

CIPAC AIP

Centro de Investigación y Producción en
Ambiente Controlado AIP

Acuaponía: Una Guía Compleensiva para la Producción Sostenible de Alimentos

Sección 1: Introducción A La Acuaponía



Sección 1: Introducción a la acuaponía

1.	Introducción a la acuaponía.....	6
1.1	Componentes de los sistemas acuapónicos	8
1.2	Acuicultura	10
1.3	Hidroponía	11
2.	Clasificación de la acuaponía	12
2.1	Diseño de Sistemas Acuapónicos para Diferentes Necesidades y Grupos Interesados	14
2.2	Clasificación Según el Modo de Operación: Extensivo e Intensivo	15
2.3	Clasificación según Gestión del Ciclo del Agua	17
2.3.1	Sistemas Acuapónicos Desacoplados (DAPS)	17
2.3.2	Sistemas Acuapónicos de Doble Recirculación (DRAPS)	18
2.4	Tipos de Instalaciones Hidropónicas Utilizadas en Acuaponía	20
2.5	Uso del Espacio: Sistemas Horizontales y Verticales	22
3.	Oportunidades, Riesgos, Desafíos y Limitaciones	22
3.1	¿Está el mercado listo para la acuaponía? Una perspectiva actual	23
3.2	Desafíos en Europa	23
3.3	Oportunidades para la expansión	24
3.4	Estado del Mercado Tecnológico en Centroamérica y Panamá	25
3.5	Recomendaciones para el Mercado Centroamericano	26
4.	Historia de la acuaponía	29
5.	Temas Actuales de Investigación	31
5.1	Tendencias en Tecnología	31
5.2	Tecnología Acuapónica: Desafíos y Oportunidades	29
5.3	Reducción de Requerimientos de Mano de Obra	30
5.4	Tendencias en el Diseño de Sistemas	31
5.5	Investigación socioeconómica de la acuaponía	33
5.6	Agricultura Urbana y Acuaponía Vertical	34
5.7	Introducción a la Agricultura Urbana	35
5.8	Introducción a la acuaponía vertical	36

Sección 2: Biología de los Peces, Alimentación, Crecimiento, Salud y Bienestar en Acuaponía

1.	Anatomía y Fisiología de los Peces	41
1.1	Anatomía Externa General	43
1.2	Anatomía Interna	47
2.	Especies de Peces Usadas en Acuaponía	50
2.1	Especies más comunes y sus características	50
2.2	Criterios de selección de especies en acuaponía	58
2.3	Factores ambientales y su impacto en las especies	59
3.	Alimentación y Crecimiento de los Peces	60
3.1	Requerimientos Energéticos	60
3.2	Interacciones entre la Ingesta y Factores Ambientales	61
3.2.1	Factores Abióticos	61
3.2.2	Factores Bióticos	62
3.3	Composición Nutricional de los Alimentos para Peces y su Impacto en Sistemas Acuapónicos ...	63
3.4	Tipos de Alimentos para Peces	63
3.5	Estrategias de Alimentación	64
3.6	Sistemas Automáticos de Alimentación en Acuicultura	65
4.	Diseño de Alimentos para Acuaponía	69
4.1	Crecimiento de los Peces y Retención de Nitrógeno	72
4.2	Fuentes de Nitrógeno	73
4.3	Absorción y Retención de Nitrógeno en Peces	74
4.4	Pérdida de Nitrógeno en los Sólidos	75
4.5	Nitrógeno Disuelto en el Agua como Nitrógeno Amoniacal Total (TAN)	75
4.6	Cálculo del Nitrógeno Disuelto como TAN	76
4.7	Nitrógeno Amoniacal en Sistemas Acuapónicos	76

4.8 Factores que Influyen en la Acumulación de TAN	78
4.9 Importancia del Control de TAN	80
5. Bienestar de los Peces	82
5.1 Medidas Específicas para Evaluar el Bienestar	82
5.2 El Eje HPI y la Respuesta al Estrés	83
5.3 Indicadores Operacionales de Bienestar (OWI)	84
5.4 Estrategias para Mejorar el Bienestar en Sistemas Acuapónicos	84
6. Monitoreo de la Evolución de la Granja Acuapónica	85
6.1 Planificación de la Producción	85
6.2 Estrategias para el Monitoreo del Crecimiento y Salud	86
6.3 Tecnologías de Monitoreo Automatizado	87

Sección 3: Fundamentos de la Acuicultura en Sistemas Acuapónicos

1. Introducción a la Acuicultura en Acuaponía	88
1.1 Definición y principios de la acuicultura	88
1.2 Importancia de la acuicultura en acuaponía	89
1.3 Diferencias entre acuicultura tradicional y acuaponía	91
2. Ingeniería de Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS) para Acuaponía	93
2.1 Diseño y construcción del tanque de peces en acuaponía	93
2.2 Separación de sólidos en sistemas acuapónicos	98
2.3 Biofiltración: Conversión de amoníaco en nutrientes para las plantas	104
2.4 Desgasificación y oxigenación en sistemas acuapónicos	109
2.4.1 Desgasificación de CO ₂	110
2.4.2 Oxigenación y su importancia para el bienestar de los peces	111
2.5 Desinfección del agua en sistemas de acuaponía	114
2.6 Bombas y sistemas de circulación en acuaponía	119
3. Gestión de los Sistemas de Recirculación Acuícola en Acuaponía (RAS)	127
3.1 Densidad de siembra en sistemas acuapónicos	127
3.2 Monitoreo de parámetros clave para el éxito de la acuaponía	130
3.2.1 Consejos para el diseño seguro y eficiente del sistema	131
3.2.2 Mantenimiento regular del sistema acuapónico	132
3.2.3 Frecuencia de monitoreo de la calidad del agua	133
3.2.4 Sistemas automatizados de monitoreo y control en acuaponía	134

Sección 4: Sistemas Hidropónicos: Fundamentos y Manejo Nutricional en Acuaponía

4.1 Principios Básicos de la Hidroponía en Acuaponía	139
4.1.1 Ventajas de la Hidroponía en Acuaponía	139
4.1.2 Desventajas de la Hidroponía en Acuaponía	141
4.1.3 Relación entre Hidroponía y Acuaponía	142
4.2 Sustratos Utilizados en Sistemas Acuapónicos	143
4.2.1 Arcilla Expandida (LECA)	143
4.2.2 Grava Volcánica (Toba)	144
4.2.3 Grava Caliza	145
4.2.4 Lana de Roca	145
4.2.5 Fibra de Coco (Coir)	146
4.2.6 Vermiculita	147
4.2.7 Perlita	147
4.3 Suministro de Nutrientes en Acuaponía	148
4.3.1 Requerimientos de las Plantas	148
4.3.1.1 Elementos Nutritivos Esenciales	150
4.3.1.2 Disponibilidad de Nutrientes y pH	151
4.3.1.3 Trastornos Nutricionales en Plantas	151
4.4.1 Sistemas de Lecho de Cultivo (Media Bed).....	153
4.4.2 Sistema de Flujo y Reflujo (Ebb and Flow).....	158
4.4.3 Técnica de Película de Nutrientes (NFT).....	159
4.4.4 Cultivo en Agua Profunda (DWC).....	160
4.4.5 Técnica de Flujo Profundo (DFT).....	161
4.4.6 Sistemas de Irrigación por Goteo.....	162
4.4.7 Aeroponía y Fogponía.....	163
4.5 Anatomía y Fisiología de las Plantas en Sistemas Acuapónicos	
4.5.1 Anatomía Básica de las Plantas.....	167
4.5.2 Fotosíntesis y Crecimiento.....	168
4.5.3 Transpiración y Regulación del Agua.....	170

4.6 Requerimientos de Crecimiento de las Plantas en Acuaponía	
4.6.1 Luz: Importancia y Control.....	172
4.6.2 Demanda de Oxígeno, Temperatura y pH.....	173
4.6.3 Dióxido de Carbono (CO ₂) y su Efecto en las Plantas.....	174
4.6.4 Temperatura del Aire y Humedad Relativa.....	175

Sección 5: Variedades y Manejo de Plantas en Acuaponía: Selección, Monitoreo y Control de Plagas

5.1 Introducción a las variedades de plantas en acuaponía.....	178
5.2 Selección de cultivos adecuados	
5.2.1 Ejemplos de cultivos de hojas verdes (lechuga, espinaca, acelga).....	181
5.2.2 Hierbas y aromáticas (albahaca, perejil, cilantro).....	184
5.2.3 Cultivos frutales (tomates, pimientos, fresas).....	187
5.2.4 Cultivos exóticos y experimentales.....	190
5.3 Selección de cultivos según el tipo de sistema acuapónico	
5.3.1 Sistemas NFT (Técnica de Película de Nutrientes).....	191
5.3.2 Sistemas de aguas profundas (DWC).....	193
5.4 Programación de cultivos y rotación	
5.4.1 Ciclos de cultivo.....	195
5.4.2 Rotación de cultivos en acuaponía.....	197
5.5 Recomendaciones para maximizar el rendimiento	
5.5.1 Sustratos adecuados.....	200
5.5.2 Suplementación de nutrientes en sistemas acuapónicos.....	201

5.2 Monitoreo de plantas en sistemas acuapónicos

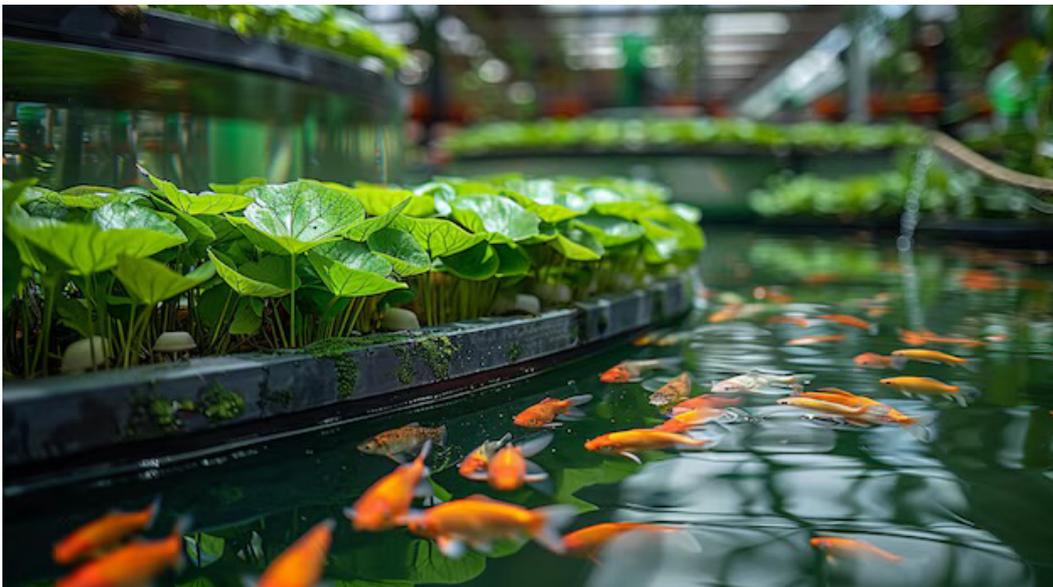
5.2.1 Identificación y manejo de enfermedades comunes en acuaponía.....	205
5.2.2 Control de la humedad relativa.....	206
5.2.3 Monitoreo de la temperatura del aire y agua.....	206
5.2.4 Control de la intensidad de luz para maximizar el crecimiento.....	207
5.2.5 Uso de sensores para la gestión de condiciones ambientales.....	208
5.2.6 Referencias	

