manera adecuada, se recomienda que el pH se mantenga en niveles superiores a 7,0 (Emerenciano *et al.,* 2017).

Amonio, nitritos y nitratos

El amoniaco es uno de los principales productos de desecho del metabolismo del camarón. En los estanques de cultivo se puede encontrar en forma no ionizada ($N\text{-}NH_3$) a ionizada ($N\text{-}NH_4$). La suma de las formas ionizada y no ionizada se conoce como nitrógeno amoniacal total (NAT) y en los sistemas hiper-intensivos se han reportado niveles de NAT de hasta 4 mg/L (Sesuk *et al.,* 2009; López-Elías *et al.,* 2015); sin embargo en los cultivos comerciales se han llegado a registrar concentraciones de hasta 10 mg/L. La dominancia entre las formas ionizada y no ionizada depende del pH. Los nitritos ($N\text{-}NO_2$) también son tóxicos para el camarón, y aunque se recomiendan niveles de 1 mg/L (Emerenciano *et al.,* 2017) en las granjas comerciales se han reportado niveles de hasta 15 mg/L sin aparentes problemas de mortalidad. Los nitratos ($N\text{-}NO_3$) son menos tóxicos; en algunos cultivos de camarón se han reportado concentraciones superiores a 100 mg/L sin ningún efecto negativo en cortos periodos de tiempo.

Alcalinidad

Al igual que el pH, la alcalinidad tiene un efecto significativo sobre la comunidad bacteriana. Altos niveles de alcalinidad pueden mejorar el proceso de asimilación de las bacterias heterotróficas, así como el proceso de nitrificación por parte de las bacterias quimioautótrofas. Se recomienda que los niveles sean superiores a 100 mg/L.

Sólidos suspendidos totales

En los cultivos con bioflóculos la cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) puede variar en función de la edad del cultivo, del tipo de dieta y de la edad de los organismos. En cultivos experimentales con camarón se han encontrado amplias variaciones. Ballester *et al.* (2010) reportaron valores de 79 a 437 mg/L durante 45 días de cultivo con camarón *Farfantepenaeus paulensis*. Por otro lado, Emerenciano

et al. (2011) obtuvieron un intervalo de 150 a 450 mg/L. En cultivos comerciales los niveles son similares, y como ya se mencionó las concentraciones dependen de la edad del cultivo y de la biomasa presente en el sistema. En general diversos autores mencionan como límite máximo 500 mg/L de SST, los niveles superiores a éste pueden obstruir las branquias e interferir en el proceso de difusión de oxígeno.

Sólidos sedimentables

En las granjas comerciales es difícil medir la concentración de sólidos suspendidos debido a la metodología requerida, sin embargo una alternativa es la determinación de los sólidos sedimentables. Los conos de Imhoff (Figura 5) son muy prácticos para ser usados en campo. Los niveles recomendados para el cultivo de camarón varían entre 5 y 15 ml/L.



Figura 5. Determinación de sólidos sedimentables con conos de Imhoff. Foto: Anselmo Miranda-Baeza.

Clorofila A

La clorofila A, es el pigmento fotosintético primario presente en las microalgas. Dependiendo del tipo de biofloc, la concentración de clorofila a puede variar desde 200 µg/l hasta cerca de 1000 µg/l (Decamp *et al*., 2007; Miranda-Baeza *et al*., 2017). Avnimelech (2009), menciona que existen grandes desventajas cuando se utilizan sistemas de biofloc de tipo autótrofo, debido a que las microalgas tienen una alta influencia en los niveles de pH, oxígeno disuelto y pueden morir masivamente desestabilizando el sistema.

2.7. Uso de probióticos

Los probióticos son una mezcla de microorganismos, que al ser aplicados tienen un efecto benéfico en el huésped, debido a que poseen propiedades de la microflora endémica (Harvennar y Huis In't Veld, 1992); actualmente existen varios productos comerciales basados en cepas de bacterias nitrificantes y heterótrofas del género *Bacillus* sp., que se utilizan como biorremediadores, aunque su efecto se refleja principalmente en beneficiar la salud de los organismos cultivados.

La mayoría de los intentos para producir probióticos se han llevado a cabo aislando y seleccionando cepas de ambientes acuáticos (Gastesoupe, 1999). Algunos de estos microorganismos pertenecen a los géneros *Vibrio*, *Pseudomona*, bacterias ácidolácticas, *Bacillus* y levaduras. Los probióticos deben tener tres características principales: 1) mostrar antagonismo contra patógenos *in vitro*; 2) tener potencial de colonización y 3) aumentar la resistencia a enfermedades de su huésped (Gastesoupe, 1999).

Actualmente en el campo de biorremediación y bioseguridad acuícola, se encuentran varios productos comerciales, los cuales se usan de manera empírica. En general no se cuenta con protocolos de manejo validados que permitan un manejo estandarizado en los sistemas de cultivo con mínimo recambio de agua. Por otro lado, algunos estudios de metagenómica indican que las especies de bacterias presentes en los ambientes naturales aledaños a las granjas son capaces de proliferar y mantener la estabilidad de los sistemas de biofloc (Huerta-Rabago, 2017; Porchas-Cornejo *et al.*, 2017).

3. ALGUNAS CONSIDERACIONES PRÁCTICAS PARA LA OPERACIÓN DE GRANJAS DE BIOFLOC

Invernaderos

Los invernaderos usados en acuicultura, en general se derivan de la agricultura protegida. Existen empresas que se dedican tanto al diseño como a la instalación. Previo a la solicitud de la cotización de éstas estructuras, es necesario contar con el diseño de los estanques considerando la forma y las dimensiones. En general los invernaderos tienen medidas estandarizadas, por lo que en ocasiones se deberán considerar las opciones que brindan las empresas.

Dependiendo de la latitud y del periodo de cultivo, la temperatura del agua puede rebasar los 35°C. El invernadero deberá tener opciones para permitir el paso del aire en caso necesario (Figura 6). Por otro lado, en algunas zonas costeras la velocidad del viento puede ser elevada, por lo que los invernaderos deberán resistir su fuerza. Las estaciones meteorológicas ubicadas en las zonas cercanas a donde se desarrollará el proyecto pueden proporcionar la información necesaria. Esta será de gran utilidad para definir las características idóneas de los invernaderos.



Figura 6. Invernadero de una granja de biofloc con estructuras que permiten el paso del viento. Foto: Anselmo Miranda-Baeza.

Tanques de cultivo

En los sistemas de cultivo BFT los tanques deben estar recubiertos, el material puede ser concreto, aunque es costoso. El material más utilizado es el polietileno de alta densidad (liner), existen empresas que se especializan en su venta y colocación. En las granjas comerciales, se pueden utilizar tanques pequeños (120 m^3; Figura 7); sin embargo, éstos se recomiendan solo para las fases de maternización, debido a que el monitoreo, la alimentación y el mantenimiento es individual. Una gran cantidad de tanques con pequeño volumen requiere más personal para su operación.

Los tanques para el crecimiento final en general tienen entre 1000 y 2000 m^2 (Figura 8), las formas son cuadradas o rectangulares. La profundidad varía, aunque deberá tener como mínimo 1,2 m con una columna de agua de 1,0 m. En algunas granjas la profundidad puede llegar a 1,8 m.



Figura 7. Tanque circular de geomembrana de 12 m de diámetro. Foto: Anselmo Miranda-



Baeza.**Figura 8.** Estanque rectangular de 2000 m^3 para el cultivo de camarón en biofloc. Foto: Anselmo Miranda-Baeza.

Sistema de aireación.

Los sistemas de aireación son fundamentales para mantener los niveles de oxígeno de preferencia en promedios de 4 a 5 mg/L. Adicionalmente, los bioflóculos deberán mantenerse suspendidos, un sistema de aireación deficiente puede ocasionar niveles bajos de oxígeno y acumulación de sedimentos en el fondo de los estanques, creando zonas anóxicas. Dependiendo de la biomasa final de cosecha, será la capacidad de aireación. En general se sugiere que para niveles de biomasa de 3 kg/m^2 en adelante, la aireación sea superior a 100 HP/Ha, pudiendo llegar 150-200 HP/Ha para cargas de hasta 5 kg/m^2.

Para suministrar aire se utilizan sopladores, que lo canalizan a través de tubería de PVC y mangueras, hasta llegar a las parrillas aireadoras de las líneas de aireación. La capacidad de los sopladores regenerativos, comúnmente varía entre 5 y 20 HP. Aunque recientemente se comienzan a utilizar sopladores de tipo lobular, los cuales al parecer tienen mayor eficiencia pero su costo es más elevado. La manguera aireadora es comúnmente usada en las granjas de biofloc ya que produce grandes cantidades de micro-burbujas, las cuales incrementan la eficiencia en la transferencia del oxígeno y mantienen las partículas en suspensión.

Suministro de energía

En los sistemas hiper-intensivos el suministro de energía debe ser constante (24 horas). Se sugiere que las granjas cuenten con suministro de energía de la red eléctrica, debido a que ésta tiene menor costo, en comparación con los generadores de combustión. Dependiendo de la fuente de energía, los costos de producción por éste concepto pueden variar entre el 15 y el 30%.

Adicionalmente es indispensable contar con un sistema de respaldo, si el suministro depende de generadores de combustión interna (Figura 9), se debe contar con uno adicional. Si el suministro es de la red eléctrica, se deberá tener uno de combustión interna. En caso de emergencia, el generador de respaldo deberá activarse en menos de 20 min, de lo contrario es posible que se comiencen a presentar eventos de mortalidad. La gravedad de éstos dependerá de la carga de biomasa, de la temperatura del agua y de la concentración de sólidos suspendidos.



Figura 9. Generadores de combustión interna para suministrar aireación en una granja de biofloc. Foto: Anselmo Miranda-Baeza.

Laboratorio

Otra área de gran importancia en una granja de biofloc es el laboratorio. Debido a la gran cantidad de variables que deben ser monitoreadas se deberán tener al menos dos secciones, una para medir las variables de la calidad del agua (oxígeno disuelto, salinidad, pH, alcalinidad, amonio, nitritos y nitratos), así como para realizar análisis en fresco del camarón. La otra área deberá ser utilizada para el monitoreo de las comunidades bacterianas (bacterias heterótrofas y bacterias tipo *Vibrio*).

Se sugiere que el personal de laboratorio cuente con experiencia en el uso del equipo y de las diferentes técnicas. En el mercado existen espectrofotómetros y fotómetros que cuentan con técnicas relativamente sencillas y con precisión aceptable.

Para el monitoreo de bacterias, es necesario conocer las técnicas básicas de microbiología, que consisten en preparación de medios de cultivo, cálculo de diluciones y siembra en placa. La información generada permitirá tomar decisiones relacionadas con los ajustes en la relación C: N, inclusión de consorcios de bacterias benéficas (probióticos), así como la presencia de posibles patógenos en el agua y en los camarones.

El análisis en fresco deberá realizarse periódicamente y puede brindar información importante acerca del estado de salud de los camarones. En general se analizan: a) las branquias para determinar epibiontes, hongos bacterias, melanización y deformidades; b) hepatopáncreas, se analiza la coloración, hipertrofia, atrofia, presencia de gregarinas, bacterias y cantidad de lípidos; c) intestino para evaluar contenido fecal, presencia de parásitos y tipo de alimento consumido, d) el tejido para evaluar la coloración, la consistencia y presencia de parásitos; e) el cefalotórax para observar cuerpos de inclusión.

Se pueden realizar cultivos en placas con medios específicos para determinar la presencia de bacterias patógenas, las muestras se toman del hepatopáncreas en organismos juveniles y adultos; mientras que en ejemplares pequeños se hace un macerado de los organismos completos. Existen varios manuales técnicos, que pueden orientar a los técnicos para realizar este proceso, entre ellos el de Morales-Covarrubias (2010).

Aunque la presencia de bacterias benéficas en el interior de los sistemas de biofloc inhibe la proliferación de patógenos, es posible que se presenten enfermedades. Cuando se presente algún tipo de síntoma, que indique la presencia de una enfermedad se sugiere solicitar asesoría especializada. En algunos casos será necesario él envió periódico de muestras a algún laboratorio de patología de camarón.

Área preparación de probióticos

Existen algunas publicaciones que han demostrado que la adición de probióticos en el agua no tiene un efecto significativo sobre la calidad del agua, ni sobre los parámetros

productivos. Aunque otros estudios indican que adicionados en el alimento, éstos tienen un efecto positivo sobre la flora intestinal y mejoran la respuesta productiva (Vargas-Albores *et al*., 2017). Se sugiere que antes de su uso, se realice una evaluación de las diferentes marcas que existen en el mercado y sobre todo, que en la medida de lo posible efectuar pruebas piloto en las granjas. En caso de que se realice éste proceso, es necesario tener un espacio y recipientes adecuados, en general se utilizan contenedores de 1 a 10 m^3, con agua estéril y medios nutritivos para el desarrollo de las bacterias (Figura 10).



Figura 10. Área para la bioaumentación de probióticos en una granja comercial de biofloc. Foto: Anselmo Miranda-Baeza.

El resto de las instalaciones son similares a las que se tienen en las granjas o en los laboratorios tradicionales. El almacén de alimentos, almacén de insumos varios, comedor, etc. se deberán mantener limpios y libres de plagas. Todas las medidas de bioseguridad que se tienen en las granjas tradicionales y en los laboratorios de producción de poslarvas de camarón deben ser observadas en una granja con sistema de biofloc.

Alimentación

El suministro de alimento en las granjas hiper-intensivas de camarón, como en las

tradicionales es de gran importancia. En estos sistemas el costo de producción por este concepto varía entre el 30 y el 40%. Por lo que es importante que los organismos en cultivo complementen su dieta consumiendo bioflóculos, los cuales como ya se mencionó anteriormente son una excelente fuente de aminoácidos, ácidos grasos, vitaminas, inmunoestimulantes y otros promotores de crecimiento. Los factores de conversión alimenticia (FCA) registrados en granjas comerciales varían entre 1,3 y 1,8. La eficiencia en el suministro de alimento es clave para disminuir los costos de producción, así como para mantener buenas tasas de crecimiento.

Relación C: N

La relación carbono: nitrógeno permite controlar el tipo de biofloc en el sistema de cultivo. Se han definido tres tipos principales: el autótrofo (dominado por microalgas), el mixotrófico (con presencia de microalgas y bacterias heterótrofas) y el heterótrofo (dominancia de bacterias heterótrofas). Una forma de controlar el tipo de biofloc es la adición de C o N inorgánicos. Si se desea un biofloc de tipo autotrófico se agrega N (relación C: N; 6:1-8:1); si se desea de tipo mixotrófico (relación C: N; 9:1-15:1) se puede lograr con adición moderada o sin adición de fuente de C; y si se desea heterotrófico se incrementa la adición de fuente de C externa (relación C: N; 16:1-20:1).

Para determinar la relación C: N, primero se debe considerar el contenido de proteína en el alimento que se está suministrando. En su manual, Avnimelech (2009) indica que de manera práctica el contenido de C en el alimento es aproximadamente del 50%, posteriormente se estima el contenido de N contenido en la proteína. Existen varias publicaciones que explican de manera sencilla la estimación de ésta relación (Avnimelech, 2009; Emerenciano *et al*., 2017).

En la práctica se utilizan relaciones C: N moderadas que pueden estar entre 9:1 y 15:1 éstas promueven un biofloc mixotrófico y se ha encontrado que mantienen los sistemas con cierta estabilidad, adicionalmente, no demandan cantidades elevadas de fuentes de carbono externas, las cuales representan un gasto adicional en la producción.

Dentro de las fuentes de C externas más utilizadas se encuentra la melaza, aunque pueden usarse harinas vegetales con alto contenido de C, como la harina de maíz, harina de trigo, etc. En caso de utilizar una fuente alterna a la melaza, se sugiere realizar algunas pruebas comparativas y elegir aquella que resulte más accesible y de menor costo.

4. BIBLIOGRAFIA

● Aguilera-Rivera D., Prieto-Davó A., Escalante K., Chávez C., Cuzone G. y Gaxiola G. (2014). Probiotic effect of FLOC on *Vibrios* in the pacific white shrimp *Litopenaeus Vannamei*. Aquaculture 424-425: 215-219.

● Avnimelech, Y. (2009). Biofloc Tecnology- A Practical Guide Book. The World Acuaculture Society, Baton Rouge, Lousiana, United States, 181 p.

● Azim, M.E. y Little, D.C. (2008). The biofloc technology (BFT) in indoors tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquaculture 283: 29-35.

● Ballester, E.L.C.; Abreu, P.C.; Cavalli, R.O.; Emerenciano, M.; Abreu, L. y Wasielesky, W. (2010). Effect of practical diets with different protein levels on the performance of *Farfantepenaeus paulensis* juveniles nursed in a zero exchange suspended microbial floc intensive system. Aquaculture nutrition 16: 163-172.

● Boyd, C. E. (1989). Water quality management and aeration in shrimp farming. Fisheries and allied aquacultures Department series No. 2, Alabama Exp. Station, Auburn University, AL. February 1989, 83pp.

● Burford, M.A., Thompson, P.J., McIntosh, R.P., Bauman, R.H., y Pearson, D.C. (2004). The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero-exchange system. Aquaculture 232 (1): 525-537.

● Crab, R., Chielens, B., Wille, M., Bossier, P., y Verstraete, W. (2010). The effect of different carbon sources on the nutritional value of bioflocs, a feed for *Macrobrachium rosenbergii* postlarvae. Aquaculture Research, 41 (4): 559-567.

● Decamp O., Conquest L., Cody J., Forster I. y Tacon A.G. (2007). Effect of shrimp stocking density on size-fractionated phytoplankton and ecological groups of ciliated protozoa within zero-water exchange shrimp culture systems. Journal of the World Aquaculture Society 38: 395-406.

● Emerenciano, M.; Ballester, E.L.C.; Cavalli, R.O. y Wasielesky, W. (2011). Biofloc technology application as a food source in a limited water exchange nursery system for pink shrimp *Farfantepenaeus brasilensis* (Latreille, 1817). Aquaculture research 43 (3): 447-457.

● Emereciano, M., Cuzon G., Mascaró Miquelajauregui M., Arévalo A., y Gaxiola G. (2012). Effect of short-term fresh food supplementation on reproductive performance, biochemical composition, and fatty acid profile of *Litopenaeus vannamei* (Boone) reared under biofloc conditions. Aquacult Int. 21 (5): 987-1007.

● Emerenciano C.M., Martínez-Córdova L.R., Martínez-Porchas M. y Miranda-Baeza A. (2017). Biofloc technology (BFT): A tool for water quality management in aquaculture. In: Hlanganani Tutu (Ed.), Water Quality. INTECH. 91-109. ISBN 978-953-51-2881-6;

http://dx.doi.org/10.5772/66416.

● Espinoza-Barrón L. (2016). Efecto del uso de probióticos sobre las comunidades de bacterias heterótrofas y tipo Vibrio, compuestos nitrogenados y parámetros productivos de Litopenaeus vannamei en un sistema hiper intensivo durante la fase de maternización. Tesis de Maestría en Sistemas de Producción Biosustentables. Universidad Estatal de Sonora, Navojoa, Sonora. Navojoa, Sonora, México, 46 p.

● Ekasari, J., Crab, R. y Verstaete, W. (2010). Primary nutritional content of bio-flocs cultured with different organic carbon sources and salinity. HAYATI Journal of Biosciences 17 (3): 125-133.

● Gastesoupe, F. J. (1999). The use of probiotic in aquaculture. Aquaculture. 180: 147-165.

● Gerardi M. (2002). Nitrification and denitrification in the activated sludge process. Wiley-interscience. Nueva York. EstadosUnidos.

● Harvennar, R. y Huis y In´t Veld. J.H.J. (1992). Probiotics: A general review. In Lactic Acid bacteria in Health and Disease. Vol. 1, ed. By Wood. J B. J. Elsevier applied Science Publishers Amsterdam.

● Huerta-Aldaz N., López-Torres M.A., Valdez-Holguín J.E. y Barraza-Guardado R.H. (2012). Evaluation of culturable nitrifying ammonium-oxidizing and metabolically active bacteria in shrimp farm effluents of Kino Bay, Sonora, México. Archives Biological Science Belgrade, 64: 895-909.

● Huerta-Rábago J.A. (2014). Evaluación poblacional de bacterias heterótrofas, oxidantes de amonio y tipo Vibrio, en un cultivo intensivo de tilapia con mínimo recambio de agua utilizando dos sustratos de fijación. Tesis Licenciado en Acuacultura. Universidad Estatal de Sonora, Navojoa, Sonora, México, 47 p.

● Huerta-Rábago J. A. (2017). Evaluación de la diversidad de bacterias presentes en bioflóculos provenientes de cultivos hiper-intensivos de camarón a través de secuenciación masiva del gen 16S rRNA. Tesis de Maestría en Sistemas de Producción Biosustentables. Universidad Estatal de Sonora, Navojoa, Sonora. Navojoa, Sonora, México, 65 p.

● López-Elías J.A., A. Moreno-Arias, A. Miranda-Baeza, L.R. Martínez-Córdova, M. El. Rivas-Vega y E. Márquez-Ríos. (2015). Proximate Composition of Bioflocs in Culture Systems Containing Hybrid Red Tilapia Fed Diets with Varying Levels of Vegetable Meal Inclusion, North American Journal of Aquaculture, 77 (1): 102-109.

● Kuhn, D. D., Lawrence, A. L., Boardman, G. D., Patnaik, S., Marsh, L. y Flick, G. J. (2010). Evaluation of two types of bioflocs derived from biological treatment of fish effluent as feed ingredients for Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture, 303 (1): 28-33.

● Loureiro, C.K., Wasielesky, W. y Abreu, P.C. (2012). The use of protozoan, rotifers and nematodes as live food for shrimp raised in BFT system. Atlantica, Rio Grande, 34 (1): 5-12.

● Martínez-Córdova, L. R., Emerenciano, M., Miranda-Baeza, A. y Martínez-Porchas, M. (2015). Microbial-based systems for aquaculture of fish and shrimp: an updated review. Reviews in Aquaculture, 7 (2): 131-148.

● McGraw, W. J. (2002). Utilization of heterotrophic and autotrophic bacteria in aquaculture. Global Aquaculture Advocate, 5 (6): 82-83.

● Megahed, M.E. (2010). The effect of microbial biofloc on water quality, survival and growth of the green tiger shrimp (Penaeus semisulcatus) fed with different crude protein levels. J. Arab. Aquacult. Soc., 5: 119-142.

● Miranda-Baeza, A., Mariscal-López, M. D. L. A., López-Elías, J. A., Rivas-Vega, M. E., Emerenciano, M., Sánchez-Romero, A., y Esquer-Méndez, J. L. (2017). Effect of inoculation of the cyanobacteria Oscillatoria sp. on tilapia biofloc culture. Aquaculture Research 2017: 1-10.

● Monroy-Dosta, M. D. C., Lara-Andrade, D., Castro-Mejía, J., Castro-Mejía, G., y Coelho-Emerenciano, M. G. (2013). Composición y abundancia de comunidades microbianas asociadas al biofloc en un cultivo de tilapia. Revista de biología marina y oceanografía, 48 (3): 511-520.

● Morales-Covarrubias, M.S. (2010). Enfermedades del camarón: detección mediante análisis en fresco e histopatología. Trillas, México.

● Moreno-Arias, A.; López-Elías J.A., Miranda-Baeza A., Rivas-Vega M.E; Martínez-Córdova L.R. y Ramírez-Suárez J.C. (2017). Replacement of fishmeal by vegetable meal mix in the diets of Litopenaeus vannamei reared in low salinity biofloc system: Effect on digestive enzymatic activity. Aquaculture Nutrition, 23: 236-245.

● Moreno-Arias A., López-Elías J.A., Martínez-Córdova L.R., Ramírez-Suárez J.C., Carvallo-Ruiz M.G., García-Sánchez G., Lugo-Sánchez M.E. y Miranda-Baeza A. (2018). Effect of fishmeal replacement with a vegetable protein mixture on the amino acid and fatty acid profiles of diets, biofloc and shrimp cultured in BFT system.

Aquaculture 483 (20): 53-62.

● Otoshi, C. A., Tang, L. R., Moss, D. R., Arce, S. M., Holl, C. M., y Moss, S. (2009). Performance of Pacific white shrimp, *Penaeus (Litopenaeus) vannamei*, cultured in biosecure, super-intensive, recirculating aquaculture systems. Browdy, CL; Jory DE (Eds). In: The rising tide-proceedings of the special session on sustainable shrimp farming. Baton Rouge: World Aquaculture Society.

● Poleo, G., Aranbarrio, J. V., Mendoza, L., y Romero, O. (2011). High-density rearing of red-bellied pacu in two closed systems. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 46 (4): 429-437.

● Porchas-Cornejo, M. A., Martínez-Porchas, M., Vargas-Albores, F., Gollas-Galvan, T., Martínez-Córdova, L. R., Vazquez-Euan, R., y Peña-Messina, E. (2017). High-resolution detection of bacterial profile of ocean water, before and after being used by shrimp farms. Aquaculture International: 1-11.

● Prosser J.I. (2007). The Ecology of Nitrifying Bacteria. En: Bothe H, Ferguson H.S. y Newton W. (Ed.) Biology of the Nitrogen Cycle. Elsevier, Netherlands. pp. 223-244.

● Ray, A. J., Dillon, K. S., y Lotz, J. M. (2011). Water quality dynamics and shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production in intensive, mesohaline culture systems with two levels of biofloc management. Aquacultural Engineering, 45 (3): 127-136.

● Sampaio, L. A., Tesser, M. B., y Wasielesky, W. (2010). Avanços da maricultura na primeira década do século XXI: piscicultura e carcinocultura marinha. R. Bras. Zootec, 39: 102-111.

● Schveitzer, R., Arantes, R., Costódio, P. F. S., do Espírito Santo, C. M., Arana, L. V., Seiffert, W. Q., y Andreatta, E. R. (2013). Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system operated with no water exchange. Aquacultural engineering, 56: 59-70.

● Sesuk T., Powtongsook S. y Nootong K. (2009). Inorganic nitrogen control in a novel zero-water exchanged aquaculture system integrated with airlift-submerged fibrous nitrifying. Bioresour Technol. 100 (6): 2088-2094

● Thompson F.L., Iida T. y Swings J. (2004). Biodiversity of *Vibrios*. Microbiology and Molecular Biology Reviews 68: 403–431.

● Timmons M.B., Ebeling J.M., Wheaton F.W., Summerlefti S.T. y Vinci B.J. (2002). Recirculating aquaculture systems, 2nd edition. pp 205-206.

● Vargas-Albores, F., Porchas-Cornejo, M. A., Martínez-Porchas, M., Villalpando-Canchola, E., Gollas-Galván, T., y Martínez-Córdova, L. R. (2017). Bacterial biota of shrimp intestine is significantly modified by the use of a probiotic mixture: a high througHPut sequencing approach. Helgoland Marine Research, 71 (1): 5-13.

● Viau, V.E., Ostera, J.M., Tolivia, A., Ballester, E.L.C., Abreu, P.C. y Rodríguez, E.M. (2012). Contribution of biofilm to water quality, survival and growth of juveniles of the freshwater crayfish *Cherax quadricarinatus* (Decapoda, Parastacidae). Aquaculture, 324, 70-78.

● Vieira, R. D. F., Lima, A. D. S., de Menezes, F. G. R., Costa, R. A., de Sousa, O. V., y Barreto, N. S. E. (2009). Vibrioses on farmed shrimps. Arquivos de Ciências do Mar (Brazil).

● Wasielesky W., Atwood H., Stokes A. y Browdy C. (2006). Effect of natural production in a zero exchange suspended microbial floc based super-intensive culture system for white shrimp *Litopenaeus vannamei.* Aquaculture, 258: 396-403.

● Xu, W. J.y Pan, L. Q. (2012). Effects of bioflocs on growth performance, digestive enzyme activity and body composition of juvenile *Litopenaeus vannamei* in zero-water exchange tanks manipulating C/N ratio in feed. Aquaculture, 356: 147-152.

● Xu, W. J., Pan, L. Q., Sun, X. H. y Huang, J. (2013). Effects of bioflocs on water quality, and survival, growth and digestive enzyme activities of *Litopenaeus vannamei* (Boone) in zero-water exchange culture tanks. Aquacult. Res., 44: 1093-1102.

● Zhou, Q. C., Li, C. C., Liu, C. W., Chi, S. Y. y Yang, Q. H. (2007). Effects of dietary lipid sources on growth and fatty acid composition of juvenile shrimp, *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture Nutrition, 13 (3): 222-229.

CAPÍTULO V
CULTIVO INTENSIVO DE TILAPIA CON TECNOLOGÍA BIOFLOC -BFT

Jorge Alejandro Medina Motta
Zootecnista
Granja El Nogal
E-mail: medinamotta@gmail.com



Engorde de Tilapia roja *Oreochromis* sp. en un sistema intensivo con tecnología Biofloc. (Granja El Nogal, Espinal-Tolima. Foto: Alejandro Medina

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción acuícola tradicionales, son sistemas que en su mayoría dependen de grandes extensiones de tierra para su desarrollo y sobre todo de volúmenes hídricos muy importantes; en general cuando hablamos de sistemas tradicionales de producción acuícola, hablamos de grandes excavaciones, remoción

de materiales y por ende daños en las estructuras naturales del suelo, que producen un deterioro importante del mismo y que significa un problema importante para el equilibrio natural de los ecosistemas. Si se quisiera cambiar la actividad de producción a otra como la agrícola, por otro lado tenemos en este tipo de explotaciones un gasto de agua muy importante, ya que debemos garantizar un recambio permanente que nos garantice un tránsito de desechos orgánicos y una mejora en la calidad del agua para los organismos que estamos produciendo, generando gran cantidad de materiales disueltos en su mayoría nitrogenados que contaminan las fuentes hídricas naturales y por ende rompen el balance de los cuerpos de agua y sus individuos, estos tipos de sistemas de producción en particular, presentan además muchas limitaciones con respecto a los volúmenes de producción por unidad de área, al tipo de alimentos requeridos y su digestibilidad y a la topografía donde estos pueden ser desarrollados, lo que a su vez limita en gran medida la amplia difusión de los mismos.

Los sistemas de producción agrícolas y pecuarios en la actualidad enfrentan varios desafíos concernientes a la intensificación a la cual son sometidos y al impacto negativo que esta intensificación conlleva. Actualmente el planeta debe luchar con la superpoblación que según datos actuales ya sobrepasa los 7549 millones de habitantes (FAO, 2017), esta explosión demográfica desmedida, ha obligado a la agricultura y a la producción pecuaria a producir cada vez más en menor espacio, esta intensificación de la producción trae consigo grandes impactos, muchos de ellos negativos, como la generación de enfermedades en la producción y por ende la utilización de medicamentos que antes no se necesitaban con tanta frecuencia y que a su tiempo podrían acarrear muchos problemas para la salud humana y para el medio ambiente.

Actualmente se han venido desarrollando sistemas de producción mucho más eficientes en el uso del espacio y los recursos utilizados, aumentando considerablemente los volúmenes de producción por unidad de área y disminuyendo la utilización del espacio requerido y de los recursos importantes como el agua y el suelo generando una menor presión de la producción sobre los recursos naturales, son los llamados sistemas sostenibles intensivos de producción acuícola, estos sistemas presentan varios inconvenientes provenientes de la misma naturaleza de su intensificación, como la acumulación de residuos orgánicos y de compuestos dañinos para el sistema y los mismos animales, es así como se desarrolló la tecnología de producción acuícola con flóculos vivos o técnica de cultivo en Biofloc (BFT), la cual fue desarrollada para resolver los problemas de calidad de agua en la producción acuícola.

Uno de los problemas más grandes a resolver en la producción acuícola intensiva es el deterioro en la calidad del agua por acumulación de materia orgánica, restos de alimentos concentrados, acumulación de compuestos inorgánicos tóxicos y gases de carácter fermentativo, lo que genera cambios en la físico - química del agua, en la microbiología de esta y en la producción de alimento natural. La tecnología de producción en Biofloc (BFT), fue implantada a la acuicultura y desarrollada para

resolver los problemas de calidad de agua dentro de la producción intensiva de peces y crustaceos, esta tecnología se basa en el principio del reciclaje natural de la materia orgánica y la posterior transformación de la misma en flóculos vivos, compuestos de bacterias, fitoplancton, zooplancton y otros microorganismos, cada uno con una función precisa y específica dentro de los ciclos biológicos naturales como el del nitrógeno y el fósforo, ciclos que son muy importantes dentro de la transformación y eliminación de nutrientes y residuos, y la producción de biomasa microbiana que funciona a su vez como alimento vivo para los organismos del cultivo, reduciendo así en un buen porcentaje los costos de alimentación y el gasto innecesario de aguas para recambio.

2. REVISIÓN HISTÓRICA

Diversas publicaciones remontan los orígenes de la tecnología biofloc a comienzos de los años 70's en donde Ifremer-COP (Instituto francés de Investigación para la exploración del mar, Centro Oceánico del Pacífico) utilizó diferentes especies de camarones (*Penaeus monodon*, *Fenneropenaeus merguiensis*, *Litopenaeus vannamei* y *Litopenaeus stylirostris)* en un sistema de cultivo usando un biodigestor externo aplicardo a un cultivo de camarón experimental. En el mismo periodo de tiempo, Ralston Purina desarrolló un sistema basado en la utilización de bacterias nitrificantes, manteniendo camarones en un cultivo con total oscuridad; en conexión con Aquacop, cada uno de estos sistemas fue aplicado en cultivos de camarones (*L*. *stylirostris* y *L. vannamei*) en el río cristal (Estados Unidos) y en Tahití dejando conocer los beneficios de este sistema de biofloc en el cultivo de camarón comercial. En 1980 un programa científico francés "Ecotron" fue iniciado por Ifremer-COP, para entender mejor cada sistema, muchos estudios fueron montados para comprender como la tecnología biofloc podía aprovecharse y para explicar cómo podían funcionar las interrelaciones existentes entre los componentes del agua y las bacterias, así como la fisiología nutricional del camarón. También en los 80's y comienzos de los años 90's, Israel y Estados Unidos en el "centro de maricultura Waddell" comenzaron investigaciones en policultivos con la tecnología biofloc (BFT) de tilapia y camarón blanco, todo esto con el fin de aplicarlos en lugares con limitaciones de agua y tierras costosas para promover desarrollos comerciales. En 1988 la granja Sopomer en Tahití (polinesia francesa) usando tanques de concreto de 1000 m^2 y con cambios reducidos de agua, produjo el récord mundial en producción (20-25 tons/ha/año) de camarón en dos cosechas. Por otro lado, la granja de acuicultura de Belice o BAL (localizada en Belice, Centro América) es probablemente el caso más famoso de acuicultura con tecnología biofloc (BFT) en el mundo, con una aplicación comercial, produjo entre 11 y 26 tons/ha/ciclo de camarón. Actualmente, se conoce de muchos emprendimientos comerciales derivados de la experiencia de BAL, en adición a esto muchos centros de investigación y universidades trabajan en aplicaciones de (BFT) en intensificación, manejo del crecimiento, nutrición, reproducción, ecología microbiana, biotecnología y economía (Emerenciano *et al*., 2012).

Steven Serfling fue el pionero del uso comercial de la tecnología biofloc aplicada a la producción de tilapia en *"solar Aquafarms"* durante los años 1986 a 1994, esta tecnología fue llamada ODAS (sistema de sopa de algas detríticas orgánicas) y de ella se desprendieron diversas publicaciones e investigaciones; entre los años 1992 y 1994 el grupo *Technion* en Israel concentró sus esfuerzos en el desarrollo de la producción intensiva de Tilapia (Avnimelech *et al*, 1994). Actualmente centros de difusión e investigación como la BTWG ***(Biofloc Technology Working Group)*** y la WAS ***(World Aquaculture Society)*** trabajan conjuntamente para difundir esta actividad y para hacer reportes técnicos de desarrollos comerciales en acuicultura con Tecnología Biofloc (BFT), para que los interesados puedan obtener de primera mano información técnica y reportes detallados de los últimos avances en producción intensiva de camarón y tilapia con esta tecnología (Avnimelech, 2015).

3. FUNDAMENTACIÓN TÉCNICA

El porqué de los sistemas Biofloc

En la acuicultura actual, los problemas más grandes son la gestión ambiental dentro de los sistemas de producción, el manejo y control de desechos orgánicos, el impacto ambiental generado por la contaminación de fuentes hídricas y el impacto negativo generado en suelos, organismos vegetales y especies nativas. Es por eso que el desarrollo de los sistemas biofloc ha facilitado una mejor gestión de los residuos de cultivo, permitiendo producir gran cantidad de proteína de origen animal en un espacio reducido, mitigando estos problemas, mejorando el control ambiental y disminuyendo al máximo los impactos negativos que la producción acuícola genera al planeta.

En muchos lugares donde el agua es escasa o las tierras son costosas, la acuicultura intensiva debe ser practicada y cumple una función muy importante a la hora de obtener una producción rentable. En este sistema existen fuertes incentivos económicos para el negocio cuando se busca ser más eficientes con los insumos de producción, especialmente los más costosos como la alimentación y los más limitantes como el agua o la tierra. La cría en alta densidad de peces por lo general requiere cierta infraestructura para el tratamiento de residuos. En su esencia, el biofloc es un sistema de tratamiento de residuos (Hargreaves, 2013).

En la acuicultura, el sistema "biofloc" actúa como una trampa para la retención de nutrientes en el estanque, disminuyendo en cierta medida los costos de mantenimiento, dado que sirve como un complemento alimenticio, mejorando las tasas de crecimiento, conversión y aprovechamiento de los alimentos comerciales (Azim y Little, 2008); asimismo, los sistemas biofloc utilizan un enfoque contra-intuitivo que consiste en permitir o alentar a los sólidos y la comunidad microbiana asociada a acumularse en el agua. Mientras se mantenga constante el movimiento y la aireación, para garantizar la tenencia de un floc activo y en suspensión, la calidad del agua puede ser controlada. La gestión de los sistemas de biofloc no es una actividad sencilla y se requiere de cierto grado de sofisticación técnica para que el sistema sea completamente funcional

y más productivo (Hargreaves, 2013).

Que es el Biofloc

El Termino “biofloc” o flóculo vivo en español, se aplica a un compuesto suspendido en la columna de agua constituido por un 60 a 70% de materia orgánica, la cual incluye una mezcla heterogénea de microrganismos (hongos, levaduras, bacterias, protozoarios y rotíferos) y de un 30 a 40% de materia inorgánica como coloides, polímeros orgánicos, cationes y células muertas. Pueden alcanzar un tamaño hasta de 100 µm, son de forma irregular, altamente porosos y permeables a los fluidos (Chu y Lee, 2004).

Los bioflocs o flóculos vivos, son agregados mucosos en suspensión constituidos por fitoplancton, en su mayoría fotosintéticos (microalgas, cianobacterias, flagelados heterótrofos y otros grupos sin clorofila), bacterias (organismos descomponedores), levaduras, hongos, zooplancton (organismos consumidores menores como rotíferos, cladóceros, copépodos y ostrácodos principalmente), protozoarios, nemátodos y varios tipos de materia orgánica particulada, tales como las heces fecales, alimento no consumido y animales e insectos muertos. Cada flóculo se mantiene unido en una matriz suelta por la mucosidad que es secretada por las bacterias, obligado por los microorganismos filamentosos, o mantenido por atracción electrostática. Algunos bioflocs grandes pueden ser observados a simple vista, aunque la mayoría son microscópicos, los flóculos en un sistema típico de biofloc con aguas verdes pueden medir alrededor de 50 a 200 micrones (Hargreaves, 2013).

Para qué sirve el biofloc.

Los biofloc proporcionan dos servicios: el tratamiento de residuos críticos de la alimentación y el suministro de nutrición por consumo directo de flóculos. Los sistemas biofloc pueden operar con recambios bajos de agua en tasas de (0,5 a 1%/día). Esta residencia de agua a largo plazo permite el desarrollo de una densa actividad del biofloc para mejorar el tratamiento de los residuos orgánicos, materia y nutrientes. En sistemas biofloc, el intercambio o recambio para gestionar la calidad del agua se reduce al mínimo, utilizando agua previamente desinfectada y los procesos de tratamiento de residuos internos se enfatizan y mejoran.

Investigaciones en camarones y tilapias indican que el agua madurada contiene factores que potencian el crecimiento, como flora microbiana y proteínas animales, que aumentan la producción. Los flóculos son un recurso suplementario alimenticio que puede ser utilizado por camarones o tilapias entre comidas de dietas granuladas. Un beneficio potencial de los sistemas biofloc, es la capacidad de reciclar los nutrientes residuales a través de la proteína microbiana en peces o camarones. Alrededor del 20 al 30% del nitrógeno añadido a la alimentación es asimilado por los peces, lo que implica que 70 a 80% del nitrógeno agregado como alimento es liberado al ambiente de cultivo como residuos. En los sistemas de biofloc parte de ese nitrógeno es incorporado en las células bacterianas que son un componente principal del biofloc

y el consumo de esta proteína microbiana, también contribuye al crecimiento de los peces. Varios trabajos con camarones y tilapias sugieren que, para cada unidad de crecimiento derivado de alimentación, un adicional de 0,25 a 0,50 unidades se derivan de proteína microbiana en los sistemas de biofloc, es decir que de 20 a 30% del crecimiento de camarones o tilapias se origina a partir del consumo y la digestión de la proteína microbiana, beneficio reflejado en una mejor conversión de alimento que es uno de los mejores y más importantes predictores de producción (Hargreaves, 2013).

Ventajas de los sistemas con tecnología Biofloc

El sistema biofloc garantiza muchas ventajas frente a los sistemas de piscicultura tradicionales dentro de las cuales están:

- Uso eficiente y mínimo del suelo

- Uso mínimo y eficiente del agua (recambio de agua casi inexistente)

- Reducción del cambio de agua como una excelente estrategia para mejorar la bioseguridad en el cultivo

- Permite mejorar el control ambiental sobre la producción

- Permite ser más eficiente con el uso de los insumos de producción especialmente con los más costosos como el alimento concentrado, el cual se reduce sustancialmente debido a que los flóculos son también elementos de nutrición y consumo con alto valor proteico

- Mejora la conversión alimenticia

- Los sistemas biofloc son sistemas de tratamiento de residuos y desechos, amigables con el medio ambiente

- El sistema biofloc previene la introducción de enfermedades a la producción por competencia directa de poblaciones bacterianas, por existir competencia poblacional entre bacterias Gram negativas y Gram positivas, mejorando la bioseguridad del sistema

- El biofloc es el método más eficiente para controlar la calidad del agua y garantizar las óptimas condiciones para el buen desarrollo y crecimiento de los peces

- Se logra con este sistema una menor sensibilidad a las fluctuaciones de luz (tiempo) (fotoperiodo)

Desventajas de los sistemas con tecnología Biofloc
Dentro de las desventajas asociadas al sistema, podemos mencionar:

● Aumenta los costos de montaje

● Requiere un tiempo prudente de maduración y puesta en funcionamiento

● Aumenta los costos de mantenimiento, dado que es necesario consumir energía eléctrica para mover equipos de aireación y/o oxigenación y para mantener el biofloc activo y en suspensión

● Uso inevitable de equipos de respaldo eléctrico como plantas o generadores de energía eléctrica

● Reduce sustancialmente el tiempo de repuesta en caso de emergencia

● Aumenta las tasas de oxigenación, cerca de un 60% del oxígeno es requerido por el biofloc para realizar sus ciclos biológicos normales

● Requiere adición alcalina constante

● Requiere control y manejo de la cantidad de radiación solar que llega directamente al estanque

● Aumenta la inestabilidad en los procesos de nitrificación

● Requiere de monitoreo constante del sistema

● Aumenta el potencial de polución por acumulación de nitratos

● Requiere conocimiento técnico especializado obligatorio y entendimiento de los mecanismos biológicos y bioquímicos de funcionamiento del sistema

Especies cultivables en sistemas biofloc
Un factor fundamental en el diseño de un sistema biofloc es la especie a ser cultivada. Los sistemas biofloc funcionan mejor con especies que son capaces de obtener algún beneficio nutricional del consumo directo de los flóculos. Los sistemas biofloc también son más adecuados para las especies que pueden tolerar altas concentraciones de sólidos en agua y son generalmente tolerantes al agua de mala calidad. Especies como el camarón y la tilapia tienen adaptaciones fisiológicas que les permiten consumir biofloc y digerir proteína microbiana, aprovechando de este modo el biofloc como recurso alimenticio. Casi todos los sistemas biofloc son utilizadas para el cultivo

de camarón, tilapia o carpa (Hargreaves, 2013).

Tipos Básicos de biofloc

Existen diversas clasificaciones según la literatura actual, unas se deben a su color, otras a su tipo de manejo y otras a su contenido microbiológico, pero en resumen todas traducen lo mismo, existen dos tipos básicos de biofloc: uno expuesto a la radiación solar, es decir a cielo abierto y otro sistema de biofloc que se desarrolla bajo techo o con cubiertas, el cual no está expuesto a la radiación solar directa.

El sistema biofloc a cielo abierto involucra la producción natural y activa de fitoplancton, junto con todos los otros componentes microbiológicos intrínsecos en el desarrollo de los flóculos, como hongos, levaduras, bacterias, desechos orgánicos y zooplancton; este contenido de algas y otros materiales vegetales producidos en el estanque, hacen que el agua se torne de color verde debido a los contenidos de clorofila de los mismos y es por esto que a este tipo de biofloc también se le conoce como biofloc en aguas verdes o sistemas biofloc ***"greenwater".***

Por otro lado tenemos los sistemas biofloc que se encuentran en instalaciones cerradas o bajo techo, es decir que no se encuentran expuestos a la radiación solar directa y en donde el control de la calidad del agua se da exclusivamente por procesos bacterianos, estas aguas se caracterizan por su alta demanda de adición tanto calcárea, como carbonatada para su funcionamiento, lo que le provee un color marrón característico, es por esto que se les conoce también como sistemas biofloc en aguas marrón o ***"brownwater".***

Otro tipo de clasificación del biofloc deriva su nombre del contenido microbiológico y de la forma como actúa, biofloc autotrófico casi siempre se encuentra en explotaciones a cielo abierto, involucra mayoritariamente dentro de su actividad microorganismos autotróficos, es decir los que producen su propia energía para procesos biológicos a través de la fotosíntesis, el color de sus aguas es verdoso y las relaciones de carbono vs nitrógeno están por debajo de 10:1; y el biofloc heterotrófico, presente en muchos sistemas bajo techo, involucra dentro de su actividad biológica, principalmente microorganismos heterotróficos dependientes de fuentes externas de carbono, para realizar a cabalidad su actividad biológica, este tipo de biofloc genera aguas de color café o marrón y las relaciones de carbono vs nitrógeno están por encima de 15:1.

Entre estos dos extremos, aparecen clasificaciones intermedias y son las más recomendadas para mantener al sistema de biofloc más estable y en equilibrio a lo largo del día y la noche, lo que redunda en bienestar, mejor crecimiento y desarrollo para los peces. Cuando las relaciones carbono – nitrógeno están en proporción entre 12:1 y 15:1, las aguas del sistema se tornan de un agradable color verde-café, y es allí donde se puede encontrar equilibrio entre los diferentes grupos de microorganismos, tanto autotróficos como heterotróficos que trabajan mancomunadamente, de esta manera el sistema trabaja con la radiación solar de día y por medio de la fotosíntesis,

los organismos autotróficos producen oxígeno y energía, consumen dióxido de carbono, regulan el pH y realizan su actividad metabólica y así mismo, los organismos heterotróficos con los azucares producidos por los autotróficos, más los carbohidratos disueltos en el agua, trabajan realizando los ciclos biológicos del nitrógeno y del fósforo, detoxificando el agua y regulando los parámetros para el buen funcionamiento del sistema, a este se le conoce como biofloc mixotrófico o multitrófico.

Procesos microbiológicos importantes en la acuicultura con tecnología biofloc
En los estanques de producción acuícola dos de los procesos biológicos y bioquímicos más importantes son la **Fotosíntesis y la Respiración,** gracias a estos procesos se producen diversas interacciones entre organismos, de las cuales dependen a su vez gran cantidad de actividades microbianas responsables del equilibrio biológico en el estanque, como son los ciclos del nitrógeno del fósforo y del potasio, responsables de la estabilidad metabólica y fisiológica de todos los organismos mayores del cultivo.

En los sistemas de producción acuícola se puede reproducir, criar, levantar y engordar peces y camarones sin presencia de microorganismos o actividad microbiana alguna, es decir en agua filtrada y/o estéril; sin embargo, en la mayoría de sistemas de producción, gran cantidad de microorganismos están presentes en el estanque en comunidades muy complejas, llevando a cabo actividades simbióticas o mancomunadas que responden a cambios o trabajos específicos en la bioquímica y microbiología del medio acuático, manteniendo su equilibrio; dos de los grupos de organismos más importantes se clasifican por la forma como realizan su actividad y por la forma como interactúan y coexisten con el resto de organismos vivos del estanque o medio acuático, estos son los organismos autotróficos y los heterotróficos.

Organismos autotróficos
Esta comunidad de organismos se encuentra comúnmente en los estanques acuícolas y corresponden a todas las algas y micro algas que están suspendidas en la columna de agua, conocidas como fitoplancton u organismos vegetales acuáticos menores. Además del fitoplancton, a este grupo también pertenecen todas las bacterias ricas en clorofila que realizan procesos de fotosíntesis, mecanismo por el cual obtienen su alimento mediante la transformación de energía solar en energía bioquímica y producen una serie de elementos orgánicos para llevar a cabo su actividad metabólica normal y sirven de alimento y energía a otros grupos de organismos que no pueden producir su propio alimento, como los organismos heterotróficos.