5.3 Manejo Integrado de Plagas (MIP) en Acuaponía

5.3.1 Concepto y principios del manejo integrado de plagas (MIP).....	210
5.3.2 Estrategias de prevención y manejo de plagas.....	211
5.3.2.1 Mantener la higiene en las condiciones de cultivo.....	211
5.3.2.2 Selección de variedades resistentes a plagas.....	211
5.3.2.3 Espaciado adecuado de las plantas.....	212
5.3.2.4 Nutrición equilibrada para mejorar la resistencia a plagas.....	212
5.3.3 Monitoreo y detección temprana de plagas.....	214
5.3.3.1 Métodos manuales y tecnológicos de monitoreo.....	214
5.3.3.2 Indicadores visuales de plagas y enfermedades.....	216
5.3.4 Métodos físicos de control de plagas.....	218
5.3.4.1 Uso de barreras físicas (redes, cobertores).....	218
5.3.4.2 Trampas y atrayentes biológicos.....	218
5.3.5 Fomento de la biodiversidad para el control biológico.....	219
5.3.5.1 Uso de microorganismos benéficos.....	219
5.3.5.2 Introducción de insectos benéficos y plantas trampas.....	219
5.3.5.3 Uso de extractos de compost y biopreparados.....	220
5.3.6 Opciones para situaciones críticas (cuando las plagas se salen de control).....	221
5.3.7 Plagas y enfermedades más comunes en acuaponía.....	221
5.3.7.1 Identificación de plagas específicas en acuaponía.....	222
5.3.7.2 Enfermedades comunes causadas por hongos y bacterias.....	223
5.3.8 Control biológico de plagas en acuaponía.....	224
5.3.8.1 Enemigos naturales de las plagas.....	224
5.3.8.2 Agentes biológicos y su uso en el control integrado.....	225

1. Introducción a la Acuaponía.

Con el aumento acelerado de la población y la creciente demanda de alimentos, sumado al avance de la urbanización, la disponibilidad de tierras agrícolas está disminuyendo rápidamente y nuestros océanos enfrentan una explotación excesiva. Las proyecciones sobre la alimentación global en los próximos 25 años han generado una creciente preocupación, ya que se estima que la producción agrícola tradicional no será suficiente para alimentar a la población mundial sin causar un mayor daño ambiental. Para abordar estas futuras necesidades alimentarias, se requiere la implementación de tecnologías innovadoras que optimicen el uso del espacio y promuevan la sostenibilidad.



La acuaponía, un sistema de producción integrado, combina la cría de peces (acuicultura) con el cultivo de plantas sin suelo (hidroponía) en un único proceso (Figura 1). Este enfoque no solo optimiza los recursos, sino que también reduce significativamente la huella ambiental. El propósito principal de este sistema es aprovechar los nutrientes provenientes de los desechos y el alimento de los peces para cultivar plantas (Graber & Junge 2009; Lennard & Leonard 2004; Lennard & Leonard 2006; Rakocy et al. 2003), al mismo tiempo que se recicla el agua utilizada. Al integrar ambos sistemas, se eliminan

muchos de los factores insostenibles que surgen cuando la acuicultura y la hidroponía se operan de manera independiente (Somerville et al., 2014).

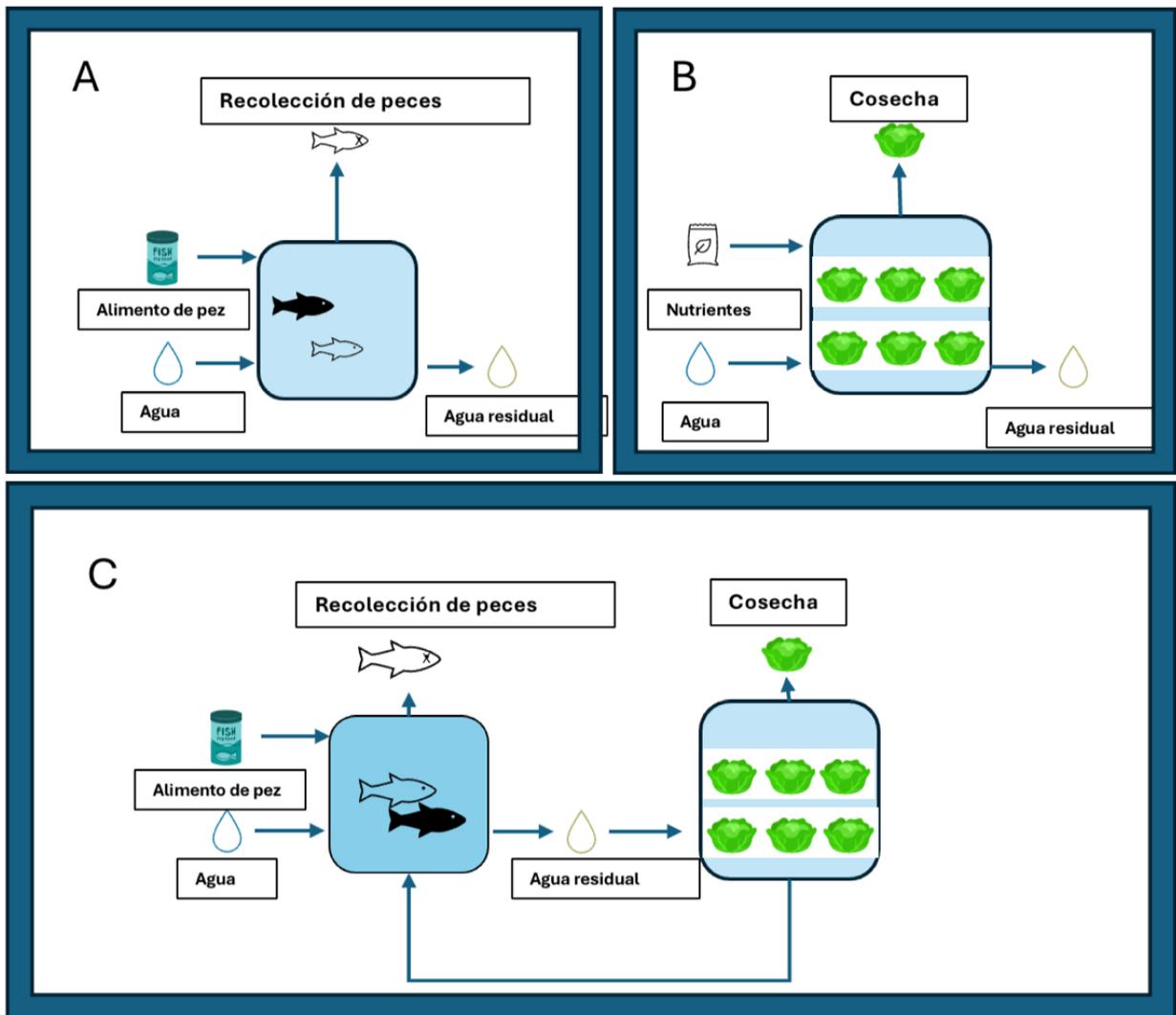


Figura 1: Flujos de insumos básicos en sistemas de acuicultura (a), hidroponía (b) y acuaponía (c).

Los desechos generados por los peces pueden ser aprovechados por las plantas, ya sea de forma directa o a través del proceso de nitrificación, en el cual bacterias convierten el amoníaco y el nitrito en nitrato, que es la forma de nitrógeno que las plantas pueden absorber más fácilmente. Este ciclo de nutrientes, impulsado por el alimento para peces, garantiza un suministro continuo de nutrientes a las plantas sin la necesidad de desechar y sustituir soluciones nutritivas, como es común en la

hidroponía tradicional basada en fertilizantes minerales. Además, en los sistemas operados de manera más ventajosa significativa en términos de ahorro y eficiencia.

El uso de los desechos de los peces como fuente de nutrientes para las plantas también reduce la necesidad de adquirir fertilizantes externos, lo que incrementa la rentabilidad del sistema acuapónico. De hecho, esta característica convierte a la acuaponía en una práctica agrícola cada vez más atractiva, especialmente en el contexto de la agricultura sostenible, donde se busca reducir insumos externos y optimizar los recursos disponibles. Según la FAO (2018), el uso de los residuos acuáticos como fertilizante puede reducir en un 40% el costo de insumos en algunos sistemas acuapónicos.

No obstante, aunque la acuaponía presenta numerosos beneficios potenciales, también enfrenta desafíos importantes. Estos incluyen la necesidad de un manejo cuidadoso del equilibrio entre peces y plantas para mantener la estabilidad del sistema, el monitoreo constante de la calidad del agua y la inversión inicial relativamente alta. Estos factores deben ser cuidadosamente considerados para maximizar la viabilidad y sostenibilidad a largo plazo de la acuaponía como método de producción agrícola.

1.1 Componentes de los sistemas acuapónicos

Los sistemas acuapónicos están compuestos por varios componentes esenciales que permiten el funcionamiento armónico del ecosistema. Estos incluyen: (i) el tanque de peces, donde los peces se crían y generan los desechos que nutren las plantas; (ii) bombas de agua y aire, que aseguran la circulación del agua y oxígeno necesario tanto para los peces como para las plantas; (iii) unidades de remoción de sólidos, como los filtros de tambor y decantadores, que eliminan los desechos sólidos para evitar que se acumulen y dañen el sistema; (iv) el biofiltro, que alberga bacterias beneficiosas encargadas de transformar el amoníaco generado por los peces en nitrato, el cual es absorbido por las plantas; (v) las camas de cultivo, donde se

colocan las plantas que reciben los nutrientes del agua recirculada; y (vi) los materiales de plomería, que permiten la correcta distribución del agua entre las diferentes partes del sistema (Figura 2).

En este sistema, las plantas, como productores primarios, obtienen los nutrientes del agua enriquecida con los desechos de los peces, mientras que los peces, como consumidores, dependen de un entorno acuático limpio y bien oxigenado. Los microorganismos, en particular las bacterias nitrificantes, desempeñan un papel clave en el ciclo de nutrientes, al facilitar la conversión de compuestos tóxicos para los peces (amoníaco) en nutrientes útiles para las plantas (nitrato). Esto no solo contribuye a la sostenibilidad del sistema, sino que también crea un ciclo cerrado en el que los residuos son aprovechados de manera eficiente.

Es importante destacar que el mantenimiento y la eficiencia de estos componentes determinan el éxito del sistema. Por ejemplo, el biofiltro debe ser lo suficientemente grande para manejar la cantidad de amoníaco producida por los peces, y las bombas deben ser capaces de mantener un flujo constante de agua y oxígeno. El equilibrio adecuado entre peces, plantas y microorganismos es crucial para evitar problemas de salud en los peces y asegurar un crecimiento óptimo de las plantas. Además, el monitoreo constante de parámetros como el pH, la temperatura y los niveles de oxígeno disuelto es esencial para mantener la estabilidad del sistema a largo plazo.

Esta integración de acuicultura e hidroponía en un solo sistema presenta un potencial considerable para la agricultura urbana y sostenible, particularmente en entornos donde el espacio y los recursos son limitados. No obstante, se requieren conocimientos técnicos especializados para operar y mantener un sistema acuapónico de manera eficaz.

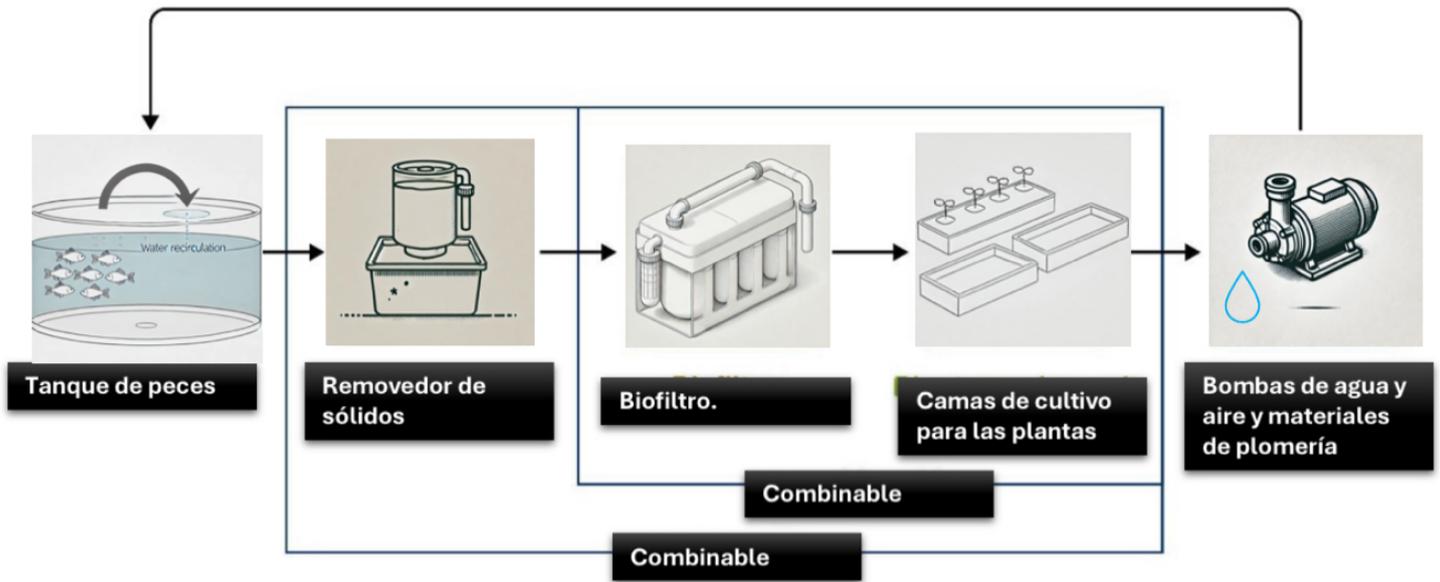


Figura 2: Principales componentes de un sistema acuapónico (adaptado de Rakocy et al., 2006).

1.2. Acuicultura



La acuicultura se refiere a la cría y cultivo controlado de peces y otras especies acuáticas en ambientes cerrados (Somerville et al., 2014). Este campo está cobrando mayor relevancia como fuente mundial de proteínas, ayudando a reducir

la presión sobre los océanos que sufren por la sobreexplotación pesquera. Sin embargo, algunas prácticas de acuicultura, como el uso de jaulas en aguas abiertas y los sistemas de flujo continuo, pueden liberar aguas residuales cargadas de nutrientes al entorno, lo que contribuye a la eutrofización y la falta de oxígeno en los cuerpos de agua. Los sistemas de recirculación acuícola (RAS) tratan y reutilizan estas aguas residuales dentro del propio sistema, lo que minimiza la cantidad de agua con altos niveles de nutrientes que se libera al medio ambiente. Esta agua excedente puede someterse a tratamiento antes de ser devuelta a la naturaleza. Aunque los sistemas RAS tienen sus beneficios, requieren un alto consumo de energía y generan lodos de peces que necesitan un tratamiento específico. En este sentido, la acuaponía puede considerarse una variación o complemento de los sistemas RAS.

1.3. Hidroponía



La hidroponía tiene sus inicios en los estudios del Dr. William Gericke en la Universidad de California en 1929 (Gericke, 1937). A lo largo de las últimas décadas, esta técnica ha ganado popularidad debido a su capacidad para aumentar los rendimientos agrícolas, principalmente porque elimina problemas asociados al

suelo, como plagas y enfermedades, y permite ajustar las condiciones de crecimiento para que las plantas alcancen su máximo potencial. Además, ofrece un uso más eficiente del agua y los fertilizantes (Somerville et al., 2014), lo que facilita la agricultura en terrenos de baja calidad. Sin embargo, la hidroponía convencional también presenta desventajas. Esta práctica depende del uso de fertilizantes minerales, los cuales suelen ser costosos y provienen de fuentes no sostenibles, y además consume una gran cantidad de energía.

Los sistemas hidropónicos requieren el suministro constante de macronutrientes (C, H, O, N, P, K, Ca, S, Mg) y micronutrientes (Fe, Cl, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Ni), fundamentales para el crecimiento de las plantas. Mientras que el C, H y O provienen del aire y el agua, los demás nutrientes se introducen en las soluciones hidropónicas en su forma iónica. El control adecuado de la concentración de nutrientes es esencial para mantener la salud y el crecimiento de las plantas.

En contraste, los sistemas acuapónicos aprovechan el agua enriquecida con los desechos generados por los peces (como heces y restos de alimento no consumido) como una fuente de nutrientes para las plantas. No obstante, el perfil de nutrientes en el agua acuapónica no siempre coincide perfectamente con las necesidades de las plantas. Es común que algunos nutrientes sean deficientes, por lo que a menudo se deben agregar, como es el caso del hierro, el fosfato y el potasio (Bittsanszky et al., 2016a). En las próximas semanas exploraremos más a fondo el tema de los nutrientes y su importancia en estos sistemas.

2. Clasificación de la acuaponía

La acuaponía, que combina el cultivo de plantas y la cría de peces en un sistema integrado, puede clasificarse de diferentes maneras en función de su estructura y uso. A continuación se presenta una clasificación más detallada de los sistemas de acuaponía, junto con un cuadro de diseño según los objetivos y el tipo de sistema:

1. **Acuaponía Básica:** En estos sistemas, la mayor parte de los nutrientes que necesitan las plantas provienen directamente de los desechos de los peces. No se utiliza suelo, y las plantas crecen en medios hidropónicos o soluciones nutritivas. La finalidad es reciclar los nutrientes de manera eficiente en un entorno cerrado, utilizando peces como principal fuente de fertilización.

2. **Acuaponía con Suelo:** Esta versión del sistema utiliza técnicas de cultivo en suelo o sustratos, además de los desechos de los peces. Aquí, el suelo sirve como un amortiguador y almacén de nutrientes, aprovechando los procesos de mineralización del suelo para complementar el ciclo de nutrientes.

Ambos sistemas persiguen un entorno sostenible en el que los desechos de los peces sirven como fertilizante para las plantas, y las plantas, a su vez, limpian el agua que se reutiliza para los peces.

Objetivos de diseño	Categoría
<i>Principal grupo de interés</i>	Producción comercial de Cultivos
	Autosuficiencia del hogar
	Educación
	Empresa social
	Embellhecimento y decoración
<i>Tamaño</i>	Grande (> 1000 m ²)
	Medio (200-1000 m ²)
	Pequeño (50-200 m ²)
	Muy pequeño (5-50 m ²)
	Microsistemas (< 5 m ²)
<i>Modo de operación</i>	Extensivo (permite el uso integrado de lodos en campos de cultivo)
	Intensiva (separación obligatoria del lodo)
<i>Tipo de agua</i>	Agua dulce

<i>Tipos de sistemas hidropónicos</i>	Agua salada
	Sistema de inundación y drenaje (Ebb-and-flow)
	Bolsas de cultivo (Grow bags)
	Riego por goteo (Drip irrigation)
	Cultivo en aguas profundas (Deep water cultivation)
<i>Uso del espacio</i>	Técnica de película de nutrientes (Nutrient Film Technique - NFT)
	Vertical
	Horizontal

Tabla 1: Este cuadro permite identificar cómo adaptar los sistemas acuapónicos a diferentes contextos y necesidades, según el espacio, los objetivos y las características del lugar.

2.1 Diseño de Sistemas Acuapónicos para Diferentes Necesidades y Grupos Interesados

La acuaponía puede adaptarse a una variedad de propósitos y satisfacer las necesidades de diversos grupos interesados, como la investigación, el desarrollo, la educación, la agricultura de subsistencia y la producción comercial de alimentos. Esta tecnología puede implementarse en diferentes entornos, como tierras degradadas, zonas urbanas o incluso en patios residenciales, brindando soluciones para la agricultura urbana, la recuperación de tierras y la seguridad alimentaria. Si bien un sistema acuapónico puede cumplir con varios objetivos simultáneamente, tales como la producción de alimentos, el embellecimiento del entorno y la promoción de la interacción social, generalmente no puede abarcar todos estos objetivos de manera eficaz al mismo tiempo. Para optimizar el rendimiento según

las metas propuestas, es necesario que los componentes del sistema se ajusten a requisitos específicos, que a menudo pueden ser contradictorios.