Los organismos autotróficos son de generación lenta o muy lenta, que puede llevar varios días o semanas dependiendo de la cantidad de radiación solar, de la temperatura del agua y de la cantidad de oxígeno disuelto disponible para los procesos biológicos, responden lentamente a cambios en las condiciones del estanque. Los organismos autotróficos se dividen en dos grupos dependiendo de su actividad metabólica y la forma como obtienen su energía y producen su alimento; estos son: los organismos quimioatróficos y los organismos fotoatróficos.

Los organismos quimioatróficos son aquellos quienes obtienen su energía y su alimento a través de procesos complejos de oxidación de componentes químicos como el amonio, el hierro divalente y el manganeso y por procesos de reducción de los sulfuros y del metano (Avnimelech, 2015), mientras que los organismos fotoatróficos obtienen su energía y su alimento por medio de la transformación bioquímica de energía solar, dióxido de carbono (CO_2) y agua mediante el proceso de fotosíntesis en donde la energía lumínica del sol es capturada por la clorofila y otra serie de pigmentos en el interior de la célula, para utilizarla en el proceso de reducción del dióxido de carbono (CO_2) y su transformación en azúcares de enlaces simples (Figura 1).

Fotosíntesis: $6CO_2 + 6H_2O + \text{Energía del sol} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$
Respiración (proceso opuesto): $C_6H_{12}O_6 + 6O_{2\rightarrow z} \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{Energía}$



Figura 1. Dinámica de la fotosíntesis y la respiración en el estanque.

Factores limitantes en la actividad de los organismos fotoatróficos

La radiación solar es el principal factor limitante para la actividad de estos organismos, dado que son organismos fotosintéticos y solo pueden usar la energía del sol en horas del día para transformar energía bioquímica y producir azúcares y durante la noche cuando no hay radiación solar realizan el proceso opuesto a la fotosíntesis, llamado respiración, con la cual compiten por oxígeno libre o disuelto con peces y animales menores o zooplancton (Figuras 2 y 3).

Los animales mayores y menores en el estanque consumen oxígeno el 100% del tiempo y los organismos fotosintéticos solo el 50% del tiempo (horas de la noche) en la mayoría de los casos; sin embargo, se debe prestar atención a los días nublados o días de lluvia con menos horas día y menor cantidad de luz y radiación sobre los cuerpos de agua, como factores que limitan la fotosíntesis.

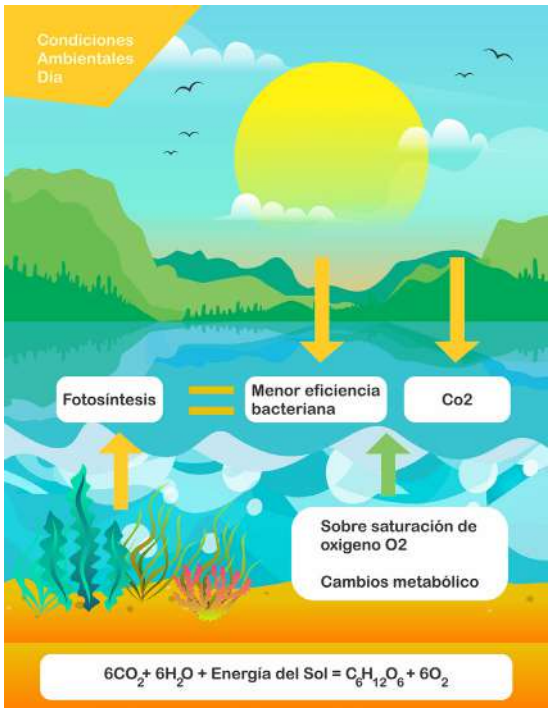


Figura 2. Dinámica de la fotosíntesis

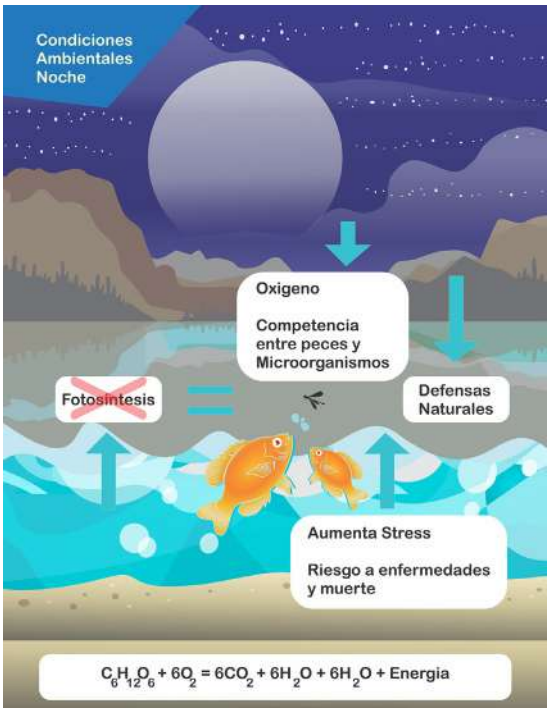


Figura 3. La respiración en el estanque

La turbidez es un factor que se traduce como, la capacidad que tiene un cuerpo de agua de transmitir la luz a través de sí misma, limitada por la cantidad de partículas en suspensión que contiene; esta turbidez se convierte en un limitante que puede influenciar en gran medida la cantidad de fotosíntesis realizada por los organismos fotoatróficos, expresada en cantidad de oxígeno y azúcares resultantes del proceso. La turbidez depende muchas veces de la cantidad de nutrientes disueltos en el agua, por residuos transmitidos por afluentes, alimento no consumido o no digerido, desechos metabólicos o cuerpos de agua con mínimo o nulo recambio de agua.

La disponibilidad de fósforo y/o nitrógeno, es uno de los factores más relevantes en la producción de fitoplancton, el aumento de estos elementos puede provocar un crecimiento desmedido en la producción de fitoplancton, lo que se traduce en un aumento de la productividad primaria del estanque y por ende en una disminución en la cantidad de luz que atraviesa la columna de agua, una disminución en la cantidad y calidad de la fotosíntesis no superficial y por ende una disminución progresiva en la producción de oxígeno disuelto en el día por competencia y un aumento en el consumo de oxígeno en la noche, pudiendo provocar problemas en los procesos bioquímicos

naturales del estanque y mortalidades importantes por bajas en el oxígeno disuelto disponible para los peces.

Organismos heterotróficos

A este grupo pertenecen todos los organismos que no pueden producir su propia energía o nutrientes para su sustento y actividad metabólica y requieren de otras fuentes diferentes para realizar su actividad, bien sea tomando la producción de organismos autótrofos o por fuentes externas como las provenientes de carbohidratos exógenos a su medio. Estos organismos se encuentran en todos los cuerpos de agua en donde se realiza acuicultura, son de generación corta, de vida media y su población en los cuerpos de agua depende de la concentración de alimento y de la adición de fuentes ricas en carbono.

Factores determinantes dentro del sistema biofloc

En los sistemas intensivos con tecnología biofloc, la bioquímica del agua y los factores físicos de la misma, cumplen una función fundamental dentro de la dinámica del equilibrio de nutrientes. Factores como la temperatura, la turbidez, el oxígeno disuelto, la electro conductividad, el pH, la dureza, la alcalinidad y los residuos nitrogenados como el amonio, el nitrito y el nitrato, son quienes controlan el balance, el equilibrio y la dinámica de las funciones biológicas dentro del estanque, así como las funciones metabólicas normales de todos los organismos del sistema.

pH

El pH es un acrónimo para potencial de hidrógeno, e indica la concentración del ion hidronio en una solución. El término pH expresa la intensidad de un ácido, dependiendo de su capacidad de disociación, así como de su concentración. El agua es un electrolito débil, en consecuencia, sólo una pequeña fracción de ésta se disocia en los iones que componen la molécula: H_3O+ (ion ácido) y OH- (ion básico). El pH de un cuerpo de agua es un parámetro para considerar cuando se va a determinar la especiación química y solubilidad de varias substancias orgánicas e inorgánicas en agua. Es un factor abiótico que regula procesos biológicos mediados por enzimas como la fotosíntesis y la respiración; la disponibilidad de nutrientes esenciales que limitan el crecimiento microbiano en muchos ecosistemas; la movilidad de metales pesados tales como cobre que es tóxico para muchos microorganismos; asimismo, afecta o regula la estructura y función de macromoléculas y organelos tales como ácidos nucleicos, proteínas estructurales y sistemas de pared celular y membranas. Variaciones en el pH pueden tener entonces efectos marcados sobre cada uno de los niveles de organización de la materia viva, desde el nivel celular hasta el nivel de ecosistemas.

Alcalinidad

Es la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. Esta representa la suma de las bases que pueden ser tituladas en una muestra de agua. Dado que la alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido

de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas. No obstante, algunas sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos pueden también contribuir a la alcalinidad, de estar también presentes. Estos iones negativos en solución están comúnmente asociados o pareados con iones positivos de calcio, magnesio, potasio, sodio y otros cationes. El bicarbonato constituye la forma química de mayor contribución a la alcalinidad. Dicha especie iónica y el hidróxido, son particularmente importantes cuando hay gran actividad fotosintética de algas o cuando hay descargas industriales en un cuerpo de agua, lo que dificulta el balance de nuestro sistema.

Dureza

Es otra forma de indicar el contenido iónico de un agua, refiriéndolo a la concentración total de iones calcio, magnesio, estroncio y bario, aunque se debe fundamentalmente a los iones calcio y magnesio (Johnson, 1980).

Electro conductividad

Es la cantidad de sales disueltas en el agua, capaces de transferir energía eléctrica en iones. El agua pura se comporta como aislante eléctrico, siendo las sustancias en ella disueltas las que proporcionan al agua la capacidad de conducir la corriente eléctrica. Se determina mediante electrometría con un electrodo conductimétrico y se expresa en micro siemens cm^{-1} (μScm^{-1}).

Turbidez

Es una medida de la dispersión de la luz por el agua como consecuencia de la presencia en ella de materiales suspendidos coloidales y/o particulados. La presencia de materia suspendida en el agua puede indicar un cambio en su calidad y/o la presencia de sustancias inorgánicas finamente divididas o de materiales orgánicos. La turbidez es un factor ambiental importante y afecta al ecosistema dado que la actividad fotosintética depende en gran medida de la penetración de la luz. Las aguas turbias tienen, por supuesto, una actividad fotosintética más débil, lo que afecta a la producción de fitoplancton y también a la dinámica del sistema (Rodier, 1989).

Materia orgánica

La materia orgánica existente en el agua, tanto la que se encuentra disuelta como en forma de partículas, se valora mediante el parámetro carbono orgánico total (TOC, total organic carbon). Los compuestos orgánicos existentes en el medio acuático se pueden clasificar en dos grandes grupos atendiendo a su biodegradabilidad, es decir, a la posibilidad de ser utilizados por microorganismos como fuente de alimentación y para su medida se utilizan los parámetros denominados DQO (Demanda Química de Oxígeno) y DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno),

Demanda química de oxígeno DQO

Es la cantidad de oxígeno consumido por los cuerpos reductores presentes en el agua sin la intervención de los organismos vivos. Efectúa la determinación del contenido total de materia orgánica oxidable, sea biodegradable o no.

Demanda bioquímica de oxígeno DBO

Permite determinar la materia orgánica biodegradable. Es la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer la materia orgánica presente, por la acción bioquímica aerobia. Comúnmente confundida con la demanda biológica de oxigeno o DBO's que es la cantidad de oxigeno requerido por los organismos en un estanque para suplir su metabolismo normal (Catalán Lafuente, 1990).

Oxígeno disuelto

Es necesario para la vida de los peces y otros organismos acuáticos. El oxígeno es moderadamente soluble en agua, dependiendo la solubilidad de la temperatura, la salinidad, la turbulencia del agua y la presión atmosférica: disminuye cuando aumenta la temperatura y la salinidad, y cuando disminuye la presión atmosférica. La solubilidad del oxígeno atmosférico en aguas dulces, a saturación y al nivel del mar, oscila aproximadamente entre 15 mg/L a 0ºC y 8 mg/L a 25ºC (Catalán Lafuente, 1990).

Dinámica de nutrientes en sistemas intensivos con tecnología biofloc

En los sistemas intensivos y súper intensivos de producción acuícola los desechos de producción cumplen un papel crítico, dado que se constituyen como un contaminante del agua y un elemento tóxico para los peces después de determinados niveles, los peces en cultivo son alimentados con dietas comerciales granuladas que contienen niveles altos de proteína, una parte de esta proteína es metabolizada y transformada en músculo y energía, otra parte que no es metabolizada de manera positiva, es excretada por el animal al medio acuático, estos residuos de proteína excretada y todos los demás nutrientes no digeridos son liberados, en forma de metabolitos y materia orgánica que puede acumularse en el estanque de no ser transformada en sustancias móviles. El nitrógeno contenido en estos residuos puede ser excretado como nitrógeno orgánico en forma de heces o como amonio, que es la principal forma de excreción de nitrógeno de los peces. El nitrógeno también puede aumentar en estanques de peces en virtud de la adición de fertilizantes, como sulfato de amonio, como abonos orgánicos y también en razón de la descomposición del alimento no consumido (Baldisseroto, 2002).

El nitrógeno puede estar presente en los ambientes acuáticos en formas de nitrato (NO_3-), nitrito (NO_2-), amonio ionizado (NH_4+), amonio no ionizado (NH_3), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO), nitrógeno molecular (N_2), nitrógeno orgánico disuelto (péptidos, purinas, aminas, aminoácidos) y como nitrógeno orgánico particulado (Hernández y Vargas, 2003). A la suma de amonio ionizado (NH_4+) y amonio no ionizado o amoniaco (NH_3), se le conoce como amonio total o NAT (Nitrógeno Amoniacal Total), las proporciones relativas de NH_3 y NH_4+ presentes en una solución dependen principalmente de la temperatura y del pH y, en menor extensión, de la salinidad. La concentración relativa de NH_3 aumenta con el aumento de la temperatura y del pH y disminuye con el aumento de la salinidad (Bower y Bidwell, 1978). En cultivos comerciales la alimentación es la mayor fuente de amonio y su toxicidad es

mayor de medio día hasta el final de la tarde, cuando el pH y temperatura alcanzan sus máximos valores, y las concentraciones de gas carbónico sus valores mínimos. En estas condiciones, el amonio no ionizado alcanza sus niveles críticos en el tanque (Boyd, 1990).



Figura 4. Ciclo del Nitrógeno en el estanque.

Ciclo del nitrógeno (nitrificación)

El ciclo del nitrógeno en el agua es un mecanismo mediante el cual este elemento químico presente en gran medida en la naturaleza es transformado bioquímicamente y movilizado por medio de varios mecanismos como la nitrificación, de un medio tóxico y no ionizado a una forma ionizada, reducida y oxidada para ser movilizada del cuerpo de agua nuevamente hacia la atmosfera.

En este ciclo se puede observar como el alimento no consumido, los organismos muertos como insectos, fitoplancton y zooplancton, el nitrógeno no digerido excretado en forma de amonio ionizado (NH_4+), amonio no ionizado o amoniaco (NH_3), nitrógeno orgánico disuelto (péptidos, purinas, aminas, aminoácidos) y el nitrógeno orgánico particulado, es metabolizado y transformado por bacterias nitrificantes principalmente *Nitrosomonas* spp. y *Nitrosococcus* spp. a través de procesos de óxido reducción a nitrito (NO_2), y por oxidación por parte de *Nitrobacter* spp. y *Nitrospira* spp. a nitrato

(NO3-), que con una adecuada turbulencia en el estanque se produce ruptura de la tensión superficial del agua y con la oxigenación es movilizado de nuevo fuera del estanque como nitrógeno atmosférico.

En contraste con ciclos rápidos entre el amoniaco disuelto y algas o células bacterianas, la nitrificación es responsable a largo plazo, del destino final de una fracción grande de entre 25 a 50 por ciento del nitrógeno proveniente de la alimentación agregado a los sistemas de biofloc intensivos (Hargreaves, 2013). Una de las estrategias principales para mejorar la dinámica de salida de nitrógeno en el estanque es el sifonado preventivo diariamente con bajo recambio de agua, si se eliminan los sólidos, una fracción significativa de nitrógeno agregado se puede sacar del sistema, si los sólidos no se eliminan, una gran proporción de nitrógeno (como amoniaco) en última instancia, se oxida a nitrato llegando a acumularse de forma peligrosa.

Sistemas y estrategias para el manejo y control del nitrógeno

El nitrógeno enriquece el agua de todos los sistemas de producción acuícola, conforme aumenta la cantidad de biomasa y la tasa de alimentación diaria de los peces, produciendo problemas graves por acumulación de sustancias nitrogenadas tóxicas como el amonio total y los nitritos, afectando tanto el crecimiento como la salud del cultivo (Avnimelech, 2015). Cuando se trabaja con sistemas de producción intensivos, se requiere controlar radicalmente, tanto el nitrógeno que entra al sistema, como el que sale. La idea principal es convertir rápidamente el nitrógeno depositado en el estanque de sus formas tóxicas y movilizarlo a sus formas no tóxicas, y para eso existen variadas estrategias de control y manejo.

Medios para el control de la acumulación de nitrógeno inorgánico

Existen cuatro vías principalmente, la primera es el recambio permanente de agua. Esta estrategia requiere cambiar aguas enriquecidas con nitrógeno y sólidos, por agua limpia, causando la estabilidad momentánea de la bioquímica del estanque, pero con un costo ambiental enorme. La segunda, es el control por parte de las algas. Es una estrategia en donde los organismos fotosintéticos toman dióxido de carbono (CO_2) de la respiración de los peces y de otros organismos y por medio de la fotosíntesis producen azúcares simples que proveen energía química a bacterias que realizan la captura de amonio y comienzan el ciclo del nitrógeno.

El componente esencial de las algas es la proteína, el cual es cercano al 12% en materia seca y para producir la proteína por medio de la asimilación de los azúcares, el alga necesita de grandes cantidades de nitrógeno disponible, la producción de células vegetales nuevas depende principalmente de nitrógeno soluble inorgánico (TAN) que ingresa al agua, luego este nitrógeno inorgánico es convertido por las algas en nitrógeno orgánico aumentando la cantidad de algas y células vegetales. Este mecanismo está limitado por la tasa de asimilación de carbono de las algas, que normalmente se encuentra en un rango de 2 a 5 g de carbono/m^2 en una relación C: N de 5 para algas en crecimiento y capacidad diaria de inmovilizar nitrógeno es de 0,4

a 1 g de nitrógeno/m^2. Esta capacidad de asimilación y transformación del nitrógeno es buena en estanques tradicionales con biomasa de 0,5 a 1,2 kg de peces/m^2, pero en estanques de producción intensiva este medio de control resulta insuficiente. Otra limitación existente en el control por parte de las algas es que la asimilación de carbono depende de la luz, es decir que las algas no pueden remover (TAN) durante las horas de la noche, en otros casos como los días nublados se produce una actividad limitada, causando estrés en los peces, limitando su consumo de alimento y su crecimiento (Brune *et al*., 2003; Avnimelech, 2015).

Relación C: N

En sistemas biofloc, un factor importante que controla la concentración de amoniaco es la relación C: N de los concentrados y otros insumos. Una alimentación con un contenido de proteína de 30 a 35% tiene una relación C: N relativamente baja, aproximadamente 9 a 10:1. Cuando se incrementa la relación C: N a niveles de 12 a 15: 1, se favorece la vía heterótrofa para el control de amoniaco. La relación C: N en la alimentación puede aumentarse con la adición de materiales complementarios, suministrando más alimentación con contenido en proteínas reducido, con el riesgo de afectar la tasa de crecimiento y desarrollo de los peces y como consecuencia alargando los tiempos de cosecha. El amoniaco transformado por las bacterias heterotróficas se produce rápidamente después de suplementación de carbohidratos. El control de amoniaco a través de la heterotrofia, es a menudo más estable y fiable que la absorción por parte de las algas o la vía larga de la nitrificación (Hargreaves, 2013).

Existen diversas fuentes y materiales utilizados como fuentes de carbono en los sistemas de biofloc, incluidos los granos de cereales, melaza, bagazo de caña, almidones y heno picado, entre otros, siendo los más eficientes los azúcares, los almidones y las melazas, en ese mismo orden de eficacia; la idea de la escogencia de la mejor fuente de carbohidratos o de la más conveniente depende del precio y de la facilidad de su consecución, dado que esta puede convertirse en una materia prima obligatoria y permanente en este tipo de sistemas de producción.

Las bacterias heterotróficas en sistemas biofloc pueden actuar sobre la materia orgánica sencilla y rápidamente, en cuestión de minutos a horas. Los carbohidratos simples como el azúcar (sacarosa o dextrosa) o almidón tendrán efecto más rápido, que materiales más toscos o de difícil degradación. La mejor fuente de carbono para añadir durante el sistema de puesta en marcha, cuando más se necesita una respuesta rápida, es el azúcar simple (Hargreaves, 2013).

El control del amonio por vía heterotrófica, es decir, estimulado por la adición de carbohidratos debe realizarse de acuerdo a la cantidad de alimento diario y al porcentaje de proteína de la dieta concentrada, a mayor porcentaje de proteína en la dieta, mayor cantidad de carbono a suplementar, por ende, mayor cantidad de carbohidrato a suministrar al estanque. Hay varios inconvenientes con la continua

adición de carbono orgánico para controlar el amoniaco, esta vía alienta la producción de sólidos bacterianos, que se acumulan en el estanque, si no se controla, la concentración de sólidos puede alcanzar niveles que causan obstrucción branquial en los animales y por ende se necesitará más oxígeno para apoyar las demandas respiratorias de una mayor carga bacteriana, la cual puede llegar a consumir hasta un 60% del consumo total de oxígeno disuelto del sistema, además se necesitará energía adicional para mantener los sólidos en suspensión (Hargreaves, 2013).

Existen diferentes enfoques de manejo para sistemas dependientes de la suplementación de carbono; por un lado, se debe corregir la demanda diaria de las adiciones de alimento concentrado vs la proteína y así mismo se debe corregir el amonio y el nitrito acumulado, para encausar el sistema a un equilibrio más dinámico. En caso de querer ser más independientes de la adición de carbohidratos, se requiere que el sistema haya alcanzado un equilibrio entre el medio autotrófico y el medio heterotrófico, en donde el control amoniacal se realice en buena parte por la vía de la nitrificación, que de no ser así puede presentar problemas de inestabilidad, causando aumentos abruptos de materiales nitrogenados, deteriorando la calidad del agua del sistema y como consecuencia ocasionando problemas de crecimiento, desarrollo y bienestar de los peces del cultivo. También es importante ayudarle al sistema con el reciclaje de materiales sólidos, disponiendo adecuadamente de los sólidos y precipitados, los cuales deben ser retirados bien sea por medio de sifonados periódicos o con el uso de sedimentadores. En algunos casos se presentan grandes cantidades de espuma en la superficie debido a la turbulencia y se deben retirar para ayudarle al sistema a mantener su equilibrio.

Promoción de nitrificación natural

En contraste con el enfoque anterior, el fomento de la nitrificación natural no requiere hidratos de carbono suplementarios o la consideración de entradas de C: N. Este enfoque promociona la nitrificación sobre otras vías de control de amoniaco, utilizando las bacterias nitrificantes que están unidas a los sólidos en suspensión para controlarlo. Los sistemas biofloc bien equilibrados y sin suplementación de carbohidratos tienden a desarrollar este mecanismo de control de amoniaco a largo plazo de forma natural; sin embargo, afecta fuertemente la reserva de alcalinidad, lo cual es una de las principales desventajas. Todos los procesos de control de amoniaco en los sistemas de biofloc consumen alcalinidad, pero la nitrificación es responsable de la mayoría de las pérdidas. En este tipo de sistemas de nitrificación natural se pueden utilizar reactores de desnitrificación para recuperar algo de la alcalinidad perdida, pero aumentan el costo de producción. El encalado regular es un requisito de los sistemas de biofloc logrados con este enfoque (Hargreaves, 2013).

Durante la puesta en marcha, los cambios en la calidad del agua en sistemas biofloc son notablemente similares a los de sistemas convencionales de recirculación, caracterizándose por presentar desfases en las concentraciones máximas de amoniaco y después de nitritos en cuanto las diferentes poblaciones de bacterias se

desarrollan (Avnimelech, 2015). Si la tasa de alimentación se aumenta demasiado rápido, las concentraciones de amoniaco o (especialmente) de nitrito puede aumentar hasta el punto de volverse tóxicos y afectar el crecimiento de los peces, la conversión alimenticia, la resistencia a las enfermedades y en algunos casos la supervivencia de los peces. La duración de la puesta en marcha depende de una amplia gama de factores, incluyendo la temperatura, la alimentación de programación de velocidad, y pre-siembra del sistema con el tipo correcto y cantidad de microorganismos de iniciación (Hargreaves, 2013).

El uso de tanques de sedimentación para el control de sólidos

Tanques de sedimentación por gravedad simples, también conocidos como clarificadores, se pueden utilizar para controlar la concentración de sólidos provenientes de la alta alimentación en sistemas biofloc súper intensivos. Clarificadores pueden ser operados de manera intermitente cada vez que la evaluación de concentración de sólidos con conos Imhoff indica que el rango objetivo se ha superado. Alternativamente, los clarificadores se puede operar de forma continua en caso de calibrado para que relativamente una pequeña proporción del volumen del tanque se aclare cada día. Un buen control de la concentración de sólidos se puede lograr con clarificadores, que funcionan a una velocidad de flujo que da la vuelta al agua del tanque de cría cada 3 a 4 días. El volumen general de los clarificadores debería ser de 1 a 5% de volumen del sistema y se hace funcionar a una velocidad de flujo para proporcionar un tiempo de residencia de 20 a 30 minutos, que es suficiente para retener los sólidos más pesados (Hargreaves, 2013).

El encalado para la gestión de la alcalinidad

Como se mencionó, la alcalinidad es la capacidad del agua para amortiguar o resistir cambios en el pH en respuesta a las adiciones de un ácido o una base (Chu y Lee, 2004). El agua en los sistemas de biofloc debe mantenerse con amplias reservas de alcalinidad, dado que constantemente se agotan por reacciones bioquímicas y por los ácidos añadidos al agua permanentemente. La actividad de bacterias nitrificantes es responsable de la mayoría de las pérdidas de alcalinidad en sistemas biofloc intensivos y con el tiempo, el ácido producido por la nitrificación desgasta la reserva de alcalinidad en el agua. Una vez que se agota la alcalinidad, el pH puede caer abruptamente, inhibir la función bacteriana, incluyendo la de las bacterias nitrificantes importantes y puede provocar la acumulación de amoniaco que puede afectar el apetito y la alimentación de los peces y por consiguiente se limita la tasa de alimentación diaria, la eficiencia de conversión y en última instancia, el rendimiento. La alcalinidad debe mantenerse entre 100 y 150 mg/L como $CaCO_3$, con adiciones regulares de bicarbonato de sodio (Hargreaves, 2013).

Otros agentes de encalado menos adecuados son los agentes cáusticos como el hidróxido de calcio), se puede utilizar con una dosificación continua al sistema. En los sistemas intensivos con biofloc en donde la nitrificación es dominante, cada kilogramo de alimento añadido al sistema debe ser suplementado con 0,25 kg de bicarbonato

de sodio. Incluso con adiciones regulares, los operadores de las instalaciones deben tener monitoreo regular para evaluar la alcalinidad (Hargreaves, 2013).

Movimiento, turbulencia, aireación y oxigenación

Debido a que todos los flóculos deben estar suspendidos en la columna de agua las 24 horas para su correcto funcionamiento, una de las estrategias fundamentales en este tipo de producción es el movimiento por medio de aireación artificial constante, para esto se utilizan equipos eléctricos como los blower o sopladores, los splash o las bombas con inyección de aire con mezcla directa o venturis. En este tipo de sistemas de producción intensiva con biofloc, se deben tener en cuenta varios factores fundamentales del movimiento del agua dentro del estanque así:

El movimiento y la mezcla del agua deben ser constantes para garantizar que todas las partículas se mantengan en suspensión, un pobre o deficiente movimiento permite que se formen agregados o flóculos grandes por la atracción de las cargas iónicas de los flóculos, lo que genera precipitación de estos al fondo del estanque donde se descomponen, aumentando el consumo de oxígeno disuelto y deteriorando rápidamente la calidad del agua de los peces. Por otro lado, se debe garantizar que el movimiento del agua se realice en todos y cada uno de los rincones del estanque, si el movimiento no es homogéneo se tendrán puntos muertos, de anoxia o zonas anaerobias, que promueven la reproducción de bacterias Gram negativas de carácter patógeno y se pueden producir y liberar gases tóxicos y/o letales como el metano, el amonio y el sulfuro de hidrógeno. Se debe tener presente que el fondo del estanque es la zona de descanso de los peces y esta debe ser una zona de confort y no una zona problema.

Una importante práctica de manejo en los sistemas intensivos con tecnología biofloc, es el retiro de desechos orgánicos del fondo del estanque; dependiendo del tipo de construcción, se deberá realizar un sifonado o bombeo de los fondos que garantice el retiro de la mayor parte de los residuos, permitiendo mejorar los procesos biológicos en el estanque, facilitar el trabajo bacteriano de reciclaje y mejorar las tasas de oxígeno disuelto y saturación del sistema.

La turbulencia juega un papel fundamental en los sistemas intensivos con tecnología biofloc, debido a que la ruptura de la tensión superficial del agua es la que permite que el sistema movilice los nitratos del agua y los retire como nitrógeno atmosférico, desintoxicando el agua y dando por terminado el ciclo del nitrógeno en el estanque. Se debe tener cuidado de no incurrir en los extremos, una turbulencia insuficiente puede provocar una acumulación excesiva de nitratos y por ende de nitritos en el agua, causando intoxicación en los peces y problemas metabólicos graves, y una turbulencia excesiva, genera estrés en los animales por el exceso de nado contra la corriente, dificultad en la localización del alimento concentrado y en algunos casos disminuye de la temperatura del agua, provocando tasas de crecimiento lentas y por consiguiente cosechas demoradas.

Es absolutamente esencial proporcionar suficiente aireación u oxigenación para satisfacer esta alta demanda de oxígeno y para mantener la concentración de este parámetro en niveles seguros. Las tasas altas de oxigenación también indican que el tiempo de respuesta en el caso de un fallo del sistema, el cual es muy corto, a menudo menos de 1 hora. Por lo tanto, el monitoreo, alarmas y alimentación de emergencia (generadores eléctricos) son elementos que los sistemas biofloc requieren con obligatoriedad (Hargreaves, 2013).

Las necesidades de aireación en un sistema biofloc dependen del requerimiento de oxígeno por parte de los peces que esta alrededor de (200-400 mg/O_2/kg/h) y por el consumo de oxígeno de los otros organismos presentes en el estanque. Existen diferentes tipos de equipos de aireación en el mercado para proporcionar el oxígeno al sistema; el número, la capacidad y el desempeño de los aireadores a escoger deben ser un tema de mucho cuidado para lograr un apropiado manejo del sistema (Avnimelech, 2015)**.** La concentración de oxígeno varía en los diferentes puntos de la columna del agua del estanque, siendo el fondo y la parte más profunda donde se presentan los valores más bajos, condicionados por la baja penetración de luz y radiación, baja temperatura y mínimo contacto con el aire, disminuyendo la productividad y generando problemas para la salud y el bienestar general de los peces.

En las áreas superficiales del estanque ocurre lo contrario, el contacto permanente del agua con el aire atmosférico mantiene en buen nivel la concentración de oxígeno, haciéndola más homogénea. Sin embargo, la capacidad de intercambio con el aire es muy baja y por ello es necesario contar con equipos que aumenten la capacidad de contacto y la difusión oxígeno-agua (Avnimelech, 2015).

La aireación artificial cumple varios papeles fundamentales dentro del buen funcionamiento del estanque y del sistema biofloc, dentro de los cuales están: distribución uniforme del oxígeno por todo el estanque, minimizando el riesgo de tener puntos muertos o de anoxia que puedan generar enfermedades por procesos fermentativos anaerobios; realizar una mezcla homogénea del agua con los sedimentos, garantizando el buen funcionamiento biológico de los flóculos; movilizar todos los desechos de los procesos biológicos de manera que estos puedan ser retirados fácilmente, por medio de sifonado o bombeo directo y garantizar un nivel óptimo de oxígeno disuelto y de saturación de oxígeno, que permita a los peces desarrollarse y crecer de manera adecuada.

Tres términos son usados para definir la capacidad de un aireador para tal fin:

a) *Standard Oxygen Transfer Rate (***SOTR**) → kg O_2/h, definida, como la cantidad de oxígeno transferido por un aireador al agua a una temperatura de 20°C, iniciando en una concentración de O_2 = 0, en un tiempo determinado.

b) Standard Aeration Efficiency (**SAE**) → kg O_2/Kw/h, definido como el SOTR dividido por el poder aplicado por el aireador, iniciando de una concentración de O_2 = 0.

c) Actual Oxygen Transffered (**AOT**), definido como la cantidad de O_2 en el estanque, teniendo en cuenta la concentración de O_2 inicial (Collazos-Lasso y Arias-Castellanos, 2013; Avnimelech, 2015).

Como desarrollar un cultivo con tecnología biofloc

En la puesta en funcionamiento de un sistema intensivo con tecnología biofloc, para el cultivo intensivo de tilapia, debemos tener en cuenta varios factores y variables muy importantes, todos con su debido tenor e importancia y sin los cuales no lograríamos un adecuado funcionamiento y balance. A continuación, describiremos el paso a paso de cada variable.

Agua de cultivo

Es de vital importancia determinar la fuente de la cual se va a alimentar el sistema, esta deberá ser una fuente segura, confiable e inocua, es decir una fuente hídrica libre de contaminantes, como agroquímicos (insecticidas, fungicidas, herbicidas, abonos, etc.) y el contenido de contaminantes orgánicos debe ser mínimo o inexistente, entre ellos las materias fecales de otras explotaciones cercanas o de pozos sépticos.

La selección de la fuente de abastecimiento debe ser complementada con un análisis completo de calidad de aguas, en un laboratorio certificado por las entidades medioambientales competentes de la zona de cultivo, análisis que debe involucrar un componente microbiológico completo y uno fisicoquímico de la fuente.

El análisis microbiológico permite determinar la presencia de contaminantes biológicos, presencia de bacterias coliformes, como la *E. coli* que indicarían contaminación por materias fecales principalmente. Este resultado facilita la toma de decisiones sobre el diseño de los protocolos sanitarios de desinfección para las aguas del cultivo y los estanques y así mismo, determinar el protocolo de siembra más adecuado para los peces. El análisis fisicoquímico permite conocer los niveles de los diferentes parámetros de la fuente hídrica como pH, dureza, alcalinidad, turbidez, olor, color, temperatura, etc. Asimismo, los macro y micro minerales y los compuestos de mayor relevancia para el balance del sistema, como fosfatos (PO_4), sulfatos (SO_4=), carbonatos, bicarbonatos, amonio, nitritos y nitratos. Estos valores son fundamentales para comenzar con el funcionamiento de un sistema biofloc y establecer el balance iónico y el balance de nutrientes e ingredientes de maduración, como los dos procesos más importantes del equilibrio del agua para el sistema.

Balance Iónico del agua

Frente a la necesidad del aseguramiento/control de calidad del trabajo analítico en la química del recurso hídrico, el cálculo del balance de iones resulta un procedimiento simple, preciso y cuyos datos son fáciles de interpretar; el mismo que provee una

medida clara de la calidad analítica y, en algunos casos, permite ubicar errores analíticos al comparar los imbalances y datos de regresión inter-iones (Knights y Stenner, 1999).

El balance de iones es la verificación entre la suma de miliequivalentes (meq) de aniones y la suma de miliequivalentes de cationes procurando que esta sea lo más cercana a la igualdad (Tabla 1).

Tabla 1. Balance Iónico de una muestra de agua para cultivo

CATIÓN	Conc. (mg/L)	P.equiv.	Conc. (meq/L)	ANIÓN	Conc. (mg/L)	P. equiv.	Conc. (meq/L)
Calcio	120	20 g	6,00	Bicarbonato	410	61 g	6,72
Magnesio	20	12,15 g	1,65	Cloruro	70	35,5 g	1,96
Sodio	40	23 g	1,74	Nitrato	10	62 g	0,16
Potasio	10	39,1 g	0,25	Sulfato	40	48 g	0,82
TOTAL CATIONES			**9,64**	**TOTAL ANIONES**			**9,66**

En un análisis de balance, la suma de las concentraciones de los aniones expresados en meq/L, debe ser prácticamente igual que la suma de las concentraciones de los cationes expresados en meq/L. En caso contrario el agua no estaría equilibrada y el análisis no será coherente, por lo cual el balance iónico debe realizarse, para procurar que en el proceso de maduración del biofloc y posteriormente en la fase de producción, no existan caídas abruptas de alcalinidad, dureza y pH, lo que resultaría en un mal funcionamiento del sistema que se traduciría en bajas de oxígeno, aguas improductivas y gastos innecesarios en insumos de balance.

Selección de la especie a cultivar

El biofloc es una tecnología que permite darle las condiciones ideales de cultivo a determinada especie, para su adecuado crecimiento, desarrollo y producción, es por eso se deben conocer los requerimientos precisos de la especie que vamos a cultivar, debido a que posteriormente se debe balancear el agua y sus parámetros fisicoquímicos mediante la adición de diversos ingredientes. En la tabla 2, se muestran los rangos ideales de cultivo para la tilapia *Oreochromis* sp.

Tabla 2. Requerimientos de calidad de agua para el cultivo de tilapia (ISA, 2005)

Parámetro	**Rangos Ideales**
Oxígeno Disuelto (OD)	3 a 10 mg/L
Ozono (O^3)	0 a 0,005 mg/L
Temperatura	24 a 32 °C
pH	6.5 a 8.5
Alcalinidad Total	100 a 200 mg/L
Dureza	20 a 350 mg/L
Magnesio (Mg)	0 a 36 mg/L
Manganeso (Mn)	0 a 0,01 mg/L
Calcio	5 a 160 mg/L
Dióxido de Carbono (CO_2)	0 a 30 mg/L
Amonio Total	< 2,0 mg/L
Amonio (NH_3; No Ionizado)	0 a 0,05 mg/L
Nitritos (NH_2)	0 a 0,1 mg/L
Fosfatos (PO_4)	0,5 a 1,5 mg/L
Fósforo Total	0,01 a 3,0 mg/L
Fósforo Soluble	0 a 10 mg/L
Ácido Sulfhídrico (H_2S)	0 a 0,003 mg/L
Ácido Cianhídrico (HCN)	0 a 0,1 mg/L
Gas Metano (CH_4)	0 a 0,15 mg/L
Cadmio en Aguas Duras	0 a 0,003 mg/L
Cadmio en Aguas Blandas	0 a 0,004 mg/L
Cloro	0 a 0,003 mg/L
Cobre en Aguas Duras	0 a 0,03 mg/L
Cobre en Aguas Blandas	0 a 0,006 mg/L
Cromo (Cr)	0 a 0,03 mg/L
Hierro (Fe)	0 a 0,015 mg/L
Mercurio (Hg)	0 a 0,0002 mg/L
Níquel (Ni)	0 a 0,02 mg/L
Plomo (Pb)	0 a 0,03 mg/L
Turbidez	30 a 40 cm
Sólidos Disueltos	0 a 30 mg/L
Sulfatos ($SO_4^=$)	0 a 500 mg/L
Zinc (Zn)	0 a 0,05 mg/L
	*Los valores en mg/L = ppm

Manejo sanitario

En cualquier tipo de producción animal uno de los puntos críticos es la propagación de enfermedades infecciosas y más frecuentes en explotaciones intensivas, súper intensivas o híper intensivas y casi siempre asociadas a una carga microbiana alta,

virus, hongos y levaduras que son en muchos casos un factor inmediato de enfermedad. La manera correcta de evitar la propagación de estas enfermedades, es mediante programas de prevención. Sin embargo, siempre se deben tener a mano un eficaz plan de desinfección, proceso que se define como la reacción química que se lleva a cabo entre el agente infeccioso y el desinfectante y manejar procesos adecuados de la bioseguridad, medidas sanitarias profilácticas que, utilizadas de forma eficiente y permanente, previenen y evitan la entrada y salida de agentes patógenos en una explotación.

En la granja hay varios componentes del sistema que se deben mantener bajo estricto control, entre ellos los equipos, instalaciones, plantas de procesamiento y sacrificio, utensilios, instrumental, vehículos para transporte de animales o de alimentos concentrados, huacales, canastillas y alojamientos, entre oros. Por ello, se hace necesario implementar programas de bioseguridad, a través de barreras que ayudan en gran medida a prevenir problemas sanitarios, productivos y de salud tanto de los peces de cultivo como del personal de manejo; Por ejemplo, se debe contar con arcos de desinfección, para evitar que vehículos ingresen patógenos o agentes infecciosos de otras explotaciones, rodaluvios en la entrada, pediluvios, lavamanos, gel desinfectante, el ingreso del personal y visitantes siempre con ropa de protección adecuada y suficiente para cada instalación y contar con protocolos adecuados para la desinfección de instalaciones, estanques, agua y animales que ingresen al cultivo.

Protocolo de maduración de estanques con tecnología biofloc

Para el protocolo de maduración de estanques, se debe conocer la composición fisicoquímica del agua del sistema, que permite conocer el balance iónico del agua y la cantidad de macro y micro minerales presentes y con esta información, la selección de las fuentes de carbono y los niveladores orgánicos. Sin embargo, escoger el ingrediente más adecuado para lograr los valores ideales de crecimiento y bienestar de la especie a cultivar requiere de conocimiento sobre el análisis bromatológico del mismo. Los ingredientes más frecuentemente utilizados en biofloc son azúcares, melazas, almidones, cereales, salvados, afrechos, harinas, tortas, mogollas y materias fibrosas provenientes de cereales como el heno y la alfalfa; las principales fuentes de fósforo son las fibras naturales, sales de fósforo, fosfatos compuestos como el súper fosfato triple, cortezas de tubérculos, abonos químicos como triple 15 o triple 18; las fuentes de nitrógeno más utilizadas en las formulaciones son: urea, abonos químicos compuestos (triple 15, triple 18), los alimentos concentrados, las harinas de cereales y las mogollas; los correctores de dureza y minerales más usados son el cloruro de sodio, el cloruro de potasio y el cloruro de magnesio; los correctores de pH más usados son los bicarbonatos de sodio, calcio y de magnesio y los carbonatos, la cal viva (pre-tratada, no segura), la cal apagada o agrícola, la cal hidratada o hidróxido de calcio; los correctores de alcalinidad más eficientes son las sales de magnesio, las sales de calcio, el carbonato de calcio, el hidróxido de calcio o cal hidratada y el bicarbonato de sodio y los correctores de electro conductividad son la sal marina, la sal blanca no yodada y las sales de magnesio. Con estos ingredientes se realizará el balance

de los diferentes minerales y factores fisicoquímicos del agua, de modo tal que se obtengan las condiciones adecuadas del agua de cultivo para los microorganismos que comenzaran a formarse y los peces que posteriormente habitaran el sistema.

Estimación de la fuente de carbono

La fuente de carbono se debe adicionar durante el tiempo de cultivo, en función de control del amonio y nitrito producido y mantener la relación C: N 20:1, son utilizadas las fórmulas establecidas por Kubitza (2011), Avnimelech (1999) y Sierra De La Rosa (2009), aplicadas según la necesidad y control dado al sistema (Atencio *et al*., 2015).

A continuación, se muestra la forma de aplicación de melaza utilizando las fórmulas de los autores antes mencionados.

Kubitza (2011)

Se calcula la cantidad de melaza o fuentes adicionales de carbono, a través de la estimación de aporte de nitrógeno por compuestos tóxicos al sistema:

Amonio total (NH_3 + NH_4) 78% N
Nitrito (NO_2) 30%N

Ejemplo: Calcular la cantidad de melaza a aplicar a un tanque de producción de levante de tilapia, de 600 L en sistema de cultivo biofloc, con valores de amonio total de 3mg/L y nitrito de 0,33 mg/L.

1- Calcular el % de Nitrógeno que aportan al sistema los valores de amonio total y nitrito:
Amonio total: 3 x 78% = 2,34 mgN/L
Nitrito: 0,33 x 30% = 0,099 mgN/L

2- Sumar y obtener el valor total de Nitrógeno (NT) en el sistema:
2,34 + 0,099 = 2.44 mgN/L

3- Se multiplica el valor NT, por el volumen de agua del tanque:
2,44 mgN/L x 600L = 1464 mgN = 1,46 gN

4- Se condiciona la cantidad de NT a la relación Carbono: Nitrógeno favorable para la comunidad bacteriana del Floc = 20:1/C: N, para conocer la cantidad de melaza a ser aplicada:
1,46 x 20 = 29,2g de melaza

5- De igual manera, se debe tener en cuenta en otros ejercicios, la relación carbono: nitrógeno en base la PB de la ración utilizada, así alimento con 36 – 40%, presenta una relación 8: 1. En este sentido el cociente de carbono no sería 20 si no 12, para estimar la relación 20:1

Avnimelech (1999).

1- Calcular la concentración de carbohidratos a adicionar para la regulación nitrógeno inorgánico en los sistemas de cultivo.

CC = (A x B x C) / (D x E)

En donde:
CC: cantidad de carbohidratos a adicionar
A: contenido de nitrógeno en alimento balanceado (%) = (% PB x 0,16)
B: nitrógeno amoniacal disponible para reciclar después de la excreción = 50%
C: tasa C: N del tejido microbiano = 4
D: concentración de carbono en carbohidratos = 50%
E: eficiencia microbiana de conversión a proteína = 40%

Ejemplo: calcular la cantidad de carbohidratos a adicionar para manejar el amonio producido vía bacterias heterotróficas, en tanques de cultivo de tilapia alimentada con concentrado de 30%PB.

CC = [(30x0,16) x 0,50 x 4]/(0,50 x 0,40)
CC = 48% de carbohidratos en base de PB

2- Estimar la cantidad de carbohidratos que son asimilados por el sistema para la reducción de la concentración de nitrógeno inorgánico.

DC mix = CH x D x E

En donde:
DCmix = cantidad de carbono asimilado por los microorganismos
CH: cantidad de carbohidratos para inmovilizar el amonio excretado
D: concentración de carbono en carbohidratos = 50%
E: eficiencia microbiana de conversión a proteína = 40%

3- Considerando que la cantidad de nitrógeno (DN) necesaria para la producción de nuevo material celular depende de la tasa C: N en la biomasa microbiana la cual es cercana a 4, tenemos:

DN= DCmix/(C: N)

Si reemplazamos DCmix en esta ecuación tenemos:
DN = (CH x D x E)/(C: N)

Reemplazando los valores correspondientes:
DN = (CH x 0,50 x 0,40)/4
DN = 0,05CH

4- Despejando CH (cantidad de carbohidratos para inmovilizar el amonio excretado), tenemos:
CH = DN/0,05

En donde:
DN = Carga de nitrógeno amoniacal total o amonio total generado por día en sistemas de producción acuícola (NAT) (Timmons *et al*., 2002)
NAT = F x PB x 0,092

En donde:
F: tasa de alimentación (Kg/día)
PB: contenido de proteína del alimento suministrado (valor decimal)
0,092: constante

5- Así la cantidad de melaza a adicionar será:
CH: NAT/0,05

Sierra De La Rosa (2009).

Ejemplo del cálculo de la cantidad diaria de melaza (u otro compuesto rico en carbono):

1. Establecer la cantidad de nitrógeno proveniente del alimento que queda en el estanque, teniendo en cuenta que la proteína contiene 16% de N y que el 70% del nitrógeno consumido es excretado en forma de amonio.

2- Si un estanque consume 24 Kg de alimento del 38% de proteína, entonces 24 Kg alimento x 38% Proteína x 16% N = 1,4592 Kg N/día.
La cantidad de N presente en el estanque será entonces:
1,4 kg de N/día x 70% = 1,02 Kg N

3- Calcular la cantidad de melaza con base en la relación Carbono/Nitrógeno (20:1)
Si 1 Kg N: 20 Kg C, Entonces 1,02 N X 20 = 20,4 Kg C
La Melaza contiene 40% de C
Entonces si 20,4 Kg C 40%
X 100%

Se necesitan 51 Kg de melaza (mes) (1,7 Kg/día)

Como primera medida y una vez se tenga el balance iónico, el balance de ingredientes y se conozcan los factores fisicoquímicos, se inicia con el proceso de inoculación. Para esto se llena el estanque previamente desinfectado con agua limpia, hasta garantizar que el nivel del agua supere el del sistema de aireación en unos 10 cm, desde este momento el sistema de aireación deberá estar en completo funcionamiento para garantizar la correcta oxigenación, turbulencia y movimiento, que nos acelerará el proceso de maduración del estanque.

Se requiere hacer los cálculos de volumetría para conocer la cantidad de agua exacta que tiene el estanque en ese momento. A partir de ahora el estanque debe mantenerse en movimiento constante y con suficiente aireación durante las 24 horas del día, ya que este movimiento y oxigenación garantizarán que se integren y diluyan todos los ingredientes al agua y que todos los procesos bioquímicos de nuestro biofloc se lleven a cabo.