La elección del sistema acuapónico más adecuado para cada situación debe basarse en una evaluación realista, que incluya un plan bien estructurado (como un plan de negocios cuando sea necesario), resultando en una solución personalizada y eficiente. Basado en la clasificación de Maucieri et al. (2018), los sistemas acuapónicos pueden clasificarse según diversas categorías, como el tipo de grupo interesado, el modo de operación, el tamaño, y el tipo de sistema hidropónico. Cada una de estas opciones debe ser cuidadosamente evaluada, teniendo en cuenta el presupuesto disponible, lo que también permite la construcción de sistemas a muy bajo costo si es necesario.

2.2. Clasificación Según el Modo de Operación: Extensivo e Intensivo

En un sistema acuapónico, el tanque de peces es el corazón del proceso, donde los peces son alimentados y a través de su metabolismo excretan heces y amoníaco al agua. Dado que altas concentraciones de amoníaco pueden ser tóxicas para los peces, las bacterias nitrificantes juegan un papel crucial en la conversión de amoníaco en nitrito, y luego en nitrato, que es menos dañino para los peces y es absorbido eficazmente por las plantas.

Los sistemas acuapónicos se clasifican en dos grandes categorías en cuanto a su modo de operación: **extensivo** e **intensivo**.

1. **Sistema Extensivo:** En los sistemas extensivos, el biofiltro y la eliminación de lodos se integran dentro de la unidad hidropónica. Los sustratos como grava, arena o arcilla expandida se utilizan para proporcionar un soporte óptimo para el crecimiento de la biopelícula, lo que facilita la transformación del amoníaco. Este tipo de sistema es eficiente en cuanto al reciclaje

completo de los nutrientes, ya que los lodos producidos por los peces se utilizan directamente en las camas de cultivo. Sin embargo, uno de los inconvenientes es la turbidez del agua y un rendimiento limitado del biofiltro, lo que restringe la cantidad de peces que se pueden mantener.

2. **Sistema Intensivo:** En los sistemas intensivos, el biofiltro y la separación de lodos se realizan de manera independiente, lo que permite un mayor almacenamiento de peces, llegando a alcanzar hasta 100 kg/m^3 o más. Este sistema se caracteriza por agua más clara, menores concentraciones de DBO (demanda bioquímica de oxígeno), una menor carga microbiana y un rendimiento optimizado del biofiltro. Sin embargo, uno de los inconvenientes es que solo se reciclan parcialmente los nutrientes, lo que puede requerir un tratamiento adicional de los lodos, como la conexión a biodigestores o el vermicompostaje, para aprovechar completamente los nutrientes (Goddek et al. 2016b).

Ambos métodos tienen sus pros y contras. El sistema que se elija dependerá de los objetivos de la operación, el presupuesto disponible y el tipo de producción que se busca alcanzar.

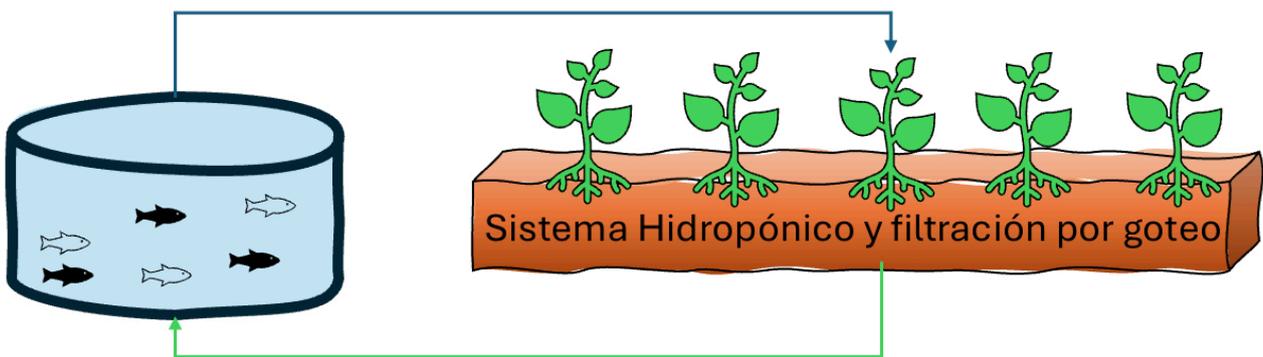


Figura 3: Sistema de acuaponía con uso integrado de lodos

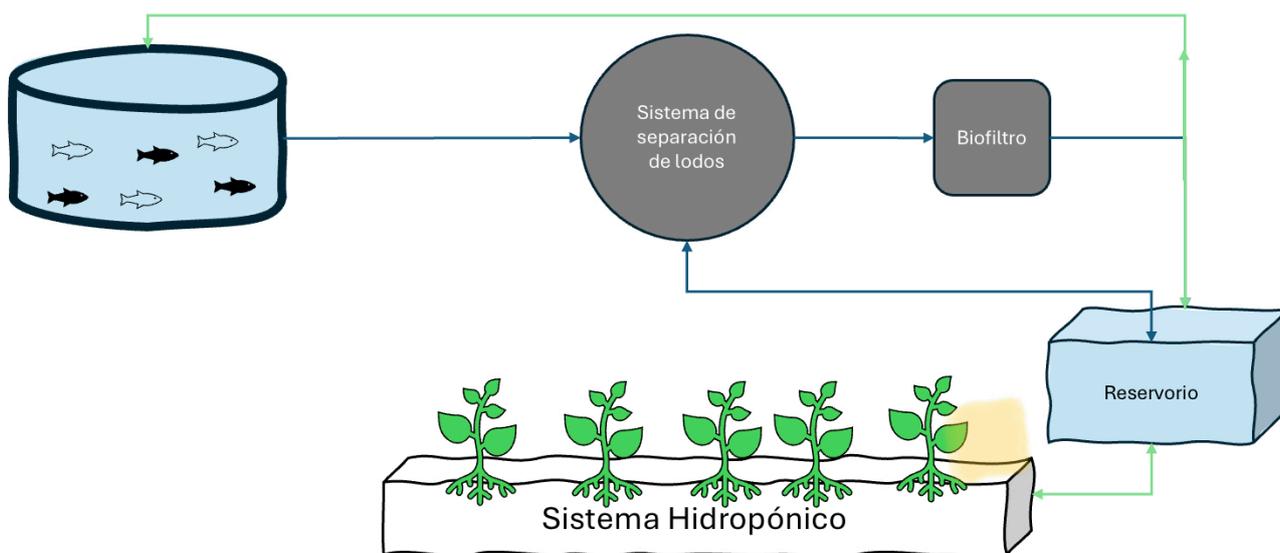


Figura 4: Disposición posible de un sistema de acuaponía con separación de lodos

2.3. Clasificación según Gestión del Ciclo del Agua

2.3.1. Sistemas Acuapónicos Desacoplados (DAPS)

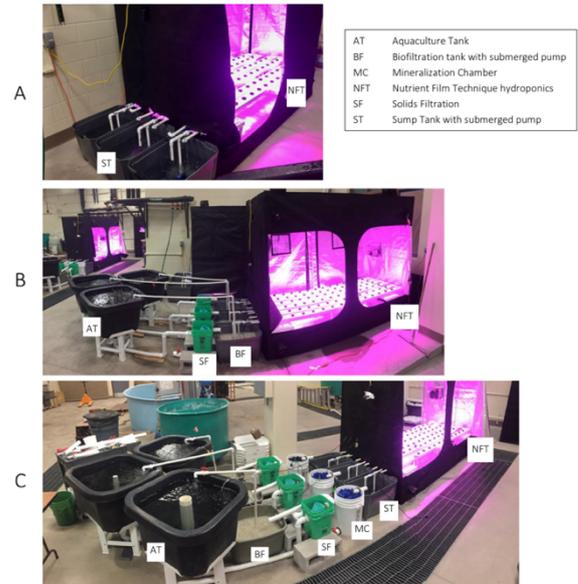
El sistema acuapónico desacoplado (DAPS) es un diseño en el que las unidades de acuicultura e hidroponía están conectadas, pero operan de manera independiente en cuanto al flujo de agua. En este sistema, el agua fluye en una sola dirección: desde el sistema de acuicultura (RAS) hacia la unidad hidropónica, pero no regresa. Esto significa que el agua utilizada por las plantas no vuelve a los peces, lo que permite un control más preciso de las condiciones en cada una de las unidades. Por ejemplo, la temperatura del agua y los niveles de nutrientes pueden ajustarse de manera óptima para los peces en el RAS y para las plantas en la hidroponía sin comprometer la salud o el rendimiento de ninguno de los dos componentes.

Este enfoque es especialmente útil cuando los requerimientos de las plantas y los peces son significativamente diferentes. Además, los nutrientes provenientes del sistema de acuicultura se utilizan de manera eficiente en la hidroponía, mientras

que el agua de la unidad de plantas puede ser tratada o mineralizada antes de ser eliminada o reutilizada en otros procesos.

2.3.2. Sistemas Acuapónicos de Doble Recirculación (DRAPS)

El sistema de doble recirculación (DRAPS) es una evolución del sistema desacoplado, donde tanto la unidad de acuicultura como la de hidroponía tienen sus propios sistemas de recirculación independientes. En lugar de un flujo unidireccional, como ocurre en el DAPS, en el DRAPS ambos sistemas mantienen la capacidad de recircular el agua de manera interna, y pueden interactuar entre sí a través de depósitos adicionales o sistemas de intercambio.



El DRAPS permite una mayor flexibilidad y eficiencia, ya que los nutrientes y el agua pueden ser recirculados y tratados de manera más dinámica. Además, en este sistema se puede implementar un proceso adicional de mineralización de los lodos de peces, lo que permite maximizar la utilización de los nutrientes antes de que el agua sea liberada o reutilizada. Al tener un mayor control sobre la calidad del agua en ambos sistemas, el DRAPS ofrece una solución más avanzada para mantener condiciones óptimas tanto para los peces como para las plantas, minimizando el desperdicio de recursos y mejorando la sostenibilidad del sistema.