Primero se debe corregir la dureza, la alcalinidad, la electro conductividad y el pH. Estos deberán ser los primeros insumos a incluir al sistema y con los cuales el estanque tendrá que permanecer mínimo 24 y máximo 36 horas, para darle tiempo al sistema que estabilice la química y así se obtengan los mejores resultados posteriores. En la segunda fase, es necesario agregar las fuentes de carbono y los niveladores orgánicos que darán inicio a la producción de colonias bacterianas iniciales y servirán de alimento en esas primeras fases al zooplancton. La tercera fase del proceso de maduración consiste, en aplicar los niveladores de minerales, los abonos químicos y las fuentes de nitrógeno y fósforo, que darán como resultado el inicio de la productividad primaria del estanque.

El tiempo de maduración del agua del estanque depende de todos los factores fisicoquímicos del agua y de los efectos bioclimáticos, como la radiación solar, la temperatura del agua y del ambiente, la velocidad de los vientos etc. Todos los días (2 veces) se deberán tomar los parámetros fisicoquímicos del agua del estanque con medidores químicos por colorimetría o digitales de laboratorio, para conocer la evolución del sistema. Se requiere de mucha paciencia, pues la maduración podría tardar entre 10 y 40 días después de aplicados los insumos, tiempo al cual todos los parámetros fisicoquímicos del agua estarán completamente en equilibrio, arrojando medidas de amonio, amoniaco, nitritos y nitratos en niveles muy cercanas a cero, el pH deberá encontrarse entre 8,2 y 8,5 y el oxígeno disuelto por encima de 6 mg/L, con una saturación de más del 60% y la temperatura deberá estar entre 28 y 30°C.

En este momento, cuando el estanque comience su proceso de estabilización y antes de la siembra de alevines, se puede inocular con bacterias nitrificantes starter comercial, o bacterias probióticas que ayudarán a controlar los picos de amonio mientras el biofloc se multiplica y tiene la capacidad de controlar solo el nitrógeno del sistema. En este periodo de estabilización se observan varios cambios en el color, en el olor y en los sólidos suspendidos del estanque. El primerom de ellos es un aumento en la producción primaria, es decir en la producción de algas, lo que torna al agua a un tono verde brillante, posteriormente y conforme se formen las colonias bacterianas, el agua se nivela a un color marrón claro y posterior a eso, el color del agua deberá haber cambiado a un verde-café y no deberán existir partículas de gran tamaño suspendidas en la columna de agua. En este momento el sistema estará listo para sembrar los alevines. En las figuras 5 a 8, se puede observar la evolución en el agua del sistema.

Nota: el tiempo de ciclado y el tiempo de maduración del biofloc varían dependiendo de varios factores, como la radiación solar, la temperatura, los insumos de maduración, el balance iónico del agua, el tipo de organismos a cultivar, el tipo de alimentación, la cantidad de grasa en la formulación del alimento concentrado, por citar solo algunos entre muchos otros factores.



Figura 5. Cambio de balance y ciclado bacteriano. Fotos: Alejandro Medina



Figura 6. Agua a mitad de maduración con aproximadamente 10 ml/L de Biofloc. Fotos: Alejandro Medina



Figura 7. Agua con 17 ml/L de Biofloc color marrón, con buena población bacteriana Terminando su proceso de maduración, agua clara. Fotos: Alejandro Medina



Figura 8. Agua terminada color marrón, con ciclado completo de 4 meses, 20 ml/L de Biofloc, flóculos homogéneos sin presencia de estiércol ni partículas de coloración diferente. Fotos: Alejandro Medina

En la figura 9, se puede apreciar una gran cantidad de espuma, la cual se produce como respuesta al proceso de nitrificación con el movimiento y la turbulencia de la columna de agua y no es más que el último paso del ciclo del nitrógeno, cuando pasamos por procesos bioquímicos de oxidación de nitritos NO_2 a nitratos NO_3 y el nitrógeno se volatiliza y sale del estanque como gas, es decir como nitrógeno atmosférico.



Figura 9. Estanque en proceso de ciclado. Foto: Alejandro Medina

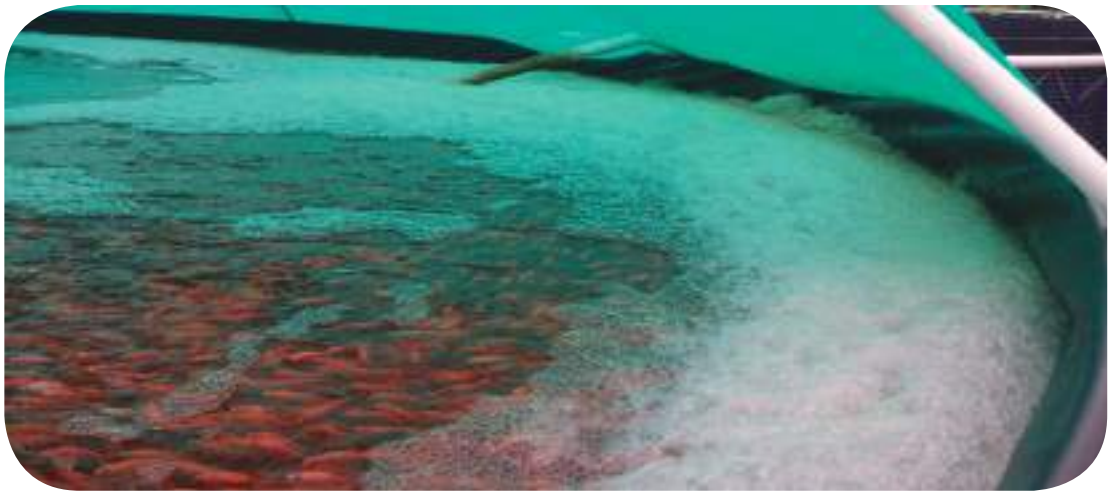


Figura 10. Estanque terminando su ciclado. Foto: Alejandro Medina

En la figura 10, se observa cómo, a medida que los microrganismos del sistema biofloc se van volviendo capturadores y transformadores directos de nitrógeno, el sistema va madurando y cada vez encontraremos menos espuma producida en horas de la mañana. En la figura 11 es presentado un estanque totalmente ciclado a las 6 am, con espuma casi inexistente y agua de color verde - café, edad de maduración 4meses y medio.



Figura 11. Estanque totalmente de ciclado a la hora de la alimentación. Granja el Nogal, Espinal – Tolima. Foto: Alejandro Medina

4. **BIBLIOGRAFÍA**

● APHA-AWWA- AWWA CF (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Díaz de Santos, Madrid.

● Atencio, V; Pertuz, V; Cordero, S; Ayazo, J. (2015) Documento del centro de investigación piscícola de la universidad de Córdoba – CINPIC

● Avnimelech, Y. (ed.). (2015). Biofloc Technology, Thrird Edition. World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA.

● Azim, M; D, Little. (2008). The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquaculture, 283 (1–4): 29-35.

● Ballester, E.L.C., Abreu, P.C., Cavalli, R.O., Emerenciano, M. Abrew, L., Wasielesky W. (2010) Effect of practical diets with different protein levels on the performance of Farfante Penaeus paulensis juveniles nursed in zero water exchange suspended microbial flocs intensive system. Aquaculture Nutrition, 16 (2): 163-172.

● Baldisseroto, B. (2002). Fisiologia de Peixes Aplicada à Piscicultura. Editora da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

● Bower, C.E., J.P. Bidwell. (1978). Ionization of ammonia in seawater: effects of temperature, pH, and salinity. Journal of Fisheries Research Board of Canada 25: 1012-1016.

● Boyd, C.E. (1990). Water quality in ponds for aquaculture. International Center for Aquaculture, Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, AL, USA.

● Catalán Lafuente, J. (1990). Química del Agua. Ed. Bellisco, Madrid.

● Chamberlain, G.; Avnimelech, Y.; McIntosh, R; Velasco, M (2001). Advantages of aerated microbial reuse systems with balanced C: N. III: practical applications. Global Aquaculture Advocate.

● Cho, C. Y., Bureau, D. P. (2001). A review of diet formulation strategies and feeding systems to reduce excretory and feed wastes in aquaculture. Aquaculture Research, 32 (Suppl. 1): 14-25.

● Collazos LF; JA. Arias (2015). Fundamentos de la tecnología biofloc (BFT). Una alternativa para la piscicultura en Colombia. Una revisión. Instituto de Acuicultura

de los Llanos - IALL, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Meta - Colombia.; Fundación Orinoquia, Puerto Carreño, Vichada – Colombia.

● Eaton AD, Cleserci LS, Greenberg AE (eds), (1995). Standard methods for the examination of water and waste water, 10th edition. Amer. Pub. Health Assoc., Washington DC.

● Hargreaves. A. (2006). Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. Aquacultural Engineering, 34 (3): 344-363.

● Hargreaves A, (2013). SRAC Southern Regional Aquaculture Center, Publication No. 4503 April 2013; Biofloc Production Systems for Aquaculture.

● Johnson, W. W. (1980). Handbook of acute toxicity of chemicals to fish and aquatic invertebrales. Fish and Wildlife, Service. Resource Publication 137. United States, Departernent of the Interior, Washington D.C.

● Knights and R. D. Stenner, (1999). The role of ion balances in examining the reliability of analytical data: A case study of Mendip stream (somerset). Proc. Univ. Bristol. Spelaeol. Soc., 21 (3): 235-249.

● Kubitza F. (2011). Criação de tilapia em sistema com bioflocos sem renovação de agua. Panorama da Aquicultura. Brasil. 14-23.

● Rodier, J. (1989) Análisis de las aguas; aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. Omega, Barcelona.

● Rodríguez H. Polo G. Salazar G. (1995) Fundamentos de acuicultura continental, Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (INPA). Calidad del agua en acuicultura continental (Ed. 2) Santa Fe Bogotá, 1995; p.85-107.

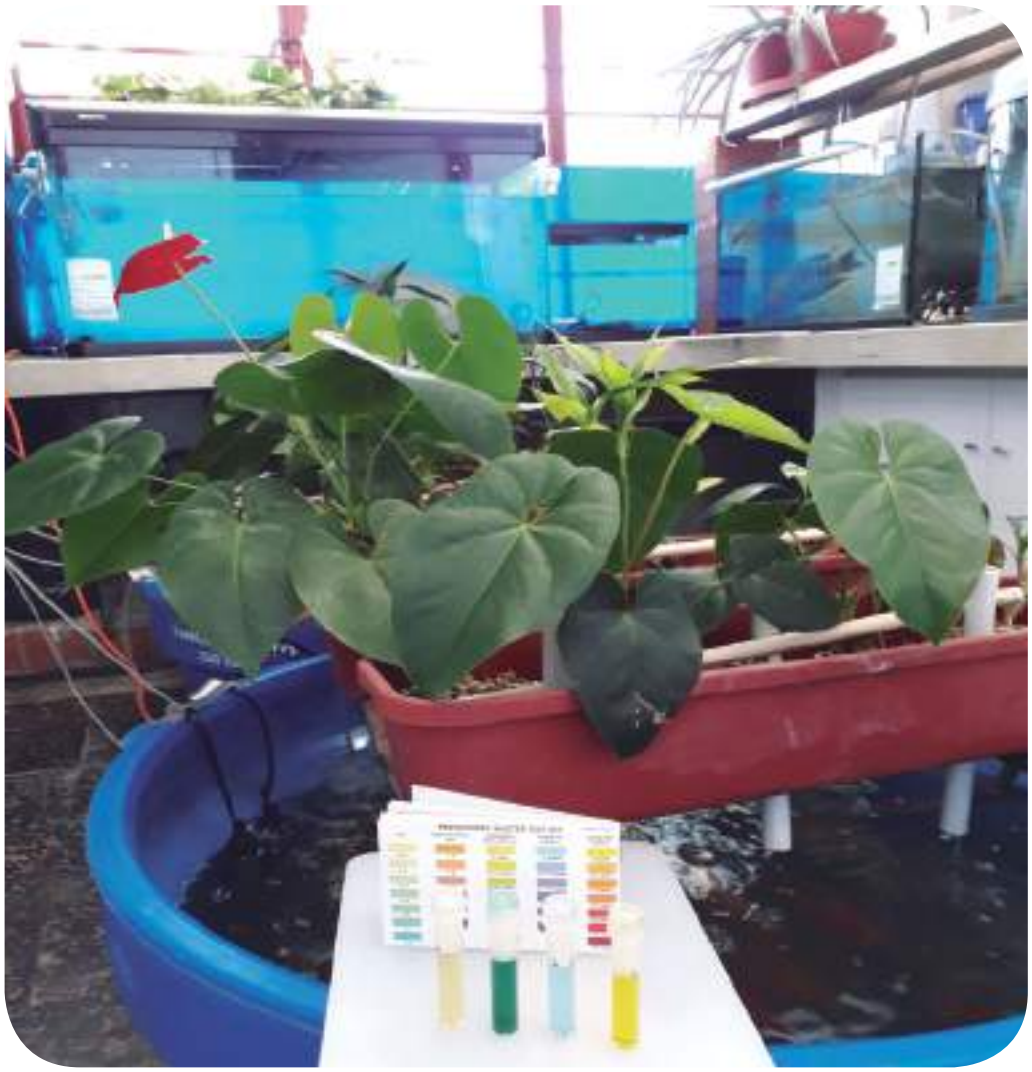
● Serfling S. (2000). The Solar aquafarms story. Global Aquaculture Advocate.

● Sierra-De la Rosa J., Martínez-Pardo X., Mendoza-Rivera M. (2007), Evaluación del cultivo de tilapia del nilo (*Oreochromis niloticus*) y tilapia roja (*Oreochromis sp*) en diferentes sistemas intensivos de granjas camaroneras como alternativa productiva en el sector camaronicultor colombiano. Corporación Centro de Investigación de la Acuicultura de Colombia – CENIACUA. Cartagena, 2007.

CAPÍTULO VI

CALIDAD DEL AGUA EN SISTEMAS CERRADOS DE ACUICULTURA

Jaime Fernando González Mantilla
M.V., M.Sc., Ph.D.
Profesor Titular, Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia
Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá
E-mail: jfgonzalezma@unal.edu.co



Sistema experimental acuapónico. (Laboratorio de Toxicología Acuática, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá). Foto Jaime Fernando González

1. **INTRODUCCIÓN**

El concepto de *calidad del agua* (CA) en acuicultura es fundamental para entender la interacción del medio en el cual se desarrollan los organismos cultivados y los factores que determinan su desempeño en el sistema productivo acuícola (ej. manejo general, nutrición, reproducción, producción, bienestar y salud de las especies acuícolas). Los sistemas cerrados de acuicultura (SCA) (ej. recirculación, acuapónicos y bioflocs), pueden presentar retos adicionales al mantener la CA en comparación con los sistemas abiertos o estáticos convencionales. Estos retos se dan teniendo en cuenta que, aunque los SCA hacen un uso más racional y ambientalmente sustentable del agua, también exigen la adecuación de infraestructura, medios técnicos y prácticas de manejo que garanticen el mantenimiento de una composición adecuada del agua para los ejemplares cultivados.

La CA se garantiza en un sistema productivo a través de un seguimiento sistemático y periódico de las variables fisicoquímicas, así como detectando la presencia de contaminantes que puedan alterar la composición ideal del agua. Las primeras son los componentes naturales que hacen del agua una solución o mezcla homogénea de varios solutos, mientras que los segundos provienen en la mayoría de los casos de actividades antropogénicas mal manejadas o con deficiente control sobre residuos o efluentes producidos en las mismas. Entre estas prácticas inadecuadas se tienen: eliminación de aguas servidas y efluentes industriales no tratados, escorrentía de plaguicidas y sus metabolitos usados en agricultura y actividad pecuaria, drenajes ácidos de minería, hidrocarburos provenientes de extracción y/o transporte de petróleo, etc.

El concepto de CA es dependiente y relativo al destino o uso que se le dé a la misma (Weiner, 2008). Este concepto diferirá sustancialmente entre un químico en su laboratorio, un salubrista público o un acuicultor. Como ejemplo, el agua potabilizada para consumo humano, uno de los usos con mayor exigencia en estándares de calidad y que cumpliría con las expectativas de un salubrista, podría ser vista como de alto riesgo por un piscicultor, debido al cloro y cloraminas aplicado en las plantas de tratamiento para controlar patógenos bacterianos y que pueden causar intoxicaciones a los peces. El concepto de *calidad del agua* tendrá que evaluarse y enmarcarse en la función de su uso y de las exigencias de la especie acuícola que se maneja en el sistema productivo.

Este capítulo se desarrolla evaluando los siguientes apartados: fuentes de abastecimiento de agua en los sistemas acuícolas, principales variables fisicoquímicas y contaminantes del agua, metodologías de análisis de la calidad del agua y características de la calidad del agua en los SCA objetos de estudio en esta publicación: sistemas de recirculación acuícola-SRA, acuapónicos y biofloc.

2. FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LOS SISTEMAS ACUÍCOLAS

La fuente de abastecimiento de agua en un sistema acuícola es el primer elemento de importancia a considerar en la valoración integral de la CA. Las fuentes disponibles para un acuicultor dependen de la zona geográfica en donde vaya a ser dispuesto el sistema productivo y de las prácticas aplicadas o protocolos de tratamiento de las fuentes. En este sentido, se esperan diferencias importantes en la CA dependiendo de la fuente particular y de la región de estudio.

Las fuentes principales de abastecimiento de agua para los sistemas acuícolas son esencialmente de tres tipos: 1) Aguas superficiales (ríos, quebradas, lagos, lagunas, etc.), 2) agua potabilizada en plantas de tratamiento de la región o municipio en el cual se localice el sistema acuícola y 3) aguas subterráneas obtenidas por perforación superficial o profunda del subsuelo (Colt y Tomasso, 2001).

1) Las aguas superficiales de cuerpos naturales ofrecen una primera e inmediata fuente de abastecimiento para un sistema acuícola. Las características fisicoquímicas de éstos cambian durante el ciclo hidrológico anual. Además, estas características dependen de si las aguas son lóticas, las que fluyen en constante movimiento, como en ríos, quebradas; o lénticas, es decir estáticas, como en lagos, lagunas o reservorios. En Colombia, el registro de los valores de la oferta hídrica y de las características fisicoquímicas del agua en su red hidrológica puede ser consultado periódicamente en el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), a través de documentos como el Estudio Nacional del Agua, el cual presenta el estado general del recurso hídrico del país con las actualizaciones en los períodos correspondientes (IDEAM, 2015). En cuanto a oferta hídrica, variable fundamental antes de revisar la CA de las fuentes, es pertinente mencionar que, en Colombia, según el más reciente reporte de la Contraloría Delegada para el Medio Ambiente, 318 cabeceras municipales del país presentan desabastecimiento de agua por reducción de la oferta hídrica en las fuentes, la mayoría de éstas ubicadas en la cuenca Magdalena-Cauca, seguida de la cuenca Caribe, Orinoquía, Amazonía y Pacífica. Esto presupone un primer efecto importante en la oferta, sin ni siquiera haber considerado la CA de la fuente (CGR, 2016).

Ya hablando en términos de CA, una vez superado el tema de abastecimiento mínimo deseable, es importante señalar que todo cuerpo de agua que sirva como fuente para un sistema acuícola debe ser valorado periódicamente por el acuicultor para tener sus registros propios, adicionales a los que suministran las fuentes oficiales de información, ya que las características de CA son únicas para cada fuente a pesar de encontrarse en una zona a la que se le asignen características generales.

2) El agua obtenida de los acueductos municipales luego de un proceso de potabilización y adecuación para consumo en la planta de tratamiento de cada lugar es otra la fuente directa de abastecimiento para el acuicultor. Si el tratamiento aplicado en la planta es adecuado la presencia de patógenos, sólidos disueltos

totales, alcalinidades o durezas extremas deberían haber sido resueltas en dicho procesamiento. Desafortunadamente, no hay una estandarización de procesos y la CA ofrecida por las plantas municipales o veredales puede ser muy variable.

La CA de las fuentes puede determinarse a través de la evaluación de parámetros como el Índice de Calidad del Agua (ICA) y el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA). Según el IDEAM (2015), las corrientes del Magdalena y Cauca tienen un ICA en la categoría *malo*, zonas estas donde hay una mayor demanda y uso del agua por razones de densidad poblacional y actividades de alta demanda como la de tipo agropecuario. Con respecto al IRCA, la mayor proporción de municipios del país están en las categorías de riesgo *medio*, *alto* e *inviable sanitariamente*, lo cual debe ser tenido en cuenta por el acuicultor para la posible intervención a la fuente antes de abastecer el sistema productivo (CGR, 2016).

3) Las aguas subterráneas son otra fuente a la que el acuicultor recurre con frecuencia. Su uso también requiere un análisis previo al mismo, ya que variables como la concentración de gases disueltos (ej. oxígeno, nitrógeno), al igual que variables como dureza y alcalinidad pueden cambiar drásticamente con respecto a los valores encontrados para éstas en aguas superficiales o con tratamiento municipal. El contacto del agua subterránea con sustratos como piedras calizas en el subsuelo puede conferir características particulares a algunas de estas variables. En Colombia, la demanda nacional de agua es suplida en un 15% de fuentes de origen subterráneo. En todo el territorio nacional, a diciembre de 2014, se tenían identificados, 50492 puntos para captación del agua subterránea, a saber: 12866 pozos, 31364 aljibes, 2107 manantiales y 4155 de otros tipos o sin información (CGR, 2016).

3. PRINCIPALES VARIABLES FISICOQUÍMICAS Y AGENTES CONTAMINANTES DEL AGUA

El número de variables fisicoquímicas que potencialmente se pueden analizar para hacer una valoración de la calidad del agua en sistemas acuícolas es muy amplio. Sin embargo, por razones de tipo práctico y económico es necesario escoger aquellas que cuando sus valores se apartan de un rango ideal para el desempeño de los ejemplares cultivados, tienen un mayor impacto en el sistema acuícola. Dentro de las variables más relevantes para este propósito están: temperatura, concentración de oxígeno disuelto, pH, amoniaco, nitrito y nitrato; sólidos disueltos totales (SDT), salinidad y conductividad, así como, dureza y alcalinidad. Si en una explotación acuícola se logra establecer monitoreo de calidad del agua utilizando estas variables, se dispondrá de un programa de gran utilidad con este propósito.

Temperatura

Es la variable física que tiene mayores efectos e interrelación con otras variables fisicoquímicas del agua ya que determina la solubilidad del oxígeno, la tasa de fotosíntesis, la relación de distribución entre las fracciones de amoniaco y amonio,

entre otras. Además, afecta directamente la tasa metabólica de los organismos cultivados (Colt y Tomasso, 2001). En los SCA, particularmente si están protegidos de la intemperie en espacios cerrados, es una variable con mayor estabilidad y menores fluctuaciones diarias.

Oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto (OD) en el agua es el resultado de la relación que se da entre la difusión de este gas desde la atmósfera, la producción de este dentro del agua a través de procesos fotosintéticos y el consumo o gasto por la actividad respiratoria de los organismos que habitan el medio acuático (Colt y Tomasso, 2001). También debe considerarse la utilización de OD en la degradación del detritus orgánico, a saber: alimento no consumido, materia fecal y otros de esta naturaleza. Esta última utilización es referida como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (Weiner, 2008). En cualquier tipo de sistema de acuicultura, el OD es una variable crítica. En particular para los SCA, su diseño y configuración debe garantizar el nivel mínimo deseable de OD según la demanda particular de la especie. La concentración de OD en cualquier sistema acuícola, pero en particular en los SCA, es determinante para garantizar un ciclo de nitrógeno adecuado (ej. NH_3 >>NO_2 >> NO_3) en los biofiltros ya que como se ve en la secuencia de reacciones, es un proceso netamente oxidativo que no puede llevarse a cabo eficientemente por parte de las poblaciones de bacterias encargadas (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*), si no hay una concentración adecuada de OD. El otro aspecto importante en el cual influye el nivel redox (potencial oxido-reductor) de las aguas es la disponibilidad de los metales presentes en éstas. Bajos potenciales redox, es decir condiciones reductivas con OD entre cero y muy bajos niveles (ej. < 3 ppm) incrementan la solubilidad de varios metales al promover números de oxidación más bajos para los cationes, esto es, por ejemplo, 2^+ en lugar de 3^+. Por su parte, altos potenciales redox (condiciones oxidantes con alta concentración de OD) hacen el efecto contrario, disminuyendo la fracción soluble y absorbible del metal. En resumen, las aguas hipóxicas, además de su efecto indeseable *per se* para los organismos acuáticos, también incrementan el riesgo de absorción de metales, algunos de ellos con efecto tóxico directo (Weiner, 2008).

pH

El potencial de hidrogeniones (pH) es otra de las variables de obligatoria medición y monitoreo en los sistemas acuícolas. El pH de las aguas influye directamente sobre otras variables por su interdependencia química, en particular determina la relación entre las fracciones de amoniaco (NH_3) y de ion amonio (NH_4^+). Esta relación se basa en que un sistema con tendencia hacia un pH alcalino aumentará la fracción no ionizada, amoniaco NH_3, la cual es tóxica para los organismos; mientras que, en el rango de pH ácido, la fracción prevalente será la ionizada, amonio NH_4^+, debido al aporte de hidrogeniones para su formación a partir de NH_3, disminuyendo los riesgos de efecto tóxico por este metabolito nitrogenado. La temperatura es el otro factor a considerar para definir la relación final entre NH_3/NH_4^+ de las aguas. Al aumentar la temperatura, se aumenta la fracción tóxica (NH_3). El pH se relaciona a su vez con otras

variables e influye también en la disponibilidad de las fracciones solubles de metales, con una tendencia a que, en su rango ácido, la fracción que prevalezca de la mayoría de los metales sea la soluble, lo cual los hace más absorbibles y potencialmente tóxicos para los organismos acuáticos.

Amoniaco/Amonio, **Nitrito** y **Nitrato**

El nitrógeno es otro componente fundamental en la CA de los sistemas acuícolas. El nitrógeno que no es utilizado a partir de la fuente de alimento o el que es eliminado-excretado por los organismos adopta una primera forma química muy tóxica, el amoniaco (NH_3). Los peces son amonotélicos; es decir, eliminan el nitrógeno sobrante en forma de NH_3 y excretan directamente este metabolito vía branquial y urinaria, contribuyendo a la carga total del mismo en las aguas. La elevación del NH_3 en las aguas se previene a través del proceso de nitrificación; el cual es el proceso oxidativo mediado por poblaciones bacterianas tipo *Nitrosomonas*, *Nitrobacter* y *Nitrospira*, que conduce a la formación final de nitrato (NO_3), pasando por nitrito (NO_2), previamente.

Los valores tóxicos del NH_3 suelen tener un rango muy estrecho para todas las especies acuícolas, en particular las de peces. Idealmente, el NH_3 no debe ser detectado al hacer los análisis de las aguas a través de cualquiera de las metodologías posteriormente sugeridas. Valores superiores a 1,0 ppm (parte por millón) de NH_3 son reportados como letales en pocas horas para la mayoría de las especies piscícolas y valores que alcancen 0,05 ppm de NH_3 y se mantengan por varios días son considerados como factor estresante con implicaciones en la salud de los peces o desencadenantes de otros problemas sanitarios (Noga, 2010). En lo referente a los iones nitrito y nitrato (NO_2 y NO_3, respectivamente), las concentraciones que llevan a efectos tóxicos están en rangos mucho más amplios dependiendo de las especies. Dentro de las más susceptibles están los salmónidos y los peces gato, a los cuales se sugiere sean mantenidos en aguas con valores inferiores a 0,5 mg/L (ppm) de nitrito (Svobodova *et al*., 2005). Pero también hay especies mucho más resistentes a la presencia de nitrito, como es el caso de la cachama blanca (*Piaractus brachypomus*), según lo evidenciado por investigaciones hechas por nuestro grupo de investigación en el pasado (Ochoa *et al*., 2002). De otra parte, las concentraciones de NO_3 que pueden llevar a intoxicaciones en peces son mucho más altas que las de NO_2 y por ello son responsables de un mucho menor número de episodios de intoxicación en organismos acuáticos. Los casos raros de intoxicación por nitrato pueden llegar a necesitar que en las aguas se alcancen concentraciones mayores a 300 ppm (Masser, 1999).

Sólidos Disueltos (SDT) y Sólidos Suspendidos Totales (SST); Turbidez, **Conductividad** y **Salinidad**

Estas variables están directamente interrelacionadas y son importantes porque pueden ser responsables de algunos eventos que alteran la salud y el desempeño productivo de las especies acuícolas.

El término *Sólidos Totales*, con referencia a la CA, es la sumatoria del material que está solubilizado en el agua (*sólidos disueltos, SDT*) y el que no lo está (*sólidos suspendidos, SST*). Los sólidos afectan la CA de varias formas. Un alto nivel de *sólidos disueltos* puede alterar el sabor del agua y causar un efecto laxante en especies terrestres, especialmente. Por su parte, los *suspendidos* alteran esencialmente las formas de vida acuática por causar efectos abrasivos en piel, taponamiento del tejido branquial y además afectar la concentración de OD ya que disminuyen la tasa de fotosíntesis en el agua al aumentar la turbidez en la misma por menor penetración de la luz solar. Los *sólidos suspendidos* incluyen arcillas, limo, óxidos de metales, sulfuros, microalgas, hongos y bacterias. Son removidos mediante floculación y filtración. Mientras que los *disueltos* agrupan minerales y sales disueltas, ácidos húmicos, taninos, entre otros. En aguas naturales, los elementos que conforman a los sólidos disueltos suelen ser las sales de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos, y nitratos (Weiner, 2008).

La *turbidez* es la propiedad óptica asociada con la dispersión o interferencia de los rayos luminosos al penetrar el agua. Se mide con un turbidímetro, el cual expresa sus resultados en unidades nefelométricas (NTU) (Romero, 2002). En los sistemas acuícolas los principales elementos que contribuyen a la turbidez del agua son las partículas de suelo que ingresan con el agua que abastece a los sistemas, alimento no consumido y materia fecal. En los estanques las algas también contribuyen en importante medida con la turbidez (Colt y Tomasso, 2001).

La *conductividad* es la expresión numérica de la habilidad del agua para transportar una corriente eléctrica y es dependiente de la concentración total de componentes ionizados y de la temperatura a la cual se haga la determinación (Romero, 2002). Por su naturaleza, tiene una correlación alta con el contenido de SDT. Las unidades utilizadas para expresarla son los mhos/cm o siemens/cm (1 mho = 1 siemen). Cuando los valores son muy pequeños es más conveniente expresarla en microsiemens (µsiemens/cm). El agua destilada y dulce tiene una conductividad de 0,5 a 2,0 µmhos/cm. La correlación entre la conductividad y los SDT permite que al tomar el valor de conductividad expresado en µmhos/cm y multiplicarlo por un factor que oscila entre 0,55 y 0,70, se obtengan los SDT expresados en partes por millón (Romero, 2002; Weiner, 2008).

El término *salinidad* es a veces confundido y su uso intercambiado erróneamente con el término *sal*. La *salinidad*, según lo describe Sverdrup *et al*. desde el año 1942, hace alusión a todo el material sólido disuelto presente en agua de mar (Colt y Tomasso, 2001). La *salinidad* se expresa en g/kg o partes por mil (en español se prefiere usar la abreviación ppt del inglés para evitar la confusión con ppm, partes por millón; y se representa con el símbolo ‰). En esta mezcla de material disuelto que representa la salinidad de las aguas se reportan hasta 66 elementos diferentes (Bowen, 1966). Por su parte el término *sal*, se refiere simplemente a las sales cloruro de sodio (NaCl) o cloruro de calcio ($CaCl_2$) presentes en el agua (Colt y Tomasso, 2001). El agua de mar

tiene una salinidad alrededor de las 35 ppt, mientras que el agua salobre o estuarina va desde 0,5 ppt hasta 35 ppt. El agua dulce se define como aquella que tiene hasta 0,5 ppt de salinidad.

Alcalinidad

La alcalinidad de las aguas es su capacidad para neutralizar la presencia de ácido o llegada de este como contaminante (Boyd, 1979). Esta propiedad está dada por la concentración de carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-). Estos dos a su vez son dependientes de la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y del pH de las aguas. Las interrelaciones entre éstos se basan en las reacciones de equilibrio que se presentan a continuación (Weiner, 2008):

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$$
$$H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$
$$HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-}$$

Cuando el pH se incrementa por encima de 10,3, el ion carbonato (CO_3^{2-}) es la especie dominante y por debajo de 6,3, es el CO_2 disuelto el que prevalece, el rango 6,3 a 10,3 (el rango para la mayoría de las aguas naturales) favorece la mayor concentración de bicarbonato (HCO_3^-). En aguas superficiales, valores de alcalinidad inferiores a 30 mg/L se consideran bajos y valores mayores a 250 mg/L son altos. Este variable permite amortiguar los efectos de un pH ácido y el efecto tóxico de varios metales al formar complejos o quelatos con éstos. Las unidades para expresarla son partes por millón de $CaCO_3$ (Weiner, 2008).

Dureza

La dureza de las aguas está dada por la presencia de cationes divalentes (2^+). Sin embargo, el calcio y el magnesio son los que aportan en mayor proporción para esta medición. Tiene similitudes con la alcalinidad en cuanto a que es dependiente de varios elementos y a que es expresada con las mismas unidades. Sin embargo, la dureza depende de cationes mientras que la alcalinidad es el resultado de la presencia de aniones. La dureza y la alcalinidad también se asocian con el concepto de SDT ya que calcio, magnesio, carbonato y bicarbonato son a menudo la mayor parte de los sólidos disueltos totales (SDT) del agua (Weiner, 2008).

Contaminantes químicos del agua

Los contaminantes químicos que pueden alterar la calidad del agua en los sistemas acuícolas provienen de fuentes diversas. Entre éstas se encuentran: hidrocarburos del petróleo (crudos o productos refinados), desechos de la industria, efluentes provenientes de actividad minera, plaguicidas, aguas servidas no tratadas provenientes de asentamientos humanos o de uso pecuario, entre otros (González *et al*., 2014). En los cuerpos de agua del planeta, así como en los de Colombia, varios de esos contaminantes encuentran en el agua un solvente adecuado que los vehiculiza para luego ser absorbidos por parte de los organismos que se abastecen de las aguas

alteradas en su composición ideal. A su vez, la presencia de los contaminantes como componentes indeseables de las aguas originan dos tipos de exposiciones para los organismos acuáticos: 1) los accidentes causados por descargas usualmente masivas de contaminantes en zonas puntuales (ej. derrame de crudos por accidentes de oleoductos, accidentes de plantas industriales, etc.) y 2) disposición de los contaminantes en cuerpos de agua a bajas concentraciones, pero de forma constante en el tiempo, ya sea en uno o varios puntos de descarga.

En el caso particular de Colombia, vale recordar que los contaminantes más prevalentes están ligados a las actividades económicas, prácticas culturales y el grado de eficiencia en el manejo de aguas residuales. En este sentido es bueno precisar que Colombia tiene una comercialización importante de plaguicidas superando históricamente los promedios de otros países de América Latina (ICA, 2016). En la actividad minera, por su parte, ha habido un impulso importante por parte de los planes de desarrollo de los últimos gobiernos, particularmente en lo relacionado con la extracción de oro y carbón (Ponce, 2012), pero al mismo tiempo muchas inquietudes y oposición por el riesgo de contaminación de acuíferos con la actividad misma. En el sector de hidrocarburos y concretamente en la extracción petrolera, la Agencia Nacional de Hidrocarburos ha indicado que el país ha alcanzado en épocas recientes la cifra de un millón de barriles producidos al día (http://www.anh.gov.co), lo cual también aumenta los riesgos de contaminación ambiental durante el proceso extractivo y la conducción a través de oleoductos. Aunque Colombia no está dentro de los países con gran desarrollo industrial, en los últimos años los índices de producción del país presentados por el Banco de la República han mostrado mejoras en esta área, y al mismo tiempo, los riesgos de que efluentes mal manejados o no tratados de las industrias alteren la calidad de las aguas (http://www.banrep.gov.co/es/ producción).

En el campo de manejo de aguas residuales o servidas municipales, desafortunadamente la disposición de éstas no es la más adecuada según lo indicado por el propio Viceministerio del Agua y Saneamiento Básico, sólo el 9% de las aguas residuales del país son tratadas adecuadamente, lo cual hace que el mayor porcentaje de las mismas termine contaminando ríos, quebradas y otros cuerpos de agua del país (http://www.minvivienda.gov/co/agua).

Una revisión exhaustiva de estos tipos de contaminantes está más allá de los objetivos de este capítulo. Por ello al lector se le recomienda la revisión de textos especializados en toxicología acuática, tanto libros de referencia como artículos publicados en revistas especializadas en esta temática.

4. TIPOS DE METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA

Los análisis periódicos de las variables de CA y de los contaminantes potencialmente presentes se pueden realizar con varios tipos de metodologías. La escogencia de éstas depende fundamentalmente de dos factores: 1) la disponibilidad de recursos

para implementar las pruebas como una práctica sistemática en las granjas y 2) la formación y capacitación del personal que se encargará de esta función. Para el primer factor es importante que el acuicultor se concientice frente a la necesidad de garantizar unos presupuestos destinados al análisis periódico de la CA. Si la intención es el montaje de un laboratorio en la granja, para cumplir con este objetivo, la inversión inicial implicará unos dineros mayores para la compra de balanzas, material de vidriería, reactivos y otros equipos e insumos. La adecuación de las metodologías puede hacerse a través de la validación de las técnicas estandarizadas y cuyos protocolos con sus marchas analíticas están disponibles en la literatura.

Uno de los textos de referencia más usados en el mundo por su descripción detallada y la presentación de pruebas con aceptación universal es el de Métodos Estandarizados para el Análisis del Agua (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*) (AWWA, 2017). En 2018 se publicó la edición 23 de este texto, la cual representa el aniversario 100 de su primera versión. La mención de este texto de referencia permite abordar el aspecto del grado de capacitación o formación del personal encargado de realizar los análisis de CA en el lugar. Quienes consulten, validen y pongan en práctica la información sobre las metodologías a partir de esta fuente u otras de métodos estandarizados, deberán ser personas con entrenamiento en laboratorio y destrezas mínimas en pesaje de reactivos, preparación de soluciones y ejecución de marchas analíticas.

La segunda opción para implementar las pruebas de CA puede ser un complemento a lo que ya se planteó, se trata del uso de kits que han sido diseñados por varias casas comerciales para facilitar el trabajo, especialmente en situaciones de campo, y que sólo requieren seguir cuidadosamente unos procedimientos que vienen claramente explicados en los protocolos anexos a estos kits. Estos kits, no requieren la compra y uso de material de vidriería tipo laboratorio porque incluyen los elementos para hacer las pruebas, los reactivos y las indicaciones para los procedimientos. Varias casas comerciales con representación en todo el mundo ofrecen en el mercado estos kits (ej. Hach®, Tetra®, LaMotte®, entre otras) (Figura 1). En el mismo sentido, el personal que puede llevar a cabo los procedimientos con los kits comerciales no necesita de un nivel de formación complejo en prácticas de laboratorio. Para las principales variables fisicoquímicas del agua también se dispone de equipos portátiles para manejo en campo que permiten obtener resultados con mayor precisión sin necesidad de envío de las muestras a laboratorios que hayan validado las pruebas de los métodos estandarizados (Figura 2). En cualquiera de los casos, lo más importante será saber interpretar los resultados de las pruebas de CA para poder tomar las acciones necesarias en el manejo del agua para beneficio del sistema y de los organismos cultivados.



Figura 1. Kit comercial para realizar pruebas de calidad de aguas. La presentación en frascos gotero facilita la realización de pruebas sin requerir material de laboratorio. A la derecha se observan los resultados para las pruebas de pH, amoniaco total, nitritos y nitratos, cuya interpretación se hace comparando los colores desarrollados en los tubos con los impresos en el cuadro de referencia. Foto: Jaime Fernando González



Figura 2. Colorímetro portátil para trabajo en campo o en laboratorio. Estos equipos permiten obtener resultados cuantitativos con una mayor precisión que la obtenida en pruebas cualitativas. A la derecha, refractómetro portátil para medición de salinidad en las aguas. Foto: Jaime Fernando González

5. CARACTERÍSTICAS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS SCA

Los sistemas cerrados en acuicultura (SCA) considerados en este capítulo son: recirculación (SRA), acuapónicos (ACP) y bioflocs (BFT). Para cada uno se hará una descripción breve de sus características básicas y el mantenimiento de la CA, según las especificidades de configuración, diseño y funcionamiento.

Sistema de Recirculación en Acuicultura (SRA)

Fundamentos del SRA

Un SRA se puede definir como aquel que mediante la implementación de procesos sucesivos y complementarios permite volver a utilizar el agua que sale del sistema a través de un reacondicionamiento de esta. El primer reacondicionamiento del agua suele ser la recuperación de los niveles de OD, pero además de este factor se debe corregir la presencia de otros desechos que alteran la CA y ponen en riesgo a los ejemplares cultivados. Por ejemplo, el hacer pasar el agua desde el tanque donde se encuentran los organismos cultivados a través de un biofiltro, permitirá la remoción del dióxido de carbono (CO_2) y del amoniaco (NH_3) y aumentará los niveles de OD y nitrato (NO_3) al retornar y ser recirculada al sistema (Sommerfeld *et al*., 2001). Además de un biofiltro, los SRA requieren de un tratamiento complementario para garantizar el mantenimiento de la CA. La complejidad de este tratamiento dependerá de la intensidad en la reutilización del agua y de las exigencias de la especie cultivada en lo referente a CA.

Algunos de estos requerimientos son: unidades de sedimentación, filtros granulares o mecánicos para disminuir los sólidos particulados, aireadores para incrementar el nivel de OD, unidades de oxidación avanzadas para desinfección y oxidación de residuos orgánicos (ej. Luz ultravioleta, ozonificación), unidades buffer para regulación de pH, etc. Es importante destacar que el concepto de recirculación (SRA) que se analiza en esta sección tiene aspectos en común con los sistemas de reutilización en serie (ej. canaletas o *raceways* en desniveles) o reutilización parcial (bombeo de un 50% a un 85% del agua usada para reincorporación al sistema luego de separar material sólido); sin embargo, lo que lo hace particular y permite designarlo como de *recirculación completa* es la reutilización de un 95 a 99% del agua en el sistema. Esta característica de máximo porcentaje posible de reutilización del agua lleva a que el SRA deba incluir idealmente tres niveles de tratamiento para las aguas utilizadas: 1) clarificadores para reducir material particulado, 2) filtros biológicos para asimilar desechos disueltos (ej. NH_3), y 3) aireadores y unidades de desinfección.

Puntos críticos en calidad del agua de los SRA

● La concentración de oxígeno disuelto es como en cualquier otro tipo de sistema acuícola una variable con incidencia en todos los componentes bióticos y abióticos del sistema. El OD no sólo influye directamente en los procesos fisiológicos

respiratorios y en la tasa metabólica de los organismos acuáticos, si no que garantiza el funcionamiento de la nitrificación en el biofiltro y su actividad bacteriana. Se estima que el nivel de oxigenación implementado debe ofrecer un mínimo de 60% de saturación de oxígeno al sistema con un mínimo de 5 ppm de oxígeno disuelto en los tanques y mayor a las 2 ppm en los efluentes que salen del filtro para reiniciar la recirculación. Complementariamente, los niveles de CO_2 en el sistema deben mantenerse por debajo de 20 ppm (Masser *et al*., 1999).

● El segundo factor fundamental que refleja un buen funcionamiento de un SRA es la capacidad del filtro biológico para cumplir con el proceso de nitrificación y evitar que una concentración indeseable de metabolitos nitrogenados (NH_3 y NO_2, especialmente) retorne a los tanques con riesgos para los peces. La capacidad de nitrificación de un filtro biológico debe verificarse entonces con una medición periódica (mínimo una vez por semana) del NH_3 y del NO_2, una vez el agua sale del filtro y empieza a recircular a los tanques. Cuando el sistema y el filtro han "madurado" (= balance entre nitrógeno ofrecido en el alimento, nitrógeno excretado luego de su utilización y asimilación por los peces y nitrógeno transformado por los biofiltros), una medición semanal de estos metabolitos suele ser suficiente para cumplir con un monitoreo adecuado. La denominada "maduración" del filtro está asociada a la colonización adecuada del sustrato por parte de la población bacteriana que se encargará de la nitrificación. Este proceso toma fácilmente un mes desde su montaje inicial. Idealmente, un resultado de "no detectables" para los dos metabolitos sería el hallazgo esperado al hacer esta medición en el sistema. De estos dos metabolitos, es preciso recordar que el amoniaco (NH_3) es el que tiene los rangos más estrechos de seguridad para todas las especies; mientras que algunos valores detectables de nitrito (NO_2) podrían ser aceptados por el acuicultor al hacer el análisis del resultado. Por supuesto, esto dependerá del grado de susceptibilidad de las especies con las cuales se trabaje frente a una elevación de este metabolito en las aguas (Svobodova *et al*., 2005).

En términos generales un incremento en la biomasa instalada en un sistema SRA tiene una correlación directa con elevaciones en los niveles de amoniaco, nitrito y fosfato; mientras la correlación es inversa con la concentración de oxígeno disuelto (Hanna *et al*., 2010). Con el desarrollo y mejora de los SRA, se implementó el concepto de *denitrificación* como otra forma de evitar la acumulación de metabolitos nitrogenados. Con esta opción el proceso de tratamiento del nitrito y del amoniaco se orienta hacia una reducción en lugar de la oxidación mediada en el proceso de nitrificación. Con la denitrificación se obtiene nitrógeno (N_2) en lugar de nitrato (NO_3) (van Rijn *et al*., 2006). Además, la nitrificación tiene una menor incidencia en la capacidad buffer del agua (= alcalinidad) en comparación a la nitrificación, proceso este en el cual hay un efecto directo sobre los niveles de carbonato y bicarbonato de las aguas (van Rijn *et al*., 2006).

● El pH del sistema afecta también al biofiltro y por ende al proceso de nitrificación ya que la actividad bacteriana del biofiltro es dependiente de este factor. Un rango

adecuado de pH para la actividad de nitrificación por parte de las bacterias está entre 7,0 y 8,0. Esto es muy importante porque la tendencia a la disminución del pH de las aguas en los sistemas hace que cuando se alcanza un valor inferior a 6,0 se afecte considerablemente la nitrificación con riesgo de exposiciones indeseables a altas concentraciones de amoniaco y nitrito (Masser *et al*., 1999).

● Aunque cada sistema puede comportarse en forma muy particular, un estudio reciente comparativo entre SRA y biofloc para cultivo de camarón (*Litopenaeus vannamei*) concluyó que, en el SRA, el pH fue una de las variables más estables y estuvo dentro de rangos ideales (7,9 a 8,1) en comparación con un sistema BFT en el cual bajó hasta 6,6 (Ray *et al*., 2017). Un valor o rango deseable de pH requiere de una buena capacidad buffer. Se recomienda que los niveles de alcalinidad en las aguas de un SRA estén entre 50 y 100 ppm de $CaCO_3$. Si el sistema no logra estabilizarse en ese rango, el acuicultor puede verse en la necesidad de ajustar esta variable adicionando bicarbonato de sodio. Masser *et al*. (1999), recomiendan una carga de bicarbonato entre 17 al 20% de la tasa de alimentación (ej. Por cada 5 Kg de alimento al día se requerirían 1 Kg de bicarbonato usando el máximo rango). Sin embargo, valores menores pueden ser necesarios según la dinámica de cada tanque o sistema.

Sistemas Acuapónicos (ACP)

Fundamentos del sistema ACP

Los sistemas acuapónicos (ACP) se definen como el cultivo simultáneo e integrado de peces y plantas mediante la recirculación del agua y favoreciendo el uso de los metabolitos nitrogenados (NH_3, NO_2 y NO_3) que son eliminados desde la unidad de peces como sustratos para la producción de proteína vegetal en la unidad de plantas (Rakocy *et al*., 2006; Bernstein, 2011; Somerville *et al*., 2014, Mullins *et al*., 2015). Son diversos los diseños que se han planteado y puesto en práctica para la conformación de un sistema ACP. Están desde los más sencillos basados en el ciclo de "inundación y drenaje" de la unidad de plantas mediante un bombeo del agua desde la unidad de peces; a otros más elaborados como los que incluyen sistemas de remoción de sólidos (clarificadores), biofiltración y tanque intermedio para neutralización de la acidez del agua proveniente de la unidad de peces. Por ello, cuando se mencionen los puntos críticos de la calidad del agua de los sistemas ACP se deberá tener presente la sencillez o mayor complejidad del sistema ACP en cuestión.