Ambos sistemas representan avances importantes en la acuaponía moderna, permitiendo una producción más eficiente y controlada, adaptada a las necesidades específicas de cada parte del ciclo de producción

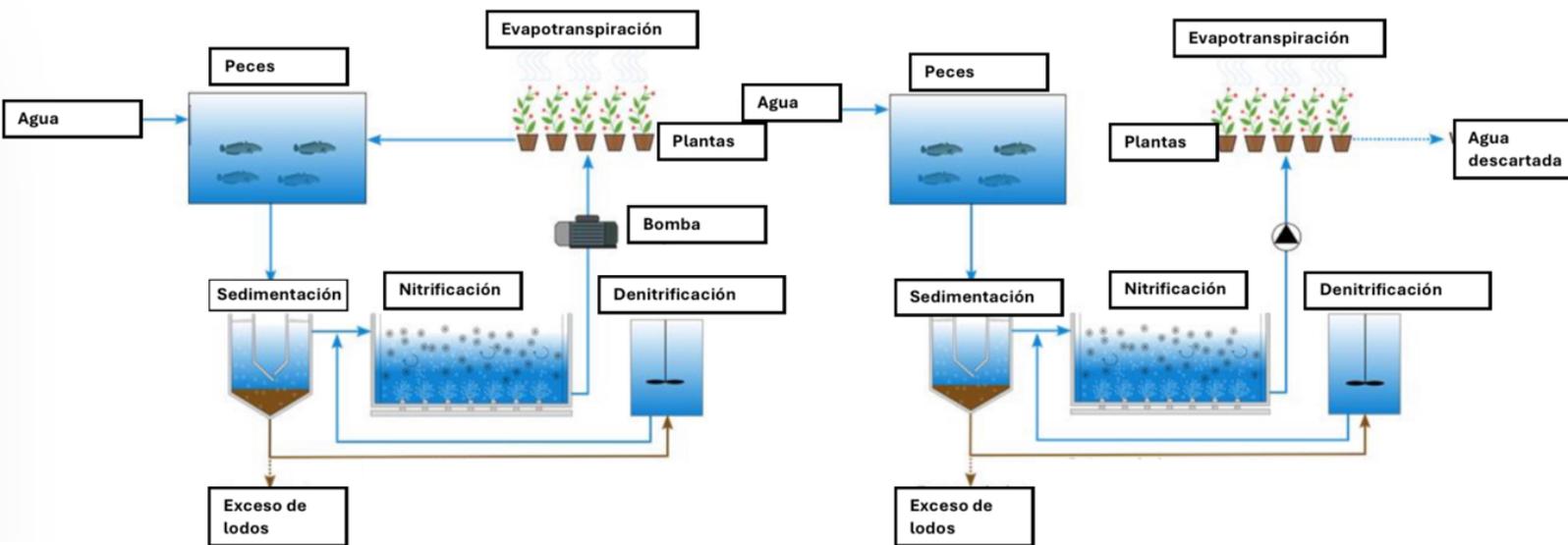
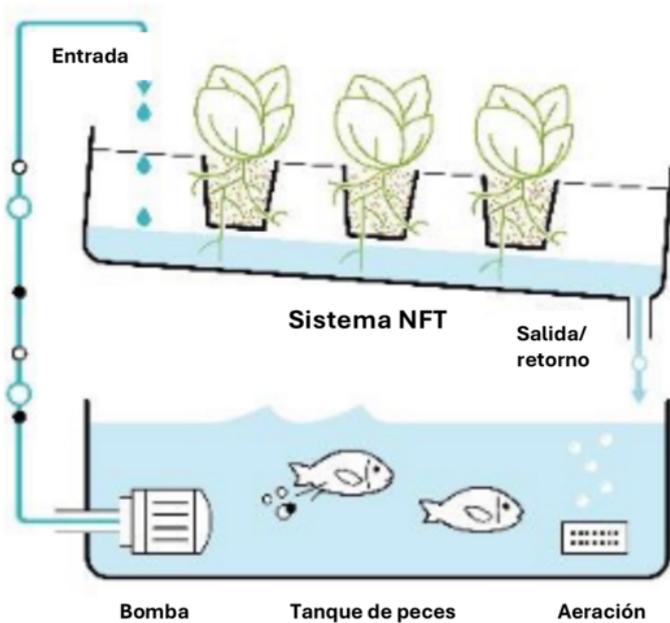


Figura 5 muestra una ilustración esquemática de los sistemas acuapónicos acoplados y desacoplados. En el sistema acoplado (circuito cerrado) que consiste en un RAS (azul: tanques de cría, clarificador y biofiltro) directamente conectado a la unidad hidropónica (verde: bandejas NFT), el agua se circula constantemente desde el RAS hasta la unidad hidropónica y de regreso al RAS. En el sistema acuapónico desacoplado (circuito abierto) que consiste en un RAS conectado a la unidad hidropónica (con un depósito adicional) a través de una válvula unidireccional, el agua se recircula por separado dentro de cada sistema y se suministra a demanda desde el RAS a la unidad hidropónica, pero no regresa al RAS.

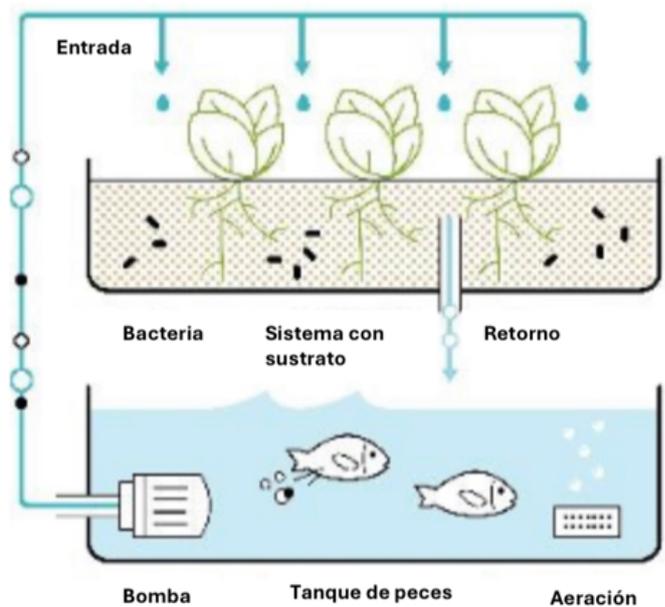
2.4. Tipos de sistemas Hidropónicos Utilizados en Acuaponía



Técnica de Película Nutriente (NFT) En los sistemas de Técnica de Película Nutriente (NFT), el agua del tanque de peces se pasa a través de la parte inferior de un tubo horizontal de PVC, formando una película delgada. Estos tubos tienen agujeros en la parte superior, donde se cultivan las plantas de tal manera que sus raíces cuelgan en el agua que fluye en la parte inferior. Los nutrientes del agua del tanque son

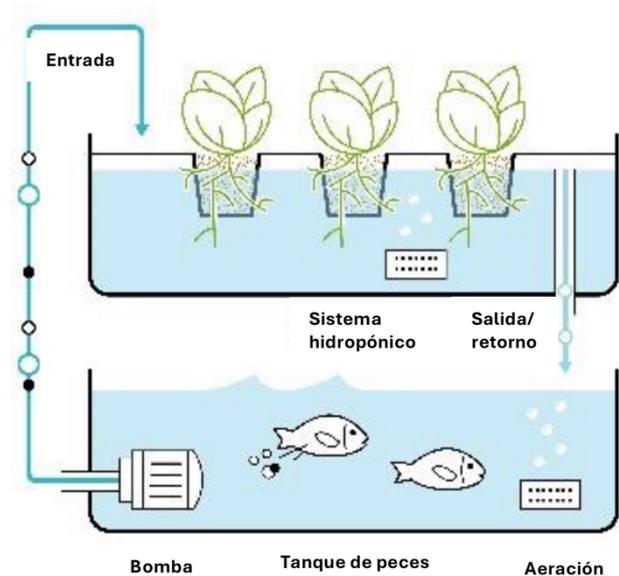
absorbidos por las plantas, y como sus raíces están solo parcialmente sumergidas, esto les permite estar en contacto con el oxígeno atmosférico también.

Técnica de Lecho de Medios Las unidades de lecho de medios llenos son el diseño más popular para la acuaponía a pequeña escala. Estos diseños usan el espacio de manera eficiente, tienen un costo inicial relativamente bajo y son adecuados para principiantes debido a su estabilidad y simplicidad. En las unidades de lecho de medios, el medio se usa para soportar las raíces de las plantas y funciona como un filtro mecánico y biológico.



Cultura de Agua Profunda o Técnica de Balsa Flotante

Los sistemas de Cultura de Agua Profunda (DWC) utilizan una 'balsa' de poliestireno que flota en aproximadamente 30 cm de agua. La balsa tiene agujeros en los que se cultivan las plantas en macetas de red, de modo que sus raíces están inmersas en el agua. La balsa también puede colocarse para flotar directamente en el tanque de peces, o puede tener agua bombeada desde el tanque a un sistema de filtración y luego a canales que contienen una serie de balsas. Un aireador proporciona oxígeno tanto al agua en el tanque como al que contiene la balsa. Dado que las raíces no tienen un medio al que adherirse, este sistema solo puede usarse para cultivar verduras de hoja o hierbas, y no plantas más grandes. Es el sistema más popular para fines comerciales, debido a la rapidez y facilidad de la cosecha.



La mayoría de los sistemas acuapónicos utilizan tanques de cultivo o camas horizontales, emulando el cultivo tradicional en tierra para producir vegetales. Sin embargo, con el tiempo, han surgido y evolucionado nuevas tecnologías de paredes vivas y agricultura vertical que, cuando se vinculan a la parte acuícola del sistema acuapónico, pueden permitir que se cultiven más plantas verticalmente en lugar de horizontalmente, haciendo los sistemas más productivos (Khandaker & Kotzen 2018).



Sistemas Horizontales Los sistemas horizontales tienen la ventaja de usar eficientemente la luz del día y pueden funcionar sin iluminación adicional, incluso en invierno. Por lo tanto, tienen un bajo

consumo de energía eléctrica. Los costos de inversión inicial son medianos/bajos, especialmente si el precio de la tierra es bajo.



Sistemas Verticales Los sistemas verticales ofrecen una solución óptima para ahorrar espacio, haciéndolos muy adecuados para instalaciones urbanas, ya sea para decoración o para producción de alimentos hiperlocal. Sin embargo, requieren luces de cultivo sobre

las camas de cultivo. También requieren menos bombas de agua, pero de mayor potencia, lo que se traduce en un mayor consumo de energía eléctrica. Los costos de inversión inicial también son altos.