Dependiendo del tipo de plantas escogidas para el sistema ACP puede ser necesario la adición de nutrientes más allá de lo ofrecido por la nitrificación que se inicia con la oferta de alimento para los peces. Plantas de fruto como pepinos y tomates pueden requerir nutrientes adicionales en algunas fases de su desarrollo. Entre éstos se encuentran hierro, potasio y calcio. Estos elementos adicionados deben vigilarse ya que pueden alterar las condiciones fisicoquímicas del agua y afectar a los peces u organismos acuáticos integrados al sistema. Del mismo modo, la absorción de estos nutrientes suplementados para un mejor desarrollo de las plantas puede disminuirse

en ocasiones por la fisicoquímica del agua (Bernstein, 2011; Somerville *et al*., 2014). Para autores como Mullins *et al*. (2015), el pH ideal del agua del sistema ACP para promover una mejor absorción de nutrientes por parte de la mayoría de las plantas está entre 6,2 y 6,5; mientras que para otros el rango es un poco más alto, 6,5 a 7,5. Otro factor muy importante a tener en cuenta es el tipo de sustratos que se usan como soporte para las plantas ya que según su naturaleza y composición, pueden alterar las condiciones iniciales o línea base de los valores de las variables fisicoquímicas. Así como hay sustratos cercanos a ser "inertes", es decir, no generan cambios en las variables del agua (ej. arlita o arcilla expandida); hay otros que si lo hacen (ej. mayores durezas y alcalinidades del agua por uso de gravilla como sustrato) (Bernstein, 2011).

Puntos críticos en calidad del agua en los ACP.

● El oxígeno disuelto en la unidad de peces de un sistema acuapónico está asociado positivamente con el fundamento mismo del sistema. La concentración de OD en el tanque o unidad de peces tiene a su favor, en la mayoría de los sistemas, que el ingreso por gravedad o bombeo del agua de retorno incrementa la oxigenación al caer al tanque. Esto, sin embargo, no debe ser sobreestimado por el acuicultor. Aunque este sea un beneficio extra de los sistemas ACP, la medición constante del OD en el agua determinará la necesidad de aireación suplementaria, particularmente si se agregan a la ecuación las variables de densidad de animales, temperatura del sistema y tasa de alimentación, entre otras.

● Se espera que las concentraciones de metabolitos nitrogenados en un sistema ACP se mantengan por debajo de los valores tóxicos para los peces dada la naturaleza y conceptualización de este sistema productivo. Toda la carga de amoniaco, nitrito y nitrato que abandona la unidad de peces se espera vaya a ser utilizada para el crecimiento de las plantas, particularmente el nitrato que ofrece el mayor nivel de oxidación de estos tres. El diseño del sistema ACP determina si la descarga total de nitrogenados se hace directamente sobre el sustrato donde crecen las plantas o luego de un paso por un biofiltro y una unidad clarificadora.

● El primer paso en varios de los diseños de sistemas ACP consiste en un tratamiento a los sólidos suspendidos que se bombean desde el tanque de peces y que deben ser retenidos antes de acceder a la unidad vegetal. Todas estas partículas suspendidas (ej. material grueso como restos de materia fecal, alimento no consumido y otro detritus) pueden afectar la absorción de nutrientes por parte de las raíces de las plantas al ubicarse sobre y entre éstas, bloqueando mecánicamente al sistema radicular en su función primordial. Pero adicionalmente, si la llegada del efluente del biofiltro, previo a la unidad de plantas, ha cumplido con su función, la descarga incluirá principalmente mayores niveles de nitratos (NO_3) que nitritos o amoniaco, lo cual beneficia directamente la síntesis de proteína vegetal. La concentración de nitrato (NO_3) es uno de los parámetros claves de seguimiento al sistema ACP ya que más que determinar el riesgo de problemas para los peces, permite ver el grado de utilización que se da a este elemento esencial en el inicio de formación de proteína vegetal.

Excesos de NO_3 podrían sugerir que la relación de área destinada para crecimiento de plantas versus la biomasa de peces productora de desechos nitrogenados no está balanceada (Bernstein, 2011).

● El pH del agua de los sistemas ACP tiende a acidificarse debido al tipo de reacciones que se suceden en la unidad de peces (ej. respiración >> liberación de CO_2 >> formación de ácido carbónico >> descenso del pH >> neutralización parcial o total según la capacidad buffer alcalinizante). Esto de cualquier forma es lo que sucede en un sistema productivo convencional. Cuando los valores de pH del agua en un sistema ACP se logran mantener en un rango de 6,5 a 7,5 se favorece no sólo un ambiente de bienestar para los peces si no también para la absorción de nutrientes por parte de las plantas y la actividad nitrificadora de las *Nitrosomonas* y las *Nitrospiras* en el biofiltro (Bernstein, 2011; Mullins *et al*., 2015). Los modelos que a través de su diseño buscan que el descenso de pH sea mínimo o inexistente incluyen un tanque intermedio "alcalinizador" (tanque de adición de base), como fue diseñado originalmente por Rakocy y su grupo en la Universidad de las Islas Vírgenes, uno de los sistemas pioneros en producción de tilapia y cultivos como lechuga, especialmente (Rakocy *et al*., 2006).

Sistemas de Bioflocs (BFT)

Fundamentos de los sistemas BFT

El sistema de tecnología de biofloc (BFT) está basado en la producción *in situ* de microorganismos para la obtención de peces o camarones con un recambio mínimo o cero de agua. Los bioflocs son agregados de algas, bacterias, protozoos y partículas de materia orgánica (restos de alimento, materia fecal). Los bioflocs también pueden incluir a quienes los consumen (gusanos tipo nemátodo y organismos zooplanctónicos) (Hargreaves, 2013). El mantenimiento de esta comunidad biótica se logra garantizando un cociente de carbono: nitrógeno de 12-20: 1. El establecimiento de esta comunidad de organismos tiene efectos en varios niveles: 1) mantenimiento de la CA mediante la toma del nitrógeno para la formación *in situ* de proteína (no acúmulo de metabolitos nitrogenados tóxicos), 2) fuente de alimento para mejorar la tasa de conversión y disminuir los costos de los alimentos y 3) control a patógenos vía interacciones entre poblaciones de microorganismos y evitando un recambio constante con ingreso de aguas que no garantizan inocuidad (Coehlo *et al*., 2017). El proceso de formación de proteína microbiana utilizando comunidades heterotróficas a partir del nitrógeno eliminado por procesos catabólicos, requiere de menos oxígeno que la misma nitrificación tal como ha sido presentado por varios autores (Avnimelech, 2006; Ebeling *et al*., 2006; Azim y Little, 2008). Esto hace a los sistemas BFT muy atractivos, entre sus otras muchas bondades, lo cual permite que los cataloguen como la nueva "Revolución Azul" de la acuicultura (Martinez-Cordova *et al*., 2016).

Un elemento esencial para garantizar la permanencia de esta estructura es la necesidad de una mezcla constante de sus componentes a través de una turbulencia,

sin la cual la suspensión se precipita. Esta turbulencia también incide en el grado de oxigenación del sistema. No sólo es necesaria para mantener la estructura del sistema, si no que cuando está ausente o en un nivel inferior al deseado, la sedimentación de los agregados genera un consumo de oxígeno y la acumulación de metabolitos nitrogenados con efectos en la CA del sistema (Hargreaves, 2013).

Cuando el sistema de BFT opera en exteriores permite la formación de "agua verde" por la exposición constante a la luz natural, mientras que cuando se hace en interiores el sistema se cataloga como de "agua café". El control de la CA en el primero está regido por actividad microbiana y de algas, mientras que en el segundo está gobernado por procesos bacterianos solamente (Hargreaves, 2013).

Puntos críticos en calidad del agua de los BFT

Dentro de los parámetros críticos en el monitoreo de la CA en los sistemas BFT están temperatura, [OD], pH, amoniaco, sólidos suspendidos y precipitables y alcalinidad (Coelho *et al*., 2017)

● La temperatura ideal para un sistema de BFT de especies tropicales está entre 26 y 28°C. Temperaturas menores alteran el desarrollo de especies microbianas y por ende de una parte esencial de la estructura del sistema.

● La [OD] es un sistema BFT debe estar a un mínimo de 4 ppm según la recomendación de varios autores y con un 60% de saturación (= 60% de la máxima capacidad de asimilación o incorporación de oxígeno disuelto en las aguas a determinada temperatura) (Coelho *et al*., 2017).

● Los sólidos suspendidos son prioritarios para ser controlados en un BFT. La acumulación o elevación mayor de éstos es contraproducente para la salud de los animales (precipitación sobre tejido branquial). También desde el punto de vista mecánico, aumentan la resistencia para hacer la mezcla y aireación adecuada del sistema.

● El mantenimiento de bajos niveles de amoniaco en un BFT puede lograrse en buena parte con la participación de bacterias de tipo heterotrófico (= las que usan compuestos orgánicos como fuente de carbono y azúcares, alcoholes y ácidos orgánicos como fuente de energía). La disminución del NH_3 se logra mediante la asimilación del mismo como biomasa bacteriana. Una forma de estimular el crecimiento de las bacterias heterotróficas, y por lo tanto el control sobre la concentración de amoniaco, es manejando el cociente de C: N del sistema. Para esto se recomienda que la relación sea de 12 a 15 de C a 1 de N (12-15: 1). Esta elevación de la relación C: N se logra con la adición de melaza, glicerol, bagazo de caña y otras fuentes de carbohidratos (Hargreaves, 2013; Coelho *et al*., 2017). De otra parte, las llamadas quimio autotróficas (ej. bacterias nitrificantes) obtiene su energía a través de la oxidación de los metabolitos nitrogenados. Sin embargo, en este proceso, el consumo

de base y la alteración subsecuente de la capacidad buffer alcalinizante se afecta (Coelho *et al*., 2017). Esto será discutido más adelante.

● En los sistemas de "agua verde", la participación de las algas en la asimilación de amoniaco es muy importante; por ello los días con mucha nubosidad y menor actividad fotosintética derivada pueden ser de riesgo por la elevación de niveles de NH_3 en el sistema (Hargreaves, 2013).

● Un estimativo para evaluar la capacidad de captación del amoniaco en el sistema es la cuantificación del Nitrógeno Total Amoniacal. Cuando estos valores superan 1 ppm, es recomendada la adición de una fuente externa de carbono con una relación 6 C: 1 N para mejorar la asimilación de NH_3 (Ebeling *et al*., 2006).

● La alcalinidad en un sistema BFT puede ser bastante fluctuante. Azim y Little (2008), encontraron resultados de rangos muy amplios en esta variable durante un ciclo de producción de tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*) (valores entre 8 y 250 ppm) mientras que en los tanques control (sin BFT) sus valores fueron bajos, pero más estables (18 a 27 ppm). Para poder mantener niveles suficientemente altos de carbonato y bicarbonato en el sistema, los autores recomiendan la adición de bicarbonato de sodio para este fin. El ideal es mantener un nivel constante de alcalinidad entre100 y 150 ppm para un sistema BFT (Hargreaves, 2013; Coelho *et al*., 2017).

6. **CONCLUSIONES**

● La calidad del agua es un componente esencial en el montaje, mantenimiento y desarrollo de todo sistema acuícola. Las características de diseño y manejo de los sistemas cerrados que fueron tratados en este capítulo demandan un seguimiento sistemático a los parámetros de calidad del agua. La recirculación, reutilización y el uso compartido entre unidades vegetales y de especies acuáticas dentro de un solo sistema, permiten un uso más racional y ambientalmente sostenible del recurso agua, pero también exigen adecuaciones y monitoreos estrictos para garantizar los estándares mínimos para los organismos cultivados.

● La primera evaluación de la calidad del agua debe hacerse a la fuente misma de abastecimiento y luego al sistema durante todo su proceso desde el montaje hasta la obtención del producto final. La obtención de registros históricos del sistema permitirá una evaluación más objetiva de posibles cambios en la calidad del agua y sus efectos sobre las expectativas de producción o los resultados al final de un ciclo de trabajo.

● Existen varios tipos de metodologías aplicables en los sistemas acuícolas para hacer un seguimiento de la calidad del agua en los mismos. Desde las técnicas de laboratorio estandarizadas y que pueden ser validadas en un laboratorio propio de la

granja hasta los kits comerciales disponibles en el mercado y de fácil implementación para trabajo en campo.

● Los sistemas cerrados en acuicultura tienen como ventaja la no incorporación continua de agua de una fuente externa, por ende, menor riesgo de ingreso de patógenos y contaminantes, pero al mismo tiempo demandan una gran responsabilidad de parte de los acuicultores que los han implementado en lo referente al mantenimiento de valores de las características fisicoquímicas, dentro de rangos aceptables o ideales para el bienestar de las especies producidas y el cumplimiento de las metas productivas.

7. BIBLIOGRAFÍA

● Avnimelech, Y. (2006). Bio-filters. The new for a new comprehensive approach. Aquacultural Enginnering, 34:172-178.

● AWWA (American Water Works Association) (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd ed. Water Environment Federation. 1496 p.

● Azim, M.E., Little, D.C. (2008). The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: water quality, biofloc conposition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquaculture, 283: 29-35.

● Bernstein S. (2011). Aquaponic gardening. New Society Publishers. Gabriola Island, BC, Canadá. 257 p.

● Bowen, H.J.M. (1966). Trace elements in biochemistry. Academic Press, New York.

● Boyd, C.E. 1979. Water quality in warmwater fish ponds. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn.

● Coelho, M.G., Martínez-Córdova, L.R., Martínez-Porchas, M.Miranda-Baeza, A. (2017). Biofloc technology (BFT): a tool for water quality management in aquaculture. Intech – Open Science. http://dc.doi.org/10.57772/66416.

● Colt, J.E., y Tomasso, J.E. (2001). Hatchery water supply and treatment. En G. Wedemeyer. (Ed.)., Fish Hatchery Management (pp. 91-196). 2nd Edition. Bethesda, EUA. American Fisheries Society. 733 p.

● CGR (Contraloría General de la República de Colombia). (2016). Informe sobre el estado de los recursos naturales y del ambiente 2015-2016.Contraloría Delegada para el Medio Ambiente. 252 p.

● Ebeling, J.M., Timmons, M.B., Bisogni, J.J. (2006). Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. Aquaculture, 257: 346-358.

● González, J. F., Landines, M.A., Borbón, J., Correal, M.L., Sánchez Ch., Rodríguez, L. (2014). Evaluación de algunos marcadores de exposición a contaminantes en tres especies de bagres colombianos (Pisces: Siluriformes). Biota Colombiana 15 (Supl. 1): 40-51.

● Hanna, K., Wheaton, Lazur, F.A., VanKeuren, S. (2010). Water quality in identical recirculating systems managed by different aquaculturists. International Journal of Recirculating Aquaculture 11: 55-73.

● Hargreaves, J.A. (2013). Biofloc production systems for aquaculture. Publicación # 4503, Southern Regional Aquaculture Center. USDA, EUA.

● http://www.anh.gov.co (consultada, 11/12/2016).

● http://www.banrep.gov.co/es/producción (consultada, 05/10/2017).

● http://www.minvivienda.gov/co/agua (consultada, 04/11/2017).

● ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). (2016). Estadísticas de comercialización de plaguicidas de uso agrícola 2015. Boletín Técnico.

● IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Instituto de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C. 496 p.

● Martínez-Córdova, L.R., Martínez-Porchas, M., Emerenciano, M., Miranda-Baeza, A., Gollas-Galván, T. (2016). From microbes to fish, the next revolution in food production. Critical Reviews in Biotechnology, 1-9.

● Masser, M.P., Rakocy, J., Losordo, T.M. (1999). Recirculating aquaculture tank production systems: management of recirculating systems. Publicación # 452, Southern Regional Aquaculture Center. USDA, EUA.

● Mullins, C., Nerrie, B., Sink, T.D. (2015). Principles of small-scale aquaponics. Publicación # 5007, Southern Regional Aquaculture Center. USDA, EUA.

● Noga, E. (2010). Fish Disease: Diagnosis and Treatment. 2nd ed. Wiley-Blackwell. 519 p.

● Ochoa, D.M., Peña, L.C., González, J.F. (2002). Waterborne nitrite exposure in white cachama (*Piaractus brachypomus*). *Revista Asociación Colombiana Ictiología (Dahlia)* 5: 27-31.

● Ponce, A. (2012). ¿Cuál locomotora? El desalentador panorama de la minería en Colombia. Debate. Bogotá, D. C. 219 p.

● Rakocy J., Masser, M., Losordo, T. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics- integrating plants and fish culture. Publicación # 454, Southern Regional Aquaculture Center. USDA, EUA.

● Ray, A.J., Drury, T.H., Cecil, A. (2017). Comparing clear-water RAS and biofloc systems: shrimp (*Litopenauus vannamei*) production, water quality, and biofloc nutritional contributions estimated using stable isotopes. Aquacultural Engineering, 77: 9-14.

● Romero, J.A. (2002). Calidad del agua. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

● Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), Technical paper # 589. 288 p.

● Summerfelt, S., Bebak-Williams, J., y Tsukuda, S. (2001). Controlled systems: water reuse and recirculation. En G. Wedemeyer. (Ed.)., Fish Hatchery Management (pp. 285-395). 2nd Edition. Bethesda, EUA. American Fisheries Society. 733 p.

● Svobodová, Z., Máchová, J., Poleszczuk, G., Hóda, J., Hamáâková J., Kroupová, H. (2005). Nitrite poisoning of fish in aquaculture facilities with water-recirculating systems. Acta Vet Brno, 74: 129-137

● Van Rijn, J., Tal, Y., Schreier, H.J. (2006). Denitrification in recirculating systems: theory and applications. Aquacultural Engineering, 34: 364-376.

● Weiner, E.R. (2008). Applications of Environmental Aquatic Chemistry: A Practical Guide. Boca Raton, EUA. CRC Press. 436 p.

CAPÍTULO VII
FUNDAMENTOS DE NUTRICIÓN SUSTENTABLE EN ACUICULTURA

Diego Alberto Rodríguez Avella
Zootecnista
Director Técnico Corporativo Línea Acuicultura. ITALCOL S.A.
E-mail: diegorodriguez@italcol.com

Miguel Ángel Landines Parra
Zootecnista, Ph. D.
Profesor Asociado Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
E-mail: malandinezp@unal.edu.co



Sistema de alimentación manual. (Represa de Betania, Huila-Colombia). Foto: Diego Rodríguez

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas sustentables son aquellos que promueven por la rentabilidad económica de un sistema de producción al tiempo que son capaces de optimizar el uso de los recursos implicados en sus procesos, cuidado del medio ambiente y de las condiciones socio económicas de la población en general y a su vez contemplan el efecto que se puede generar del uso posterior de su producto, permitiendo así a las generaciones futuras disfrutar de los mismos recursos.

El termino sustentabilidad es ampliamente utilizado actualmente por la mayoría de los sistemas de producción agropecuarios ya que existe una presión por producir mayor cantidad de alimentos, necesarios para alimentar a una población humana en constante tasa de crecimiento, estimándose para el año 2050 unos 9,5 billones de habitantes, que demandarán un gran volumen de proteína animal, pero esta producción tiene el desafío de implementar soluciones ecológicamente apropiadas.

La acuicultura es una de las actividades de mayor crecimiento en la última década y se espera que esta tendencia se mantenga, tanto por la disminución de la pesca de los mares y ríos como por la alta eficiencia fisiológica que tienen los peces para utilizar los nutrientes contenidos en la dieta, comparados con las otras especies animales de cultivo terrestres, además de presentar la menor huella de carbono entre los sistemas de producción animal.

La acuicultura juega un papel crucial presente y futuro en el abastecimiento de proteína a la población humana, pero debido a que el medio de crecimiento de los peces es el agua, este recurso debe ser privilegiado en su cuidado y mantenimiento. Los peces de cultivo de agua dulce no consumen agua para su regulación osmótica, lo cual es una gran ventaja cuando se comparan con animales terrestres que necesitan grandes volúmenes de agua para producir un kilogramo de carne, sin embargo, el metabolismo de los nutrientes contenidos en los alimentos balanceados consumidos por el pez y prácticas no adecuadas de alimentación, aportan nutrientes al agua que si no son manejados de forma correcta pueden causar eutrofización.

La minimización del impacto medio ambiental por parte de la acuicultura, está estrechamente relacionada con el máximo aprovechamiento de los nutrientes contenidos en la dieta. Cuando se diseña un sistema de alimentación es necesario contar con un amplio conocimiento de los requerimientos nutricionales de cada especie de pez, la disponibilidad de los nutrientes de las materias primas y de las modificaciones físicas y químicas que sufren los nutrientes durante la fabricación del alimento, así como de la opción de adicionar una serie de aditivos funcionales, que promueven por el aumento en la digestibilidad de algunos nutrientes específicos y otros que disminuyen el estrés inherente de la producción intensiva y de forma indirecta mejoran la absorción de nutrientes en general al modificar la respuesta inmune, la flora microbiana del intestino y la morfología de las células del intestino.

Además de la implementación de un alimento amigable con el medio, es necesario que en cada empresa acuícola se genere la información suficiente para desarrollar e implementar protocolos de alimentación, ajustados a la especie y a la calidad de agua, que eviten la presentación de dos escenarios desfavorables bajo el concepto de la sustentabilidad: la subalimentación y la sobrealimentación. En este capítulo se discutirán los puntos críticos que deben tenerse en cuenta para el diseño, fabricación y suministro de dietas responsables con el medio ambiente que promuevan por la disminución de la descarga de nutrientes al agua.

2. ALIMENTOS AMIGABLES CON EL MEDIO AMBIENTE

Las fuentes de contaminación ambiental al agua derivadas de la acuicultura son diversas, los principales factores a tener en cuenta son las descargas de fósforo, nitrógeno, materia orgánica, metales traza, residuos de medicamentos y alimento no consumido, incluyendo finos. Los desechos producidos tienden a acumularse en el fondo de los estanques deteriorando la calidad del suelo, promoviendo la fermentación anaeróbica y el crecimiento de microorganismos y parásitos patógenos. En el caso de sistemas de producción semi-intensivos con bajo recambio de agua, un porcentaje de estos residuos permanecen disueltos en la columna de agua, ocasionando un estrés continuo a los peces y estimulando un excesivo crecimiento de fitoplancton, que puede consumir en la noche la totalidad del oxígeno disuelto en el agua o modificando las poblaciones de algas al desbalancear las relaciones de fósforo con otros nutrientes, lo cual favorecería el crecimiento de algas cianofíceas las cuales son bajas productoras de oxígeno durante el día y pueden producir sustancias toxicas para los peces como la geosmina que ocasionan el olor y/o sabor a barro del pescado cosechado (Sugiura, 1998).

Sugiura y Hardy (2002), desarrollaron el concepto de Alimento Amigable con el Medio Ambiente, considerando que un alimento responsable, es aquel que minimiza la descarga de nutrientes al medio ambiente acuático. Debe ser formulado de forma tal que el pez digiera, absorba y retenga la mayoría posible de nutrientes contenidos en el alimento. Así, este tipo de alimentos también denominados «Eco Amigables» son de importancia crítica en la industria de la acuicultura, para el medio ambiente y para el bienestar de la humanidad (Figura 1).

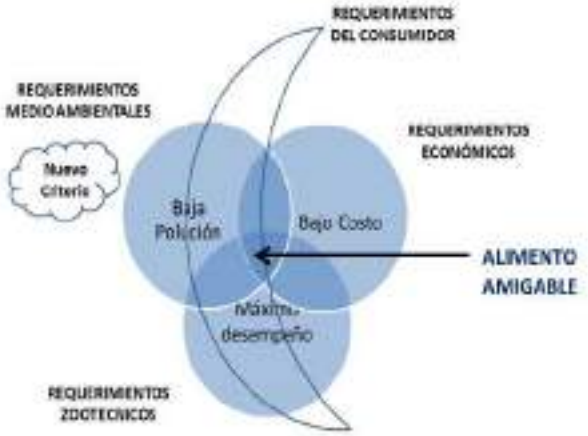


Figura 1. Concepto de Alimento Sostenible. Los alimentos Amigables con el medio deben cubrir varios estándares adicionales al concepto tradicional (Sugiura y Hardy, 2002).

Este modelo considera tres puntos críticos a tener en cuenta para la formulación de Alimentos Amigables con el medio ambiente:

I. Reducción de los nutrientes de la dieta al nivel mínimo del requerimiento de la especie
II. Selección de materias primas sostenibles con altos coeficientes de digestibilidad de nutrientes
III. Procesar adecuadamente el alimento para mejorar la digestibilidad de los nutrientes

3. REQUERIMIENTOS DE NUTRIENTES DIETARIOS MÍNIMOS

Todas las especies de peces y crustáceos requieren para su óptimo crecimiento y bienestar dietas nutricionalmente balanceadas, las cuales deben contener cerca de 40 nutrientes esenciales, incluyendo proteína y aminoácidos específicos, lípidos y ácidos grasos, carbohidratos, vitaminas, minerales, y energía. El conocimiento exacto de los nutrientes requeridos por los peces permite ajustar la dieta al mínimo requerimiento para evitar pérdidas excesivas de nutrientes al medio. El estudio de los requerimientos nutricionales en la dieta de peces y camarones ha sido basado en su mayoría en estudios comparables a los conducidos con animales terrestres. De esta forma, la mayoría de la información disponible sobre los requerimientos nutricionales de las especies acuáticas se deriva de ensayos de alimentación conducidos en laboratorio, en donde los animales son mantenidos en condiciones controladas y sin acceso a algún alimento natural (Rodríguez, 2011).

Proteína

La proteína es un nutriente indispensable para la estructura y función de todas las

especies de peces. Debido a que este nutriente y los aminoácidos que lo componen se utilizan continuamente para el mantenimiento, crecimiento y reproducción, es necesario garantizar un adecuado consumo. Generalmente se ha definido que los organismos tienen un requerimiento proteico, pero realmente el requerimiento es de una mezcla balanceada de aminoácidos esenciales y no esenciales. El inadecuado consumo de estos conlleva a un retardo en el crecimiento, ya que su utilización se privilegiará para el mantenimiento de funciones vitales. Por otro lado, un excesivo consumo puede resultar en una pérdida económica, ya que este nutriente que se considera el más costoso dentro del sistema de formulación de dietas balanceadas, sería utilizado como fuente de energía (NRC, 2011).

Energía

La energía no es un nutriente, pero es una propiedad de los nutrientes que es liberada durante el metabolismo de lípidos, proteínas y carbohidratos. Un correcto balance de energía es importante cuando se formulan dietas para peces, debido a que una cantidad elevada puede resultar en una disminución en el consumo de alimento, también, este exceso de energía en la dieta puede ocasionar un incremento en la deposición de grasa. El requerimiento de energía en peces ha sido reportado en términos de energía bruta (E.B.), energía digestible (E.D.) y de la relación de las anteriores con la proteína de la dieta (Rodríguez, 2011).

Lípidos

Los lípidos son una fuente concentrada de energía para los peces y el conocimiento de su utilización por cada especie es importante en la elaboración de dietas a bajo costo, ya que como fue mencionado anteriormente la proteína en exceso puede utilizarse como energía, siendo un nutriente muy costoso. Además de ser fuente de energía, los lípidos en la dieta son la única fuente de ácidos grasos esenciales, nutrientes necesarios para el adecuado desarrollo y crecimiento de los peces. Un grupo de lípidos denominados fosfolípidos son importantes en el mantenimiento de la estructura celular. Los lípidos también son precursores de hormonas y son necesarios para la absorción de algunas vitaminas. Los lípidos ejercen una función como atractante en dietas balanceadas y su composición en esta puede variar la composición de ácidos grasos del músculo del pez. Generalmente se considera que los peces de aguas frías requieren altas concentraciones de ácidos grasos insaturados omega 3, mientras que los peces de aguas cálidas, como la tilapia y la cachama requieren ácidos grasos omega 6 (NRC, 2011).

Carbohidratos

Las diferencias entre los hábitos alimenticios de las diferentes especies de peces cultivadas, complica la formulación de las dietas comerciales ya que estas tienen que estar diseñadas para cada una de estas especies. Los peces de aguas cálidas, incluyendo la cachama y el yamú, pueden utilizar como principal fuente de energía altos niveles de carbohidratos dietarios, con respecto a peces de agua fría como la trucha o especies marinas (NRC, 1993). Aunque no existe un requerimiento como

tal de carbohidratos para ninguna especie de pez, es importante explorar que peces pueden utilizar altos niveles como fuente de energía, debido a su menor costo y mayor disponibilidad. El principal carbohidrato presente en las dietas balanceadas de peces es el almidón. El almidón está constituido por unidades de glucosa y su estructura está compuesta de dos tipos, uno de cadena lineal denominado amilosa y otro de cadena ramificada denominada amilopectina. El almidón es depositado por las plantas como reserva energética para la planta o dentro de la semilla como fuente de energía para el embrión latente (diferente a los animales cuya reserva energética son los lípidos o grasas). La principal fuente de almidón son los cereales dentro de los que se destacan por su importancia en nutrición de peces el maíz, arroz, trigo y sus subproductos. En algunas regiones de Colombia también se utiliza la yuca como fuente de almidón, esta es una raíz que se cultiva principalmente para el consumo humano (NRC, 2011).

Vitaminas y Minerales

Las vitaminas son sustancias orgánicas requeridas en pequeñas cantidades, esenciales para el crecimiento, mantenimiento, salud y reproducción. Los peces al igual que la mayoría de los animales no pueden sintetizar vitaminas y si lo hacen es solo en pequeñas cantidades, debido a esto deben ser incluidas en la dieta. Las vitaminas pueden dividirse en dos grupos: liposolubles e hidrosolubles, en el primer grupo están incluidas las vitaminas A, D, E y K; en el segundo, la vitamina C, tiamina (B1), riboflavina (B2), ácido pantoténico (B3), piridoxina (B6), cianocobalamina (B12), colina, biotina, ácido fólico y niacina. Cada una de estas vitaminas tiene una función específica en el organismo y la correcta suplementación de cada una en la dieta determinará un óptimo desempeño productivo (Lovell, 1998).

Los minerales son elementos encontrados en la porción de las cenizas de un alimento o de un tejido. Las necesidades de minerales para los peces, así como para la mayoría de los animales son muy importantes para un normal desarrollo y crecimiento. Según los requerimientos expresados en cantidades pueden dividirse en dos grupos: macro y microminerales, estos últimos requeridos en cantidades muy pequeñas. Dentro de las principales funciones de los minerales en el cuerpo del pez está formar parte de la estructura ósea, dentro de este sistema encontramos: calcio, fósforo, magnesio, sodio y potasio. Los minerales también forman parte de proteínas y lípidos, participan en la activación de algunas enzimas y mantienen el equilibrio osmótico, especialmente el sodio, potasio y cloro (Rodríguez, 2011).

Recientemente el *National Research Council* (2011), publicó los requerimientos para peces y crustáceos. En la Tabla 1 se presentan los requerimientos nutricionales para dos de las especies presentes en nuestro país, tilapia y trucha arcoíris.

Tabla 1. Requerimientos nutricionales para tilapia y trucha arcoíris. Modificado de NRC (2011)

Nutrientes[a]	Tilapia	Trucha arcoíris
Energía Digestible (DE, kcal/kg)	3400	4200
Proteína Digestible (%)	29	38
Arginina (%)	1,2	1,5
Histidina (%)	1	0,8
Isoleucina (%)	1	1,1
Leucina (%)	1,9	1,5
Lisina (%)	1,6	2,4
Metionina (%)	0,7	0,7
Metionina + Cisteina (%)	1,0	1,1
Fenilalanina (%)	1,1	0,9
Fenilalanina + Tirosina (%)	1,6	1,8
Treonina (%)	1,1	1,1
Triptofano (%)	0,3	0,3
Valina (%)	1,5	1,2
Taurina (%)	NT	NR
18:2n-6 (%)	0,5-1,0	1,0
18:3n-3 (%)	NT	0,7- 1,0
n3 LC-PUFA (%)	R	0,4 – 0,5
Fosfolípidos (%)	NT	NT (4 - 14)[b]
Calcio (%)	R/0,7	NR
Cloro (%)	0,15	NT
Magnesio (%)	0,06	0,05
Fósforo disponible (%)	0,4	0,7
Potasio (%)	0,2-0,3	NT
Sodio (%)	0,15	NR
Cobre (mg/kg)	5	3
Yodo (mg/kg)	NT	1,1
Hierro (mg/kg)	85	NT
Manganeso (mg/kg)	7	12
Selenio (mg/kg)	NT	0,15
Zinc (mg/kg)	20	15
Vitamina A (mg/kg)	1,8	0,75
Vitamina D (ug/kg)	9	40
Vitamina E (mg/kg)	60	50
Vitamina K (mg/kg)	NT	R
Tiamina (mg/kg)	NT	1
Riboflavina (mg/kg)	6	4

Vitamina B6 (mg/kg)	15	3
Ácido Pantoténico (mg/kg)	10	20
Niacina (mg/kg)	26	10
Biotina (mg/kg)	0,06	0,15
Vitamina B12 (mg/kg)	NR	R
Folacina (mg/kg)	1	1
Colina (mg/kg)	1000	800
Mioinositol (mg/kg)	NR	300
Vitamina C (mg/kg)[c]	15	20

NT: No Testado; NR: No Requerido; R: Requerido, pero No cuantificado
[a] Valores determinados con ingredientes altamente purificados altamente digestibles, así que estos valores representan el 100% de biodisponibilidad
[b] Valores en paréntesis reportados únicamente para estadios larvarios
[c] Como L-Ascorbil – 2 –Monofosfato, forma estable

Furuya (2010), publicó un compendio denominado Tablas Brasileras de Nutrición de Tilapia, a partir de una completa revisión de las investigaciones realizadas en Brasil sobre los aspectos nutricionales de la especie, realizadas por varios grupos de investigación de diferentes universidades especializadas en nutrición de peces (Tabla 2).

Tabla 2. Requerimientos nutricionales de tilapia. Modificado de Furuya (2010)

Nutriente	**Fase producción ciclo tilapia**		
	Reversión	**Post-reversión (hasta 100 g)**	**> 100 Gramos**
Energía Digestible (DE, kcal/kg)	4007	3036	3075
Proteína Cruda (%)	41,3	29,7	26,8
Proteína Digestible (%)	38,6	26,8	24,3
Arginina (%)	1,81	1,26	1,14
Histidina (%)	0,75	0,52	0,47
Isoleucina (%)	1,34	0,93	0,84
Leucina (%)	1,46	1,01	0,92
Lisina (%)	2,20	1,53	1,38
Metionina (%)	0,75	0,52	0,47
Metionina + Cisteina (%)	1,32	0,92	0,83
Fenilalanina + Tirosina (%)	2,38	1,65	1,50
Treonina (%)	1,70	1,18	1,07
Triptofano (%)	0,43	0,30	0,27

Valina (%)	1,20	0,83	0,75
Fósforo disponible (%)	0,75	0,65-0,51	0,51 – 0,46
Cobre (mg/kg)	4		
Hierro (mg/kg)	60		
Selenio (mg/kg)	0,25		
Zinc (mg/kg)	79,51		
Vitamina A (UI/kg)	4769		
Vitamina E (mg/kg)	50		
Vitamina B6 (mg/kg)	5		
Folacina (mg/kg)	1		
Colina (mg/kg)	800		
Vitamina C (mg/kg)	600		

El estudio del requerimiento de todos estos nutrientes para las especies nativas, como la cachama, es aún escaso y se requiere de mayor investigación en esta área (Rodríguez, 2011). Como referencia cercana a esta especie, la *Asian Aquaculture Feed Formulation Database* (http://www.iaffd.com/nutrients), presenta una tabla completa de recomendaciones nutricionales para la especie Pacú (*Piaractus mesopotamicus*) en diferentes etapas, con respecto a su peso vivo, esta especie está muy relacionada filogenéticamente con la cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) y su morfología digestiva es muy similar (Tabla 3).

Tabla 3. Requerimientos nutricionales de pacu (*Piaractus mesopotamicus*), según su peso vivo. Modificado de http://www.iaffd.com/nutrients (2017)

Nutriente	**< 5 g**	**5 - 50 g**	**50 - 200 g**	**200 - 500 g**	**> 500**
Energía Digestible (DE, kcal/kg)	2814	2773	2689	2642	2642
Proteína Cruda (%)	34,95	34,42	33,26	31,58	27,89
Proteína Digestible (%)	31,47	31,05	29,89	28,42	25,16
Extracto Etereo (%)	6,42	6,32	6,00	5,89	5,89
Almidón (%)	12,63	12,63	12,63	14,00	18,95
Arginina (%)	1,68	1.58	1,58	1,58	1,58
Histidina (%)	0,63	0,63	0,53	0,53	0,53
Isoleucina (%)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Leucina (%)	2,21	2,11	2,00	2,00	2,00
Lisina (%)	1,89	1,79	1,79	1,79	1,79
Metionina (%)	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Metionina + Cisteina (%)	0,95	0,84	0,84	0,84	0,84

Fenilalanina (%)	1,05	1,05	0,95	0,95	0,95
Fenilalanina + Tirosina (%)	1,89	1,89	1,79	1,79	1,79
Treonina (%)	1,16	1,16	1,05	1,05	1,05
Triptofano (%)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Valina (%)	1,16	1,05	1,05	1,05	1,05
18:2n-6 (%)	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
18:3n-3 (%)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
n3 LC-PUFA (%)	0,32	0,21	0	0	0
Fosfolipidos (%)	1,26	1,05	1,05	1,05	1,05
Cloro (%)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Magnesio (%)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Fósforo Total (%)	0,95	0,95	0,84	0,84	0,84
Fósforo disponible (%)	0,53	0,53	0,53	0,42	0,42
Potasio (%)	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Sodio (%)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Cobre (mg/kg)	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26
Yodo (mg/kg)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Hierro (mg/kg)	100	100	100	100	100
Manganeso (mg/kg)	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53
Selenio (mg/kg)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Zinc (mg/kg)	21,05	21,05	21,05	21,05	21,05
Vitamina A (UI/kg)	6316	4211	3158,89	3158,89	3158,89
Vitamina D (UI/kg)	1684	1263	421,05	421,05	421,05
Vitamina E (mg/kg)	158,00	105,26	105,26	105,26	105,26
Vitamina K (mg/kg)	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Tiamina (mg/kg)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Riboflavina (mg/kg)	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
Vitamina B6 (mg/kg)	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53
Acido Pantotenico (mg/kg)	15,79	15,79	15,79	15,79	15,79
Niacina (mg/kg)	27,37	27,37	27,37	27,37	27,37
Biotina (mg/kg)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Folacina (mg/kg)	2,11	1,05	1,05	1,05	1,05
Colina (mg/kg)	1053	1053	1053	1053	1053
Mioinositol (mg/kg)	157,89	157,89	157,89	157,89	157,89
Vitamina C (mg/kg)	105,26	105,26	105,26	105,26	105,26

En las tablas 4 y 5 se presentan las recomendaciones nutricionales condensadas por la IAFFD (2017) para las especies tilapia y trucha arcoíris.

Tabla 4. Requerimientos nutricionales de tilapia (*Oreochromis* sp.), según su peso vivo. Modificado de http://www.iaffd.com/nutrients (2017)

Nutriente	< 5 g	5 - 50 g	50-200 g	200-500 g	500-1500 g	> 1500 g
Energía Digestible (DE, kcal/kg)	3288	3268	3070	3096	3185	3215
Proteína Cruda (%)	42,32	41,05	35,79	34,74	34,42	29,16
Proteína Digestible (%)	38,84	37,79	32,95	32,00	31,68	26,84
Extracto Etereo (%)	6,42	6,32	6,32	6,63	7,26	10,84
Almidón (%)	12,63	15,79	18,53	20,21	21,58	21,58
Arginina (%)	1,68	1,58	1,58	1,47	1,47	1,47
Histidina (%)	0,53	0,53	0,53	0,42	0,42	0,42
Isoleucina (%)	0,95	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Leucina (%)	1,68	1,58	1,58	1,47	1,47	1,47
Lisina (%)	1.89	1,79	1,68	1,68	1,58	1,58
Metionina (%)	0,74	0,74	0,63	0,63	0,63	0,63
Metionina + Cisteina (%)	1,16	1,10	1,05	1,05	1,05	1,05
Fenilalanina (%)	0,95	0,95	0,84	0,84	0,84	0,84
Fenilalanina + Tirosina (%)	1,58	1,58	1,47	1,37	1,37	1,37
Treonina (%)	1,16	1,16	1,05	1,05	1,05	1,05
Triptofano (%)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Valina (%)	1,16	1,16	1,16	1,05	1,05	1,05
18:2n-6 (%)	0,95	0,95	0,84	0,74	0,63	0,84
18:3n-3 (%)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
n3 LC-PUFA (%)	0,21	0,21	0,11	0	0	0
Fosfolipidos (%)	1,26	1,05	0,53	0,53	0,53	0,53
Cloro (%)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Magnesio (%)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Fósforo Total (%)	1,37	1,26	1,16	1,16	1,05	1,05
Fósforo digestible (%)	0,74	0,74	0,63	0,63	0,53	0,53
Potasio (%)	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Sodio (%)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Cobre (mg/kg)	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26
Yodo (mg/kg)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Hierro (mg/kg)	100	100	100	100	100	100
Manganeso (mg/kg)	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53
Selenio (mg/kg)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21

Zinc (mg/kg)	21,05	21,05	21,05	21,05	21,05	21,05
Vitamina A (UI/kg)	6316	4211	3158	3158	3158	3158
Vitamina D (UI/kg)	1684	1263	421	421	421	421
Vitamina E (mg/kg)	126,32	126,32	63,16	63,16	63,16	63,16
Vitamina K (mg/kg)	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Tiamina (mg/kg)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Riboflavina (mg/kg)	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
Vitamina B6 (mg/kg)	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53
Acido Pantotenico (mg/kg)	15,79	15,79	15,79	15,79	15,79	15,79
Niacina (mg/kg)	27,37	27,37	27,37	27,37	27,37	27,37
Biotina (mg/kg)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Folacina (mg/kg)	2,11	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Colina (mg/kg)	1052,63	1052,63	1052,63	1052,63	1052,63	1052,63
Mioinositol (mg/kg)	157,89	157,89	157,89	157,89	157,89	157,89
Vitamina C (mg/kg)	105,26	105,26	105,26	105,26	105,26	105,26

Tabla 5. Requerimientos nutricionales de trucha arcoíris (*Oncorhynchus miikys*), según su peso vivo. Modificado de http://www.iaffd.com/nutrients (2017)

Nutriente	< 5g	5-50g	50-200g	200-500g	500-1500g	> 1500g
Energía Digestible (DE, kcal/kg)	4419,15	4321,68	4404,2	4813,05	5312,62	5312,62
Proteína Cruda (%)	50,74	47,47	42,32	38,42	37,47	37,47
Proteína Digestible (%)	45,68	42,74	38,11	34,53	33,79	33,79
Extracto Etereo (%)	15,37	16,21	19,89	26,11	32,21	32,21
Almidón (%)	12,63	12,63	13,05	14,42	14,42	14,42
Arginina (%)	2,11	2,00	1,79	1,58	1,58	1,58
Histidina (%)	1,05	0,95	0,84	0,74	0,74	0,74
Isoleucina (%)	1,37	1,26	1,16	1,05	1,05	1,05
Leucina (%)	2,63	2,42	2,21	2,00	2,00	2,00
Lisina (%)	2,74	2,63	2,32	2,11	2,11	2,11
Metionina (%)	1,05	0,95	0,84	0,74	0,74	0,74
Metionina + Cisteina (%)	1,37	1,37	1,16	1,05	1,05	1,05
Fenilalanina (%)	1,47	1,37	1,16	1,05	1,05	1,05
Fenilalanina + Tirosina (%)	2,53	2,32	2,11	1,89	1,89	1,89

Treonina (%)	1,68	1,58	1,47	1,37	1,37	1,37
Triptofano (%)	0,42	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Valina (%)	1,79	1,68	1,47	1,37	1,37	1,37
18:2n-6 (%)	0,53	0,53	0,42	0,32	0,32	0,32
n3 LC-PUFA (%)	0,53	0,53	0,42	0,32	0,32	0,32
Sumatoria n3	1,05	1,05	0,95	0,95	0,84	0,84
Fosfolipidos (%)	1,58	1,05	0,53	0,53	0,53	0,53
Cloro (%)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Magnesio (%)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Fósforo Total (%)	1,68	1,58	1,58	0,95	0,84	0,84
Fósforo digestible (%)	0,95	0,84	0,84	0,53	0,42	0,42
Potasio (%)	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Sodio (%)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Cobre (mg/kg)	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26
Yodo (mg/kg)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Hierro (mg/kg)	100	100	100	100	100	100
Manganeso (mg/kg)	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53
Selenio (mg/kg)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Zinc (mg/kg)	21,05	21,05	21,05	21,05	21,05	21,05
Vitamina A (UI/kg)	6316,00	4210,52	3157,89	3157,89	3157,89	4210,52
Vitamina D (UI/kg)	1684,00	1263,00	421,05	421,05	421,05	421,05
Vitamina E (mg/kg)	210,53	157,89	105,26	105,26	105,26	105,26
Vitamina K (mg/kg)	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Tiamina (mg/kg)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Riboflavina (mg/kg)	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32	6,32
Vitamina B6 (mg/kg)	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53
Acido Pantotenico (mg/kg)	15,79	15,79	15,79	15,79	15,79	15,79
Niacina (mg/kg)	27,37	27,37	27,37	27,37	27,37	27,37
Biotina (mg/kg)	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Folacina (mg/kg)	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11
Colina (mg/kg)	1053,00	1053,00	1053,00	1053,00	1053,00	1053,00
Mioinositol (mg/kg)	158	158	158	158	158	158
Vitamina C (mg/kg)	210,53	157,89	105,26	105,26	105,26	210,53

4. SELECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS SOSTENIBLES

Tradicionalmente los alimentos para acuicultura estuvieron basados en dos materias primas básicas para la formulación: Harina de Pescado y Aceite de Pescado, obtenidos a partir de peces capturados en los océanos. Sin embargo, la presión de pesca, el crecimiento de la acuicultura y el consumo humano directo de los productos y subproductos de la pesca, han ocasionado una disminución en la oferta de estas dos materias primas extractivas y un aumento de su costo en el mercado internacional. Como fue mencionado, la acuicultura es el sector pecuario de mayor crecimiento, para que este crecimiento sea sostenible y siga esta tendencia, es necesario el reemplazo de estas dos materias primas por otras alternativas que cubran los requerimientos nutricionales de los peces (Tacon, *et al*., 2009).

La revisión más reciente de la descripción nutricional de las materias primas de uso común en acuicultura fue presentada por la AAFFD (*The Asian Aquaculture Feed Formulation Database* (AAFFD)), cuya última versión fue presentada en agosto de 2017 con el nombre de *International Aquaculture Feed Formulation Database* (http://www.iaffd.com). Esta compilación fue liderada por el laboratorio de Nutrición de peces de la Universidad de Guelph, bajo un proyecto internacional que busca ampliar los conocimientos de nutrición de las principales especies de cultivo y la descripción completa de las materias primas tanto química como biológicamente, con el fin de promover la acuicultura y el diseño de fórmulas ajustadas y eficientes. A continuación, se presenta la descripción nutricional detallada de las principales materias primas comúnmente utilizadas en dietas para peces (Tablas 6 a 8).

Tabla 6. Descripción bromatológica de materias primas comúnmente utilizadas en dietas para peces. Modificado de http://www.iaffd.com/nutrients (2017)

Materia prima	Materia Seca (%)	Humedad (%)	Proteína Cruda (%)	Extracto Etéreo (%)	Fibra Cruda (%)	Cenizas (%)	Energía Bruta (kcal/kg)
Harina de Pescado, anchoveta	91,9	8,1	67,0	8,8	0,7	15,4	4629
Harina de Pescado, sardina	93,5	6,5	66,1	7,3	0,8	16,7	4548
Harina de Pescado, atún, Subproductos	92,6	7,4	58,1	9,2	0,6	22,0	4270
Harina de Cabeza de Camarón	95,2	4,8	41,0	5,6	0,0	33,0	3468
Harina de Krill	93,0	7,0	57,7	16,0	3,0	12,8	5010
Harina de Calamar	92,9	7,1	72,1	6,0	1,2	7,4	4928

Harina de Sangre, Secado *spray-dried*	89,5	10,5	86,3	0,6	0,2	3,2	4926
Harina de Plumas, 81% PC	95,3	4,7	80,9	9,7	0,9	1,9	5581
Harina de Carne y Hueso, 50% CP	93,6	6,4	50,2	10,0	2,3	30,5	3882
Harina de Cerdo, 65% PC	97,8	2,2	65,5	13,5	2,0	13,0	4971
Harina de Vísceras de Pollo, 60% PC	92,6	7,4	60,0	12,4	2,6	15,3	4739
Harina de Yuca, raíz	87,0	13,0	2,9	0,7	3,9	2,7	3510
Gluten de Maíz, 60% PC	90,9	9,1	59,9	1,6	2,0	2,4	4625
Concentrado de Proteína de Maíz, 77% PC	93,0	7,0	77,5	3,5	1,0	1,3	5134
Grano de Maíz Amarillo	87,3	12,7	8,6	3,5	1,8	1,3	3816
Destilado de Maíz, DDGS	90,3	9,7	27,3	8,5	8,0	5,6	4321
Torta de Palmiste, solvente	92,0	8,0	17,5	1,4	19,6	3,9	3929
Torta de Canola, solvente, 37% PC	90,0	10,0	37,0	2,0	12,7	7,4	4045
Harina de Arroz	89,5	10,5	12,5	11,5	12,7	13,2	3903
Grano de Arroz Quebrado	89,6	10,5	8,9	1,4	0,8	1,1	3808
Grano de Sorgo	88,1	11,9	10,1	2,9	2,1	1,8	3819
Concentrado de Proteína de Soya, 60% PC	92,0	8,0	61,9	1,6	3,9	5,1	4591
Torta de Soya, solvente, 45% PC	89,2	10,8	44,0	1,4	5,9	6,2	4140
Salvado de Trigo	87,3	12,7	17,3	3,9	10,4	5,6	3798
Harina de Trigo	87,7	12,3	12,7	1,8	1,3	1,3	3800
Grano de Trigo Duro Rojo de Invierno	88,5	11,5	13,1	2,1	3,1	2,1	3829
Harina de Espirulina, 55% PC	92,8	7,2	55,3	4,0	2,1	7,6	4546
Aceite de Pescado, anchoveta	99,0	1,0	0,0	99,0	0,0	0,0	9228

Aceite de Pollo	99,0	1,0	0,0	99,0	0,0	0,0	9228
Aceite de Canola	99,0	1,0	0,0	98,8	0,0	0,2	9211
Aceite de Palma	99,0	1,0	0,0	99,0	0,0	0,0	9228
Aceite de Soya	99,0	1,0	0,0	99,0	0,0	0,0	9228
Lecitina de Soya	99,0	1,0	0,0	91,0	0,0	3,0	8685

Las principales materias primas utilizadas en las formulaciones de dietas de peces se pueden agrupar de la siguiente forma: fuentes proteicas de origen animal (incluyendo harinas de pescado, harinas de subproductos de animales terrestres, harinas de insectos); fuentes proteicas de origen vegetal (subproductos de cereales, semillas oleaginosas y sus derivados y otras); fuentes de proteína celular (algas, bacterias, levaduras); fuentes de lípidos (aceites de origen marino, aceites de subproductos de animales terrestres, aceites vegetales); otras fuentes de origen vegetal (harinas de plantas acuáticas) y aditivos alimentarios (incluyendo aminoácidos sintéticos, minerales, vitaminas, preservantes, antioxidantes y otros) (Simonson, 2016).