3. Oportunidades, Riesgos, Desafíos y Limitaciones

La acuaponía ofrece a los emprendedores muchas posibilidades para iniciar un negocio, incluyendo la producción comercial de alimentos y productos no alimentarios, servicios de consultoría para el diseño y construcción de granjas comerciales, suministro de equipos especializados, y sistemas domésticos para restaurantes, escuelas y el público en general. Los productores comerciales pueden vender plantas y peces a través de una variedad de mercados directos e indirectos. Los mercados directos incluyen mercados de agricultores, puestos de granja y

esquemas de agricultura apoyada por la comunidad (CSA); los mercados indirectos incluyen tiendas de comestibles, restaurantes, instituciones y mayoristas. Los productores comerciales también pueden diversificarse, ofreciendo agroturismo, talleres de capacitación y la venta de equipos especializados. Las oportunidades son numerosas, pero también hay desafíos, riesgos y limitaciones a tener en cuenta. En este subcapítulo, queremos destacar algunos de los desafíos involucrados en llevar esta tecnología innovadora con éxito al mercado.

3.1 ¿Está el mercado listo para la acuaponía? Una perspectiva actual

En años recientes, la acuaponía ha sido reconocida como una tecnología emergente que podría tener un impacto significativo en la agricultura sostenible. Un informe del Parlamento Europeo destacó la acuaponía como una de las tecnologías que podría transformar diversas industrias, junto con innovaciones como vehículos autónomos, impresión 3D, y drones (European Parliament Research Service, 2021). Sin embargo, la pregunta clave sigue siendo si la acuaponía está lista para ser adoptada ampliamente en mercados y si existe una demanda suficiente que justifique las inversiones necesarias.

3.2 Desafíos en Europa

Los primeros adoptantes de la acuaponía en Europa enfrentan una fase de experimentación, lo que la convierte en una tecnología con un alto riesgo inicial. A pesar de sus beneficios, el tamaño de muchas granjas acuapónicas sigue siendo pequeño debido a los elevados costos de inversión y la novedad de la tecnología. En comparación con la acuicultura o la horticultura convencional, las instalaciones acuapónicas requieren una inversión inicial más alta, ya que deben integrar tecnologías de ambos sectores (Monsees et al., 2021).

Uno de los principales obstáculos es la necesidad de una mayor escala para que las operaciones sean rentables. Aunque los sistemas piloto han mostrado buenos

resultados, su pequeño tamaño no proporciona la evidencia robusta que los inversores suelen buscar. Los inversores, por lo tanto, dudan en comprometer grandes cantidades de capital en una tecnología aún en desarrollo. En consecuencia, las pequeñas instalaciones acuapónicas deben demostrar que pueden escalar de manera eficiente y competir con la agricultura convencional, o desarrollar un concepto de negocio lo suficientemente sólido como para atraer inversiones mayores (Goddek et al., 2020).

3.3 Oportunidades para la expansión

El mercado europeo ha mostrado un creciente interés en la producción sostenible de alimentos, lo que podría ser un catalizador para el crecimiento de la acuaponía. La demanda de productos orgánicos y locales ha aumentado, y los consumidores valoran cada vez más las prácticas agrícolas que reducen el uso de agua y promueven la sostenibilidad ambiental (Junge et al., 2021). Este cambio en las preferencias del consumidor ofrece una oportunidad significativa para que la acuaponía encuentre su lugar en el mercado.

Además, las políticas de la Unión Europea, como el *Green Deal*, están alineadas con las prácticas sostenibles, lo que podría proporcionar un impulso adicional a las granjas acuapónicas. A medida que los gobiernos europeos continúan implementando políticas que apoyan la agricultura sostenible, es probable que la acuaponía reciba más atención y financiación.

Conclusión

Aunque la acuaponía tiene un alto potencial para convertirse en una tecnología clave dentro de la agricultura sostenible en Europa, todavía enfrenta desafíos importantes, especialmente relacionados con el financiamiento y la escalabilidad. Para que esta tecnología prospere, será crucial desarrollar modelos de negocio

viables, proporcionar evidencia convincente de su efectividad y continuar fomentando la investigación y la innovación en este campo.

3.4 Estado del Mercado Tecnológico en Centroamérica y Panamá

En términos de adopción tecnológica, Centroamérica y Panamá enfrentan retos significativos. Aunque la región ha visto un aumento en la adopción de tecnologías emergentes, como la agricultura de precisión, todavía existe una brecha en cuanto al acceso generalizado a las tecnologías avanzadas y al conocimiento técnico necesario para implementar sistemas acuapónicos a gran escala. Según un informe del *Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture* (IICA, 2021), las barreras tecnológicas y la falta de infraestructura limitan la capacidad de los agricultores locales para adoptar soluciones sostenibles y avanzadas.

Además, los costos iniciales de inversión para implementar sistemas acuapónicos siguen siendo altos. En Panamá, a pesar de los avances en la modernización agrícola, las pequeñas y medianas empresas agrícolas todavía dependen de tecnologías tradicionales, y los sistemas acuapónicos aún se encuentran en su etapa experimental. Para ser competitivo, el sector agrícola en Centroamérica necesitaría no solo acceso a tecnología de bajo costo, sino también programas de capacitación técnica sostenida y apoyo gubernamental para subsidios y financiamiento.

Desafíos y Oportunidades del Mercado Acuapónico en Panamá

El clima tropical de Panamá y Centroamérica es favorable para la acuaponía en términos de disponibilidad de agua y el ciclo continuo de cultivo debido a las condiciones de temperatura. Sin embargo, uno de los desafíos más críticos radica en la infraestructura tecnológica y el conocimiento local.

- **Tecnología e Innovación:** Al igual que en Europa, los costos iniciales de instalación son elevados, especialmente cuando se requiere importar componentes clave como sensores, bombas, y tecnologías de monitoreo

ambiental. Panamá y otros países de la región dependen en gran medida de la tecnología importada, lo que puede incrementar los costos y alargar los tiempos de implementación.

- **Conocimiento y Capacitación:** La acuaponía requiere un conocimiento técnico sofisticado que involucra tanto la gestión de los parámetros acuáticos como los principios agrícolas. En Centroamérica, la educación técnica en acuaponía aún está en sus primeras fases, y aunque hay iniciativas regionales, como proyectos financiados por organizaciones internacionales, aún no existe una infraestructura educativa o técnica consolidada para el aprendizaje de acuaponía a nivel masivo. Es clave fomentar la capacitación a nivel local para superar esta barrera.
- **Mercado y Demanda Local:** En comparación con los países europeos, donde la demanda de productos orgánicos y sostenibles está en auge, Centroamérica todavía está en proceso de desarrollar mercados para productos de alto valor añadido como los producidos por acuaponía. Sin embargo, el creciente interés en la agricultura sostenible y la mejora de la seguridad alimentaria en la región puede ser un catalizador para el crecimiento de la acuaponía.

Un estudio de *FAO* (2022) indica que el mercado de productos sostenibles y orgánicos en América Latina ha crecido en los últimos años, con un enfoque creciente en la diversificación y sostenibilidad de las producciones agrícolas, lo que presenta una oportunidad para los sistemas acuapónicos en Panamá y otros países de la región.

3.5 Recomendaciones para el Mercado Centroamericano

1. **Incentivos Gubernamentales y Alianzas Público-Privadas:** Es necesario que los gobiernos en Centroamérica impulsen incentivos fiscales y programas de financiación para mitigar los altos costos de inversión inicial. Además, la creación de alianzas con el sector privado y ONGs podría

acelerar la adopción de acuaponía a través de la capacitación, investigación y desarrollo de infraestructura.

2. **Proyectos Piloto Regionales y Escalables:** En lugar de intentar implementar sistemas acuapónicos a gran escala desde el principio, se recomienda comenzar con proyectos piloto escalables que puedan servir como centros de demostración tecnológica. Estos proyectos pueden ayudar a demostrar la viabilidad comercial de la acuaponía y aumentar la confianza de los inversores.
3. **Desarrollo de Tecnología Local:** A largo plazo, la región debería invertir en el desarrollo de tecnologías acuapónicas locales que sean accesibles y adaptables a las condiciones locales. Esto no solo reduciría los costos de importación, sino que también fomentaría la innovación tecnológica en la región.
4. **Capacitación y Transferencia de Conocimiento:** Se requiere un esfuerzo conjunto de las universidades, centros de investigación y gobiernos para establecer programas de capacitación técnica en acuaponía. Esto permitiría que los agricultores locales adopten sistemas acuapónicos con el conocimiento técnico adecuado, disminuyendo así los riesgos asociados a la falta de experiencia.

Conclusión

Aunque el mercado en Centroamérica y Panamá aún no está completamente preparado para la adopción masiva de la acuaponía, hay un potencial significativo para el crecimiento en los próximos años, siempre que se superen las barreras tecnológicas, educativas y de inversión inicial. El apoyo gubernamental, el desarrollo de proyectos piloto escalables y la creación de capacidades locales serán cruciales para que la acuaponía se convierta en una alternativa viable y sostenible en la región.

Referencias

- Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture (IICA). (2021). *Agricultural Innovation and Sustainable Development in Latin America*. IICA Publications.
- FAO. (2022). *Sustainable Agriculture in Latin America: Trends and Opportunities*. FAO Report.
- Storey, J. (2020). *Sustainable Aquaponic Farming: Challenges and Solutions*. *Journal of Sustainable Agriculture*, 10(2), 45-60.
- Valdez, A. (2021). *Best Practices in Aquaponic Technology Adoption*. *Aquaponic Journal*, 12(3), 150-160.
- European Parliament Research Service. (2021). *Emerging technologies and their potential impact on the European market*. Retrieved from [source].
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. (2020). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer.
- Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., & Jijakli, M. H. (2021). *Strategic development of aquaponics: Key considerations for sustainable food systems in the EU*. *Sustainability*, 13(5), 260.

Monsees, H., Keuter, S., Paul, M., & Kloas, W. (2021). *Ecological and economic sustainability of aquaponics systems: Opportunities and challenges for Europe*. *Environmental Science and Policy*, 115, 24-33

4. Historia de la acuaponía

El concepto de usar excrementos de peces para fertilizar plantas ha existido durante milenios.

Civilizaciones antiguas en Asia y América del Sur empleaban este método. Los ejemplos más conocidos son las 'islas estacionarias' o chinampas aztecas establecidas en lagos (1150-1350 a.C.) y el sistema de acuicultura de arroz y peces introducido en Asia hace unos 1500 años, el cual aún se utiliza hoy en día. Tanto el sistema de acuicultura de arroz y peces como las chinampas fueron catalogados por la FAO como Sistemas Ingeniosos del Patrimonio Agrícola Mundial (Koohafkan & Altieri 2018).



En Europa, los primeros sistemas de recirculación de acuicultura (RAS) datan de finales de los años 70 (Bohl 1977). Al mismo tiempo, Naegel (1977) ya había probado la integración de la hidroponía con los ciclos de agua y nutrientes de los RAS. La acuaponía contemporánea en los Estados Unidos comenzó con la investigación pionera de Todd, mencionada en Love et al. (2014), junto con estudios de Goldman et al. 1974 y Ryther et al. 1975 sobre la reutilización de nutrientes de aguas residuales para la producción de plantas y animales. Antes de los avances tecnológicos de los años 80, la mayoría de los intentos de integrar hidroponía y acuicultura tuvieron éxito limitado. Los años 80 y 90 vieron avances en el diseño de sistemas, biofiltración y la identificación de las proporciones óptimas de peces a plantas, lo que llevó a la creación de sistemas cerrados que

permiten el reciclaje de agua y la acumulación de nutrientes para el crecimiento de plantas. Los pioneros de la acuaponía que inspiraron a muchos seguidores fueron:

- **Dr. Mark McMurtry:** Comenzó a trabajar en acuaponía cuando estaba en la Universidad Estatal de Carolina del Norte a mediados de los 80 hasta principios de los 90. Llamó al método 'Sistema Integrado de AcuaVegetación' (IAVS). Los sistemas de inundación y drenaje actuales, preferidos por los practicantes en el hogar, derivan de este modelo.
- **Dr. James Rakocy:** Diseñó quizás el diseño más copiado, el sistema acuapónico de la Universidad de las Islas Vírgenes (UVI) en 1980 (Rakocy et al. 2003; Rakocy et al. 2004). Desarrolló relaciones y cálculos vitales para maximizar la producción de peces y vegetales manteniendo un ecosistema equilibrado.
- **Dr. Wilson Lennard:** En Australia, también produjo cálculos clave y planes de producción para otros tipos de sistemas (Lennard & Leonard 2004; Lennard & Leonard 2006).
- **Dr. Nick Savidov:** En Canadá, mostró que cuando se cumplían ciertos niveles clave de nutrientes, los sistemas acuapónicos tenían una producción significativamente superior de tomates y pepinos en comparación con los sistemas hidropónicos (Savidov & Brooks 2004).

Estos avances en la investigación, así como muchos otros, han allanado el camino para varios grupos de practicantes y empresas que están comenzando a surgir en todo el mundo. Sin embargo, la investigación en acuaponía realmente despegó solo después de 2010 (ver el número comparativo de publicaciones científicas sobre hidroponía, acuicultura y acuaponía en la Figura 7). Existe, sin embargo, una gran diferencia entre lo que el mundo 'habla' y lo que se está investigando actualmente. Junge et al. (2017) acuñaron el término 'índice de hype' como un indicador de la popularidad de un tema en los medios públicos en comparación con el ámbito académico. Se calcula como el número de resultados en Google dividido por el

número de resultados en Google Scholar. La acuaponía tiene un 'índice de hype' de más de 1000, significativamente mayor que la hidroponía (más de 100) y la acuicultura (alrededor de 20). En este sentido, la acuaponía puede ser considerada 'una tecnología emergente' y un tema científico emergente.

5. Temas Actuales de Investigación

5.1 Tendencias en Tecnología

Como vimos anteriormente, el diseño de sistemas acuapónicos exitosos depende del grupo de usuarios. La producción de alto rendimiento sin suelo requiere una alta inversión en tecnología (bombas, aireadores, registradores) y conocimiento, por lo que es más adecuada para operaciones comerciales. Sin embargo, también es posible diseñar y operar sistemas acuapónicos de baja tecnología que requieren menos habilidad para operar y **aún así producen resultados respetables**. Este compromiso implícito (**alta tecnología / baja tecnología**) y la amplia gama de aplicaciones de la acuaponía tienen consecuencias para los futuros caminos de desarrollo de la tecnología, el diseño del sistema y los aspectos socioeconómicos. La tecnología acuapónica podría desarrollarse en al menos dos direcciones: por un lado, hacia soluciones de baja tecnología (probablemente principalmente en países en desarrollo y para aplicaciones no profesionales); y, por otro lado, hacia instalaciones hi-tech altamente eficientes (predominantemente en países desarrollados y con socios profesionales/comerciales) (Junge et al. 2017).

Si bien la tecnología en sí misma no limita un área de la granja (porque puede ser modular), el tamaño de las granjas urbanas está determinado por (i) las características del área disponible, que necesariamente está fragmentada en una ciudad (sitios baldíos, edificios subutilizados o vacíos y azoteas); y (ii) las limitaciones impuestas por la economía de la producción de cultivos. Como regla general, el área requerida para alcanzar el punto de equilibrio para operaciones comerciales es de alrededor de 1000 m². Las instalaciones de pasatiempo y de jardín pueden ser, por supuesto, mucho más pequeñas. Las granjas acuapónicas

pueden crecer / expandirse aumentando el número de sistemas operativos (o módulos), o yendo verticalmente, aunque no pueden escalarse demasiado sin aumentar abruptamente los costos de construcción y energía. El rango de tamaño de las granjas acuapónicas urbanas probablemente oscilará entre 150 m² y 3000 m², debido a limitaciones de espacio, económicas y de gestión, pero esto podría ser suficiente para cubrir los requisitos básicos de una variedad de vegetales frescos para parte de la población urbana. Las granjas acuapónicas periurbanas podrían ser más grandes y modificadas para incluir sistemas de acuicultura continental o para reutilizar efluentes ricos en nutrientes o lodos de peces compostados en áreas rurales.

5.2. Tecnología Acuapónica: Desafíos y Oportunidades

La tecnología acuapónica en sí misma puede **considerarse inmadura, ya que todavía existen problemas por resolver**. Simplemente vincular un sistema acuícola de última generación con un sistema hidropónico de última generación no considera otros factores, como **problemas con filtros de tambor obstruidos, sedimentadores ineficientes, fallas de oxígeno, sedimentadores mal diseñados y tuberías de agua obstruidas**. Aunque la influencia de los lechos de cultivo de plantas (NFT, riego por goteo, cultivo en agua profunda) ya es conocida en sistemas hidropónicos, la elección de esos lechos en sistemas acuapónicos necesita ser estudiada más a fondo ya que tendrá consecuencias para la productividad y la operación. Se requiere más investigación en otras áreas también. Dado que los microorganismos son ubicuos, desempeñan un papel importante en todas las etapas de la producción acuapónica. La influencia de las condiciones ambientales en su abundancia, diversidad y roles podría investigarse, por ejemplo, mediante el uso continuo de métodos de secuenciación de nueva generación (Schmautz et al. 2016a, Eck et al. 2019, Schmautz et al. 2021). Una de las preguntas centrales es el control adecuado de plagas y enfermedades para los sistemas acuapónicos. Los problemas relacionados con la protección de plantas en la acuaponía fueron discutidos por

Bittsanszky et al. (2016b). Concluyeron que, dado que hay muy pocas herramientas disponibles para la protección de plantas en la acuaponía, se debe hacer hincapié en medidas preventivas para minimizar la infiltración de plagas y patógenos. Por otro lado, los métodos biológicos de control de plagas actualmente disponibles para la agricultura orgánica deben adaptarse a la acuaponía.

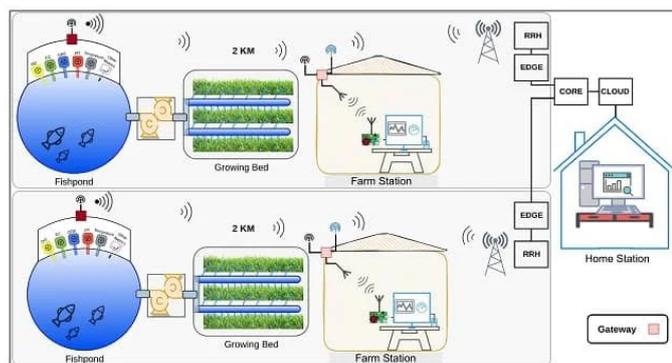
En resumen, la acuaponía continúa siendo un área de investigación dinámica con múltiples oportunidades y desafíos pendientes. A medida que la tecnología evoluciona y se adapta a diferentes contextos socioeconómicos y ambientales, se espera que se encuentren soluciones innovadoras para optimizar la producción de alimentos de manera sostenible y eficiente.

5.3. Reducción de Requerimientos de Mano de Obra

- **Avances en Automatización:** Es crucial mejorar las tecnologías de automatización. Los sistemas actuales monitorean parámetros como los niveles de oxígeno y el balance de nutrientes, pero se necesita un desarrollo adicional para ajustes en tiempo real y un rendimiento óptimo del sistema.

- **Agricultura de Precisión:**

Los principios de la agricultura de precisión deben integrarse en los sistemas acuapónicos. Esto implica utilizar sensores



para la recolección continua de datos sobre condiciones ambientales y salud de los cultivos. Estos datos pueden informar respuestas automatizadas para optimizar el uso de recursos y el crecimiento de los cultivos.

- **Robótica en la Acuaponía:**

La implementación de robots podría revolucionar las operaciones al manejar tareas como siembra, cosecha y mantenimiento. Los robots



pueden operar de manera autónoma, reduciendo costos laborales y mejorando la eficiencia operativa. El desarrollo de sistemas versátiles como FarmBot para acuaponía podría estandarizar y optimizar estos avances.

5.4. Tendencias en el Diseño de Sistemas

La acuaponía tiene el potencial de ser sostenible, pero los estudios exhaustivos de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) sobre las operaciones y productos acuapónicos son escasos (Forchino et al., 2017; Maucieri et al., 2018). Sin embargo, es evidente que el impacto ecológico de la acuaponía podría mejorarse aún más mediante:

1. **Uso de Energías Renovables:** Implementar fuentes de energía renovables para reducir la dependencia de la energía eléctrica convencional.
2. **Métodos de Captación de Luz Diurna:** Desarrollar métodos de captación de luz solar para evitar el uso de energía eléctrica durante el día.
3. **Uso de Agua Pretratada o Reciclada:** Utilizar agua pretratada, reciclada o de lluvia para minimizar el consumo de agua potable.
4. **Mejora del Control Climático en Invernaderos:** Optimizar el control climático en los invernaderos para reducir el uso de recursos energéticos.
5. **Integración en Entornos Urbanos:** Fomentar la integración de la acuaponía en edificaciones urbanas, permitiendo el intercambio de gases, agua y energía entre invernaderos y edificios.
6. **Ciclos de Materia Orgánica:** Mejorar los ciclos de materia orgánica cerrando aún más el ciclo acuapónico. Esto implica digerir lodos de peces para reutilizar los nutrientes en el sistema acuapónico, o criar lombrices rojas

e insectos con residuos de plantas para utilizarlos como alimento para los peces, mientras se compostan los residuos de peces y plantas.