Tabla 7. Perfil de aminoácidos de materias primas comúnmente utilizadas en dietas para peces. Modificado de http://www.iaffd.com/feed.html (2017)

Materia prima	Arg (%)	His (%)	Iso (%)	Leu (%)	Lys (%)	Met (%)	Phe (%)	Thr (%)	Tryp (%)	Val (%)	Cys (%)	Tau (%)
Harina de Pescado, anchoveta	3,89	1,60	3,08	5,00	5,06	1,94	2,75	2,81	0,76	3,48	0,61	0,21
Harina de Pescado, sardina	3,96	1,79	2,80	4,23	4,85	1,80	2,44	2,68	0,61	3,16	0,60	0,21
Harina de Pescado, atún, Subproductos	3,35	1,77	2,43	3,80	4,08	1,48	2,27	2,37	0,61	2,78	0,44	0,13
Harina de Cabeza de Camarón	2,34	2,34	5,25	3,03	1,11	0,53	1,76	1,39	0,78	1,35	0,55	0,03
Harina de Krill	4,46	1,49	3,58	5,50	5,00	2,13	3,68	3,15	0,84	3,69	1,31	0,54
Harina de Calamar	4,66	2,07	3,10	5,41	4,88	1,98	3,31	2,90	0,88	3,28	0,78	0,36
Harina de Sangre, Secado *spray-dried*	4,80	4,84	0,93	11,10	7,93	1,37	6,61	4,75	0,48	7,40	0,80	0,15
Harina de Plumas, 81% PC	5,30	0,70	3,80	6,50	1,30	0,58	4,80	3,80	0,50	5,70	2,00	0,05
Harina de Carne y Hueso, 50% CP	3,37	1,01	1,74	4,03	2,48	0,83	1,91	1,80	0,32	2,30	0,71	0,04
Harina de Cerdo, 65% PC	4,00	1,70	2,30	4,60	3,70	0,88	2,70	2,50	0,52	3,20	0,60	0,25

Harina de Vísceras de Pollo, 60% PC	4,41	1,25	2,77	5,01	3,14	1,14	3,30	2,12	0,60	3,53	0,75	0,20
Harina de Yuca, raíz	0,15	0,10	0,08	0,15	0,11	0,11	0,08	0,08	0,02	0,13	0,05	0,00
Gluten de Maíz, 60% PC	2,11	1,42	3,01	12,43	1,05	1,36	5,30	1,99	0,30	3,39	1,08	0,00
Concentrado de Proteína de Maíz, 77% PC	2,53	1,59	3,20	13,64	1,76	1,86	5,18	2,73	0,32	3,76	1,15	0,00
Grano de Maíz Amarillo	0,26	0,17	0,34	1,37	0,15	0,21	0,52	0,28	0,04	0,39	0,15	0,00
Destilado de Maíz, DDGS	1,21	0,74	1,20	2,24	0,76	0,66	1,33	0,98	0,42	1,36	0,54	0,00
Torta de Palmiste, solvente	2,36	0,32	0,64	1,19	0,54	0,33	0,79	0,61	0,20	0,82	0,28	0,00
Torta de Canola, solvente, 37% PC	1,88	20,60	1,45	3,59	1,51	0,89	1,91	1,55	0,53	1,88	0,75	0,00
Harina de Arroz	1,13	0,31	0,47	0,85	0,55	0,22	0,65	0,44	0,13	0,68	0,26	0,00
Grano de Arroz Quebrado	0,69	0,19	0,39	0,68	0,32	0,21	0,44	0,31	0,17	0,50	0,14	0,00
Grano de Sorgo	0,59	0,57	0,60	1,23	0,47	0,66	1,27	0,69	0,83	1,43	0,64	0,00
Concentrado de Proteína de Soya, 60% PC	4,94	1,64	2,83	4,78	3,65	0,80	3,25	2,53	0,82	3,11	0,99	0,00
Torta de Soya, solvente, 45% PC	3,30	1,16	2,11	3,41	2,76	0,60	2,23	1,73	0,61	2,21	0,86	0,00
Salvado de Trigo	1,16	0,47	0,55	1,04	0,69	0,26	0,67	0,55	0,24	0,80	0,36	0,00
Harina de Trigo	0,60	0,21	0,33	0,60	0,27	0,13	0,54	0,27	0,13	0,40	0,25	0,00
Grano de Trigo Duro Rojo de Invierno	0,55	0,21	0,42	0,71	0,29	0,17	0,63	0,34	0,13	0,50	0,23	0,00
Harina de Espirulina, 55% PC	4,03	0,94	3,05	4,73	2,43	1,08	2,57	2,76	0,90	3,70	0,51	0,00

Las fuentes proteicas de origen marino fueron importantes debido al desconocimiento de los requerimientos nutricionales de las especies de cultivo. Estas harinas aportaban un balance ideal de aminoácidos y de ácidos grasos esenciales de alta palatabilidad para la mayoría de las especies. Con los nuevos conocimientos científicos, es posible disminuir estas fuentes sobre todo en dietas de levante y engorde y proteger así poblaciones de peces en estados vulnerables sin comprometer los recursos marinos (Tacon *et al*., 2009).

Las fuentes proteicas de origen terrestre son ingredientes derivados a partir de subproductos de animales que fueron destinados al consumo humano. Estos subproductos son procesados en equipos especiales para su deshidratación,

obteniéndose harinas de alta calidad que han resultado en una excelente fuente de reemplazo de harina de pescado. La harina de vísceras de pollo, por ejemplo, presenta un perfil de aminoácidos similar al de la harina de pescado (Tacon *et al*., 2009). Otros subproductos de aves, como hemoglobina y harina de plumas hidrolizadas y de otras especies como bovinos y cerdos, harinas de carne y harinas de sangre son fuentes valiosas de fósforo disponible y de algunos minerales como el hierro. Sin embargo, estas materias primas generalmente muestran niveles inferiores en los aminoácidos metionina, lisina, histidina y triptófano cuando se comparan con la harina de pescado (Simonson, 2016).

Actualmente, materias primas de origen vegetal como tortas de oleaginosas, subproductos concentrados de cereales y granos de leguminosas, son utilizadas ampliamente en dietas acuícolas, por su relativo alto valor de proteína y aporte de aminoácidos y porque presentan ventajas, como su fácil consecución durante el año y precio más competitivo. Sin embargo, estas fuentes de proteína presentan valores biológicos menores, desbalances de aminoácidos y presencia de factores anti nutricionales (Tacon *et al*., 2009). Son deficientes principalmente en los aminoácidos metionina y cisteína y cerca del 70% del fósforo total corresponde a fitato, forma de fósforo que no es disponible para los peces y se considera un factor anti nutricional; este tema se ampliará con mayor profundidad más adelante en la sección de eutrofización.

Tabla 8. Perfil de ácidos grasos de materias primas comúnmente utilizadas en dietas para peces. Modificado de http://www.iaffd.com/feed.html (2017)

Materia prima	Palmítico 16:0 (%)	Oleico 18:1 n-9 (%)	Linoleico 18:2 n-6 (%)	Linolénico 18:3 n-3 (%)	Araquidónico 20:4 n-6 (%)	EPA 20:5 n-3 (%)	DHA 22:6 n-3 (%)
Harina de Pescado, anchoveta	1,54	1,02	0,11	0,07	0,01	1,50	0,78
Harina de Pescado, sardina	1,19	0,83	0,10	0,12	0,12	1,24	0,94
Harina de Pescado, atún, Subproductos	1,79	1,66	0,17	0,07	0,20	0,54	2,45
Harina de Cabeza de Camarón	0,85	1,10	0,13	0,04	0,04	0,53	0,56
Harina de Krill	3,40	2,68	0,34	0,38	0,05	2,78	1,82
Harina de Calamar	0,93	0,94	0,00	0,00	0,00	0,85	1,02
Harina de Sangre, Secado spray-dried	0,15	0,24	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Harina de Plumas, 81% PC	2,10	3,62	1,89	0,10	0,00	0,00	0,00
Harina de Carne y Hueso, 50% CP	2,38	4,12	1,02	0,10	0,00	0,00	0,00

Harina de Cerdo, 65% PC	3,21	5,56	1,38	0,14	0,00	0,00	0,00
Harina de Visceras de Pollo, 60% PC	2,68	4,63	2,42	0,12	0,00	0,00	0,00
Harina de Yuca, raíz	0,09	0,16	0,40	0,01	0,01	0,00	0,00
Gluten de Maíz, 60% PC	0,17	0,39	0,93	0,01	0,00	0,00	0,00
Concentrado de Proteína de Maíz, 77% PC	0,38	0,85	2,04	0,02	0,00	0,00	0,00
Grano de Maíz Amarillo	0,38	0,85	2,04	0,02	0,00	0,00	0,00
Destilado de Maíz, DDGS	0,93	2,07	4,96	0,06	0,00	0,00	0,00
Torta de Palmiste, solvente	0,61	0,51	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
Torta de Canola, solvente, 37% PC	0,06	1,21	0,41	0,24	0,00	0,00	0,00
Harina de Arroz	1,71	3,99	3,10	0,32	0,22	0,00	0,00
Grano de Arroz Quebrado	0,26	0,54	0,51	0,03	0,00	0,00	0,00
Grano de Sorgo	0,40	0,90	1,42	0,08	0,00	0,00	0,00
Concentrado de Proteína de Soya, 60% PC	0,16	0,36	0,80	0,11	0,00	0,00	0,00
Torta de Soya, solvente, 45% PC	0,14	0,31	0,70	0,09	0,00	0,00	0,00
Salvado de Trigo	0,74	0,55	2,42	0,20	0,00	0,00	0,00
Harina de Trigo	0,15	0,13	0,50	0,00	0,00	0,01	0,00
Grano de Trigo Duro Rojo de Invierno	0,40	0,29	1,30	0,11	0,00	0,00	0,00
Harina de Espirulina, 55% PC	1,83	0,21	0,69	0,02	0,00	0,01	0,00
Aceite de Pescado, anchoveta	17,40	11,60	1,20	0,80	0,10	17,00	8,80
Aceite de Pollo	21,60	37,30	19,50	1,00	0,00	0,00	0,00
Aceite de Canola	3,10	60,00	20,30	12,00	0,00	0,00	0,00
Aceite de Palma	43,50	36,60	9,10	0,20	0,00	0,00	0,00
Aceite de Soya	10,30	22,80	51,00	6,80	0,00	0,00	0,00
Lecitina de Soya	15,77	12,98	62,92	2,02	0,00	0,00	0,00

Cereales como granos y otras fuentes de almidón, como raíces y tubérculos pueden ser una fuente de energía importante dependiendo del comportamiento alimentario de la especie. Adicionalmente, para el proceso de extrusión se requiere un mínimo de estas materias primas para lograr la formación del alimento durante el procesamiento

y otras características físicas del producto obtenido como hidroestablidad, flotabilidad y finos.

5. SELECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS CON ALTOS COEFICIENTES DE DIGESTIBILIDAD DE NUTRIENTES

El valor nutricional de los ingredientes utilizados en dietas para peces depende en gran parte de la biodisponibilidad de sus macromoléculas y componentes para la especie que está siendo alimentada (Aksnes y Opstvedt, 1998; Smith, 1971). Los coeficientes de digestibilidad aparente (CDA), cuantifican la cantidad de nutrientes o energía que no son evacuados por las heces y son una herramienta indispensable para la formulación de dietas eficientes. La digestibilidad de los alimentos es el factor de mayor variabilidad en el proceso de utilización y la digestión incompleta representa la mayoría de los nutrientes perdidos en las heces (Aksnes *et al*., 1996; Smith *et al*., 1980). Es conocido que las diferentes especies de peces aprovechan de forma diferente los alimentos, siendo esa variación cuantificada a través de la determinación de los coeficientes de digestibilidad (Pezzato *et al*., 2004). La determinación de coeficientes de digestibilidad para dietas, nutrientes y recursos alimenticios, se torna así en un punto crítico de importancia para la formulación de alimentos comerciales amigables con el medio ambiente. Durante la determinación de los coeficientes se busca asegurar el bienestar al animal, rapidez, simplicidad y sobre todo precisión para cuantificar las pérdidas fecales.

La tabla 9 presenta los coeficientes de digestibilidad de nutrientes específicos para materias primas seleccionadas, utilizadas convencionalmente en las dietas para peces en el país.

Tabla 9. Coeficientes de digestibilidad aparente de principales nutrientes en materias primas comúnmente utilizadas en dietas para peces. Modificado de http://www.iaffd.com/feed.html (2017)

Materia prima	CDA Materia Seca (%)	CDA Energía Bruta (%)	CDA Proteína Cruda (%)	CDA Extracto Etéreo (%)	CDA Lisina (%)	CDA Metionina (%)
Harina de Pescado, anchoveta	85	57	83	78	89	89
Harina de Pescado, sardina	78	63	86	54	84	84
Harina de Pescado, atún, Subproductos	86	70	88	67	71	71
Harina de Cabeza de Camarón	61	71	79	84	79	79
Harina de Krill	78	86	84	99	84	84
Harina de Calamar	85	89	91	90	91	91

Harina de Sangre, Secado *spray-dried*	78	77	74	90	79	72
Harina de Plumas, 81% PC	73	74	74	74	74	74
Harina de Carne y Hueso, 50% CP	71	82	82	83	82	82
Harina de Cerdo, 65% PC	75	82	85	80	82	83
Harina de Vísceras de Pollo, 60% PC	79	85	85	85	85	85
Harina de Yuca, raíz	79	80	80	85	80	80
Gluten de Maíz, 60% PC	82	84	90	85	90	90
Concentrado de Proteína de Maíz, 77% PC	80	81	82	84	82	82
Grano de Maíz Amarillo	78	79	79	80	79	79
Destilado de Maíz, DDGS	57	62	80	81	80	80
Torta de Palmiste, solvente	46	49	75	85	75	75
Torta de Canola, solvente, 37% PC	66	71	89	85	89	89
Harina de Arroz	66	72	71	85	71	71
Grano de Arroz Quebrado	84	84	92	85	92	92
Grano de Sorgo	77	78	79	85	79	79
Concentrado de Proteína de Soya, 60% PC	86	90	99	95	99	99
Torta de Soya, solvente, 45% PC	69	74	89	90	89	89
Salvado de Trigo	55	58	77	80	77	77
Harina de Trigo	80	81	90	85	90	90
Grano de Trigo Duro Rojo de Invierno	74	74	67	80	67	67
Harina de Espirulina, 55% PC	78	82	83	90	83	83
Aceite de Pescado, anchoveta	95	95	0	95	0	0
Aceite de Pollo	90	90	0	90	0	0
Aceite de Canola	95	95	0	95	0	0
Aceite de Palma	90	90	0	90	0	0
Aceite de Soya	95	95	0	95	0	0
Lecitina de Soya	80	83	0	85	0	0

6. PROCESAMIENTO DEL ALIMENTO PARA PECES

El procesamiento de la dieta es uno de los factores que también tiene influencia en la disponibilidad de los nutrientes y en la utilización del alimento ya que interfiere

en la estabilidad, dureza, plasticidad y orientación de las estructuras en función, principalmente, del calor y de la humedad.

La extrusión es la metodología de procesamiento más utilizada en la actualidad para la elaboración de dietas para peces y mascotas. Las partículas son aglomeradas, compactadas, acomodadas y orientadas, permitiendo la obtención de nuevas estructuras (Gutiérrez, 1988). La extrusión facilita el manejo del cultivo, debido al eficiente control de la alimentación y a la mayor estabilidad de los granos en el agua (Akness *et al*., 1997).

El proceso de peletización es la otra metodología, menos frecuente, para la fabricación de alimentos para peces. Een este, el alimento pasa por un proceso relativamente menos complejo, con menor gasto de energía que la extrusión y también hace posible la inclusión de mayor cantidad de ingredientes en la dieta. Las diferencias de los procesamientos y sus consecuentes transformaciones en el alimento, pueden tener como consecuencias diferentes grados de digestión y absorción de nutrientes.

El proceso de extrusión incluye un proceso de cocción a alta temperatura y presión en corto tiempo (5-10 segundos) producido por la disipación de la energía mecánica, la cual es transferida a la mezcla por medio de los elementos (tornillos sinfín, pared del barril o camisa) del extrusor. Durante el proceso, la mezcla que se alimenta al extrusor es en forma de harina; a medida que se somete a alta presión y temperatura y a las fuerzas de corte de los elementos actúan, esta cambia hasta formar una masa visco-elástica con características similares a un plástico derretido, por lo cual también se le conoce como un proceso de cocción termoplástico.

El uso de la tecnología de extrusión en todos los tipos de alimentos acuáticos ha aumentado con rapidez en todo el mundo, siendo la más utilizada en la actualidad. Su crecimiento se debe principalmente, a la versatilidad del proceso que permite producir alimentos densos (550 g/L) para camarones y otras especies que se alimentan en el fondo, semi-densos (500-525) g/L) que se hunden lentamente, para salmones y flotantes (<500 g/L) para especies que se alimentan en la superficie tales como tilapia, cachama y trucha, y especies de importancia ornamental, como las carpas koi y muchos peces de acuario.

En el proceso de extrusión ocurren una serie de fenómenos casi todos ellos ventajosos, estos son (Riaz, 2006):

• Mejora la digestibilidad, en particular la de los cereales (dextrinización) ya que se rompe la estructura molecular de la amilosa y amilopectina, liberando cadenas más cortas de glucosa que a su vez pueden ser digeridas mejor y con mayor facilidad en el tracto digestivo.
• Coagulación parcial de las proteínas mejorando su digestibilidad. Estas junto con el almidón, se unen formando una mezcla homogénea y cohesionada.

• Inactivación por medio de tratamiento térmico, de las enzimas deteriorantes de la fracción de grasa de las materias primas, como las lipasas y lipoxigenasas, las cuales catalizan reacciones químicas que llevan a la formación de compuestos de fácil rancidez.
• Inactivación de factores inhibidores del crecimiento. La alta temperatura necesaria para eliminar dichos factores, no atenta contra la calidad nutritiva de la mezcla ya que se aplica por breve tiempo.
• Incrementa la resistencia de los alimentos a su degradación en el agua (hidroestabilidad).

En la tabla 10 se presentan algunas características del producto extruido, comparado con el producto peletizado.

Tabla 10. Características del alimento para peces producido mediante los procesos de manufactura más comunes de la industria. Adaptado de Hardy (2002)

Característica	Extruido	Peletizado
Temperatura Máxima del Proceso (°C)	150	95
Exposición al Vapor (minutos)	2 – 5	< 1
Digestibilidad del almidón	Alto	Bajo
Gelatinización del Almidón (%)	> 80	< 40
Flotabilidad	Flota/Hunde	Hunde
Estabilidad en el agua	Alto	Bajo
Densidad (g/L)	400 – 500	590
Durabilidad	Alto	Bajo
Destrucción de nutrientes	Medio	Bajo
Nivel Máximo de Grasa (%)	38	18
Máximo de Finos (%)	< 1	2 – 3
Costo	Alto	Bajo

Se pueden utilizar un amplio rango de materias primas para producir alimentos extruidos para peces. Sin embargo, se deben seleccionar las mejores, puesto que las mismas tienen una consecuencia importante en cuanto a calidad, hidroestabilidad y expansión del producto final.

Las biomoléculas contenidas en la dieta, provenientes de cada ingrediente utilizado, presentan cambios físicos y químicos cuando son sometidos a las condiciones extremas del proceso de extrusión. Los ingredientes proteicos son el componente más importante de los alimentos para peces, debido a que estos tienen bajos requerimientos de energía. Dichos ingredientes, pueden subdividirse según su origen: vegetal y animal, siendo los primeros más importantes en cuanto a características funcionales del agregado, por sus propiedades de absorción de agua, elasticidad

y capacidad de cohesión. Sin embargo, el valor nutritivo de las proteínas de origen animal es mayor, pues su perfil de aminoácidos y digestibilidad son superiores (Cheng y Hardy, 2003; Pezzato *et al*., 2002; Abimorad y Carneiro, 2004).

Los cereales son una fuente importante de energía para la mayoría de las especies de peces. Pueden comprender hasta un 60% del total de la dieta, dependiendo de la especie a la cual se le realiza la formulación. Su principal objetivo es proveer energía, gracias a su contenido de almidón, el cual a la vez funciona como aglutinante (Krogdahl, 2005); es importante mantener una inclusión mínima del 20% para el proceso de extrusión, esto garantiza una adecuada expansión (Rokey y Huber, 1994). El trigo y sus derivados son los principales productos utilizados para tal fin, principalmente por su costo y fácil consecución. Otras fuentes de almidón incluyen maíz, arroz, cebada, leguminosas y tubérculos, como papa y yuca (Hardy, 2002; Evers y Millar, 2002; Krogdahl, 2005).

Debido a que el procesamiento de extrusión modifica química y físicamente las moléculas de los ingredientes utilizados, es necesario cuantificar este efecto sobre la digestibilidad de los recursos y de las dietas obtenidas. El proceso de extrusión puede hacer más disponible la energía de los ingredientes, lo que puede desequilibrar su relación con la proteína cruda. Sin embargo, Robaina (1999) afirma que, debido al mejor aprovechamiento del almidón gelatinizado, ocurre un mejor aprovechamiento de la proteína, lo que da como resultado una reducción en la liberación de amonio; esta reducción genera una menor contaminación de las fuentes de agua y mejora el ambiente para el pez. Por las consideraciones anteriores, es necesario considerar la cocción y las interacciones entre los ingredientes durante el proceso de extrusión, ya que en la práctica las formulaciones son realizadas con base en la composición química y en la digestibilidad del ingrediente en su forma natural (Antonio, 2004).

Cheng y Hardy (2003), evaluaron los efectos del proceso de extrusión sobre a la digestibilidad de la torta de soya, cebada, gluten de maíz y trigo para la trucha arcoirís. En este trabajo los ingredientes fueron extrudizados de forma independiente, y evaluados utilizando la técnica de la dieta referencia. Los resultados (Tabla 11), mostraron que el proceso de extrusión mejora significativamente los CDA para materia seca, lípidos y energía bruta. Sin embargo, los CDA de proteína bruta, fósforo, cobre, hierro y zinc presentaron valores menores. Los autores recomiendan que al utilizar estos productos en formulaciones para trucha se suplemente de forma adicional un 10 a 20% de cobre, hierro y zinc.

Ta**bla 11.** Coeficientes de Digestibilidad Aparente de ingredientes extrudizados (E) y no extrudizados (SE) (%), para trucha arcoirís. Modificado de Cheng y Hardy (2003)

Item	Torta de soya		Cebada		Gluten de maíz		Trigo	
	SE	E	SE	E	SE	E	SE	E
Materia Seca	75,4	78,4	43,6	67,2*	74,2	86,0	46,7	71,1*
Proteína Bruta	98,1	98,1	95,6	94,3*	87,4	75,4***	95,6	90,2*
Lípidos	73,0	86,1*	72,6	80,7*	76,0	75,7	77,3	74,4*
Energía	79,1	81,9	48,5	69,9	80,0	88,9*	54,0	77,1**
Ca	7,4	8,6	29,4	24,4	1,5	7,7	20,9	19,8
K	99,8	99,7	99,3	99,4	99,6	99,5	99,1	99,5
Mg	78,9	78,4	89,7	89,4	76,6	75,3	87,9	85,9*
P	63,2	60,6	76,3	70,6**	65,6	64,7	71,1	67,4*
S	98,1	97,9	96,5	96,4	94,7	91,8*	96,7	94,8**
Cu	94,9	94,2	88,3	81,7***	85,2	77,3***	86,6	79,4***
Fe	77,2	54,0	55,9	53,4	78,7	33,4*	54,4	47,5
Mn	30,6	32,3	43,8	42,7	42,5	42,2	36,5	26,9
Zn	64,7	58,1*	55,4	48,0**	53,0	45,4	56,0	40,9***

Los asteriscos muestran efectos significantivos para cada ingrediente procesado sin y con extrusión.

*P<0,05; **P<0,01; ***P< 0,001.

Pezzato *et al*. (2002) determinaron la digestibilidad aparente de varios ingredientes para tilapia nilótica, con la utilización de una dieta de referencia purificada. Las dietas experimentales se balanceaban con la dieta de referencia más los recursos a evaluar variando desde 44,25 hasta 67,79% de inclusión. Dentro de los recursos energéticos, los autores evaluaron maíz y maíz extrudizado. Las dietas fueron mezcladas y peletizadas, por lo que en este ensayo solo se pueden tener en cuenta interacciones debidas a tratamiento térmico de peletización entre biomoléculas. El CDA de materia seca resultó en un aumento del 33,03% cuando se comparó extruído vs peletizado. Los CDA para lípidos difirieron entre estos ingredientes, siendo el maíz extruído 17,7%, superior al maíz. Por otro lado, el maíz extruído mostró un índice de 36,51% mayor con respecto al maíz, en su valor de energía digestible (Tabla 12).

Tabla 12. Digestibilidad aparente de maíz y maíz extruído para tilapia nilótica. Modificado de Pezzato *et al*. (2002)

Ingrediente	Digestibilidad (%)			ED
	Materia Seca	Proteína Bruta	Extracto Etéreo	(kcal/kg)
Maíz	52,52 ± 0,09	91,66 ± 0,05	69,02 ± 0,03	2429
Maíz extruído	69,87 ± 0,18	89,62 ± 0,07	81,24 ± 0,14	3315

Antonio (2004), evaluó el efecto de los dos tipos de procesamiento: peletización y extrusión, de dietas prácticas para tilapia nilótica, sobre los CDA de proteína y energía de productos de origen animal y vegetal (Tabla 13). En el proceso de peletización los productos de origen vegetal presentaron mayores CDA de proteína bruta, excepto para la harina de arroz y la torta de soya (76,5 y 88,1% respectivamente), mientras que para los de origen animal presentaron los valores más bajos. Los CDA de energía fueron mayores para los productos vegetales altos en proteína (torta de algodón 61,2% y soya integral tostada 62,6%), mientras que para los de origen animal fueron bajos. El procesamiento de extrusión mejoró los CDA de PB del salvado de trigo, harina de arroz y en menor cantidad el de torta de soya. Para los recursos de origen animal mejoró significativamente las harinas de carne y hueso, vísceras de aves y de pescado (72,8, 78,5 y 87,1% respectivamente). De igual forma, fue mayor el CDA de energía para el maíz y el salvado de trigo (84,5 y 71,5% respectivamente). Respecto a la energía, los mayores valores de digestibilidad fueron encontrados para los de origen vegetal, en el maíz y el salvado de trigo y para los de origen animal, en la harina de pescado y la harina de carne y huesos.

Tabla 13. Coeficientes de Digestibilidad Aparente de ingredientes para dietas de tilapia nilótica sometidos a dos metodologías de procesamiento. Antonio (2004)

Ingrediente	CDA energía (%)		CDA proteína (%)	
	Peletizada	Extruida	Peletizada	Extruida
Torta de algodón	61,2 $_{a\,AB}$	48,5 $_{b\,D}$	86,8 $_{a\,A}$	82,8 $_{a\,ABC}$
Soya integral tostada	62,6 $_{a\,AB}$	58,9 $_{a\,CD}$	86,6 $_{a\,A}$	82,9 $_{a\,ABC}$
Torta de Soya	59,1 $_{a\,AB}$	59,3 $_{a\,CD}$	87,7 $_{a\,A}$	88,1 $_{a\,A}$
Harina de Arroz	57,6 $_{a\,AB}$	48,0 $_{b\,D}$	75,7 $_{a\,BC}$	76,5 $_{a\,CD}$
Maíz	68,4 $_{b\,A}$	84,5 $_{a\,AB}$	85,3 $_{a\,A}$	85,1 $_{a\,AB}$
Salvado de trigo	60,5 $_{b\,AB}$	71,5 $_{a\,BC}$	82,2 $_{b\,AB}$	90,2 $_{a\,A}$
Harina de vísceras de aves	69,5 $_{a\,A}$	71,7 $_{a\,BC}$	73,3 $_{b\,C}$	78,5 $_{a\,BCD}$
Harina de carne y huesos	52 b $_{BC}$	85,7 $_{a\,A}$	54 $_{b\,D}$	72,8 $_{a\,D}$
Levadura de alcohol	40,7 $_{b\,C}$	57,2 $_{a\,D}$	84,1 $_{a\,A}$	84,4 $_{a\,ABC}$
Harina de Pescado	66,5 $_{b\,A}$	93 $_{a\,A}$	61,2 $_{b\,D}$	87,1 $_{a\,A}$

Medias seguidas de la misma letra (minúsculas en las filas y mayúsculas en columnas) no difieren estadísticamente (P<0,05).

7. FORMULACIÓN DE LA RACIÓN BAJO EL CONCEPTO DE PROTEÍNA IDEAL

Durante muchos años la formulación tradicional de dietas para peces se basó en el concepto de proteína bruta, cuyo valor se obtiene de multiplicar el nitrógeno total de la dieta por el factor 6,25 (Caputi *et al*., 2011). Este tipo de formulación generaba un exceso de aminoácidos, aumentando así la excreción de nitrógeno vía amonio, excretado en su mayoría por las branquias de los peces. Actualmente, con el conocimiento de los requerimientos de aminoácidos de las principales especies de interés comercial junto con la producción sintética de los principales aminoácidos limitantes, es posible balancear la dieta de acuerdo a los requerimientos de aminoácidos, permitiendo disminuir la proteína de la dieta sin afectar el desempeño productivo de los peces, al tiempo que se reduce el uso de aminoácidos como fuente de energía, promoviendo así una menor excreción de amonio al agua (NRC, 2011).

El concepto de proteína ideal, se define como el balance exacto de aminoácidos que requieren los peces en su dieta para cubrir los requerimientos de mantenimiento y proporcionar el máximo de ganancia de proteína corporal con la menor conversión alimenticia (Caputi, *et al*., 2011).

En la práctica, para implementar este concepto se requiere cubrir los requerimientos de aminoácidos de la especie a formular, de acuerdo a lo presentado en las tablas 1 a 5, se toma como patrón el aminoácido lisina, al cual se le atribuye un valor de 100. Posteriormente, el requerimiento de los otros aminoácidos se ajusta en relación a la lisina. Con el uso de un software de formulación o a través de la función Solver de Excel, se ofertan las materias primas, cuyo perfil de aminoácidos debe ser conocido y los aminoácidos sintéticos (Tabla 7) y se establecen las relaciones de aminoácidos para que se cubra su valor mínimo.

8. INCLUSIÓN DE LA ENZIMA FITASA

La utilización de materias primas alternativas de origen vegetal, es una estrategia actual para reducir el uso de harina de pescado en la formulación de dietas para peces, logrando una formulación sostenible. Sin embargo, su uso conlleva a la adición de factores anti nutricionales que pueden generar desbalances de nutrientes, reducción de nutrientes esenciales, efectos negativos en los sistemas digestivo, hormonal y fisiológico, afectando la salud de los animales. Adicionalmente, pueden generar efectos negativos en el consumo voluntario debido a la disminución en la palatabilidad del producto final.

Todos los organismos vivos, incluyendo los peces, dependen de una fuente continua de administración de fósforo en la dieta para su óptimo crecimiento y metabolismo.

Su requerimiento de fósforo ha sido estimado por varios comités científicos y las recomendaciones dietarias ya han sido menicionadas en la sección de requerimientos nutricionales (Tablas 1 a 5).

Cerca de un 50% de las reservas de fósforo en la mayoría de granos y leguminosas es almacenado como fitato (Tabla 14), el cual es considerado como factor anti nutricional, al no ser una fuente de fósforo disponible para los animales monogástricos, incluyendo a la mayoría de especies de peces. Así, la presencia de fitato en las dietas de peces se puede traducir directa o indirectamente en efectos negativos sobre el desempeño de crecimiento y en la utilización de otros nutrientes importantes para el pez, como minerales, proteína y energía. Adicionalmente, debido a que el fósforo también es un limitante para la producción primaria en la mayoría de los ecosistemas acuáticos (Mainston y Parr, 2002), la descarga de este fósforo fítico al agua contribuye directamente con el proceso de eutrofización y favorece el crecimiento excesivo de algas que degradan los cuerpos naturales de agua.

El uso de enzimas exógenas en las dietas para animales monogástricos ha sido utilizado ampliamente, principalmente en aves y cerdos, siendo un campo nuevo de acción las dietas extruidas para peces. Su utilización mejora significativamente la digestibilidad de los nutrientes, reduciendo así su excreción al medio ambiente. Como es sabido, cada tipo de enzima actúa sobre un sustrato específico. La enzima denominada fitasa, hidroliza los enlaces ésteres del fitato, liberando así el fósforo y otros nutrientes (Caputi, *et al*., 2011), razón por la cual, su inclusión sería altamente recomendada en la formulación de las dietas para peces.

El fósforo es el mineral más costoso en la formulación de dietas para peces y puede representar cerca del 3% del costo total. El uso de la fitasa, disminuye la suplementación de fósforo, mejorando la digestibilidad de éste, cuando está presente en las materias primas de origen vegetal, atenuando al mismo tiempo, la excreción de este mineral al medio acuático, disminuyendo así el impacto ambiental. Adicionalmente, su inclusión también puede mejorar la digestibilidad de otros minerales como magnesio, cobre, hierro y manganeso. Asimismo, algunas investigaciones han encontrado una pequeña influencia positiva sobre la digestibilidad de los aminoácidos y de la energía de la dieta.

Tabla 14. Concentración de fósforo total y fósforo fítico en ingredientes comunes de alimentos para peces. Adaptado de Tahir *et al*. (2012)

Ingrediente	Fósforo total P% (CV*)	Fósforo fítico P% (CV*)	Porcentaje de fósforo fítico
Maíz (grano)	0,324 (28,7)	0,186 (13,44)	57,40%
Torta de Soya	0,836 (7,18)	0,395 (5,57)	47,24%
Destilado de Maíz (DDGS)	0,958 (6,47)	0,257 (27,24)	26,83%
Torta de Canola	1,350 (5,11)	0,695 (4,75)	51,48%

Trigo (grano)	0,421 (14,96)	0,251 (13,94)	59,62%
Mogolla de Trigo	1,305 (15,02)	0,799 (6,38)	61,23%

* CV= Coeficiente de Variación

Diferentes estudios sugieren que la adición de fitasa a dietas de peces con inclusión de materias primas de origen vegetal, mejora la utilización de fósforo fítico del 20 al 60% y disminuye la excreción de fósforo total al medio acuático del 30 al 50%, tanto en trucha arcoíris (Forster *et al*., 1999; Lanari *et al*., 1998; Rodehutscord y Pfeffer, 1995; Sugiura *et al*., 2001), tilapia (Goda, 2007) y cachama (Brandao *et al*., 2015). Estos estudios sugieren que la adición exógena de fitasa a dietas de peces, puede ser vista como la solución en la reducción del potencial impacto medio ambiental, causado por la descarga de nutrientes de la acuicultura al medio acuático.

Como ejemplo del potencial uso de la enzima en dietas comerciales para peces, está el estudio de Morales *et al*. (2015), quienes demostraron que el uso de 4000 FTU/kg de fitasa en dietas de trucha arcoíris, incrementó la retención corporal del fósforo dietario de 26% a 67%, logrando una reducción cercana al 50% de la descarga de este nutriente al medio acuático (Figura 2). De igual forma, el fósforo contenido en la fracción sólida de las heces se redujo con la inclusión de la enzima de 3,8 a 1,8 g/kg de ganancia de biomasa. Aunque en este ensayo la descarga total de fósforo disminuyó significativamente por la inclusión de la enzima, la fracción soluble de fósforo fue relativamente más alta en las dietas suplementadas presentando un incremento de 0,1 a 0,3-0,5 g/kg de ganancia de biomasa.

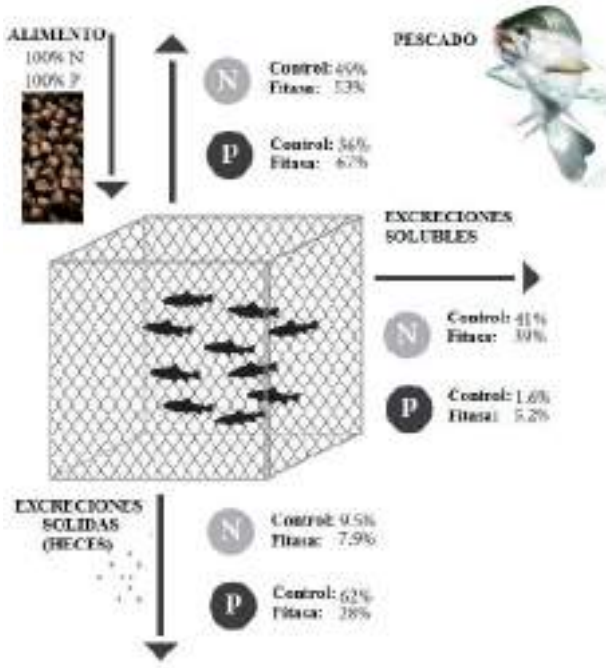


Figura 2. Efecto de la suplementación con enzima Fitasa (4000 FTU/kg de alimento) en dietas de trucha arcoíris, sobre la descarga de nitrógeno (N) y nósforo (P) al agua. Modificado de Morales *et al*. (2016)

Por otro lado, Brandao *et al*. (2015), evaluaron inclusiones crecientes de enzima fitasa en dietas de juveniles de cachama, encontrando resultados similares entre tratamientos para los parámetros zootécnicos de producción (Tabla 15).

Tabla 15. Valores promedio de parámetros zootécnicos en juveniles de cachama (*Colossoma macropomum*) alimentadas con dietas extruidas con niveles crecientes de Fitasa

Tratamiento	Sobrevivencia (%)	Ganancia de peso (g)	Conversion (FCA)
Sin Fitasa	100	33,9 ± 0,9a	1,2 ± 0,9a
1000 FTU	100	34,9 ± 0,8a	1,1 ± 0,8a
1500 FTU	100	35,0 ± 0,8a	1,1 ± 0,8a
2000 FTU	100	35,2 ± 0,8a	1,1 ± 0,8a

Letras diferentes en la misma columna son significativamente diferentes (P<0,05)

Sin embargo, como se observa en la figura 3, en este mismo ensayo se logró una reducción del 21% en la excreción de fósforo al agua, pasando de 11,82 µg/L de fósforo en la dieta control, a un promedio de las dietas con fitasa de 9,3 µg/L, demostrando así la efectividad de la acción de la enzima para liberar fósforo fítico de los ingredientes de origen vegetal de la dieta.

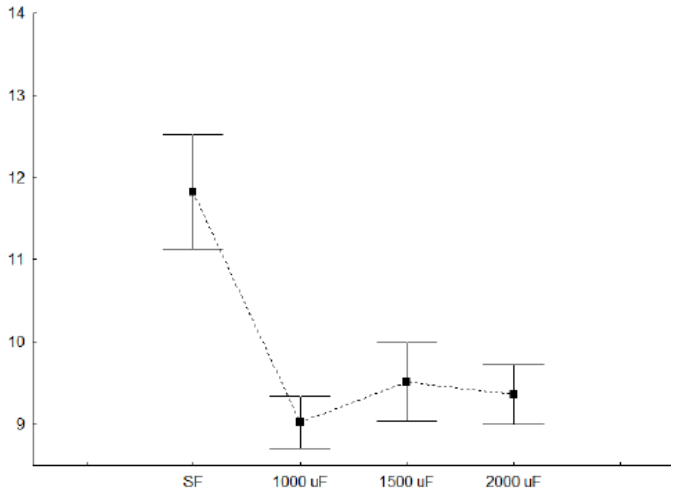


Figura 3. Concentración de Fósforo total en el agua (ug/L) por la inclusión de diferentes niveles de fitasa en dietas de cachama (Brandao *et al*., 2015)

De acuerdo con Morales *et al*. (2016), en peces de aguas cálidas como tilapia y cachama, se ha encontrado un efecto positivo de la suplementación de fitasa sobre la tasa de crecimiento, eficiencia de conversión alimenticia y digestibilidad de fósforo y otros minerales. Adicionalmente Lemus y Tacon (2015) en una revisión completa de resultados de la inclusión de fitasa en dietas de peces y camarones, reportaron incrementos en la digestibilidad de la proteína del 2% al 18%, lípidos del 26% al 65%,

energía del 4% al 16% y aminoácidos del 5% al 12%, con inclusiones de fitasa que variaban entre 500 y 1000 FTU/kg de alimento.

9. ESTRÉS Y USO DE ADITIVOS FUNCIONALES

Según Landines (2011), el crecimiento de la acuicultura y en especial de la piscicultura, se basa fundamentalmente en la implementación de sistemas intensivos y súper intensivos de producción, cuyas prácticas y condiciones de cultivo (densidad de siembra, captura, manipulación, transporte, calidad de agua, entre otras) son en ocasiones generadoras de estrés en los animales, situación que si no es controlada de manera adecuada, puede ocasionar disminución en el crecimiento, aparecimiento de enfermedades e incluso conllevar a mortalidades significativas dentro del sistema productivo.

Sin lugar a dudas, dichos agentes estresantes son inevitables en condiciones de cultivo intensivo y el piscicultor debe estar en capacidad de reconocerlos y darles un adecuado manejo para evitar pérdidas importantes en su producción, ya que un estrés severo (agudo) puede ocasionar grandes mortalidades, mientras que uno crónico (subletal) puede comprometer la actividad fisiológica y comportamental de los peces, con disminución en el crecimiento, reproducción e inmunología.

Por otro lado, como ya se mencionó, la calidad y cantidad de varios nutrientes requeridos por los peces han sido determinadas en términos de sobrevivencia y crecimiento, ambos directamente relacionadas con la disponibilidad (digestibilidad) y la cantidad de los principales macronutrientes (proteína, lípidos, carbohidratos y otros). Sin embargo, a medida que el cultivo se intensifica, surgen nuevos retos e incrementos en problemas críticos del sistema productivo, como la ocurrencia de enfermedades, infestación por parásitos, infecciones bacterianas y virales, las cuales pueden llevar a pérdidas económicas importantes. Adicionalmente, otro aspecto relevante en el posicionamiento del producto en el mercado, tiene que ver con la calidad e inocuidad del producto final.

Por tales razones, queda claro que la prevención de las enfermedades es más importante que un tratamiento médico veterinario especializado. Aunque en algunas producciones el uso de antibióticos se ha generalizado para prevenir enfermedades y mejorar la eficiencia alimenticia (promotor de crecimiento), existen muchos problemas asociados a su utilización, como la residualidad del producto en los tejidos del pez, la generación de resistencia por las poblaciones bacterianas y el imbalance en la microflora intestinal, entre otros. Es por ello que actualmente se propende por buscar alternativas para mitigar el estrés, dentro de las cuales se destaca la utilización de aditivos funcionales en el alimento, los cuales poseen propiedades benéficas para los animales, que contribuyen a mejorar su resistencia al estrés y a las condiciones (a veces extremas) del cultivo.

Es así como una amplia variedad de suplementos dietarios han sido investigados con respecto a sus efectos sobre la salud del pez y la calidad del pescado producido bajo cultivo controlado, y algunos de ellos se han confirmado en campo a través de prácticas implementadas por productores. Dentro de estos suplementos, han sido utilizados vitaminas, probióticos, prebióticos, nucleótidos, hongos, algas, ácidos orgánicos y materiales vegetales, entre muchos otros.

En el caso de las vitaminas, las más usadas son la C (ácido ascórbico) y la E (α-tocoferol) cuya comprobada acción antioxidante puede utilizarse para beneficio de los peces, principalmente cuando se someten a condiciones de estrés. Por supuesto, se habla aquí de que los animales deben cubrir sus requerimientos vitamínicos con el balanceado, antes de utilizar las mencionadas vitaminas como favorecedores de su respuesta al estrés o de su función inmune. Por otro lado, existen los probióticos, los cuales se podrían definir como suplementos alimenticios vivos de tipo microbial, que pueden contribuir al equilibrio microbiano del tracto gastrointestinal de los animales, lo que a la postre mejora su desempeño productivo, principalmente porque favorecen la absorción de los nutrientes. Dentro de ellos se encuentran principalmente las bacterias ácido-lácticas; y los prebióticos, conocidos como ingredientes alimenticios no digeribles, generalmente de origen vegetal, los cuales benefician al pez estimulando el crecimiento y la actividad de los microorganismos benéficos en su intestino, mejorando la absorción de los nutrientes y favoreciendo la función inmune de los animales. Dentro de ellos se incluye un amplio rango de carbohidratos y fibras dietarias de diversos tipos, dentro de las que se destacan las asociadas a la levadura de cerveza. Componentes importantes de los prebióticos son los mananooligosacáridos (MOS) y fructooligosacáridos (FOS). En la práctica se utilizan los β-glucanos como aditivo funcional para mejorar la función inmune de los peces.

Asimismo, se han utilizado hongos, como el Shitake (*Lentinula edodes*), algas, como la Spirulina, ácidos orgánicos, nucleótidos y recientemente han cobrado gran importancia los denominados fitogénicos, los cuales corresponden a partes de plantas o a sus componentes activos extraídos, usados frecuentemente debido a su bajo costo, a su facilidad de obtención en materiales nativos o comerciales y a su comprobada eficiencia en medicina humana desde tiempos remotos, principalmente por la medicina herbolaria China. Los compuestos activos de estos materiales vegetales pueden ejercer múltiples efectos sobre el organismo del pez, incluyendo un mejoramiento en la eficiencia alimenticia y la digestión, reducción en la excreción de nitrógeno, desarrollo de una flora intestinal benéfica y mejora en el estatus sanitario.

Los fitogénicos son aditivos extremadamente heterogéneos, y pueden originarse de hojas, raíces, tubérculos, tallos, frutas, especias o hierbas, entre otros; y pueden ser suministrados molidos, secos, o como su aceite esencial extraído. Dentro de su actividad biológica, variables como especie, parte de la planta, época de cosecha y origen geográfico determinan su potencial ya sea como antioxidante, antimicrobial o inmunoestimulante. Un buen ejemplo de estos es la Silimarina, extraída de las

semillas de *Silybum marianum* y cuyo contenido de flavonoides es ampliamente reconocido. Asimismo, los aceites esenciales, los cuales cuentan con propiedades terapéuticas, antioxidantes, antimicrobianas y antisépticas importantes y podrían ser utilizados para mejorar la eficiencia alimenticia y la digestión, al tiempo que reducirían la excreción de nitrógeno, gracias al balance y equilibrio de la flora intestinal benéfica.

Son muchos los aceites esenciales que se podrían utilizar en piscicultura, dentro de los que se destacan los de las plantas de la familia Amaryllidaceae (antes Liliaceae), como el ajo (*Allium sativum*) y principalmente, los obtenidos del orégano (*Origanum vulgare*). Adicionalmente, el aceite esencial de clavo (*Eugenia caryophyllata*) también se utiliza comúnmente en piscicultura; no obstante, con fines de sedación (anestésico) de los peces. Actualmente, se investiga con otros aceites esenciales de orégano, nativos de Suramérica dentro de los que se destacan el de origen brasileño (*Lippia alba*) y el denominado orégano de monte en Colombia (*Lippia origanoides*), cuyas bondades nutracéuticas para los peces al parecer son muchas.

Todos esos compuestos, clasificados en su mayoría como nutracéuticos han cobrado gran importancia, debido a que como se mencionó, la acuicultura se ha intensificado de manera significativa, siendo necesario implementar el concepto de “prevenir antes que curar”, puesto que, aunque desafortunadamente el uso de antibióticos es generalizado en muchas producciones, existen muchos problemas asociados a su utilización, pues como fue dicho, generan resistencia, desbalances en la flora intestinal y residualidad en el producto final y en el agua del efluente.

A pesar de que en la literatura existen múltiples reportes de la utilización de este tipo de aditivos en la alimentación de los peces, a continuación, presentamos un resumen de los principales ensayos realizados a nivel nacional por nuestro grupo de trabajo, entendiendo que los resultados son más pertinentes para nuestra realidad y con las especies trabajadas en el país.

Respecto a las vitaminas, se ha trabajado con tilapia roja (*Oreochromis* sp.), cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) y con la especie de pez ornamental denominada tiburoncito (*Hexanematichthys seemanni*), la cual presenta altas mortalidades durante las actividades de acopio en agua dulce, por ser una especie capturada en agua salobre. En la tilapia, se observó que el crecimiento de los animales fue mejor al suplementar la dieta con ácido ascórbico (AA) (300 mg/kg). Asimismo, los resultados sugirieron que la suplementación con AA promueve un efecto protector ante el estrés, hecho corroborado a través de la evaluación de los niveles de glucosa, hematocrito, hemoglobina y cortisol de los animales. Por otro lado, al combinar el AA con α-tocoferol (α-T), la supervivencia fue superior que en animales no suplementados, indicando que al parecer el uso de 300 mg de AA y 200 mg de α-T son eficaces para mejorar la supervivencia de la especie.

En cachama, se pudo comprobar que la utilización de AA (alrededor de 400 mg/kg)

en la dieta, fue aconsejable para mitigar el estrés de los peces, lo cual se corroboró mediante la determinación de glucosa, cortisol, lactato y sodio plasmáticos en animales sometidos a estrés por hipoxia.

En relación con el tiburoncito, se pudo observar un aumento significativo en la supervivencia al utilizar suplementación con 400, 800 y 1600 mg/kg de AA, existiendo adicionalmente mayor ganancia de peso y mejor conversión alimenticia a utilizar tales niveles, siendo evidente que niveles inferiores (0, 100 y 200 mg/kg), fueron insuficientes para tales propósitos.

En el campo de los probióticos y prebióticos, se han realizado ensayos con tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus* var. chitralada), (*Oreochromis* sp.), cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) y yamú (*Brycon amazonicus*). En tilapia nilótica, se pudo comprobar que la ganancia de peso, tasa de crecimiento específico, factor de conversión alimenticia y tasa de eficiencia proteica, fueron significativamente mejores al utilizar pared celular de *Saccharomyces cerevisiae* como suplemento en el alimento. Sin embargo, al utilizar únicamente bacterias ácido-lácticas, tales parámetros presentaron un desempeño inferior. En tilapia roja, se evaluó el efecto de la inclusión de polidextrosa (como prebiótico) en la dieta de juveniles de la especie, sobre la resistencia al estrés, pudiéndose comprobar que el uso del prebiótico no tuvo efecto significativo en ninguno de los parámetros indicadores de estrés. No obstante, en otro ensayo en el que se evaluó el uso de este prebiótico sobre la digestibilidad aparente de los nutrientes, fue evidente un aumento significativo en los coeficientes de digestibilidad para materia seca, proteína cruda y extracto etéreo cuando la dieta fue suplementada.

Respecto a la cachama, se evaluó el uso de probióticos y prebióticos sobre la respuesta al estrés, obteniendo como resultado que la utilización de pared celular de *Saccharomyces cerevisiae* o su asociación con bacterias lácticas (*Lactobacillus acidophilus* y *Bifidobacterium lactis*) contribuyó al mantenimiento de la homeostasis de los animales sometidos a estrés por hipoxia, probablemente gracias a un efecto simbiótico que podría estimular la respuesta de los animales ante condiciones adversas. En otro ensayo, se pudo verificar que la utilización de β-glucanos en asociación con AA también contribuyó a mejorar la respuesta inmune de la especie, hecho corroborado a través de la determinación de hematocrito, hemoglobina e inmunoglobulina M (IgM) y del recuento diferencial de células blancas.

En yamú, la inclusión en la dieta de β-glucanos asociados con MOS mejoró significativamente la supervivencia de los animales al utilizar un suplemento que contenía 24% de β-glucanos y 22% de MOS en una proporción de 0,05 y 0,10% de la dieta. Adicionalmente, se pudo evidenciar que niveles muy altos de suplementación (0,5%) fueron significativamente inferiores para este parámetro, incluso con supervivencia inferior a la del grupo no suplementado. Tales resultados se corroboraron a través de los niveles de cortisol plasmático, los cuales fueron inferiores en los dos

grupos que presentaron mejor sobrevivencia, lo cual aparentemente podría deberse a que la suplementación aumentó la resistencia de los animales al estrés.

Con nucleótidos, se llevó a cabo un ensayo con juveniles de *Brycon amazonicus* alimentados durante 60 días con una dieta de 32% de proteína cruda, suplementada con diferentes niveles de un nucleótido comercial a razón de 0; 0,5; 1; 2; 3 y 4% pudiéndose observar que los animales de la dieta suplementada con 3% del nucleótido, mostraron una ganancia de peso y supervivencia significativamente superiores a las de los demás tratamientos, posiblemente por un incremento en la respuesta inmune o por un mejoramiento en la integridad del epitelio intestinal (mecanismo de acción de algunos nucleótidos) y un favorecimiento en la absorción de los nutrientes.

En otros ensayos, se han probado diferentes aditivos para aumentar la resistencia de los animales al estrés y mejorar su desempeño productivo. En alevinos de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), se suplementó la dieta con harina de Shitake, Silimarina y un aditivo comercial constituido por ácidos orgánicos, nucleótidos, extracto de ajo (*Allium sativum*) bajo la forma de alicina y vitamina C, pudiéndose observar que después de 32 días de alimentación, los animales que recibieron el tratamiento con Shitake, presentaron una mayor talla y peso y su tasa de crecimiento específico y factor de condición fueron significativamente superiores a los de los demás grupos. Asimismo, se verificó que en todos los grupos tratados los niveles de proteína plasmática fueron superiores al compararlos con el grupo que no recibió tratamiento. En la misma especie, a suplementar la dieta de juveniles durante 75 días con aceite esencial de *Lippia origanoides*, se pudo observar que al suministrar 0,6 g/kg del aceite en la dieta la talla fue significativamente superior que al no ser suplementado o recibir niveles de suplementación menores (0,15 y 0,3 g/kg).

Respecto a los aceites esenciales, se llevó a cabo un ensayo con juveniles de yamú alimentados durante ocho semanas con niveles de inclusión en la dieta de 0; 50; 100; 200 y 400 ppm de aceite esencial de *Origanum vulgare*. Los resultados mostraron que la supervivencia fue mejor en los tratamientos de 100 y 200 ppm, mientras que la glucosa fue menor en el tratamiento de 200 ppm, lo que probablemente supondría un menor estrés de los animales. Asimismo, los tratamientos de 100, 200 y 500 ppm presentaron valores superiores de inmunoglobulina M (IgM), lo cual probablemente significaría un mejoramiento en la respuesta inmune de los ejemplares.

Finalmente, para verificar el efecto del uso de aceite esencial de orégano y otros aditivos funcionales sobre la respuesta inmune de los peces, se realizó un ensayo con juveniles de yaque (*Leiarius marmoratus*), una de las especies con mayor potencial productivo en el país. Se concluyó que la inclusión del aceite no favoreció dicha respuesta. Sin embargo, la adición de hemicelulosa y de β-glucanos asociados con MOS, promovieron un aumento importante en el nivel de IgM. No obstante, otras investigaciones deberían aplicarse para entender el mecanismo de acción en esta y otras especies nativas con potencial productivo en el país.

En conclusión, se podría afirmar que el uso de aditivos funcionales en la alimentación de los peces podría ser una alternativa viable para el mejoramiento de los sistemas de producción nacionales. Sin embargo, se debe seguir investigando al respecto, para determinar si su utilización es viable en campo o en sistemas especializados como los que se abordan en el presente libro.

10. ALIMENTACIÓN SUSTENTABLE

Se debe suministrar alimento a los peces de cultivo de excelente calidad y en la correcta cantidad para que expresen al máximo su potencial genético de crecimiento. En la empresa acuícola el crecimiento de los peces representa la ganancia económica y una empresa sustentable es aquella que es capaz de convertir rápidamente alimento balanceado en carne de pescado (Ewos, 2015).

Dentro del flujo de costos de la empresa, el alimento corresponde al concepto más alto, se considera que su participación esta entre el 60% y el 70% de los costos totales, dependiendo del grado de intensificación de la producción; por lo tanto, su uso debe ser el más eficiente para maximizar el crecimiento del animal.

En la acuicultura, el suministro de alimento es totalmente controlado por el hombre, de esta forma el objetivo de la alimentación sustentable es conseguir un máximo crecimiento a un mínimo costo de alimento, implicando así un bienestar óptimo de los peces al tener los nutrientes necesarios. Al mismo tiempo que se disminuyen las descargas de nutrientes al agua. El acuicultor por tanto, deberá controlar todos y cada uno de los aspectos que permitan optimizar el proceso de alimentación, para que el mismo sea sustentable:

Seguimiento de parámetros y colecta de datos

La información colectada en la empresa acuícola debe ser una herramienta de análisis indispensable para la toma de decisiones y para generar proyecciones a futuro, con la implementación de protocolos de toma de información básica es posible estimar el crecimiento, la alimentación, el factor de conversión alimenticia y el porcentaje de mortalidad, como parámetros zootécnicos básicos de evaluación de cultivo, pero también es posible programar otras actividades importantes como traslados, compra de alimento y otros insumos, pescas, auditorias y otros, que facilitan la planeación estratégica enfocada en la eficiencia sustentable de la producción (Talbot, 2004).

Crecimiento

El crecimiento se puede definir como el aumento gradual en peso y longitud corporal del pez; una de las características que diferencia a los peces de los animales terrestres de cultivo es su plasticidad, así el crecimiento de los peces parece ser indeterminado lo que dificulta la definición clásica de madurez, ya que pueden seguir creciendo a lo largo de toda su vida e incluso después de la madurez sexual. El crecimiento de

los peces es afectado sensiblemente a diferencias ambientales, alimento consumido, densidad de población, disponibilidad de oxígeno, temperatura y demás parámetros físicoquímicos del agua, además de las variables inherentes al pez, como línea genética y sexo (Aguilar, 2010).

En términos de la acuicultura comercial el crecimiento se puede expresar como el peso ganado en un periodo de tiempo, es decir el peso en una fecha determinada menos el peso inicial registrado en una fecha anterior.

$$\text{Crecimiento (Peso Ganado g)} = \text{Peso Final (g)} - \text{Peso Inicial (g)}$$

Adicional a la ganancia de peso, existen también dos índices que pueden ser utilizados para evaluar el crecimiento en un periodo de tiempo y también pueden ser útiles para proyectar dicho crecimiento a futuro, la Tasa de Crecimiento Especifico y el Coeficiente Térmico de Crecimiento.

La tasa de crecimiento específico SGR (por sus siglas en inglés *Specific Growt Rate*) es una medida del aumento de peso corporal expresado como porcentaje de peso ganado por día:

$$SGR = \frac{((Ln\ Wf) - (Ln\ Wi))}{t} \times 100$$

Dónde:
SGR = Tasa de Crecimiento Específico
Ln = Logaritmo Natural
Wf = Peso Final
Wi = Peso Inicial
T = Tiempo expresado en días

La Tasa de Crecimiento Específico disminuye a medida que el pez crece, y con el valor obtenido asociado a los datos históricos recolectados en cada empresa, es posible calcular el peso final o peso estimado a futuro de los animales muestreados usando la siguiente ecuación:

$$Wf = Wi * Exp\ (SGR * t)$$

Dónde:
Wf = Peso Final
Wi = Peso Inicial
Exp = Base de Logaritmo Natural
SGR = Tasa de Crecimiento Especifico %
T = Tiempo expresado en días

Cho y Bureau (1998) desarrollaron un índice de crecimiento denominado Coeficiente Térmico de Crecimiento, realizado a partir de datos recolectados en salmones y

truchas de agua dulce. Este modelo considera la temperatura y peso de los peces para producir un índice de crecimiento, mientras más alto sea el número más rápido será el crecimiento. Sin embargo, este coeficiente presenta la desventaja que no es muy preciso fuera del rango de 5 a 14°C.

La aplicación estadística de modelos matemáticos para predecir el crecimiento de los peces, es una herramienta de alta precisión que describe y caracteriza tal parámetro. Dentro de estos modelos, los de tipo no lineal, permiten determinar coordenadas de algunos puntos de interés biológico dentro de la curva, como son la fase de estructuración, las tasas de ganancia de peso y el punto de inflexión, donde termina la fase de aceleración del crecimiento e inicia la fase de desaceleración (Aguilar, 2010). En la figura 4 se presenta un ejemplo de curva de crecimiento de trucha arcoíris, realizada con el modelo matemático de Gompertz, el caul fue propuesto por Benjamin Gompertz en 1925 (Winsor, 1932), la ecuación es la siguiente:

$$Pt = P * (Exp^{-\exp(b-c*t)})$$

Dónde:
Pt = Peso en la edad t
P = Peso Adulto
Exp = Base de Logaritmo Natural
b = Parámetro de ajuste ascendente
c = Parámetro de ajuste descendente
t = Edad

Existen una multitud de modelos que pueden ser utilizados para describir el crecimiento como son: Logistic, Bertalanffy, Richards, Janoscheck, West y Michaelis-Menten (Aguilar, 2010).

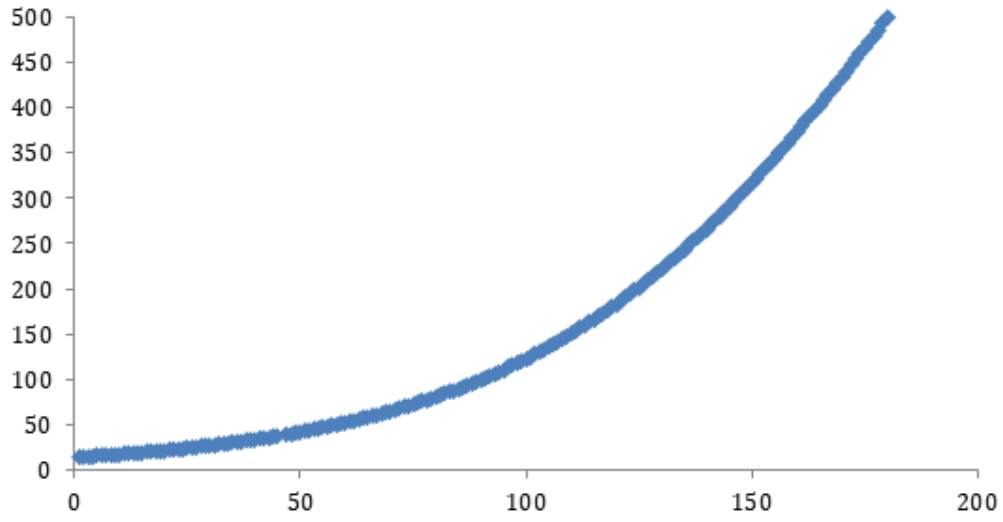


Figura 4. Curva de crecimiento de trucha arcoíris en la laguna de Tota a 15°C, aplicando el modelo de crecimiento de Gompertz. Eje de la X = tiempo (días). Eje de las Y = peso (g)

Medición de la eficiencia de la alimentación

La Tasa de Conversión Alimenticia es el parámetro que se usa principalmente como herramienta para medir la eficiencia de alimentación. Este índice se calcula a partir del alimento suministrado a los peces, dividido entre el aumento de su biomasa, relacionando así la eficiencia con la que el pez utilizó el alimento entregado para crecer. Las mismas unidades son usadas para medir el peso del alimento suministrado y el peso del aumento de la biomasa (Ewos, 2015). Cuando se realiza el análisis del crecimiento a la par con el factor de conversión alimenticia es posible detectar los fenómenos indeseables de sub y sobrealimentación.

La subalimentación se da cuando se alimenta menos de lo que el pez está dispuesto a comer, reduciendo así el crecimiento. Es común creer que esta situación reduce el Factor de Conversión Alimenticio, pero lo que ocurre es exactamente lo contrario, ya que la mayoría de la energía del alimento es usada para cubrir el requerimiento únicamente de mantenimiento y no se destina parte de esta para la ganancia de peso. Durante el proceso de alimentación, especialmente en truchas, también se puede generar subalimentación cuando se entrega el alimento de forma muy rápida a los peces y esta velocidad de entrega supera la capacidad de captura del pez, el cual no alcanzará la saciedad. Adicionalmente, la subalimentación puede causar una mayor incidencia de enfermedades bacterianas e infección de parásitos, mayor estrés y menor bienestar (Einen y Morkore, 1997).

La sobrealimentación ocurre cuando se entrega más alimento del que el pez está dispuesto a comer. Esto resulta en pérdida de alimento y genera un valor alto de Factor de Conversión Alimenticia. Esta situación refleja que la entrega de alimento se realizó por encima del nivel de apetito o saciedad del pez. Sin embargo, como se comentó anteriormente en la subalimentación, si la velocidad de entrega de alimento es muy rápida y supera la capacidad de captura de alimento por los peces, no se logrará la saciedad, pero habrá sobre alimentación y pérdidas de alimento que generarán contaminación del agua (Einen y Morkore, 1997).

En la Tabla 15 se presenta una modelo de de alimentación (tabla) generado a partir de los datos básicos recolectados en granjas de truchas de la laguna de Tota, correspondientes a pesos de muestreos y datos de consumo de alimento registrados para varios lotes. Con el análisis y modelación matemática de esta información básica, es posible establecer tablas de alimentación específicas para ciertos modelos de producción en condiciones medio ambientales particulares, promoviendo de esta forma una alimentación ajustada y enfocada en el crecimiento y ganancia diaria, reduciendo así la perdida de alimento y el impacto ambiental.

Tabla 15. Tabla de alimentación generada a partir de modelo matemático de crecimiento y datos históricos de consumo de alimento para trucha arcoíris en la laguna de Tota (Boyacá)

Edad (días)	Peso (gramos)	Tasa (%) de alimentación promedio	Cantidad de alimento (kg para 1000 truchas)	Tipo de alimento
1 - 30	8 - 27	4,2	24	Iniciación
31 - 60	27 - 52	3,3	37	Iniciación
61 - 90	52 - 100	2,7	60	Levante
91 - 120	100 - 183	2,4	100	Levante - Finalización
121 - 150	183 - 317	2,1	153	Finalización
151 - 180	317 - 500	1,8	225	Finalización
Total de alimento (kg)			599	
Factor de Conversión Alimenticia			1,22	

Manejo del alimento

Los problemas más comunes durante la manipulación y el almacenamiento de alimentos balanceados para peces, son las pérdidas de nutrientes. Es muy importante, tener especial atención a los procesos de rancidez de las grasas, crecimiento de hongos y producción de sus toxinas, así como también a las infestaciones de insectos y/o roedores. Por lo general, las condiciones propias de los sistemas de producción acuícola, favorecen el exceso de humedad y en el caso de especies de clima cálido, la permanente temperatura alta, uede promover el crecimiento de hongos, levaduras y otros microorganismos que deterioran la calidad del alimento. Estas mismas condiciones, producen la rancidez por oxidación de la grasa contenida en el alimento, para lo cual en la industria es común el uso de compuestos adicionados a la ración que permiten prevenir estos fenómenos. Tales compuestos incluyen a los antioxidantes, como etoxiquina, BHT, BHA y vitamina E. Igualmente, por lo general se utilizan aditivos para prevenir el crecimiento de hongos, como el ácido propiónico y sus sales (Italcol, 2014).

Cuidados durante el transporte

Durante el trasporte es importante tener siempre presentes las siguientes consideraciones:

● Revisar el estado del vehículo o embarcación donde se transportará el alimento, el piso debe estar limpio y libre de humedad. Verifique que el vehículo siempre cuente con una carpa y que esta no tenga orificios, ya que en temporada de lluvias el alimento se puede humedecer. Evite la incidencia directa de los rayos solares, pues estos afectan la calidad de las vitaminas, los pigmentos y la grasa del producto.

● Evitar el manejo excesivo de los bultos de alimento. Durante el cargue, descargue y traslado se debe manipular cuidadosamente el alimento. Generalmente los encargados de este manejo tienen el concepto errado de que los alimentos extruidos para acuicultura son tan resistentes como los granos. Esto es un grave error, razón

por la cual los sacos de alimento deben ser tratados con mayor cuidado, pues si se maltratan o manipulan excesivamente se producirán granos partidos y finos, que ocasionarán pérdidas económicas para el sistema de producción y deteriorarán la calidad del agua de cultivo (Italcol, 2014).

Cuidados en el almacenamiento

Respecto al almacenamiento, es importante seguir estrictamente las siguientes recomendaciones:

● Aprovechar siempre la temporada de verano para realizar el mantenimiento preventivo sobre el techo de la bodega. Revisar la presencia de goteras y el estado de las canaletas para realizar reparaciones que eviten el ingreso de agua durante el invierno.

● Mantener siempre ordenada y limpia la bodega tanto en su interior como en los pasillos exteriores, revisando siempre la limpieza de pisos, paredes y techo. Evitar la acumulación de alimento derramado, polvo y telarañas. Una bodega ordenada permitirá llevar un buen control de inventarios. Llevar siempre registros completos y detallados de todas las existencias.

● Durante el almacenamiento, apliquecar siempre el sistema de “Primeras Entradas - Primeras Salidas”. Es decir, se ocupará primero el alimento viejo y luego el nuevo, teniendo presente la debida separación por lotes y siempre conservando la etiqueta de los sacos. En ningún caso se deben colocar los bultos recién llegados sobre los que ya estaban almacenados en la bodega.

● Nunca almacenar el alimento directamente sobre el suelo y siempre revisar que este no esté en contacto con las paredes de la bodega. Las diferencias de temperatura entre las superficies de la bodega y el alimento producen humedad en los bultos, la cual favorece el crecimiento de hongos y la descomposición del producto. Los bultos de alimento SIEMPRE deben estar sobre estibas de madera o plásticas en arrumes de hasta máximo 10 filas. Como regla general, debe existir un espacio suficiente (mínimo 50 cm) entre la estiba y la pared, para que una persona transite fácilmente por todos los ladosy pueda supervisión el producto.

● Los bultos de alimento deben almacenarse alejados de la incidencia directa de los rayos solares. Es un error muy común dejar los bultos a la orilla de los estanques y/o jaulas sin protección contra el sol y en algunas ocasiones, almacenando en tanques plásticos el alimento de varios días. Esta siempre será una práctica equivocada, puesto que la pérdida de nutrientes del producto se incrementa, debido a la alta temperatura en el interior de dichos tanques, la cual es trasferida al alimento.

● La bodega debe estar protegida contra roedores y aves. Es importante realizar

un programa de control de plagas e instalar trampas para evitar su ingreso y la contaminación del alimento. No se debe permitir el ingreso de ningún tipo de animal a la bodega, ni que mascotas entren en contacto directo con el alimento ya sea consumiéndolo o con sus excreciones.

● Programar el requerimiento de alimento y almacenar únicamente lo que va a ser consumido máximo en los dos meses siguientes.

● La forma ideal de arrumar los bultos sobre la estiba debe lograr una buena ventilación entre cada una de las filas de bultos, esto se consigue colocando 8 bultos por fila, dejando siempre un canal de circulación de aire cada dos filas (Italcol, 2014).

11. BIBLIOGRAFÍA

● Abimorad, E.G. y Carneiro, D.J. (2004). Métodos de Coleta de Fezes e Determinação dos Coeficientes de Digestibilidade da Fração Protéica e da Energia de Alimentos para o Pacu, Piaractus mesopotamicus (Holmberg, 1887). Revista Brasileira de Zootecnia. 33: 1101-1109.

● Aguilar, F. (2010). Modelos matemáticos no lineales como herramienta para Evaluar el crecimiento de tilapia roja *(oreochromis spp.)* y Tilapia nilótica *(oreochromis niloticus var. Chitralada)"* alimentadas Con dietas peletizadas o extruidas. Tesis de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogota.

● Aksnes, A. y Opstvedt, J. (1998). Content of digestible energy in fish feed ingredients determined by the ingredient-substitution method. En: Aquaculture 161; p.45-53.

● Aksnes, A., Hjertnes, T. y Opstvedt, J. (1998). Comparison of two assay methods for determination of nutrient and energy digestibility in fish. Aquaculture, 140: 343-359.

● Akness, A., M.S.Izquierdo, L. Robaina, J.M.Vergara, D.Monteroc (1997). Influence of fish quality and feed pellet on growth, feed efficiency and muscle composition in gilthead seabream (*Sparus aurata*). Aquaculture, 153: 251-261.

● Antonio, C. (2004) Efeito da extrusão e da peletização sobre a digestibilidade da fração protéica e da energia de alimentos para juvenis de tilápia do Nilo. Trabalho final (Graduação em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Universidade Estadual Paulista - Jaboticabal, 2004. 59 p.

● Caputi, B., Costa, A. y Nogueira, E. (2011). Nutrição Responsável: Contribuindo com o meio ambiente- Estrategias para reducir a excreção e perda de nutrientes em aves e suínos. Sao Paulo, Brasil.

● Cheng, Z. y Hardy, R.W. (2003). Effects of extrusion processing of feed ingredients on apparent digestibility coefficients of nutrients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Aquaculture Nutrition, 9: 77-83.

● Cho, C.Y., Bureau, D.P. (1998). Development of bionergetic models and the Fish-PrFEQ software to estimate production, feeding ration and waste output in aquaculture. Aquatic Living Resources, 11: 199-210.

● Einen, O. y Morkore, T. (1997). Dietary Protein/Energy ratios for Atlantic salmon in relation to fish size, growth, feed utilization and slaughter quality. Aquaculture Nutrition, 3: 115-126.

● Evers, T. y Millar, S. (2002). Cereal Grain Structure and Development: Some Implications for Quality. Journal of Cereal Science, 36: 261-284.

● Ewos. (2015). Manejo Práctico del alimento, Agua dulce, Para el cultivo de salmón y Trucha. Chile. 61 p.

● Furuya, W.M. (2010). Tabelas brasileiras para nutrição de Tilápias. 21 ed. Toledo: GFM. 100 p.

● Gutierrez, R. Tecnologia de extrusão: produtos texturizados e expandidos. Campinas: Unicamp, FEA, 1988. Apostila.

● Italcol. (2014). Guía De Truchicultura, Trucha Arco Iris. Bogotá. 56 p.

● Hardy, R. W. (2002) Diet Formulation and Manufacture. En Fish Nutrition, Tercera edición. Elsevier Science (USA). Capítulo 9: 505 – 600.

● http://www.iaffd.com/home/nutrients.html

● http://www.iaffd.com/home/feed.html

● Krogdahl, A., Hemre G.I. y Mommsen, T.P. (2005). Carbohydrates in fish nutrition: digestion and absorption in postlarval stages. Aquaculture Nutrition, 11: 103-122.

● Landines, M. (2011). Aditivos funcionales en piscicultura: productividad y bienestar animal en su cultivo. Revista Entornos, Sup. Esp.: 50-53.

● Ladines, M., Franco, A., Rodríguez, L., Rodríguez D. (2011). Effect of the use of dietary additives on some productive, physiological, and inmunological variables in juveniles of *Leiarius marmoratus*. World Aquaculture 2011 - Meeting Abstract. 727.

● Landines, M., Rodríguez, L., Rodríguez, D. (2014). Effect of the dietary inclusion of oregano oil *Origanum vulgare* on some productive, physiological and inmunological variables in juveniles of *Brycon amazonicus*. World Aquaculture 2014- Meeting Abstract. 1014.

● Lovell, T. (1998). Nutrition and Feeding of Fish. Second Edition. Auburn University, Alabama.

● NRC (1993). Nutrient Requirements of fish. National Academy Press, National Research Council, National Academy Press. Washington, D.C.

● NRC (2011). Nutrient Requirements of fish and Shrimp. National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.

● Pezzato, L., Carvalho, E., Barros, M., Quintero, L., Massumitu, W. y Pezzato, A. (2002). Digestibilidade Apparente de ingredientes pela tilapia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). Revista Brasileira de Zootecnia, 31: 1595-1604.

● Pezzato, L, Miranda EC, Barros, M, Furuya, W, Quintero, LG (2004) Digestibilidade aparente da matéria seca e da proteína bruta e a energia digestível de alguns alimentos alternativos para tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). Acta Scientiarum, 26 (3): 329-337.

● Riaz, M.N. (2006). Introduction to extrusion. En: Feeds and pet food extrusion manual. Texas AyM University.

● Robaina, L. (1999). Digestibility, postprandial ammonia excretion and selected plasma metabolites in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fed pelleted or extruded diets with or without wheat gluten. Aquaculture, 179: 45-56.

● Rodríguez, L., Rodríguez, D., Landines, M. (2014). Effect of the inclusion of β-glucans and mannan-oligosaccharides in the diet of juveniles of *Brycon amazonicus* in their productive and physiological performance.World Aquaculture 2014- Meeting Abstract. 873.

● Rodríguez, D. (2011). Nutrición de la Cachama y el Yamú. En: Estrategias De Alimentación Para Cachama Y Yamú A Partir De Prácticas De Restricción Alimenticia. Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, AcuiOriente. Bogotá.

● Rokey, G y Huber, G. (1994). Procesamiento de extrusión en los alimentos para la acuacultura. En: Tecnología para la fabricación de alimentos balanceados. American

Feed Industry Association Inc. Capítulo 57: 484 – 491.

● Simonson, H. (2016). Feed Ingredients in Aquaculture. Arraina Project Technical Booklet a database of Aquaculture feed ingredients. INRA, EU.

● Smith, R. A (1971). Method for measuring digestibility and metabolizable energy of fish feeds. En: Prog.Fish-Cult. 33; p.132–134.

● Smith, R., Peterson, M. y Allred, A. (1980) Effect of leaching on apparent digestion coefficients of feedstuffs for salmonids. En: Prog. Fish-Cult. 42; p.195–199.

● Sugiura, S y Hardy, R. (2002). Environmentally friendly feeds. Encyclopedia of Aquaculture. Editado por Robert Stickney, Bryan, Texas.

● Sugiura, S. (1998). Development of Low-Pollution Feeds for Sustainable Aquaculture, Ph.D. dissertation, University of Washington, Seattle.

● Tacon, A., Metian, M. y Hasa, M. (2009). Feed ingredients and fertilizers for farmed aquatic animals: sources and composition. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 540. Rome, FAO. 209p.

● Talbot, C. (2004). Aplicación de modelos de crecimiento y alimentación en la gestión del cultivo de peces. Skretting Informa No 8. Invierno 2003/2004 P6.

● Winsor, C.P. (1932). The Gompertz curve as a growth curve. Proceedings of the National Academy of Sciences, 18: 1-7.

CAPÍTULO VIII
ENERGÍAS ALTERNATIVAS PARA LA ACUICULTURA INTENSIVA

Michele Sonego
Ingeniero Mecánico
Director Técnico Italiana Construcciones y Energy Evolution S. A.S
E-mail: mikisongo@hotmail.it



Páneles fotovoltaicos. Foto: Michele Sonego

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de acuicultura intensiva gozan de una difusión masiva en Latino América y en particular, en el territorio colombiano, en todas sus latitudes.

Una característica típica y recursiva de todos los sistemas, es el consumo suficientemente estable en el tiempo y muy predecible de energía eléctrica, apta a alimentar unas actividades que se repiten cíclicamente, cualquiera sea la técnica del cultivo (tanques, raceways y estanques en tierra, con peces juveniles, adultos o hasta alevinos) y cualesquiera que sean las dimensiones de la empresa que se dedica a la acuicultura (o, en otros terminos, el grado de “intensidad” de la práctica de acuicultura), de la multinacional a la empresa individual.

El piscicultor necesita energía eléctrica para tres actividades principales:

1. Activación las 24 horas del día de los motores destinados a la oxigenación del agua en sus diferentes modelos: splash, aireadores convencionales, motobombas, entre otros.

2. El alumbrado nocturno (12 horas, aproximado) de la zona de cultivo y del área “productiva” (depósito de herramientas, bodega de los alimentos, zona de almacenamiento de la cosecha y zona de eventual preparación del pescado, previa a la venta, escritorio “oficina” para la administración del sitio).

3. La alimentación eléctrica de eventuales refrigeradores (neveras o congeladores de diferentes tamaños), en los cuales almacenará la cosecha en el periodo previo a la comercialización.

Los consumos eléctricos de los puntos 1 y 2 son totalmente predecibles. Una mayor complicación queda en los cálculos del punto 3, porque los sistemas de acuicultura intensiva de pequeño tamaño muchas veces no cumplen con la fase de almacenamiento de la cosecha; y los de tamaño enorme utilizan sistemas de refrigeración muy modernos que tienen curvas “consumo/energía-frío” particulares y/o inestables. Además, en los sistemas de mediana escala como, a título de ejemplo, los sistemas constituidos por módulos de seis piscinas de 12 o más metros de diámetro (muy comunes para el cultivo de tilapia roja), la cosecha se almacena en cuartos fríos muy “artesanales”, sin acogerse a las medidas de aislamiento térmico requeridas. En este caso, se hace muy difícil estimar el consumo eléctrico asociado a la “producción” del frío (técnicamente, al mantenimiento de la temperatura deseada en el cuarto frío). Estas razones entonces permiten enfocar el análisis a los consumos energéticos asociados a los puntos 1 y 2 y solamente una estimación aproximada para el punto 3.

Conocer los consumos eléctricos de un sistema de acuicultura, permite evaluar la oportunidad de abastecer corriente eléctrica a través de fuentes de energías no

convencionales, en modo particular de energía solar fotovoltaica, que garantiza una serie de beneficios de inestimable valor:

● Beneficio financiero directo: la producción de energía de fuente solar reduce el consumo de energía de la red eléctrica pública, con ahorro directo para el consumidor del servicio, reflejado en la factura (en Colombia EPM, Codensa, Electricaribe, etc.)

● Beneficio financiero indirecto: la instalación de una planta fotovoltaica goza de los beneficios tributarios y fiscales de la ley 1715 de 2014, los cuales tienen repercusiones a mediano/largo plazo

● Beneficios técnico-energéticos: la energía producida por un sistema fotovoltaico tiene parámetros eléctricos "perfectos", garantizando una larga vida a los electrodomésticos conectados (motores, bombas, splash, luces, etc.)

● Beneficios técnico-prácticos: la planta fotovoltaica, asociada a un sistema de baterías, constituye una "bodega" de energía en los días y en las noches en las cuales el proveedor de red no esté garantizando el servicio, asegurando una acometida mucho más económica que el de la planta de ACPM o de algún otro "plan de emergencia"

Estas razones y otras más, que se verán en el análisis, estimulan a sugerir la instalación de un sistema de alimentación de las cargas eléctricas con energía renovable, y más puntualmente, una planta fotovoltaica, según los criterios que se desarrollan a continuación.

El cálculo preliminar, proyecto, instalación, ensayo y puesta en marcha de un sistema solar son operaciones "delicadas" con un grado de complejidad elevado; es fundamental, para reducir los riesgos asociados a cada fase de la obra y poder beneficiarse totalmente de las ventajas de la energía solar, contratar a ingenieros y/o técnicos calificados, que operen en el lleno del marco legal vigente y trabajen en el respeto total a la ley, permitiendo minimizar los accidentes en fase de instalación (las corrientes son elevadas, las tensiones son continua y peligrosas, los accesorios requieren montaje con herramientas como pulidoras, roto martillos, taladros con brocas grandes, etc.); esto es obligatorio para no tener inconvenientes con el operador de red y fundamental para poder gozar de los beneficios tributarios y fiscales, además, es lo más adecuado para que el proyecto instalado sea amigable con el medio ambiente y se conjugue perfectamente con el sistema de acuicultura intensiva.

2. ASPECTO LEGAL (NORMATIVIDAD VIGENTE)

En Colombia, la normatividad vigente y las leyes de referencia se encuentran en desarrollo. Con el tiempo los legisladores van actualizando las "normas" y los "decretos ejecutivos" a los nuevos alcances tecnológicos, pero sin que nunca se traicione el espíritu de las leyes.

El marco legal de referencia es el siguiente:

Ambiental:

● *Decreto 1076 de 2015*: Decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible.

● *Decreto 2041 de 2014*: Por el cual se reglamenta el *título VIII de la ley 99 de 1993* sobre licencias ambientales.

Técnico:

● *Ley 142 de 1994*: Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.

● *Ley 697 de 2001*: Por medio de la cual se actualiza la *ley 142* según los desarrollos tecnológicos vigentes.

● *Ley 1715 de 2014*: Por medio de la cual se regula la integración de las energías no convencionales al sistema eléctrico nacional.

● Reglamento técnico de instalaciones eléctricas *RETIE*

● *Decreto 1623 de agosto de 2015,* por el cual se modifica y adiciona el *Decreto 1073 de 2015*, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas.

● *Decreto 570 de marzo 2018,* Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, *1073 de 2015*, en lo relacionado con los lineamientos de política pública para la contratación a largo plazo de proyectos de generación de energía eléctrica y se dictan otras disposiciones.

● *Sección 690* de la *NTC 2050,* sistemas solares fotovoltaicos.

● *Resolución 90795* del Ministerio de Minas y Energía del 25 julio 2014, por la cual se aclara y se corrigen unos yerros en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), establecido mediante Resolución número 90708 de 2013.

● *Resolución CREG 121 de 2017* – en actuación de la ley 1715 del 2014.

● *Resolución CREG 030 de 2018* – representando la integración del CREG 121 con actualizaciones de normas técnicas.

En cualquier caso, durante la ejecución de la obra se deben aplicar aquellas órdenes o normas que, aunque no estén contempladas en los puntos anteriormente mencionados, sean de obligatorio cumplimiento, en una central de producción eléctrica. De esta forma y en modo especial, se pretende que se cumpla con todas las normas del reglamento de baja tensión y sus actualizaciones (Retie/Retilap).

3. ASPECTO MEDIOAMBIENTAL (ANÁLISIS DE MEDIDAS AMBIENTALES)

El análisis de los aspectos medioambientales hace referencia directa a la estricta normativa vigente en la materia. Para poder construir una central eléctrica fotovoltaica sobre terreno, hasta de pequeñas dimensiones como las que quedan asociadas a la mayoría de los sistemas intensivos de piscicultura, se deben obtener las autorizaciones administrativas que prevé la ley vigente; los permisos dependen de las siguientes consideraciones previas:

- El proyecto no afecta ningún espacio de interés natural, es decir zona húmeda, geo zona de interés geológico o hábitat de interés comunitario.

- No existe en el terreno ningún tipo de yacimiento arqueológico, ni de interés histórico o geológico.

- La instalación queda afuera de los sitios acuíferos.

- Se prevé el mantenimiento de una capa herbácea en zonas del terreno.

- Se garantiza la correcta gestión del terreno y de sus recursos verdes, una vez que quede terminada la obra de instalación de los componentes de la planta.

- El material de cimentaciones no produce contaminación.

- El terreno no queda en zona susceptible de inundaciones.

- El sistema de cerramiento no interfiere con el paso de la fauna típica de la zona (este punto vale obviamente solo para instalaciones de gran tamaño).

4. ASPECTOS TÉCNICOS

1.1. **Consideraciones preliminares y análisis energético**

Por energía solar fotovoltaica se entiende la transformación de la energía solar en energía eléctrica a partir del efecto fotovoltaico de los materiales semiconductores que forman las células solares.

La *ley 1715 del 2014* impulsa la utilización de fuentes renovables diversificadas

de energía; y el caso de Colombia, es particularmente favorecido porque se juntan todos los requisitos para pertenecer a un área con enorme capacidad de recoger la energía del sol: en particular, según el *ATLAS Solar IDEAM* (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) del 2014 (y sucesivas actualizaciones), en el cual se recolectan más de 30 años de información, la irradiación global horizontal promedio diaria en un año oscila entre de los 3,5 y los 7,5KWh/día/año en la gran mayoría de las zonas habitadas del país; además, hay muchas zonas en Colombia que se ven favorecidas por la gran cantidad de días sin nubes al año.

Datos más precisos se encuentran en el link: http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html, donde el IDEAM presenta los mapas interactivos detallados, por año, mes, horas; un trabajo enciclopédico gigantesco y muy útil para poder prever con excelente margen de precisión la cantidad de energía solar disponible en cada lugar de Colombia.

En el análisis, se utiliza el valor promedio 5,5KWh/día/año que representa un parámetro aproximado, pero bastante útil en la mayoría de aplicaciones y las experiencias directas de instalaciones de los últimos años, sugieren que este factor es el correcto, para un cálculo preliminar en la costa atlántica (Magdalena, Atlántico, Bolívar y Córdoba), en el centro-norte del País (Cesar, Sucre, Magdalena Medio, Norte de Santander), y en la zona de los departamentos de Choco y Antioquia-Eje Cafetero. Queda un poco sobrestimado en el centro del Colombia (ciudad de Bogotá, departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Huila, entre otros); y resulta poco generoso con el departamento de la Guajira, en el cual, observaciones puntuales en instalaciones fotovoltaicas existentes, dan respuestas mucho más positivas (valores de hasta 7,5KWh/día/año).

La figura 1 muestra los principales mapas de irradiación global horizontal promedio día/año del IDEAM para Colombia, mientras que la figura 2 presenta el número promedio de días al mes sin brillo solar del IDEAM

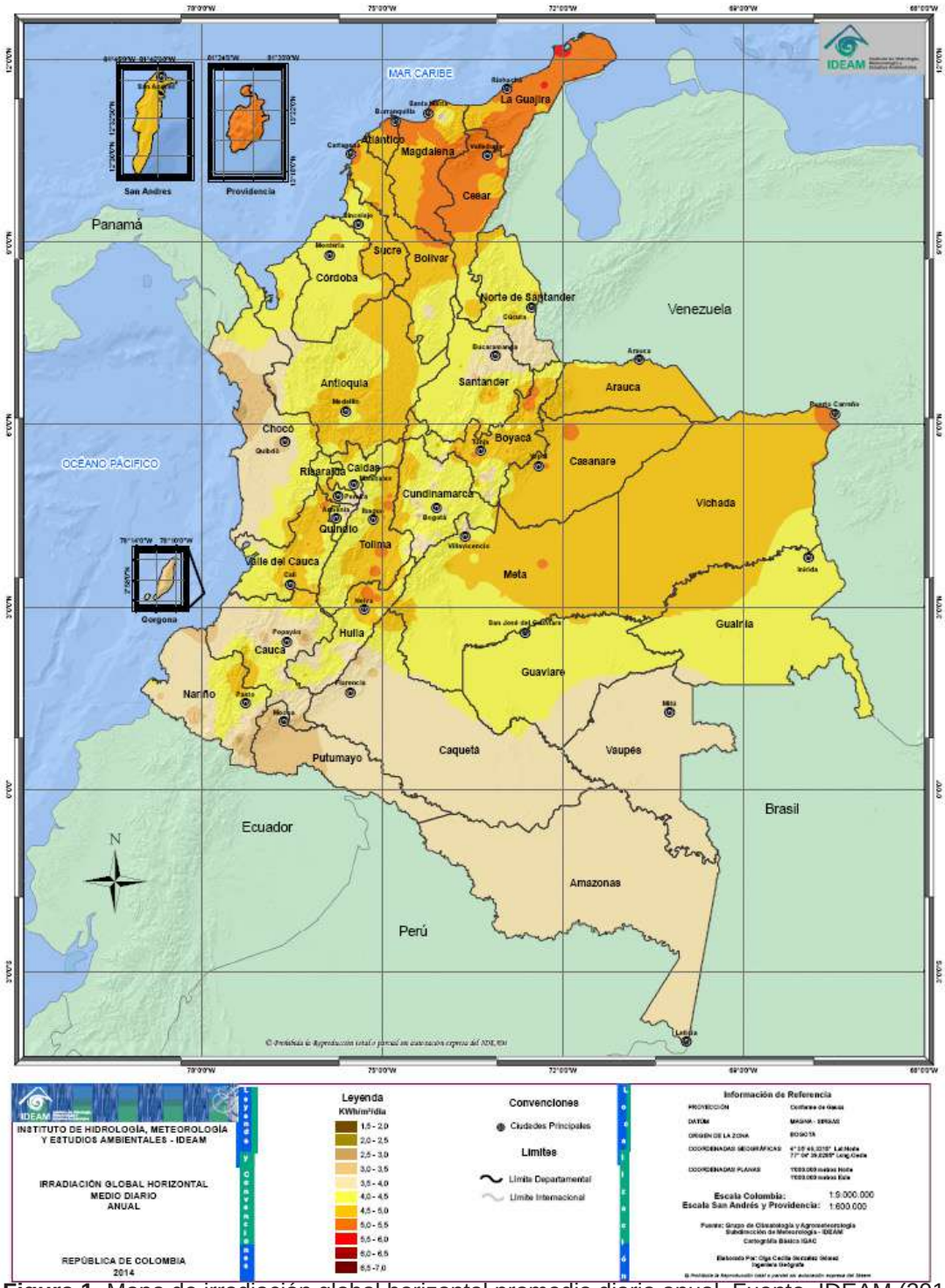


Figura 1. Mapa de irradiación global horizontal promedio diario anual. Fuente. IDEAM (2014)

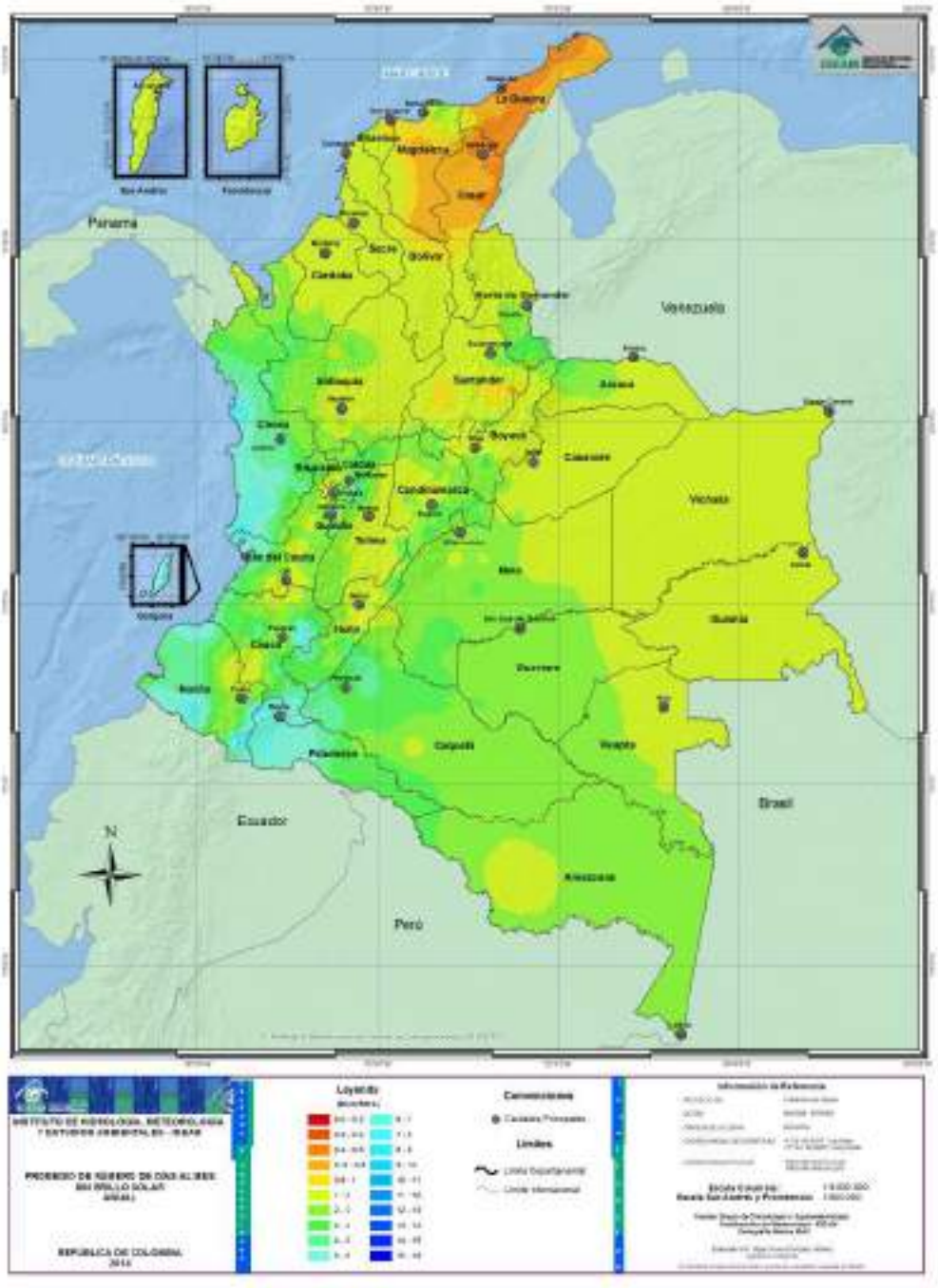


Figura 2. Mapa de número promedio de días al mes sin brillo solar. IDEAM (2014)

Puesto que el sol es una fuente de energía inagotable y muy generosa con el territorio colombiano, queda la tarea de "interceptar" la mayor cantidad posible de energía por metro cuadrado, a través de los páneles fotovoltaicos. La *ley 1715 del 2014* y las normas técnicas siguientes (comúnmente denominados Creg) establecen

que cualquier interesado puede convertirse en productor de electricidad a partir de la energía del sol, alcanzando retornos de inversión muy interesantes a 4/6 años, contra una vida útil de los componentes del sistema a 20/25 años (garantizado por los mismos fabricantes), así como se estima en los siguientes párrafos de este análisis.

Se analiza entonces el comportamiento de la energía solar en las 24 horas, ya que evidentemente el brillo en las horas de la madrugada y del atardecer no es tan intenso como al medio día. La figura 3 muestra energía la producida en un día estándar en una planta solar de 9,24KWp, utilizando los datos recogidos de una planta solar instalada por la Fundación Labriegos por la Paz en colaboración con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en el departamento de Córdoba, en proximidad de San Bernardo del Viento, en el corregimiento de José Manuel de Altamira (JMA):

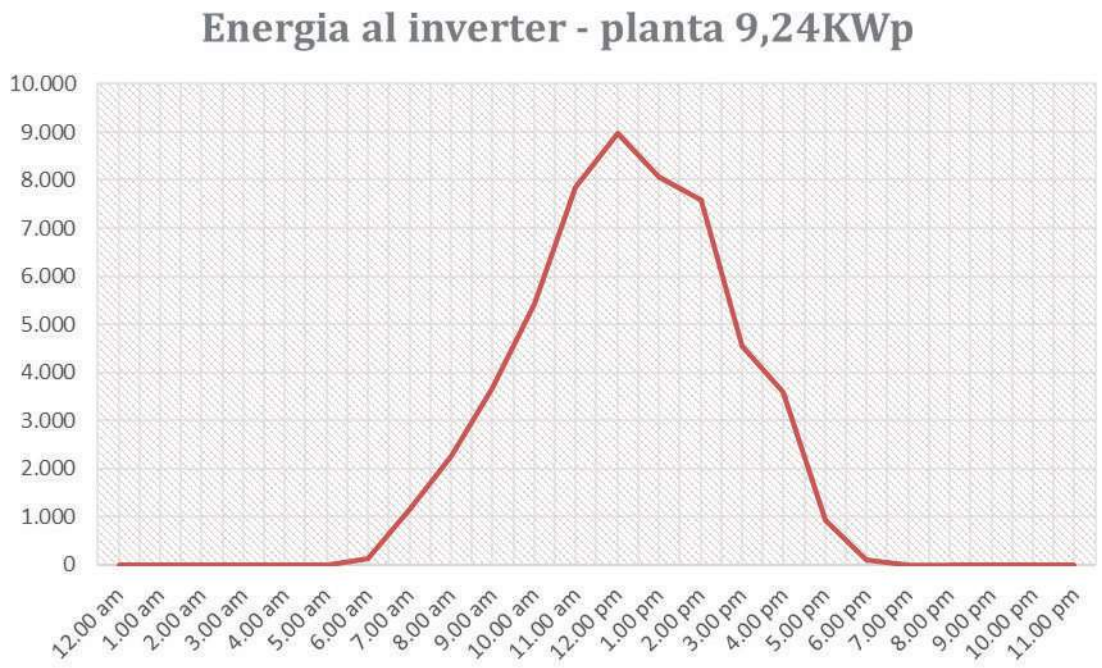


Figura 3. Energía (Wh) producida en un día estándar en planta solar de 9,24KWp-JMA

El flujo energético solar es inconstante: en las horas centrales del día es muy elevado (el pico energético, coincide casi con la capacidad de la planta, es decir se aproxima a los 9,24KW); pero en las horas de la noche es nulo.

En el caso analizado, la planta solar de José Manuel (Figura 4) está asociada a un cultivo intensivo de tilapia roja, constituido por seis piscinas de 12 metros de diámetro, cada una oxigenada a través de un splash de 1,5 HP. Este conjunto (seis piscinas con seis “motores” splash, lámparas modelo reflectores para alumbrado nocturno, luces led para el alumbrado de una zona destinada a oficina-almacenamiento/baño/ y un par de tomas para recargar la batería del teléfono y conectar una balanza electrónica)

representa una “unidad base” en el caso de cultivos intensivo de tilapia.



Figura 4. Sistema fotovoltaico para cultivo intensivo de tilapia roja “Fundación Labriegos por la Paz”, JMA, San Bernardo del Viento. Foto: Michele Sonego

En la mayoría de los cultivos intensivos con tecnología BFT en Colombia, se utilizan entre 5 y 7 tanques de cultivo, cada uno asociado un aireador (splash, motobomba, etc.), que representa la carga eléctrica principal en el análisis de los consumos, en un período de 24h. Las otras cargas (tomas, luces, herramientas de trabajo) no tienen un peso energético relevante por el uso discontinuo (las luces en las horas nocturnas, las tomas por momentos). Sin embargo, es fundamental calcular en modo preciso, el eventual consumo de los equipos que soportan los sistemas fríos para almacenamiento de producto (congeladores, neveras, cuartos fríos), porque normalmente permanecen encendidos las 24 horas y en zonas de clima cálido, sus necesidades energéticas son muy altas. Un cuadro de carga es una herramienta interesante para comparar los datos aquí presentados. En la Tabla 1 se muestra la reacción de equipos, la potencia y el consumo.

Tabla 1. Carga eléctrica aproximada de los equipos en el sistema intensivo (JMA)

Cargas electricas	Un	Pot. Ind. (W)	Pot. Total (Wh)	A	Picos	Amax	Horas/dia	KWh/dia
Motores (splash)	6	1.462,2	8772,9	39,88	100,0%	79,75	24	210,55
Luces nocturna	6	50	*300*	2,73	0,0%	2,73	12	3,60
Luces "zona oficina"	4	18	*72*	0,65	0,0%	0,65	5	0,36
Tomas uso discontinuo	2	150	*300*	2,73	5,0%	2,86	2	0,60
Congelador uso domestico clase A+	1	1.400	*1400*	12,73	30,0%	16,55	24	33,60
Cuarto frio	1	3.800	*3800*	17,27	30,0%	22,45	24	91,20
TOTALES (KWh/dia)								**339,91**

En la figura 5 se observa la distribución de los consumos por horas promedio/día lo que permite analizar visualmente la distribución de los consumos energéticos por horas en el caso del sistema de cultivo intensivo, correspondientes a los equipos que refiere la tabla 1, sin incluir lo correspondiente a la red de frío.

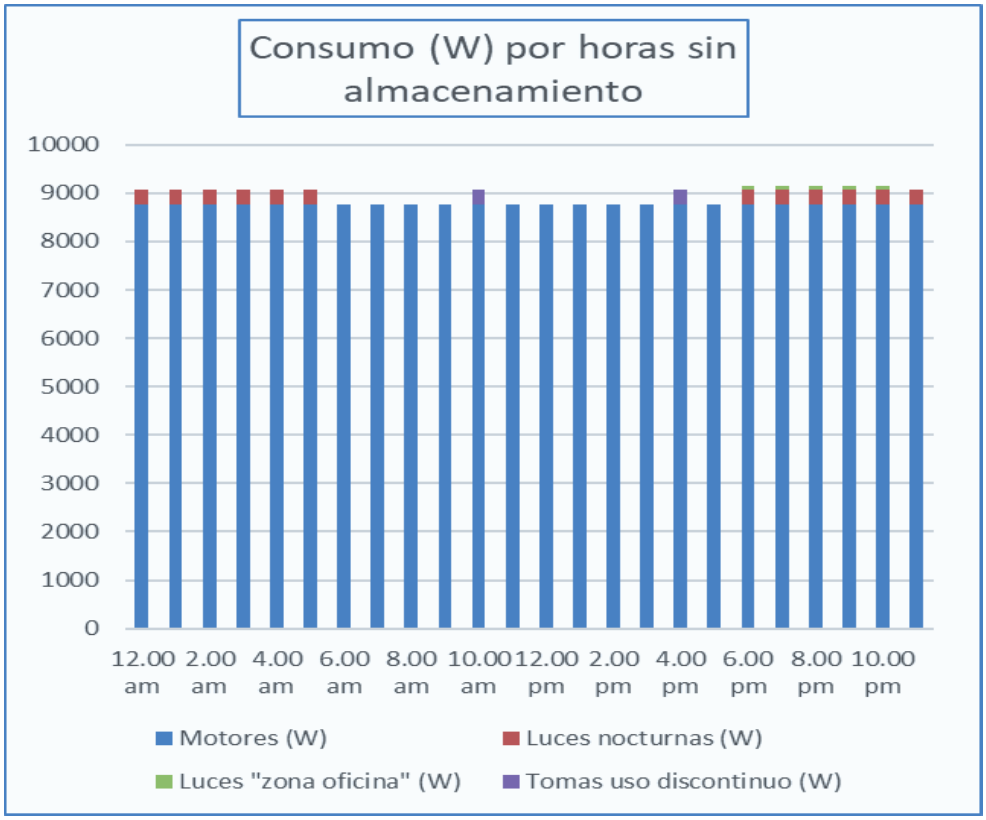


Figura. 5. Distribución del consumo energético por horas promedio día en el sistema -JMA

Cuando se consideran los consumos energéticos por equipos de frio (que aparecían en el cuadro de carga), se puede observar que el "gasto" energético principal,

representado por las columnas en el diagrama, se debe a los motores (de los splash), los cuales absorben casi la totalidad de la energía requerida en el sistema. Sin embargo, en ocasiones ocurre un incremento en el consumo, que debe ser tenido en cuenta cuando se va a dimensionar la planta fotovoltaica, para abastecer el consumo eléctrico del sistema de cultivo intensivo. Es decir, se debe priorizar el cálculo del consumo de los motores, pero sin dejar de lado las otras cargas menos importantes (Figura 6). Es evidente que el "peso energético" de los aparatos de almacenamiento frío (columnas naranjas) es relevante y habría que considerarlo en el análisis energétic de dimensionamiento de la planta solar asociada al sistema de cultivo intensivo.

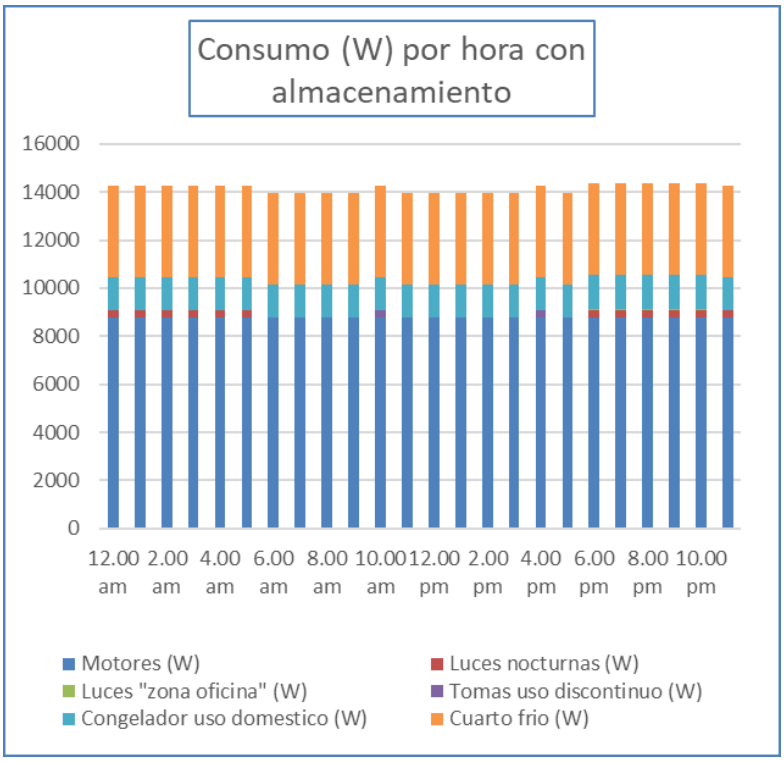


Figura 6. Distribución del consumo energético por horas promedio día – incluyendo almacenamiento frío.

Actualmente en Colombia no hay un mecanismo práctico y efectivo para tramitar y recibir de las empresas generadoras, suministro del exceso de energía producida de su fuente renovable, lo cual hace más relevante proyectar el sistema para que abastezca el consumo generado por los motores sin que haya sobrantes y más bien acceder a los demás beneficios de la *ley 1715 del 2014* en relación a la instalación de la planta dedicada al autoconsumo, sin inyección a la red.

El balance energético para un proyecto de autoconsumo es relativamente "simple": el pico de producción de la planta solar (en las horas centrales del día, las de máximo brillo solar) debe coincidir con el consumo del sistema de acuicultura en las mismas horas (siendo por supuesto el consumo bastante estable en todas las horas del día),

para no inyectar energía solar a la red de distribución nacional y aplicar el régimen de autoconsumo. En la figura 7, se visualiza bien un caso práctico de situación de autoconsumo: se compara la energía producida por la planta solar, con la requerida por el sistema de piscicultura en el proyecto de JMA:

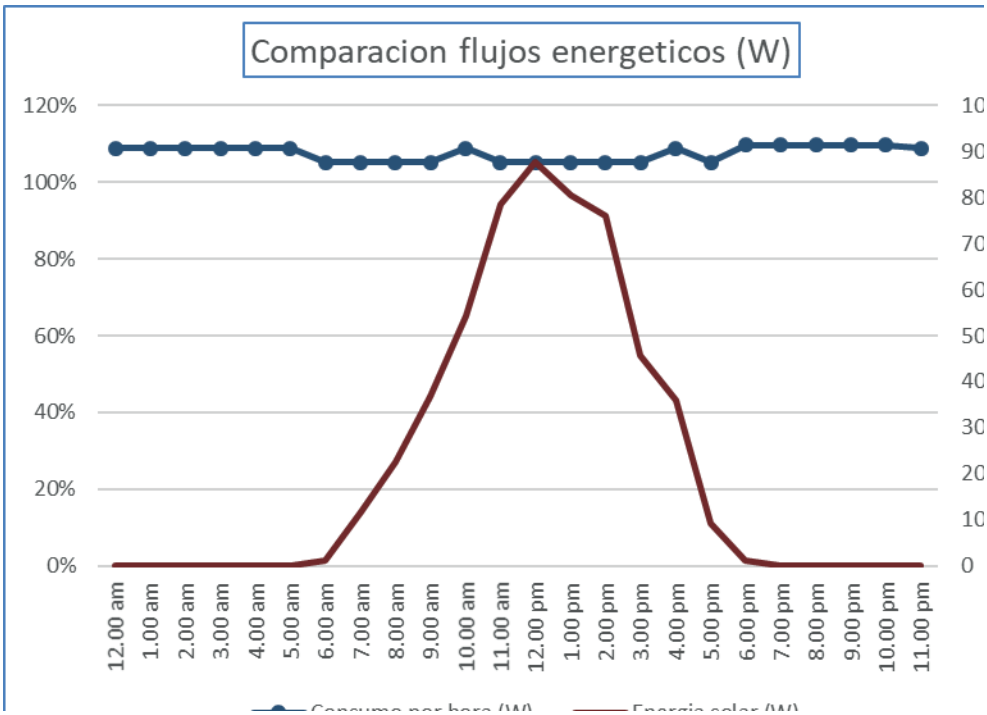


Figura 7. Producción planta solar de 9,24KWp en JMA vs Consumo global eléctrico (W) sistema piscicultura

La energía generada por la planta solar es suficiente para abastecer el consumo eléctrico del sistema de piscicultura solo al medio día, mientras que en las demás horas la planta solamente aporta una fracción de la energía necesaria. En la figura 8, se puede observar el aporte de energía de una planta solar (área roja) y los requerimientos totales del proyecto para su funcionamiento (área azul), por lo que se debe obtener de otra fuente, bien sea convencional de la red eléctrica pública, que es la mejor opción por disponibilidad y precio o de otra alternativa (eólica, química-baterías, planta ACPM, etc.).

La mejor solución posible en término financieros es la utilización del 100% de la energía producida por una planta solar en el mismo predio, de manera que toda la inversión en los componentes de la planta solar estaría trabajando por el ahorro energético del sistema de piscicultura.

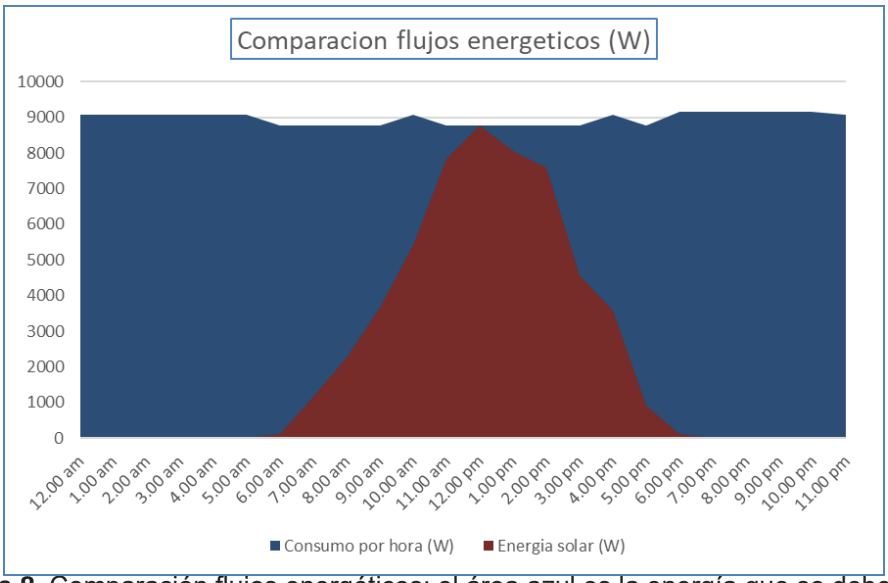


Figura 8. Comparación flujos energéticos: el área azul es la energía que se debe "conseguir" de fuente convencional.

A simple vista, es relativamente fácil dimensionar el tamaño ideal de una planta solar fotovoltaica asociada al sistema de piscicultura: 1) se calcula, a través de un cuadro de carga aproximado, el consumo horario del sistema, que casi coincide con la suma de los consumos de los motores de aireación y 2) se dimensiona la planta por un valor en KWp parecido para evitar que la planta sobre produzca energía, teniendo en cuanta que con el paso del tiempo, todos los componentes del análisis bajan su eficiencia por desgaste. Los motores consumen más energía y se vuelven menos eficientes, páneles y los demás elementos de la planta producen menos (menos eficientes), ampliando así la diferencia entre energía necesaria (que va creciendo) y provisionada por el sistema fotovoltaico (que va disminuyendo).

1.2. Descripción general de los componentes del sistema y sus análisis

Un sistema fotovoltaico (o planta solar) es un conjunto de dispositivos que aprovechan la energía producida por el sol y la convierten en energía eléctrica. La generación de energía eléctrica horaria depende de las horas que el sol brille sobre el panel solar (se puede estimar según las imágenes del IDEAM), del tipo y cantidad de módulos instalados, orientación (en Colombia hacia Sur, con la mayor precisión posible, hasta un error máximo de 15°), inclinación (entre los 4° y los 10,5°), radiación solar que les llegue (estimable también por las mapas IDEAM), calidad de la instalación y de los componentes, en particular de los inverters, los cuales se encargan de contener las perdidas por transformación de le energía. Los componentes de un sistema de energía solar se muestran en la Figura 9.



Figura 9. Componentes de un sistema fotovoltaico híbrido

Los elementos fundamentales de la planta solar son los páneles fotovoltaicos, que apoyan arriba de una estructura, el inverter que "administra" las fuentes de energía y el cableado de conexión. Entre los elementos de la planta solar, aparece también la red eléctrica nacional porque se requiere el suministro durante varias horas del día y durante toda la noche. Combinar la energía del sol con la "eléctrica" convencional es importante para que un solo flujo energético abastezca las cargas del sistema de piscicultura intensiva. En el caso de que el sistema tenga almacenamiento en baterías (por situaciones de emergencia, por ejemplo, contemporánea ausencia de fluido eléctrico de la red y de brillo solar en la noche), u otra fuente de energía (planta ACPM) la planta solar se define como "híbrida". Los sistemas que aplicamos en la piscicultura intensiva son híbridos; mezclan de hecho características propias de los sistemas "on grid", los cuales tienen como objetivo la inyección de energía a la red eléctrica y de los "off grid" o "isla", los cuales no tienen conexión a la red convencional.

1.2.1. Red eléctrica

Es la fuente convencional de energía eléctrica, compuesta de líneas, transformadores, postes, etc. Se utiliza para distribuir la energía eléctrica comercializada por los grandes generadores y distribuidores (en Colombia, Condensa, EPM, Electricaribe, etc.).

En una instalación híbrida, el inverter se encarga de establecer (según las exigencias de las cargas) de cual fuente absorber la energía para mandarla a las cargas, después de haberla "re-parametrizado"; en el caso híbrido, teóricamente existe la posibilidad que la red eléctrica sea al tiempo proveedor y consumidor (es decir que la energía de red transite por el inverter, se sume a otras fuentes, y se devuelva así a la red misma). Para mantenerse en régimen de autoconsumo, entonces, es fundamental calcular

bien el tamaño de la planta solar requerida como ya se describió. Es importante programar el inversor de modo que no permita la devolución de corriente a la red en caso de anomalía en las cargas eléctrica (por ejemplo, cuando los motores aireadores queden apagados para su limpieza, mantenimiento, o cualquiera otra razón).

En la mayoría de los casos, la red eléctrica se encarga de provisionar un porcentaje mínimo en las noches, para el autoconsumo de los componentes electrónicos y eléctricos de la planta solar misma (inverters, sistemas de monitoreo, alumbrado general, cerca eléctrica de protección, entre otros).

1.2.2. Páneles solares

Son los dispositivos que captan la energía del sol para convertirla en electricidad; producen corriente a tensión relativamente baja, en continua. Están preensamblados en una estructura sólida para que puedan resistir los factores atmosféricos más exigentes. La potencia de la planta solar es determinada por la suma de potencia pico de cada panel; por ejemplo, la planta de JMA de San Bernardo del Viento es de 9,24KWp y está conformada por 33 unidades de páneles solares marca ALMADEN (exactamente: 33 unidades de 280Wp = 9240Wp = 9,24KWp). Los módulos fotovoltaicos de la mayoría de las marcas en Colombia son importados y se caracterizan por poseer unos parámetros técnicos certificados RETIE (es obligación que los productos tengan este certificado, que además representa una garantía de calidad mínima aceptable). Se sugiere que los páneles fotovoltaicos, que se escojan para un proyecto solar, deben por lo menos cumplir con los siguientes requisitos:

- Tolerancia de los parámetros eléctricos 0-3% positiva.

- Certificaciones del productor, ISO9001:2018; ISO14001:2004; OHSAS18001 y de producto IEC61215 y IEC61730.

- Tecnología Busbar a 5 estratos que contribuye a mejorar la eficiencia energética de las celdas (mayor capacidad de captar energía por metro cuadrado, reduciendo la superficie necesaria) o soluciones técnicas equivalentes que garanticen alta capacidad de captar el brillo solar.

- Excelente resistencia mecánica (factor importantísimo en la costa Caribe, Magdalena Medio, Guajira y en todos los departamentos y zonas sujetas a impredecibles vendavales y lluvias intensas).

- Certificación TUV en condiciones de alta humedad y alta salinidad (TUV NORD) o sus equivalentes.

- Facilidad de instalación (marco de aluminio de muy simple manejo o bordes en vidrio de alta resistencia).

- Garantía de eficiencia superior al 80% en los primeros 25 años.

Los páneles que cumplen con estas características son bastante comunes en el mercado. A continuación, se presenta la hoja técnica de un panel de 280Wp de marca Jinko (Figura 10).

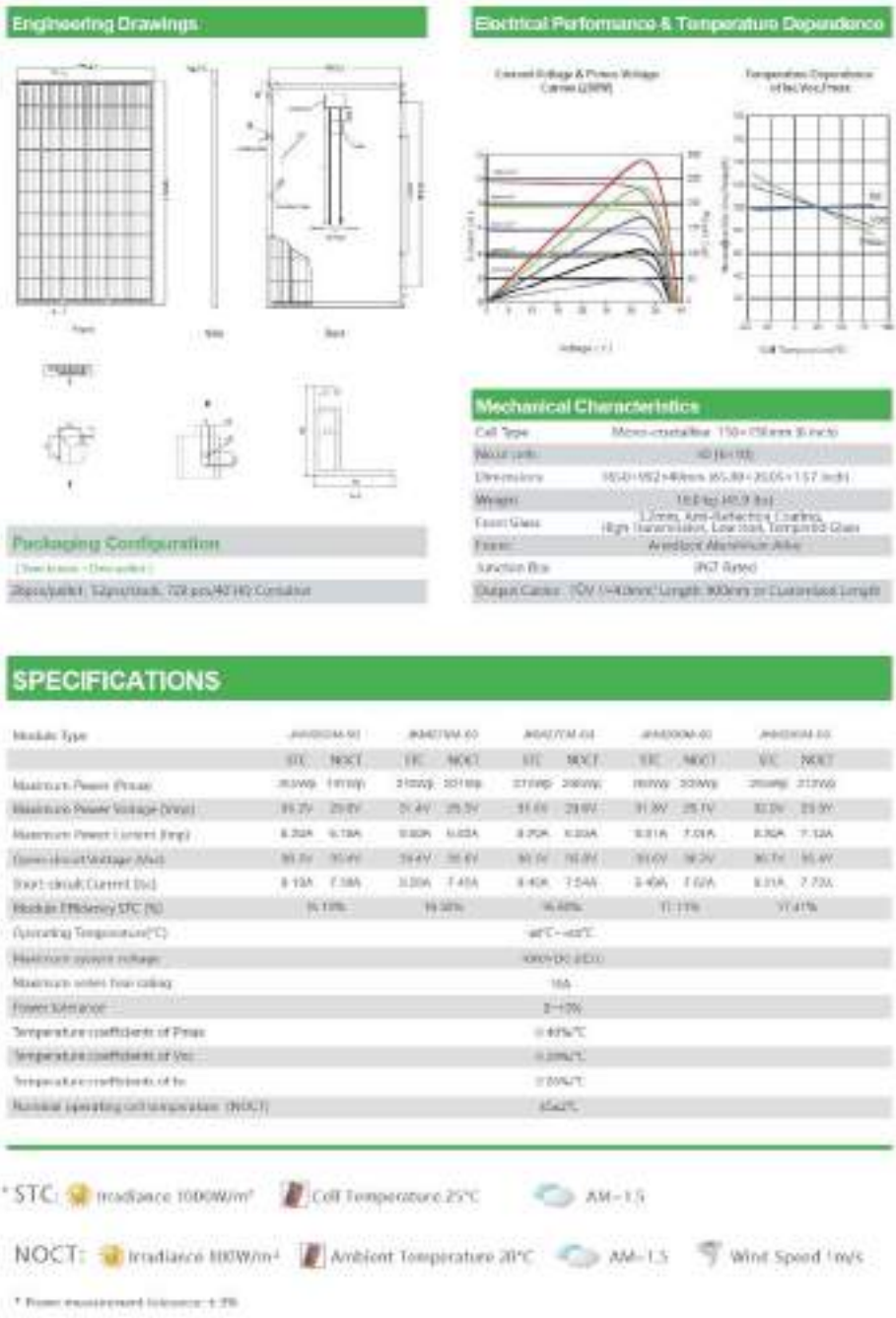


Figura 10. Data sheet panel fotovoltaico monocristalino Jinko Solar de 280Wp

Cuando se disponga de una superficie libre amplia, sin elementos arquitectónicos (sombras) o ambientales, se prefiere instalar páneles solares monocristalinos, dado que tiene mayor capacidad de captar la energía en horas pico, respecto a los policristalinos, que son más eficientes en instalaciones con ángulos no óptimos (por ejemplo, techos de edificaciones en la ciudad).

En el caso de Colombia el pico de producción de los páneles debe quedar por instalaciones con inclinación hacia el Sur con la mayor precisión posible (por ejemplo, con un error de 15°, la pérdida de eficiencia es inferior al 1,5%) y la inclinación respecto al piso dependiendo de la latitud oscila entre s 4° en la Costa Caribe y 10,5° en el Sur del País.

1.2.3. Inversor

Es un equipo que transforma la energía de corriente continua procedente del panel en corriente alterna para poder ser utilizada en la instalación eléctrica (motores de los aireadores, luces, tomas y cualquier otro electrodoméstico comercial). En la versión más moderna, los inversores (o inverters) están dotados de un microchip que contiene un software poderoso, coordina varias fuentes energéticas al mismo tiempo (por ejemplo, páneles, baterías, generadores ACPM), dictando prioridades y actuando como transferencia para que las diferentes fuentes no choquen en ningún momento. Una característica típica de los inversores híbridos es la conversión de varias fuentes (continua de los páneles, continua a baja tensión de las baterías, alterna de la red, alterna a 230Vac de la planta ACPM, entre otras) a un solo fluido eléctrico con excelentes paramentos eléctricos (cos fi próximo a valor unitario, menores pérdidas de transformación posible).

Se sugiere siempre la instalación de un equipo inverter de una marca reconocida, que genere una onda sinusoidal pura y que tenga la mayor eficiencia posible (las pérdidas en el inverters, hasta unos años atrás, representaban el anillo débil principal de las instalaciones solares). Como todos los otros elementos eléctricos, el inverter debe ser certificado RETIE. La mayoría de los inversores híbridos aceptan bajas tensiones de entrada en continua (por lo general hasta 130Vdc), obligando al proyectista a prever conexiones en serie entre los páneles muy limitadas, ya que los páneles en vacío tienen una tensión de 35-40Vdc. Es decir que una serie de apenas 3 páneles genera una tensión de ingreso de 105-120Vdc; la instalación en serie de un cuarto panel produce el riesgo de superar la tensión máxima admitida, generando una alarma al inverter y el bloque de funcionamiento.

La solución al riesgo de superar la tensión máxima admitida al adicionar un panel, es poner varios grupos de 3 páneles en paralelo entre ellos, cableándolos en un registro con barraje en proximidad de los páneles mismos; al barraje de esta misma caja se aconseja colocar protectores en Dc (mini-breakers) con la función de protección pasiva en caso de problemas (importante, si el panel por cualquier razón tuviera un defecto de fábrica, se puede incendiar); además, el mismo mini-breaker se releva muy fácil, para la desconexión de una línea de panel en caso de mantenimiento y, en

la fase de ensayo de la planta, para poder ir "sumando" la energía producida por cada grupo de 3 páneles, verificando que no se presenten anomalías y en caso de que existan, individualizando inmediatamente el origen de las mismas.

Un inverter híbrido típico brinda las siguientes características, que ameritan un análisis:

● Voltaje máximo de entrada de los páneles en vacío: Por lo general es de 145Vdc (las maquinas más recientes alcanzan los 200Vdc) – se pueden hacer string (filas) de 3 páneles conectados en serie, 4 en el caso de los inverters de última generación, con una limitación que se analiza en el punto siguiente.

● Voltaje MPPT: Representa la tensión de trabajo nominal de la string; el grupo de páneles tiene que mantener su tensión dentro del rango MPPT para que el inverter trabaje con la mayor eficiencia posible, maximizando la producción de energía. Por lo general este valor oscila alrededor de los 115Vdc, vinculando al proyectista a sugerir la conexión de máximo 3 páneles en serie.

● Voltaje mínimo de arranque: No existe porque el inverter siempre busca una fuente de energía activa; cuando los páneles no puedan aportar, el inverter se apoya a las baterías o a la red eléctrica convencional.

● Número de salidas en DC: Representa el número de ingresos en tensión continua disponibles para la conexión de los páneles; por lo general son dos entradas.

● Voltaje de entrada en AC: La red eléctrica nacional trabaja a 230Vac y esa tiene que ser la entrada permitida por el invertir, además se sugiere verificar la frecuencia de entrada, que debe ser de 60Hz (por lo general, se programa en la pantalla del inverter entre los varios parámetros).

● Voltaje de entrada de las baterías: Hay modelos a 24Vdc o a 48Vdc - no hay ventajas relevantes en el preferir un modelo al otro, simplemente se deben acomodar las baterías en grupos serie/paralelo para cumplir con el requisito de máquina.

● Entrada por acometida en AC suplementaria: Esta entrada se utiliza para la conexión de otra alimentación en AC, que representa la última opción en el caso de que falle la red eléctrica convencional, no había sol o las baterías queden descargadas. Esta entrada en AC por lo general se activa a través de adecuada programación en los parámetros del inverter y su utilización se puede automatizar. El inverter puede dar la señal a la transferencia de la planta ACMP para que se active según los criterios del proyectista.

● Eficiencia garantizada en trasformación DC/AC: Es importante que sea la más alta posible y en ningún caso menor del 95%.

● Características mecánicas: Es fundamental verificar que el inverter no disminuya su eficiencia por temperaturas ambiente variables (por lo menos, debe mantenerse firme entre los 0°C y los 50°C con hasta el 98% de humedad relativa).

● Facilidad de instalación: Es fundamental que el inverter sea bien protegido con adecuado cofre plástico, tenga una pantalla LCD de programación visible con buena resolución, tenga la botonera de fácil acceso, y no quede de complicada instalación.

Los inversores híbridos que existen en el comercio tienen una potencia máxima de salida de 5 KVA; en caso de que se necesite provisionar potencias mayores, se conectan varios inverters entre sí en paralelo, hasta obtener la potencia requerida. El firmware integrado, en todos los inverters que están en el mercado colombiano, autorregula entradas y salidas de energía, equilibrando todas las cargas, cuando hay varias máquinas en paralelo entre sí mismas.

1.2.4. Tableros de protección, sistemas de distribución y conexión

Son los componentes en los que se protegen cada uno de los distintos circuitos en los que se divide la instalación a través de fusibles, breakers, contactores, interruptores, entre otros equipos.

Puesto que el costo de las protecciones y conexiones no es relevante en relación al costo de los otros componentes de la planta solar, se omite en este análisis la descripción detallada de los componentes, limitándonos a recordar que se necesita instalar:

● Cable solar: el calibre requerido por las conexiones es mínimo 4 mm para la interconexión en serie de los 3 páneles de las string y de 6 mm para la conexión desde el registro donde se agrupan en paralelo los páneles hasta el inverter. Característica principal del cable solar es la chaqueta particular con la cual el cobre es recubierto, que garantiza durabilidad por varias décadas, a pesar de las condiciones ambientales adversas (altas temperaturas ambiente en horas pico, que se suma al calor generado por la corriente continua que circula en el cable y al calor que se propaga de los páneles mismos, por el absorbimiento de energía solar y su reflejo).

● Tableros de protección con seccionadores, fusibles y protectores DPS contra las descargas atmosféricas para los flujos de corriente continua (páneles y baterías).

● Tableros con totalizador a la entrada del inverter, para poder seleccionar las cargas en fase de arranque de la planta solar y para la desconexión por mantenimiento; en este tablero, por lo general, se colocan también los breakeres de protección de los motores aireadores y de los demás circuitos eléctricos; por razones económicas, se colocan los arrancadores o variadores de velocidad de los motores en la proximidad de los breakeres, limitando el gasto en cableado de señal.

El proyecto de los tableros es una actividad bastante compleja, porque involucra el conocimiento de la norma Retie y del buen sentido práctico. Se necesita acomodar los elementos en espacios limitados (el costo de los tableros y de los tableros plásticos certificados, es mayor en modo exponencial en función de las dimensiones y capacidades), sin afectar la facilidad de acceso a cada uno de ellos. La tarea del proyectista es además complicada por las distancias entre los componentes: los páneles por lo general no están ubicados en proximidad del inverter, dado que los páneles quedan al aire libre, el inverter en una caseta, resguardada de la lluvia y el tablero de protección tampoco queda cerca de los motores de los aireadores. Es fundamental entonces, calcular la eventual caída de tensión entre los diferentes elementos, escoger cables de adecuado calibre y colocar protectores de buena marca.

1.2.5. Estructura metálica

La estructura metálica representa el soporte sobre el cual se colocan los páneles. Hay muchos productos, en acero, aluminio y ligas metálicas de buena calidad, en el mercado. Pero recientes experiencias negativas en Colombia con las estructuras preensambladas sugieren “autoproducir” la misma, según los planos de un técnico especializado con adecuada experiencia. El proyecto de la estructura debe considerar TODOS los siguientes factores:

● Peso de los páneles y su distribución de esfuerzos: equilibrado al piso, según diagrama de los esfuerzos simétricos. En el caso de los módulos solares de 280Wp (o parecida potencia) mono/policristalinos, la estructura debe descansar sobre columnas con zapata bajo tierra a una profundidad de por lo menos 0,85-0,9 m (eso depende obviamente del tipo de suelo, pero es un valor bastante acertado en la mayoría de los casos); las columnas deben tener estructuras en varillas de acero y una varilla roscada central en acero inoxidable, a la cual se atornilla la base de la estructura. La distancia entre columna y columna, a lo largo no debe superar los 4,1 m (o valores inferiores). En el caso de que se coloquen dos filas de páneles (que es lo aconsejado), la distancia entre columna anterior y posterior debe ser entre 1,70 y 1,90 m.

● Efecto vela en caso de vientos en dirección opuesta a la cara superior de los páneles: para obviar este fenómeno, que es totalmente destructivo, hay que construir un segundo “triangulo” metálico entre las patas anteriores y posteriores de la estructura; se recomienda, además, fundir cemento alrededor de los tornillos de fijación de los triángulos para que la estructura resulte totalmente compacta, como un solo bloque. El vendaval de hecho es destructivo cuando logra generar un componente de momento de las fuerzas (con ángulo distinto a 0 respecto la perpendicular de los páneles) de intensidad mayor al valor de ruptura de cualquier elemento con el cual choque; eso se evita tratando el sistema (estructura-páneles-cables) como un solo bloque, cosa que determina un aumento del valor de ruptura (el bloque tiene una resistencia en Nm mayor que sus componentes). Considerar el efecto vela es ABSOLUTAMENTE determinante para garantizar el buen funcionamiento de la planta solar a largo tiempo.

● Posibilidad de inundación del suelo - alto de las columnas: otro aspecto fundamental es la altura de las columnas respeto al suelo, muchas zonas son sujetas a aguaceros fuertes e impredecibles. Es necesario que las columnas tengan un alto considerable, según las experiencias que nos pueden trasmitir los habitantes del sitio de instalación, para que el agua no llegue a hundir los páneles y las conexiones eléctricas. De todos modos, este valor no puede exceder por razones de "efecto vela" (entre más altos los páneles, más recogen los vientos) y por razones de costo (materiales de las columnas y mano de obra para armar los páneles a altura incomodas).

● Ángulo de exposición al sol: para Colombia la estructura debe quedar en lo posible orientada al SUR, para que el sistema tenga su máxima eficiencia a lo largo de las 12 horas del brillo.

● Ángulo respecto al suelo: el ángulo recomendado oscila entre los 4 y los 10,5°, pero estudios científicos consolidados evidencian como la inclinación respeto al suelo, equivocada hasta 5° alrededor del punto máximo, no genera pérdidas de eficiencia del sistema; al contrario, se observa un mayor rendimiento con estructura un poco más inclinada porque eso aumenta la velocidad con la cual el agua lluvia corre a piso, lo cual garantiza una "limpieza" más eficiente de la superficie del panel que, al reaparecer del sol tiende a aumentar su capacidad de recolectar energía.

● Tornillos y conectores: para garantizar la confiabilidad a largo plazo, todos los tornillos, elementos de conexión de los brazos de la estructura, abrazaderas metálicas para la puesta en sitio de los páneles y la interconexión de los mismos, chapas de soporte etc., deben ser de acero inoxidable AISI 214 o, mejor aún, AISI 216.

1.2.6. Baterías

Las baterías representan un componente fundamental de los sistemas híbridos. Las baterías se conectan en conjunto serie-paralelo para alcanzar el valor de la tensión de entrada al inverter (típicamente 24Vdc o 48Vdc) y tener una cantidad de carga de reserva suficiente para alcanzar dos objetivos:

● En el transcurso del día, en presencia del flujo de energía solar no es suficiente para abastecer las exigencias de la carga (por ejemplo, a las horas 7:30 am o a las 11:00am de un día nublado), las baterías pueden compensar esta necesidad, sumando la propia energía química a la fotovoltaica. Se sugiere programar el inversor para que las baterías cumplan con esta función **sólamente** en el caso de **total ausencia** de la red eléctrica. Si se programan para uso "continuado" (es decir, como primera opción para surtir las cargas, a pesar de la presencia de la red eléctrica convencional), el ciclo de vida de las baterías se reduce mucho; tampoco el uso de las baterías en las noches, en presencia de red eléctrica convencional, es aconsejable, por diversas razones. Las baterías son elementos muy delicados y necesitan un cuidado especial, con un uso racional lo más limitado posible.

● En ausencia de brillo solar (noche o días nublados) y en ausencia de la red eléctrica convencional, las baterías representan la "planta de emergencia" del sistema intensivo de piscicultura, garantizando que no se apaguen los motores de los aireadores, este sería un evento catastrófico para el cultivo.

La adecuada programación de las baterías permite a las cargas (motores, luces, etc.) no sufrir ninguna interrupción de servicio, ni siquiera por fracciones de segundo. El inverter queda constantemente alimentado por le energía solar, por la energía de red o por las baterías y escoge, según programación y de modo totalmente automático, cual fuente es la preferencial, según el principio que en ningún momento falle el flujo eléctrico hacia la salida.

¿Qué tipología de baterías es preferible colocar en una planta solar? *¿En qué cantidad*? El proyectista debe considerar la potencia necesaria para abastecer el sistema de cultivo intensivo (por lo menos los motores de los aireadores) en el caso de que el sistema de baterías quede como único elemento activo de la planta (en los momentos de ausencia de red eléctrica y de brillo solar). Las baterías deben provisionar esta cantidad de energía, considerando eventuales picos de corriente, en modo continuado por el tiempo que se supone permanezca la emergencia.

A título de ejemplo, consideramos el sistema de cultivo en JMA: el consumo calculado de los motores al máximo de sus potencias es alrededor de los 8780 W a 220 Vac; provisionar esta misma potencia por una hora, a 48 Vdc (que representa la tensión de ingreso de las baterías al inverter) significa armar un "banco baterías" de una potencia alrededor de 180 Ah. Comercialmente, se encuentran con facilidad baterías de 150 Ah y 200 Ah a 12 Vdc. En el caso de JMA, el proyectista ha puesto dos grupos de 4 baterías en serie (12 Vdc x 4 und = 48 Vdc), cada grupo de 150 Ah, para un total a carga llena de 300 Ah a 48 Vdc: se garantizan así casi dos horas de funcionamiento de los motores a carga llena.



Figura 11. Banco baterías con conexiones serie-paralelo

Las baterías (Figura 11) representan un elemento muy delicado del sistema, porque los elementos químicos que las componen, tienen un desgaste bastante rápido en función de tres factores principales:

1. La temperatura ambiente: Por encima de 25°C las baterías sufren, se deben instalar lejos de fuentes de calor, protegidas del sol y de los agentes atmosféricos, en lugares ventilados.

2. Ciclos de trabajo: El ciclo de carga-descarga de las baterías *(duty cycle)* afecta la durabilidad de estas a corto/mediano plazo. Por esta razón se aconseja el uso de las baterías en modo discontinuo, por situaciones de emergencia. Las baterías son costosas, inciden mucho en la inversión inicial del sistema y su durabilidad está asociada a una utilización diaria continua, es inferior a los 4 años, según la tecnología en la actualidad. Para alargar la vida útil del sistema de almacenamiento, es evidente la necesidad de un uso esporádico.

3. Descarga profunda: En la literatura científica se presentan casos en los cuales la descarga profunda y continuada de las baterías, limita en modo sustancial la vida útil de las mismas; las más recientes tecnologías han solucionado en parte este inconveniente; se aconseja de todos modos, programar en el inverter el parámetro "límite de descarga" (opción que está presente en todos los inversores en el mercado) a un valor no inferior al 35% de la potencia máxima.
Es oportuno que los motores de los aireadores, que representan la carga energética más grande del sistema estén cableados con unos reguladores individuales de velocidad. Este aparato, asociado a un control simple (una rueda tipo dimmer de abanico) permite al administrador del sistema de cultivo intensivo:

● Regular la velocidad de cada motor, para garantizar un flujo de oxígeno suficiente a cada piscina según el tamaño de los peces, evitando que el ruido del aireador a su máxima velocidad resulte traumático para su crecimiento.

● Bajar los consumos energéticos nominales en época de siembra y en los primeros meses de vida de los peces (a menor velocidad del motor, corresponde un menor consumo).

● Bajar la velocidad de los motores en situaciones de emergencia energética, en ausencia de red eléctrica convencional y con bajo o nulo brillo solar: la reducción de los consumos asociada al decremento de la velocidad permite a las baterías un aporte por tiempos muchos más largos de energía, aumentando el plazo por la solución de la situación emergencia.

1.2.7. Sistema puesto a tierra y apantallamiento

Los proyectos solares requieren siempre un estudio de apantallamiento, porque hay

zonas que son sujetas a fuertes descargas eléctricas, así que el sistema de protección a través de Dps puede no resultar suficiente para la protección de los equipos y de los páneles. Se sugiere, en un primer análisis, evaluar si se puede instalar un sistema de apantallamiento tipo “rechazador”, siempre y cuando eso no genere peligro en las áreas cercanas, además, los equipos inverter necesitan una adecuada puesta a tierra (así como los elementos de utilización “diaria”, luces, tomas de la oficina de control, computadores, sistemas de monitoreo), equipo potencial a la malla tierra del apantallamiento, para que las descargas eléctricas no tengan un camino de retorno “preferencial” hacia los equipos.

1.3. Análisis de los costos y tiempos de retorno de la inversión

Uno de los parámetros financieros más acertados para evaluar el éxito de una iniciativa empresarial es el “tiempo de retorno de la inversión” o “periodo de retorno de la inversión” - PRI, a través del cual se mide el tiempo necesario para que el empresario recupere el capital invertido. Una instalación de planta fotovoltaica destinada al autoconsumo en Colombia tiene un tiempo de retorno de la inversión atractivo, gracias a los beneficios de la *ley 1715 del 2014*, se coloca alrededor de los 4/5 años, frente a una durabilidad de la planta misma (por lo menos al 80% de su eficiencia) de 20 años.

El tiempo de retorno no se ve afectado por gastos de mantenimiento extraordinarios significativos, porque en el curso de la vida útil del sistema, el único elemento que necesita un cambio es el inverter, por el cual se programa la sustitución al décimo año de funcionamiento. Los páneles tienen 25 años promedio de vida útil; la estructura y los demás compontes tienen una vida útil larga, el mantenimiento ordinario es básico: limpieza de las partes electrónicas y eléctricas con brocha seca o paño (inverter, componentes del tablero); limpieza de los páneles con agua en caso de que se noten opalinos por el polvo que, en periodo de sequía, se puede acumular sobre ellos.

Sin entrar en detalles sutiles de cálculo financiero que requieren el análisis de muchos más parámetros (costo del dinero, amortización de los elementos, etc.) estimar en modo aproximado pero eficaz el tiempo de retorno de la inversión es bastante simple, para ello se calcula la relación fraccionaria entre el costo de inversión y el ahorro generado en el tiempo.

Al denominador de esta fracción el ahorro por año, se estima la producción anual promedio de la planta solar (en el caso de la planta de 9,24 KWp, la producción esperada queda alrededor de los 17520 KW anuales), se multiplica este valor por el costo del KWh del sitio en el cual la planta está instalada (valor promedio es de 450 $/KWh) y así se deduce el ahorro anual. En el caso de este ejemplo:

17520 KWh/año x 450 $/KWh = $ 7.884.000 /año

Al numerador de la fracción, el costo de la inversión inicial, es decir el precio pagado por

el proyecto “planta solar fotovoltaica”. Este valor también necesita un “cálculo” porque no es correcto considerar el dinero total cancelado al proveedor de la planta solar. Lo más oportuno es discriminar entre los diversos elementos; el costo de las baterías, por el cual aplican completamente los beneficios de amortización de la inversión de la *ley 1715 del 2014*, es un costo variable según las exigencias del sitio, dependiendo de la frecuencia con la cual se presentan situaciones de emergencia. Puede representar un costo mínimo, si el proyectista determina que las necesidades energéticas de emergencia no son frecuentes o son de menor cuantía; puede representar un costo enorme, hasta el 60-70% del valor total de la inversión, en caso contrario.

Por esta razón, el costo de las baterías y de los elementos asociados a sus conexiones (cable de adecuado calibre, fusibles de protección, portafusiles, armario o estructura por el posicionamiento en seguridad del banco baterías, etc., no se consideran en el análisis del tiempo de retorno de una planta solar. Las baterías se colocan en conjunto con el sistema fotovoltaico, pero representan un costo por servicio adicional (garantiza la sobrevivencia de los peces en ausencia de red eléctrica y sol), cual podría ser por ejemplo el costo de una planta a ACPM (que cumple con las mismas funciones de las baterías), el costo de la vigilancia del sitio, etc.

En el cálculo del periodo de retorno de la inversión, se evalúa el costo de la planta solar al neto de las baterías, sumando una cuota de costo de mantenimiento. En plantas de tamaño superior a los 3 KWp e inferior a los 100 KWp, el costo de mantenimiento es estimable en un del 1% de la inversión total, anual (20% en 20 años), según la literatura sobre el tema y las experiencias de campo.

Un ejemplo numérico facilita la comprensión: los precios a KWp de sistemas solares instalados, en el mercado, son muy variables, en función de la disponibilidad de los elementos en el mercado, de la marca de los componentes, de la calidad de la instalación, de los gastos de transportes, etc. A título meramente de ejemplo, se evalúa el costo de un KWp instalado en 4.800.000 de pesos; al multiplicar este valor por el tamaño de la planta, 9,24 KWp se obtiene el precio a pagar para tener una planta solar:

$4.800.000 x 9,24 KWp = $44.352.000

Aproximando un costo de mantenimiento equivalente al del 20% en los 20 años de vida útil de la planta, se tiene un costo total de inversión de 53.222.400 de pesos.

Los beneficios de la *ley 1715 del 2014*, aplicados, permiten de recuperar casi la mitad de esta inversión, a través de deducciones y exenciones fiscales y tributarias en los cinco años sucesivos a la instalación de la planta solar; para acceder a los beneficios se deben presentar actas formales de especialistas (firmados por el ingeniero que ha proyectado/instalado la planta y por un contador), operación que obviamente implica unos costos. Si se descuentan los honorarios que se cancelan a los profesionales,

los beneficios permiten recuperar más o menos un 34% de la inversión inicial. La inversión del ejemplo numérico quedaría finalmente alrededor de los 35.142.000 de pesos.

Los estudiosos de matemática financiera y expertos en contabilidad y balances, al leer estas últimas notas, opinarán que apenas se ha adoptado un procedimiento de cálculo demasiado ligero ¡Así es! Sin embargo, el objetivo del documento es tener un valor estimado aproximado y un análisis de los errores en términos de "incertitud relativa" que sugiere que el procedimiento adoptado, a pesar de sus carencias formales, ofrece un resultado suficientemente acertado.

El PRI, en nuestro ejemplo numérico, entonces es (inversión inicial/ahorro anual):

$35.142.000/$7.884.000 = 4 años y 6 meses

El valor neto del retorno de la inversión calculando todas las aproximaciones del caso, queda perfectamente entre los valores numéricos esperados, ya que la literatura sobre el tema sugiere un tiempo que varía entre los 4 y los 5 años, contra una expectativa de vida útil de mínimo 20 años. El ejemplo numérico, confirma como una planta solar fotovoltaica, bien proyectada y correctamente instalada, a un precio de mercado bueno, representa una inversión excelente.

Las verdaderas razones por las cuales instalar un sistema solar, no son netamente financieras. Son éticas, como la obligación moral de cada individuo cuidar el medio ambiente y que la utilización de energías de fuentes renovables no convencionales es hoy al día el principal medio para lograr el cuidado de nuestra madre tierra.

1.4 Beneficios de la energía verde y ahorro energético

La energía solar es conocida como energía verde, es renovable, inagotable y ha determinado el desarrollo de la vida en la tierra en las manifestaciones más bellas (Figura 12).

- La energía solar es ecológica, es una fuente limpia de energía, lo que significa que aporta emisiones de carbono y de invernadero nulas. El uso de energías renovables reduce drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles y, por lo tanto, la contaminación del aire.

- La energía solar es un recurso renovable que no se agota a lo largo de la vida. Las energías renovables pueden ayudar a los países en desarrollo a no depender excesivamente de los combustibles fósiles, que son limitados.

- La energía renovable ha estabilizado los precios mundiales de la energía: El costo de las energías renovables depende casi exclusivamente del costo inicial de instalación de las tecnologías en los sitios de producción; al contrario, a la utilización de energía

de combustibles fósiles es sujeta a los aumentos de costos en función de la inflación y de la disponibilidad del recurso mismo.

● La energía renovable beneficia la salud pública, en términos financieros. Hoy al día, en todo el mundo, una parte muy significativa del presupuesto de los estados se destina a mitigar y curar enfermedades relacionadas directamente con el uso de combustibles fósiles, enfermedades pulmonares y del corazón, cáncer y los trastornos neurológicos.

● La energía renovable permite el empoderamiento de la gente en el campo. La energía renovable se puede producir en entornos remotos. La electrificación de esas áreas abrirá oportunidades no aprovechadas para el desarrollo, catalizando la regeneración de zonas deprimidas tanto social como económicamente.

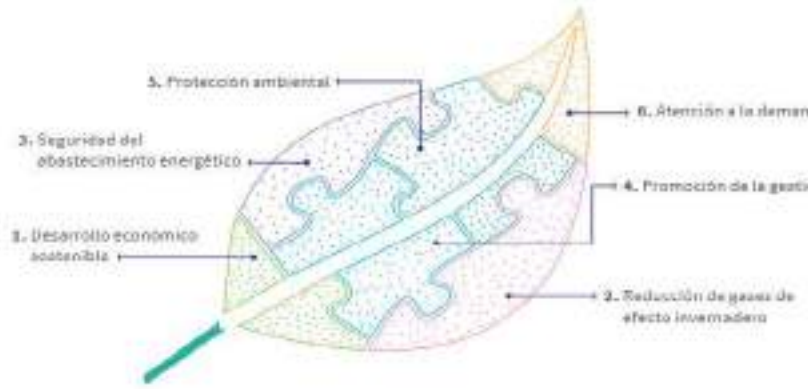


Figura 12. Beneficios de la implementación de sistemas de energía solar.

4. SUGERENCIAS TÉCNICAS Y ANÁLISIS DE SEGURIDAD

4.1. Recomendaciones

El proyecto y la instalación de una planta solar fotovoltaica es una actividad bastante compleja, caracterizada por muchos factores de riesgo. En la fase de estudio preliminar y en la siguiente, definida por la ingeniería de detalle, se recomienda siempre contratar a un ingeniero o técnico con un perfil adecuado. La precisión en la fase de cálculos es fundamental para determinar los parámetros óptimos del sistema, de los cuales depende la eficiencia de la planta y su capacidad de producir el máximo de energía posible.

Cada detalle tiene un peso relevante y puede orientar a preferir productos de características distintas (por ejemplo, páneles monocristalinos o policristalinos, estructura en aluminio o acero, fija o dinámica) y de marcas distintas: por ejemplo, en el caso de los inverter, cada productor asocia valores agregados al inversor, que pueden exaltar la eficiencia de la planta solar a largo plazo, desde lo sistemas de

monitoreo hasta la capacidad de resistir a situaciones climáticas de temperatura y humedad pesadas.

Todavía más importante es confiar, en la fase de instalación, en una empresa seria y calificada: la eficiencia de la planta depende en modo directo de la precisión en la puesta de los elementos (ángulo de inclinación de la estructura y su orientación, por ejemplo) y en la calidad de las conexiones eléctricas; la durabilidad de los elementos es directamente vinculada al buen trato que reciben en la fase de montaje y en el sucesivo ensayo. La presencia de un ingeniero y de un técnico certificado CONTE es fundamental en este proceso.

La instalación de una planta solar es una obra con altos riesgos para los trabajadores: se deben cumplir actividades mecánicas con herramientas pesadas (roto martillos, pulidoras, etc.) y operaciones de conexiones eléctrica en presencia de corriente continua a alta intensidad, con altos volúmenes de amperaje. La corriente continua, hasta bajos voltajes, es perjudicial para la salud del ser humano.

La empresa que instale la planta solar debe cumplir con todos los requisitos de ley: tener un plan de seguridad y salud laboral vigente, mantener informado el personal sobre los riesgos en cada operación, prevenir todos los eventos que puedan generar accidentes laborales. La supervisión de un técnico especialista en Salud Ocupacional en todas las fases de instalación, ensayo y puesta en marcha es lo más recomendable.

5. **BIBLIOGRAFÍA**

- http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html

- http://www.ideam.gov.co/

- Jinko Solar Inc. (2017). 1500V TUV Spanish Manual. Changai-China. 27 p.

CAPÍTULO IX

ELEMENTOS PARA LA FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS

Sandra Mariana Amaya Pérez
Ingeniera Industrial
Especialista en Ingeniería de la producción
Miembro Comité de Viabilidad de Proyectos – Agrosavia
E-mail: marianaamayap@gmail.com



Proyecto de producción intensiva de tilapia; utiliza SRA, energía fotovoltaica y aireación suplementaria. (Piscícola RVG, Villavieja-Huila). Foto: Miguel Landines

1. INTRODUCCIÓN

El capítulo abordado a continuación, se centra en una de las fases más importantes alrededor de la puesta en marcha de un proyecto, constituida como el punto de partida de éste, al abordar muchos de los interrogantes que se pretenden resolver con la implementación, independiente del fin que persiga el mismo.

La formulación, como fase del proyecto ha venido ganando importancia tras la apuesta que desde la política pública se ha venido haciendo alrededor de la ideación de instrumentos que la incorporen, como punto inicial asociado al ciclo de vida del proyecto. En la práctica, se ha logrado evidenciar cuáles son las ventajas que el considerarla como punto de partida generan dentro del análisis y toma de decisiones, así como las deficiencias que un inadecuado proceso o la inexistencia de este, pueden suscitarse en la fase de ejecución.

En la práctica y con la experiencia específica con el sector productivo acuícola y pesquero, aunque se ha logrado avanzar en la incorporación de elementos más robustos alrededor del diseño, planeación y programación de los proyectos, aun se requiere darle mayor estructura a la manera cómo se viene desarrollando el ejercicio. Es preciso partir del análisis de la situación actual que se pretende impactar y dar mayor importancia a los elementos de diagnóstico y caracterización, en lugar de abordar la estructuración desde un enfoque de oferta basado en la existencia de capital financiero únicamente.

De lo anterior, las temáticas seleccionadas están enfocadas a visualizar un enfoque diferente que da mayor importancia a la situación actual y al análisis de diferentes interrogantes asociados a la existencia de un problema, necesidad u oportunidad en la región a la que se oriente la fase de implementación del proyecto. Asimismo, dentro del contenido se incorporan como elementos algunas recomendaciones sobre la estructuración misma de los presupuestos y con la intención de dar mayor comprensión al público objetivo de la publicación, se abordan como explicación algunos resultados sugeridos a través de las variables financieras usadas alrededor de la modelación financiera.

2. CONCEPTOS BÁSICOS PARA LA FORMULACIÓN

Todo proceso de formulación de un proyecto debe involucrar un análisis adecuado de variables, a través del cual sea posible identificar si el proyecto tiene origen en una necesidad, en una oportunidad o como respuesta de cara a la manifestación de una problemática. Posterior a ello, será posible determinar cuál es el alcance que se pretender abordar en el marco de la formulación, estableciendo el objeto del proyecto y definiendo la lógica de intervención, de la siguiente manera: i. Análisis de la situación actual (Diagnóstico), ii. Definición de alcance del proyecto, iii. Establecimiento de fases para la ejecución, iv. Definición de productos y v. Identificación de actividades, tareas

y recursos. En la figura 1 se ilustra la lógica de intervención básica para un proyecto.

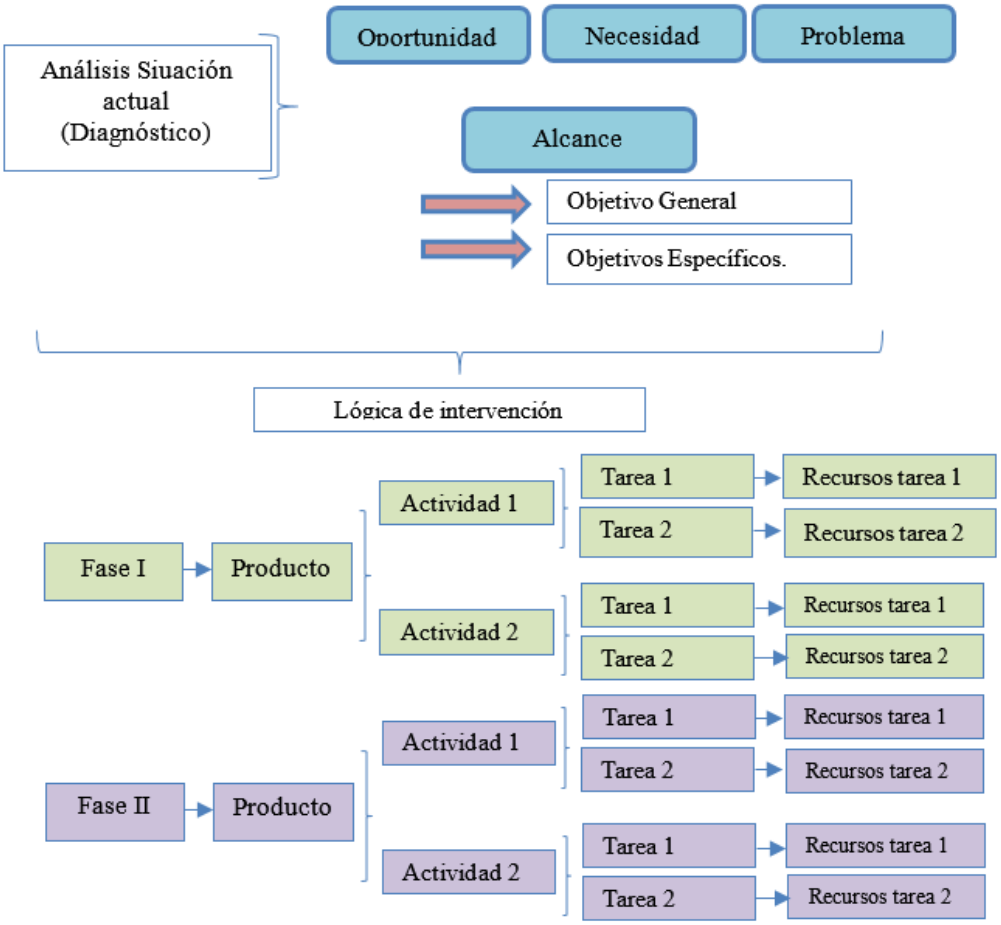


Figura 1. Esquema – Lógica de intervención de un proyecto.

Existen diversas metodologías asociadas con el proceso de formulación de un proyecto, todo dependerá de su magnitud y de la experticia de quien lo asuma. No obstante, en la práctica basta la realización de un ejercicio sencillo que involucre la participación de personas que dominen el componente técnico, financiero y que apoyen el ejercicio de construcción.

Asociado a dicho ejercicio, a continuación se presentan una serie de comentarios y recomendaciones a tener en cuenta en la definición de cada uno de los pasos referidos como la lógica de intervención de un proyecto.

2.1. Análisis situación actual

Se asocia con el levantamiento de un diagnóstico que incluya información de variables como: ubicación y descripción física de la zona (vías de acceso, clima, hidrografía,

suelo, biodiversidad, entre otros), aspectos demográficos, características económicas de la región, y un aporte de información que permita conocer cómo es la dinámica para el caso de los sistemas acuícolas en la región.

Asimismo, y de cara a la oportunidad del modelo de negocio es importante levantar y consultar información asociada con la dinámica del mercado, de tal manera que sin haber definido aún el alcance definitivo del proyecto, se pueda identificar el potencial y también las restricciones para el negocio. Lo anterior, también involucra la realización de un análisis básico de mercado que permita conocer en detalle cuáles son las variables que inciden en el comportamiento del mercado del producto en la región en la que se desea o plantea implementar. A menudo es un análisis que se limita a indicar que no existen competidores en la zona, o que los que existen no dan respuesta al volumen de demanda que se presenta, pero no se aporta un análisis adecuado de información, que precisamente este orientado a indagar cuáles son los volúmenes de producción, cuáles los de demanda, cuáles son los esquemas de comercialización que aplican en la zona, quiénes son los responsables de dinamizar el mercado del producto, cuál es el comportamiento de los precios en los últimos periodos, que variables inciden en la estimación de los mismos, cuáles son las expectativas y motivaciones que los consumidores (mayoristas) están requiriendo del producto, entre otros aspectos.

A continuación, se enuncian a modo de interrogantes, algunas de las consideraciones que vale la pena indagar antes no sólo de emprender un modelo de negocio, si no de acotar su alcance.

- ¿Dónde existe el interés de desarrollar el sistema productivo?

- ¿Cuál es la vocación productiva de la región?

- ¿Existen limitantes o restricciones para el uso de suelo en la zona? ¿Cuáles?

- ¿Existe disponibilidad de suelo para una posible implementación? ¿Qué condiciones morfológicas tiene?

- ¿Existe disponibilidad de agua? ¿Cuáles son las fuentes?

- ¿Hay facilidad en la consecución de permisos y licencias que se puedan requerir?

- ¿Cuáles son las condiciones climáticas de la zona?

- ¿Cuál es la biodiversidad de la zona? ¿Cómo se impactaría con la implementación del sistema productivo?

- ¿Hay disponibilidad de vías de acceso?
- ¿Existe cobertura en la prestación de servicios públicos?
- ¿Qué tipo de especie soportaría el modelo productivo a implementar?
- ¿Cómo es el comportamiento de la especie en la región?
- ¿En la zona se desarrollan sistemas productivos acuícolas?
- ¿Cuál es el alcance de los mismos?
- ¿Existe disponibilidad de semilla en la zona?
- ¿Qué volumen de producción están manejando?
- ¿Comercializan directamente la producción?
- ¿Cuál es la demanda de producto en la zona y región? ¿Qué tipo de demanda existe: ¿fresco, postcosecha?
- ¿Existen potenciales compradores para la producción?
- ¿Qué requisitos exige el mercado?
- ¿Cuál es el aporte de la región en los volúmenes de producción nacional?
- ¿Cómo ha sido el comportamiento de precios en la región?

De lo anterior, existirá como insumo información en diversas variables, que permitirá soportar el análisis frente a la potencialidad del negocio, las garantías que existen para su implementación y sostenibilidad, así como las oportunidades de escalamiento en el corto plazo.

2.2. Situación no deseada

Una vez efectuado el levantamiento y análisis de información de diagnóstico, será posible identificar sí alrededor de la puesta en marcha del sistema productivo acuícola, se responde a una problemática, a una necesidad o a una oportunidad del mercado. En la figura 2 se cita como referencia un ejemplo para cada una de las condiciones expuestas.

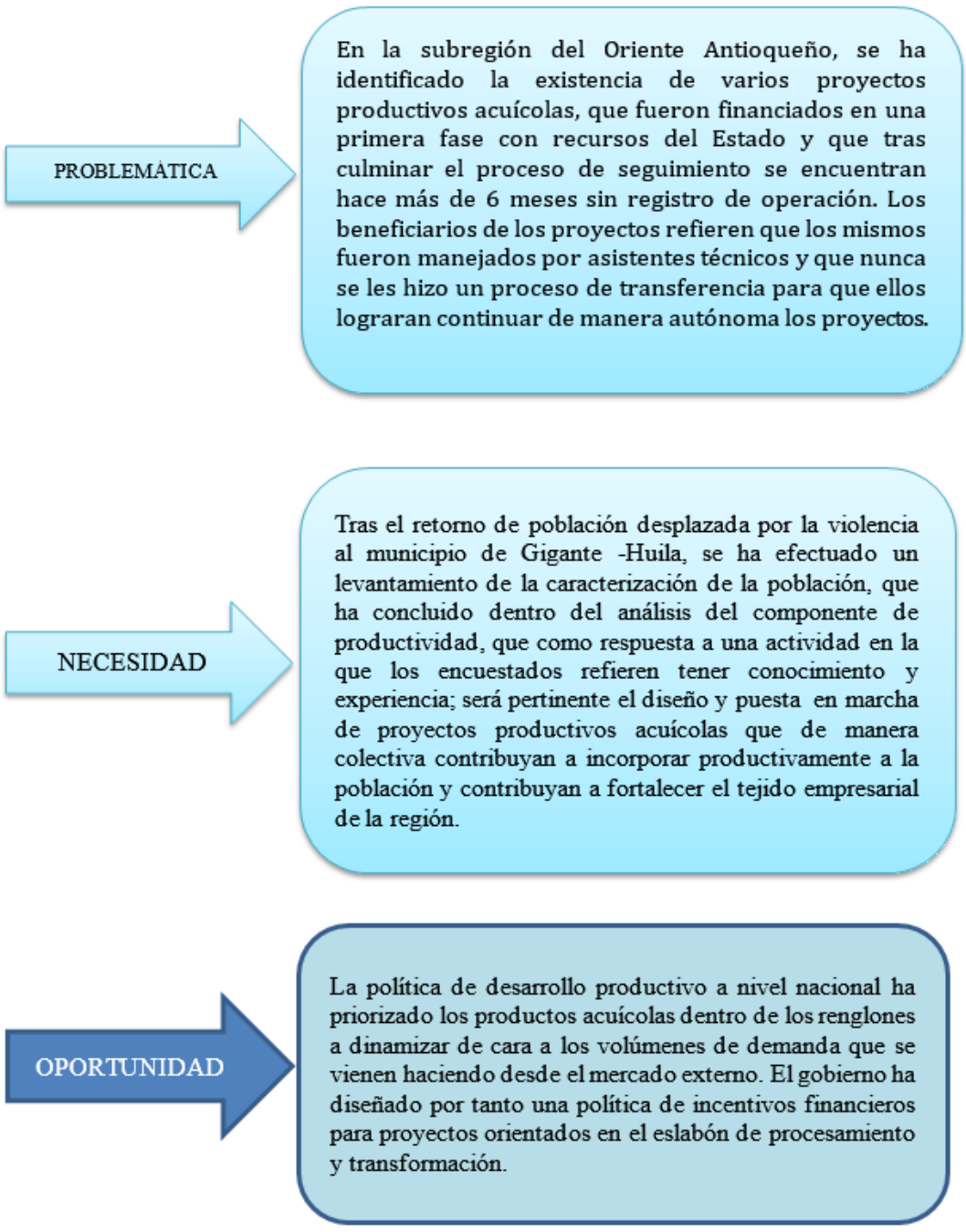


Figura 2. Ejemplificación - Análisis de situación no deseada.

2.3. Definición del alcance

Posterior a la identificación de la situación o contexto a atender, visto como problema, necesidad u oportunidad, se continúa el ejercicio de establecer la denominada

"Situación esperada", que consiste en definir cuál será el objetivo general y los específicos del proyecto a formular. Aquí será importante para la construcción de estos, de acuerdo con lo establecido por la Dirección de inversiones y Finanzas públicas del DNP en el documento "Guía para la construcción y estandarización de la Cadena de valor - versión 3.0 - mayo de 2013", dar respuesta a unos interrogantes sencillos y tener en cuenta algunas recomendaciones:

Objetivo general

• ¿Cuál es la situación deseada con relación al problema/necesidad/oportunidad identificada?
• ¿El objetivo general provee una solución al problema o necesidad previamente identificado?
• ¿El objetivo general indica claramente la situación deseada?

Como recomendación para la construcción del objetivo general, se podrían tener en cuenta las siguientes acotaciones:

• La estructura de un objetivo debe contener al menos tres componentes: (i) la acción que se espera realizar, (ii) el objeto sobre el cual recae la acción y (iii) elementos adicionales de contexto o descriptivos.
• La redacción de un objetivo deberá iniciar con un VERBO EN INFINITIVO, es decir, con una palabra terminada en "ar", "er" o "ir". Por ejemplo, aumentar, reducir, brindar, desarrollar, formar, adoptar, etc.

Objetivos específicos

• Son los medios cuantificables que llevarán al cumplimiento del objetivo central.
• Corresponden a los resultados del proyecto.
• Surgen de pasar a positivo las causas del problema.

La construcción de los objetivos específicos debe responder a los siguientes interrogantes:

• Al materializar los medios u objetivos específicos que abarca el proyecto, ¿Se garantiza la solución del problema?
• ¿Cada uno de los objetivos específicos del proyecto resulta de pasar a positivo una de las causas del problema?
• ¿El objetivo específico es medible o cuantificable?

De lo anterior, se concluye que es la definición del objetivo general y específicos la que permite limitar el alcance de la formulación, como resultado de un ejercicio de levantamiento y análisis de información. A continuación, a manera de ejemplo, se expone en la figura 3, la definición de un objetivo general, la alternativa de solución y los objetivos específicos para un proyecto acuícola que responde a una necesidad de generación de ingresos.

Objetivo General

Incrementar los niveles de ingresos de población víctima de la violencia ubicada en el Municipio de Gigante - Huila

Alternativa de Solución

Implementar en el Municipio de Gigante Huila, un proyecto productivo de cría, levante y engorde de tilapia que beneficie a 10 familias.

Objetivos Específicos

- Vincular a una actividad productiva un total de diez familias de población retornada en el Municipio de Gigante – Huila.
- Desarrollar una actividad económica que sea coherente con la vocación productiva de la población y de la zona.
- Adoptar un sistema de producción acuícola semi intensivo de tilapia.
- Efectuar un proceso de asistencia técnica de cien horas en el manejo técnico del sistema productivo.
- Establecer una alianza con una comercializadora regional.
- Generar ingresos por valor de $150 millones en el primer año.

Figura 3. Ejemplificación – Análisis de Situación Actual

2.4. **Análisis de fases**

Posterior a establecer el alcance, será útil para poder dimensionar la magnitud del proyecto a implementar, dividirlo a su vez en fases de ejecución; por lo general, de acuerdo con el proceso productivo o eslabón de la cadena al que se haga referencia. Esto facilitará tener una concepción clara de todas las actividades y tareas que se deben ejecutar, así como la magnitud de los recursos; y podrá facilitar la labor de seguimiento a la ejecución, permitiendo controlar un desarrollo por etapas.

Se considera útil aproximar la división por fases a la definición de productos en la lógica de marco lógico; en tanto es claro que de cada una de las fases será posible identificar un entregable a través del cual se vaya dando cumplimiento a los objetivos específicos establecidos.

Algunos ejemplos de productos de acuerdo con la fase a la que pertenecen se ilustran en la tabla 1.

Tabla 1. Ejemplos definición de productos por Fase.

FASE	PRODUCTOS
Alistamiento	Infraestructura de estanques disponible. Plan de aprovisionamiento de insumos y materias primas. Reactivación de 15 Ha de estanques. Plan de monitoreo de la calidad del agua. Paquete tecnológico de piscinas en geomembrana. Concesión de aguas ante la Corporación correspondiente.
Alevinaje	Plan de selección de semilla. Sistemas de tanques precría. 150.000 post-larvas de hasta PL-30 o más. Siembra mensual escalonada de 7.200 alevinos de 2-3 gr de peso.
Levante y Engorde	Plan de gestión en Buenas Prácticas de producción Acuícola. Sistema de monocultivo en estanques con área total de 25 Has. Plan de ajuste mensual de raciones y evaluación del crecimiento.
Cosecha – Postcosecha	3.000 kilos de trucha en fresco 2.500 kilos de tilapia en filete. Convenio entre la asociación de productores y la comercializadora regional.

2.5. Actividades

Frente a cada uno de los productos establecidos, será procedente enumerar, descomponer o desagregar el alcance en actividades; de tal manera que se enuncie la secuencia que es necesario seguir para obtenerlo.

Asociado con cada una de las actividades definidas, se hace necesario precisar en el mismo sentido de la lógica de intervención, cuáles son las tareas en las que se descompone la actividad, qué recursos requiere para su ejecución y cuánto tiempo demandan; entre otros aspectos.

En la tabla 2, se listan algunos ejemplos de actividades según el producto establecido.

Tabla 2. Ejemplos Definición de Actividades por Fase.

FASE	ACTIVIDAD
Infraestructura de estanques disponibles	Definir diseño del sistema de estanques Realizar descapote y limpieza Realizar marcación y estacado Realizar el proceso de excavación y conformación de diques. Efectuar nivelación e impermeabilización del estanque. Diseño y construcción del sistema hidráulico

3. CONSIDERACIONES ASOCIADAS CON LA EVALUACIÓN FINANCIERA

3.1. Construcción del presupuesto del proyecto

A menudo cuando se presenta la posibilidad de acceder a financiación de recursos en el marco de una Convocatoria, se identifica como una de las mayores deficiencias de cara a los procesos de formulación, la dificultad asociada con la estimación y proyección de presupuestos. Pareciera por lo general que, aunque existe claridad técnica en el modelo de negocio, no se domina el Componente Financiero. De lo anterior, se puede concluir que en muchos casos las ideas o modelos con mayor potencial terminan subestimados por la falta de claridad en la identificación de los recursos que requieren, para la puesta en marcha e implementación y que constituyen a la vez garantía frente a claridad que soporta la sostenibilidad del negocio. A continuación, y en aras de compartir elementos de soporte a un proceso de formulación, se presentan algunos elementos sencillos asociados a la cuantificación tanto de variables técnicas en los sistemas productivos como a aspectos netamente relacionados con el componente presupuestal y financiero.

3.2. Clasificación por rubros

De acuerdo con los procesos de formulación, independiente sí se espera aplicar a un proceso de convocatoria, es importante tener claridad respecto a los rubros que en términos presupuestales se afectan tras la planeación de los recursos. Aunque se trata de un concepto sencillo, la generalidad apunta a que existe un desconocimiento del alcance de estos, de lo cual resulta que se continúen “cargando” a nivel presupuestal elementos que por naturaleza no corresponden al alcance técnico de un rubro. Lo anterior, en el marco de una convocatoria deriva en el incumplimiento de requerimientos de elegibilidad de una propuesta y termina por ende invalidando la evaluación del proyecto. En tabla 3 se presenta un esquema en el cual se aborda una definición sencilla por rubro, y se refieren como ejemplo algunos recursos que por clasificación hacen parte de los mismos. En todo caso, frente al marco de las convocatorias para aplicación a recursos, serán las condiciones propias las que indiquen el alcance de los rubros definidos.

Tabla 3. Ejemplos Definición de recursos por Tipo de Rubro.

RUBRO	DEFINICIÓN	TIPO DE RECURSOS
MATERIALES Y SUMINISTROS	Se trata de los recursos asociados a insumos y materiales de uso directo en la actividad productiva que se destinan al desarrollo propio de la actividad.	Semilla (alevinos, larvas), fertilizantes, abono, productos de uso veterinario, alimento concentrado, elementos de ferretería asociados con la adecuación de infraestructura, mangueras, baldes, etc.
MAQUINARIA Y EQUIPOS	Corresponde a bienes (activos) de consumo/uso duradero. Se incluyen todos los instrumentos, utensilios y aparatos de carácter técnico que se requieren para la ejecución del proyecto.	Equipos de análisis de agua, motobombas, aireadores, congeladores, cavas isotérmicas, balanzas, cuartos fríos, plantas eléctricas, incubadoras, jaulas, empacadoras, etc.
RECURSO HUMANO	Corresponde a los recursos destinados a garantizar el pago de mano de obra calificada y no calificada, cuyas actividades se relacionen de manera directa con el proyecto.	Pago de jornales asociados con las diferentes fases de cultivo, incluyendo los procesos de cosecha, pago de honorarios o salarios asociados con el direccionamiento técnico de los proyectos.
OBRAS DE INFRAESTRUCTURA Y ADECUACIONES	Corresponde los recursos asociados con la ejecución de obras de infraestructura física o adecuación de la existente, destinadas a la producción, procesamiento o comercialización del producto.	Construcción de estanques, construcción y adecuación de zonas de beneficio, proceso, bodegas, vivienda, oficinas, unidades sanitarias, rehabilitación de bocatomas, sistema hidráulico, recubrimientos con geomembrana, etc.
SERVICIOS DE LABORATORIO	Recursos orientados a garantizar el acceso a la prestación de servicios especializados de laboratorio y cuyo fin está asociado a garantizar el control sanitario de parámetros fisicoquímicos del agua y animales de cultivo en explotaciones acuícolas.	Análisis microbiológicos, análisis parasitológicos, análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua, análisis de parámetros ambientales, análisis organolépticos de producto, etc.
PAGO DE TARIFAS	Recursos orientados a garantizar el cumplimiento de requisitos establecidos en la normatividad propia del sector, sumado a los requerimientos propios en términos de transformación y comercialización de productos derivados de la acuicultura.	Permiso de cultivo, permiso de procesamiento, permiso de Comercialización, acreditación de normas técnicas asociadas con la transformación de productos, codificación requerida para tramites de comercialización, etc.

RUBRO	DEFINICIÓN	TIPO DE RECURSOS
ACTIVIDADES COMERCIALES	Recursos asociados directamente con la ejecución de estrategias de mercadeo orientadas a garantizar la inserción o fortalecimiento comercial.	Se incluyen la participación en calidad de expositores en ferias y eventos comerciales, participación en ruedas de negocio, diseño de catálogos y brochure, diseño de páginas web, viajes de relacionamiento comercial (principalmente al exterior), etc.
CAPACITACIÓN	Recursos asociados a la ejecución de actividades de formación (no formal) y que se orientan a mejorar el conocimiento que se tiene sobre una temática específica.	Cursos de manipulación de alimentos, gestión de residuos, prácticas acuícolas, manejo poscosecha, procesamiento y conservación, etc. En algunas convocatorias se incluye el recurso asociado con la logística de la actividad, incluyendo recursos para cubrir los gastos de transporte del personal que dicta el proceso de capacitación, entrega de material didáctico, alquiler de espacios y de ayudas audiovisuales, refrigerios, etc.
ASISTENCIA TÉCNICA	Recursos asociados con la necesidad de acceso a servicios profesionales especializados en calidad de acompañamiento y asesoría específica y que tienen como fin la transmisión de conocimientos y métodos para mejorar un proceso productivo.	Manejo de dietas alimenticias, elementos básicos de reproducción, manejo de cultivos, elementos de sanidad y bioseguridad, etc.
GASTOS ADMINISTRATIVOS	Son aquellos recursos asociados con la operación propia de un esquema productivo o modelo de negocio y que deben garantizarse independientemente de los volúmenes de producción.	Servicios de arrendamiento de infraestructura, servicios públicos, pago de servicio de vigilancia, pago de servicios contables, materiales de oficina, etc.
GASTOS LEGALIZACIÓN E IMPUESTOS	Recursos de tipo transversal al desarrollo de la actividad económica y que se requieren asegurar a fin de cumplir con requisitos contables y legales.	Legalización de convenios de financiación, pago de pólizas, impuestos, etc.

En la práctica y asociado a la construcción del presupuesto, cada una de las actividades tendrá una valoración de recursos que aplicará a diferentes rubros. Frente a la dimensión de cada recurso, se deberá incluir la unidad de medida y la cuantificación unitaria por recurso, para hacer la conversión a valores totales de acuerdo con la necesidad. A continuación, en la tabla 4 se presenta un modelo de construcción de presupuesto por fases.

Tabla 4. Ejemplo Construcción de un Presupuesto.

Descripcion	Rubro	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
FASE I Adecuación Infraestructura					
Ampliacion de estanques tilapia	R01 - Infraestructura	m2	1.350	$ 3.500	$ 4.725.000
Ampliacion de estanques trucha	R01 - Infraestructura	m2	30	$ 350.000	$ 10.500.000
Obras de adecuación de Conducciones	R01 - Infraestructura	Unidad	1	$ 9.000.000	$ 9.000.000
Adecuación Lago de oxidacion	R01 - Infraestructura	Unidad	6	$ 1.000.000	$ 6.000.000
Mano de obra (adecuaciones)	R04 - Recurso Humano	Jornal	35	$ 25.000	$ 862.500
FASE II Alevinaje					
Kit calidad de aguas	R02 - Materiales y Suministros	Unidad	1	$ 1.500.000	$ 1.500.000
Malla polisombra	R02 - Materiales y Suministros	Rollo	1	$ 200.000	$ 200.000
Alevinos tilapia primer año	R02 - Materiales y Suministros	Unidad	22.500	$ 250	$ 5.625.000
Mano de obra (operatividad)	R04 - Recurso Humano	Jornal	20	$ 25.000	$ 500.000
FASE III Levante y Engorde					
Alimento concentrado tilapia primer año	R02 - Materiales y Suministros	Kg.	9.171	$ 1.818	$ 16.672.878
Cal viva	R02 - Materiales y Suministros	Kg.	585	$ 400	$ 234.000
Cal dolomita	R02 - Materiales y Suministros	Kg.	1.170	$ 400	$ 468.000
Fertilizante inorganico	R02 - Materiales y Suministros	Kg.	12	$ 1.700	$ 19.890
Yodo para desinfeccion	R02 - Materiales y Suministros	Galones	2	$ 25.000	$ 50.000
Nasa	R02 - Materiales y Suministros	Unidad	6	$ 70.000	$ 420.000
Chinchorro 10 M	R02 - Materiales y Suministros	Unidad	2	$ 1.500.000	$ 3.000.000
Balde	R02 - Materiales y Suministros	Unidad	12	$ 10.000	$ 120.000
Canastilla plastica	R02 - Materiales y Suministros	Unidad	12	$ 15.000	$ 180.000
Mano de obra (operatividad)	R04 - Recurso Humano	Jornal	183	$ 25.000	$ 4.562.500
FASE III Levante y Engorde					
Mesas de acero inoxidable 3 x 1 M	R03 - Maquinaria y Equipos	Unidad	6	$ 1.500.000	$ 9.000.000
Cuchillos	R02 - Materiales y Suministros	Unidad	12	$ 50.000	$ 600.000
Balanza electronica 30 Kg	R03 - Maquinaria y Equipos	Unidad	2	$ 100.000	$ 200.000
Indumentaria (oberoles, guantes y botas)	R02 - Materiales y Suministros	Unidad	6	$ 100.000	$ 600.000
Mano de obra (cosecha y procesamiento)	R04 - Recurso Humano	Jornal	50	$ 25.000	$ 1.250.000
Gastos Transversales					
Arrendamiento infraestructura terrenos	R05 Gastos Asministrativos	Mes	12	2.000.000	24.000.000
Servicios públicos	R05 Gastos Asministrativos	Mes	12	$ 250.000	$ 3.000.000
Honorarios profesional contable	R05 Gastos Asministrativos	Mes	12	$ 350.000	$ 4.200.000
Mano de obra (vigilancia)		Jornal	365	$ 25.000	$ 9.125.000
TOTAL					**$ 116.614.768**

3.3. Cálculo de Punto de Equilibrio

Asociado a un indicador de rentabilidad de un esquema productivo, se identifica el uso del cálculo denominado “punto de equilibrio”. La acotación se asocia con poder determinar aquel nivel de producto (cantidad) o de ingresos (ventas) en la cual los ingresos generados son suficientes para cubrir los costos asociados con la puesta en marcha del sistema productivo; es decir que se tiene una utilidad de cero. De lo anterior, el cálculo se constituye en información apropiada para poder proyectar cuál es el nivel de utilidades al que se quiere llevar un modelo de negocio.

El cálculo, aunque es sencillo, requiere identificar previamente la información de las variables: costos fijos, costos variables, cantidad vendida, precio de venta unitario e ingresos totales. A continuación, y al considerarlas de mayor complejidad, se aporta una breve conceptualización asociada con la cuantificación de costos fijos y variables, previo a explicar cómo hallar el punto de equilibrio.

3.3.1. Costo fijo

Se constituyen en aquellos recursos que se requieren independientemente del nivel de producción al que se oriente la formulación y que deben darse de manera obligatoria para la puesta en marcha y la sostenibilidad del sistema productivo.

De acuerdo con la fase o proceso del sistema productivo en la que se originan estos costos, algunos ejemplos se relacionan en tabla 5.

Tabla 5. Ejemplo costos fijos por Fase.

FASE	EJEMPLO RECURSO
Alistamiento	Alquiler/compra de infraestructura – Terreno. Obras de adecuación. Servicios de laboratorio (suelos, agua). Bombas/Electrobombas. Cal.
Alevinaje	Reproductores (cuando aplique de acuerdo con el sistema productivo).
Cosecha, Procesamiento, Comercialización.	Artes de pesca: Redes / Atarrayas (sí aplican). Infraestructura de cuartos fríos. Cavas isotérmicas.
Otros Transversales.	Embarcaciones (sí aplican). Permisos. Dotación para recurso Humano fijo. Servicio de vigilancia. Servicios públicos.

Alrededor de la valoración de los costos fijos, el dimensionamiento se hace teniendo en cuenta la depreciación de las inversiones fijas requeridas para la implementación de cualquier sistema productivo. Este concepto se traduce de manera sencilla en tomar el valor total de las inversiones en activos que se requieren para la puesta en marcha del sistema productivo y disminuir su valor a partir de estimar cuál es el valor de vida útil en años. Contablemente, estos valores ya están estandarizados dependiendo el rubro al que pertenezca un activo. Por ejemplo, los activos clasificados como inmuebles tienen una vida útil de 20 años, la maquinaria y equipo tienen una vida útil de 10 años, los vehículos tienen una vida útil de 5 años.

3.3.2. Costo Variable

Se constituyen en aquellos recursos que se requieren para la puesta en marcha y operación del sistema productivo y que de manera directa dependen del volumen de producción que se plantee técnicamente.

De acuerdo con la fase o proceso del sistema productivo en la que se originan estos costos, algunos ejemplos se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Ejemplo costos variables por Fase.

FASE	EJEMPLO RECURSO
Alistamiento	- Fertilizantes - Cal
Alevinaje	- Alevinos /Larvas
Levante y Engorde	- Alimento Concentrado - Fertilizantes - Medicamentos - Jornales asociados al monitoreo del cultivo
Cosecha, Procesamiento, Comercialización	- Jornales Cosecha - Jornales Poscosecha - Materiales de empaque
Otros Transversales	- Combustibles - Lubricantes - Hielo

3.3.3 Método de cálculo Punto equilibrio

Existen dos fórmulas que aplicadas permiten identificar el punto de equilibrio: un método en el cual se identifica el número de unidades de producto y un segundo método a partir del cual se identifica el nivel de ingresos. En ambos casos, la respuesta sugiere que dicha cifra es aquel valor en el que los ingresos de ventas son iguales a los costos de implementación. Por encima de la cifra obtenida, se registran las utilidades del modelo de negocio.

Fórmula 1. Punto de equilibrio en cantidad

$$\text{Formula 1:} \quad \frac{\text{Costos Fijos}}{\text{PV unitario} - \text{CV Unitario}}$$

Ejemplo:

Un sistema productivo semi intensivo en cachama, requirió para su implementación una inversión fija de $27.024.838 y costos variables de $103.678.080. Al finalizar el primer año productivo, se registró una producción de 12312 kilogramos, que fueron comercializados a un valor de $11500/kg.

De la lectura de información se tiene disponible el costo fijo y precio de venta unitario. Para determinar el costo variable unitario se debe dividir el costo variable total entre el número de kilogramos producidos, obteniendo un valor de $8421 por kilogramo.

De esta manera y reemplazando en la fórmula 1, tenemos:

$$\frac{\$27.024.838}{\$11.500 - \$8.421} = 8.777 \text{ kilogramos}$$

Fórmula 2: Punto de equilibrio en Ingresos

$$\text{Formula 2:} \quad \frac{\text{Costos Fijos}}{1 - \dfrac{\text{Costos Variables Totales}}{\text{Ventas Totales}}}$$

Siguiendo el mismo ejercicio anteriormente citado, se tendría disponible la información de la variable costos fijos y costos variables totales. Para determinar las ventas totales se debe multiplicar la producción esperada de 12.312 kilogramos por el precio de venta de $11.500 kilogramo, obteniendo un valor de $141.588.000 millones

De esta manera y reemplazando en la fórmula 2, tenemos:

En ambos casos, la respuesta sugiere que una producción inferior a 8.777 kilogramos,

$$\frac{\$27.024.838}{1 - [\$103.678.080 / \$141.588.000]} = \$100.933.814 \text{ millones}$$

con ventas de $100.933.814 representaría que el sistema productivo no está generando utilidades, y en el corto plazo no será sostenible financieramente. Por encima de dichos valores, el sistema productivo es rentable.

4. Variables asociadas al análisis de rentabilidad financiera

Asociado a la implementación de un proyecto de tipo productivo, siempre será necesario identificar previo a la puesta en marcha cuál es la rentabilidad del mismo, ya que se espera adicional a la generación de ingresos para las personas que

participan, que el proyecto sea rentable y sostenible en el tiempo. Este tipo de análisis se soporta en el levantamiento de un modelo financiero algunas veces más robusto que otros, en tanto para el caso es necesario levantar cálculos específicos asociados con el sistema productivo seleccionado. Independiente de la manera en la que se apoye la construcción del modelo financiero, las variables que permiten determinar la rentabilidad y sostenibilidad, por lo general son las mismas.

A continuación, se intenta dar una explicación sencilla que sugiere cuál es la interpretación asociada al resultado de algunas de esas variables.

4.1. Flujo de Caja

Corresponde a una serie de operaciones de suma y resta que permiten determinar cuáles fueron los ingresos y egresos de un año y cuál fue el costo de financiamiento del dinero (cuándo la inversión del proyecto está asociada a un préstamo), para poder conocer sí en efecto fue mayor el ingreso o por el contrario el gasto.

Sí al final de un año los ingresos son mayores a los egresos (incluyendo el pago de préstamos), el resultado traduce en que se están generando ingresos suficientes para dar continuidad al proyecto.

4.2. Tasa de descuento

Se traduce en un factor (%) que se utiliza dentro del modelo financiero para determinar cuál es el valor del dinero en el tiempo, esto se traduce en dar respuesta a las preguntas: ¿Cuánto vale el dinero que generará la implementación del proyecto en el futuro sí hago de cuenta que tengo ese dinero hoy en día disponible? o ¿Cuál es el costo de los recursos financieros utilizados para poder implementar el proyecto productivo?

Respecto a la última pregunta, es necesario tener en cuenta que los recursos financieros asociados a la puesta en marcha de un proyecto productivo pueden ser de dos tipos: los recursos propios y los recursos financiados a través de un acreedor a manera de deuda o préstamo. Asociado a cuál de las fuentes será la que apoye la puesta en marcha del proyecto, será posible identificar cuál es ese porcentaje (%) que se debe seleccionar como tasa de descuento y que se traduce en saber cuál es la rentabilidad mínima que debe tener el dinero para cumplir con los compromisos de expectativa sobre los recursos (dinero) propios o para poder hacer frente a las obligaciones con los acreedores.

En síntesis, la tasa de descuento se traduce en la rentabilidad mínima que se debe esperar tenga para el caso un proyecto productivo.

4.3. Valor Actual Neto (VAN)

Se traduce en el valor del dinero luego de descontar los beneficios a futuro, esto es, luego de descontar el pago de deudas a acreedores o los beneficios generados por expectativas de rentabilidad propias.

Aunque su valor o resultado se obtiene automáticamente a partir de la modelación financiera en una hoja de cálculo, el ejercicio está asociado a valorar el resultado de los flujos de caja anuales para un horizonte de análisis de rentabilidad establecido (por lo general 5 o 10 años dependiendo del sistema productivo), aplicando la tasa de descuento establecida.

A manera de ejemplo a continuación se refiere un flujo de caja para un proyecto productivo para el que se quiere conocer su rentabilidad a 5 años, con una inversión inicial de $291.600.000 y una tasa de descuento del 8%.

Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
-291.600.000	149.912.500	236.042.500	236.042.500	236.042.500	236.042.500

Al aplicar la formulación sugerida en una hoja de cálculo, que es la siguiente:

VAN: (tasa de descuento; Sumatoria de los flujos de caja de los años de análisis)

Se tiene, un VAN para el proyecto negativo de $30.185.021, que refiere que para el horizonte propuesto y con la tasa de descuento sugerida, no existe rentabilidad en el proyecto, esto derivado a la existencia de una inversión inicial alta para el horizonte de análisis fijado de 5 años. Para el caso, el resultado indica que el proyecto no consigue alcanzar la tasa de descuento del 8% por un valor de $30.185.021.

Sí el resultado obtenido fuese mayor a cero, sugeriría el proyecto es rentable. Mientras sí se obtiene que es igual a cero, sugiere que el proyecto está generando exactamente la rentabilidad que se espera según la tasa de descuento aplicada.

4.4. Tasa Interna de Retorno (TIR)

Este es un referente similar al que representa el uso de la tasa de descuento. Mientras en la tasa de descuento se reducen los beneficios que produce una inversión, la Tasa Interna de Retorno, al contrario, permite identificar cuál es la tasa de interés o rentabilidad que genera una inversión durante determinado periodo de análisis.

Esto traducido de manera sencilla, es conocer cuál es el porcentaje de beneficio o pérdida que tiene una inversión, teniendo en cuenta que una vez hecha no se podrá retirar el dinero en determinado periodo de tiempo.

El análisis del resultado se recomienda sea asociado a la definición de la tasa de descuento del proyecto, de tal manera que se pueda concluir lo siguiente:

● Sí la TIR es mayor a la tasa de descuento, la inversión que requiere el proyecto es aceptable y la rentabilidad que se obtiene del dinero en el horizonte de planeación definido, es mayor a la que se requiere, es decir se cumple con las expectativas de rentabilidad propias, así como las obligatorias frente a acreedores.

● Sí la TIR es menor a la tasa de descuento, la inversión que requiere el proyecto no es aceptable, en tanto lo generado no es suficiente para hacer frente a las expectativas de rentabilidad propias y a las obligaciones con acreedores.

● Sí la TIR es igual a la tasa de descuento, la inversión que requiere el proyecto se puede realizar, teniendo en cuenta no obstante que no se generará una rentabilidad mayor a la considerada por la tasa de descuento.

5. BIBLIOGRAFÍA

● Departamento Nacional de Planeación. Dirección de Inversiones y Finanzas Públicas. Guía para la Construcción y estandarización de la cadena de valor. Versión 5.0 enero 2017.

● Departamento Nacional de Planeación. Dirección de Inversiones y Finanzas Públicas. Manual de soporte conceptual, metodología general para la formulación y evaluación de proyectos. Versión 1.5 agosto 2013.

● Dirección de Inversiones y Finanzas Públicas FAO. Dirección del Centro de Inversiones. Departamento de Cooperación Técnica. Título Formulación y Análisis detallado de Proyectos, Capítulo 9 Análisis Financiero y preparación de recomendaciones. 2005



ISBN: 978-958-56718-7-4

GOBIERNO DE COLOMBIA

MINAGRICULTURA

AUNAP
AUTORIDAD NACIONAL DE ACUICULTURA Y PESCA
"Acuicultura y Pesca con Responsabilidad"

FFCC
Fundación Fauna Caribe Colombiana