7. **Concepto de Residuo Cero:** Alcanzar un concepto de residuo cero en la granja acuapónica para reducir la huella de carbono.
8. **Estudios de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero:** Realizar estudios sobre las emisiones de gases de efecto invernadero para comprender mejor el impacto ambiental completo de la acuaponía.
9. **Uso de Organismos Nuevos:** Explorar el uso de organismos nuevos en la acuaponía, como plantas acuáticas, peces marinos, algas, crustáceos, entre otros, para ampliar el ciclo ecológico y mejorar la sostenibilidad.

Estas mejoras en el diseño y la operación de los sistemas acuapónicos pueden promover una mayor eficiencia, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica de la tecnología. La investigación continua y la innovación son clave para avanzar hacia sistemas acuapónicos más integrados y eficientes en el uso de recursos.

5.5. Investigación Socioeconómica en Acuaponía

Actualmente, la acuaponía está emergiendo como un sector empresarial con un gran potencial, aunque su desarrollo aún es relativamente limitado. Si bien la producción de alimentos sigue siendo el objetivo principal, esta tecnología innovadora se ha expandido hacia otras áreas como el turismo y la educación, con el fin de mejorar la viabilidad económica. Debido a su carácter tecnológico novedoso, la acuaponía no cuenta con un marco regulatorio claramente definido en Europa (Joly et al., 2015). En Estados Unidos, los productos provenientes de sistemas acuapónicos pueden obtener certificación orgánica, pero en Europa, la producción sin suelo y los sistemas de acuicultura recirculante (RAS) no cumplen con las normas actuales de agricultura orgánica de la Unión Europea.

A pesar de su promesa como tecnología sostenible para la producción de alimentos, la acuaponía aún enfrenta interrogantes clave. Por ejemplo, aunque ha ganado

popularidad en redes sociales y espacios de discusión, el conocimiento y la aceptación de los consumidores en torno a esta tecnología siguen siendo áreas poco investigadas. Es necesario profundizar en cómo se perciben los beneficios de sostenibilidad en comparación con otros aspectos más tradicionales como el sabor, la frescura y el costo del producto (Newman et al., 2014). La percepción pública y la aceptación cultural también juegan un papel crucial, por lo que es fundamental adaptar las estrategias de comunicación a diferentes mercados y contextos.

La mayoría de los esfuerzos de investigación hasta ahora se han concentrado en perfeccionar las instalaciones y el diseño técnico de los sistemas acuapónicos. Sin embargo, para mejorar su rentabilidad, es crucial optimizar la eficiencia en el uso de recursos. El aprovechamiento de energías alternativas, el reciclaje de agua y efluentes orgánicos, y la integración de economías circulares no solo reducirán costos operativos, sino que también podrían aportar a la sostenibilidad general de la operación. El desafío reside en equilibrar los mayores costos iniciales de inversión con los beneficios a largo plazo, lo cual requiere una gestión eficiente y modelos de negocio innovadores.

Asimismo, el desarrollo de nuevas variedades de cultivos y productos acuapónicos de alto valor podría abrir nuevas oportunidades de mercado. La producción de especies y variedades menos comunes, que pueden ser más sensibles al transporte, podría permitir a los agricultores obtener un precio de mercado más competitivo al evitar la competencia directa con la horticultura convencional. Sin embargo, la combinación de nuevas tecnologías y productos presenta también riesgos e incertidumbres, lo que podría aumentar la complejidad empresarial.

La acuaponía ha demostrado ser particularmente valiosa en el ámbito educativo. Incluso los sistemas pequeños, instalados en aulas o instituciones educativas, ofrecen amplias oportunidades pedagógicas. Estos sistemas permiten a los estudiantes comprender no solo principios ecológicos y biológicos, sino también adquirir habilidades prácticas en áreas como la química, física y

matemáticas. Las iniciativas educativas en acuaponía también promueven competencias valiosas como el trabajo en equipo, el pensamiento crítico y la conciencia medioambiental (Junge et al., 2019). De esta forma, la acuaponía se presenta como una herramienta interdisciplinaria, capaz de integrarse en los currículos de todas las materias STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas).

El éxito de la acuaponía dependerá de la colaboración entre diversos actores clave. Además de ingenieros y científicos especializados en acuicultura y fisiología vegetal, es fundamental contar con el apoyo de diseñadores y arquitectos que puedan crear instalaciones funcionales y estéticamente agradables. Los científicos sociales también juegan un papel importante en la comprensión de las percepciones públicas y la aceptación de los productos acuapónicos, mientras que los expertos en salud y nutrición pueden explorar cómo estos productos pueden contribuir a una dieta saludable y sostenible.

Finalmente, es crucial establecer mecanismos de retroalimentación continua entre los desarrolladores de sistemas, fisiólogos de plantas y peces, y los consumidores, con el fin de optimizar tanto la sostenibilidad como el valor nutricional de los productos acuapónicos. El avance de la acuaponía no solo depende de innovaciones tecnológicas, sino también de su integración exitosa en la sociedad y en los hábitos de consumo.

5.6. Agricultura Urbana y Acuaponía Vertical

Introducción a la Agricultura Urbana

La agricultura urbana adopta diversas formas que van desde huertos caseros, escolares y comunitarios hasta granjas en azoteas e interiores. A menudo se hace una distinción fundamental entre la agricultura urbana (que implica la producción de alimentos en áreas urbanas) y la agricultura periurbana, que se desarrolla en las

afueras de las ciudades. En el caso de esta última, la agricultura es llevada a cabo principalmente por agricultores profesionales en tierras que frecuentemente ya han sido utilizadas para la agricultura durante décadas. Una granja urbana forma parte de un sistema alimentario local donde los alimentos se cultivan y producen dentro de un área urbana y se comercializan principalmente a consumidores dentro de esa área urbana. Además del cultivo de frutas y verduras, la agricultura urbana puede incluir la cría de animales, la apicultura, la acuicultura y productos no alimentarios como la producción de semillas, el cultivo de plántulas y el cultivo de flores. Se puede caracterizar en términos de la proximidad geográfica de un productor al consumidor y prácticas sostenibles de producción y distribución. Las granjas urbanas pueden adoptar una variedad de formas, incluyendo jardines sin fines de lucro y negocios con fines de lucro. Pueden proporcionar empleos, formación laboral y educación en salud, y pueden contribuir a una mejor nutrición y salud para la comunidad al proporcionar productos frescos cultivados localmente (McEldowney 2017).

5.7. Agricultura Comercial en Áreas Urbanas

Este subcapítulo se centra en la producción comercial de alimentos dentro de áreas urbanas y, específicamente, en invernaderos en azoteas y otros tipos de granjas interiores. A medida que las ciudades continúan creciendo tanto en población como en superficie, sus necesidades de infraestructura para transportar y distribuir alimentos se extienden constantemente, empujando la producción de alimentos cada vez más lejos del consumidor urbano y generando sistemas alimentarios globalizados que contribuyen al 19-29% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Vermeulen et al. 2012). Actualmente, el flujo de alimentos hacia las ciudades sigue un modelo lineal, lo que resulta en un alto consumo de recursos energéticos y la generación de residuos y emisiones de CO₂.

Con más de dos tercios de la población global proyectada para vivir en ciudades para 2050 y con algunos expertos siendo escépticos sobre la capacidad de la

biosfera para producir suficientes alimentos para toda la población humana, ha resurgido el interés en la producción local para contribuir a sistemas alimentarios urbanos sostenibles entre los tomadores de decisiones. La horticultura urbana históricamente ha contribuido al suministro de productos frescos a los habitantes urbanos, pero recientemente ha ganado popularidad en el Norte Global, con una creciente conciencia sobre preocupaciones ambientales y de salud.

Durante los últimos años, han surgido granjas comerciales en las principales ciudades del norte, promoviendo una tendencia de alimentos locales respetuosos con el medio ambiente, cultivados en instalaciones altamente eficientes en la parte superior o dentro de edificios. La agricultura urbana también ofrece oportunidades para un ciclo cerrado de recursos en el metabolismo urbano, en marcado contraste con el flujo tradicional unidireccional.

5.8. Acuaponía Vertical



La mayoría de los sistemas acuapónicos utilizan camas de cultivo horizontales, emulando así prácticas tradicionales basadas en suelo para el cultivo de verduras. Sin embargo, en los últimos años han surgido nuevas tecnologías de agricultura vertical que, al

integrarse con la parte de acuicultura de un sistema acuapónico, pueden permitir cultivar más plantas en comparación con las camas horizontales. Esto se logra aprovechando el espacio vertical que generalmente no se utiliza en unidades de

producción y invernaderos, lo que potencialmente hace que los sistemas sean más productivos, especialmente en áreas urbanas donde el espacio de cultivo puede ser costoso (Palm et al. 2018).

Esta premisa parece estar respaldada por estudios comparativos entre sistemas hidropónicos verticales y horizontales, que han mostrado una productividad significativamente mayor en los sistemas verticales en términos de la relación rendimiento/área ocupada (Liu et al. 2004; Neocleous et al. 2010; Ramírez-Arias et al. 2018; Ramírez- Gómez et al. 2012; Touliatos et al. 2016). Sin embargo, mientras que el uso óptimo del espacio es la ventaja más citada de la acuaponía vertical, esto puede estar potencialmente contrarrestado por varias desventajas.

La bioincrustación en un sistema acuapónico es típica, y los sistemas verticales son particularmente susceptibles al bloqueo y a la reducción de los caudales que pueden privar a las plantas de agua, por lo que será necesario el lavado rutinario a presión de los componentes del sistema para evitar esto (Patillo 2017). Además, mientras que un sistema de flujo horizontal solo utiliza electricidad para bombear agua de vuelta a los tanques de peces, se requiere bombeo adicional para elevar el agua hasta la parte superior de los sistemas acuapónicos verticales.

El cultivo de plantas en camas horizontales tiene la ventaja teórica de que la luz natural se transmite desde todos los lados en un invernadero independiente sin obstrucciones de otros equipos y componentes del sistema, y donde se requiere iluminación, estos sistemas de iluminación pueden colocarse fácilmente directamente sobre las plantas sin interferencias. Sin embargo, en la acuaponía vertical, la luz natural desde arriba será mayor hacia la parte superior del sistema en comparación con la parte inferior, y los elementos verticales mismos bloquearán la luz que entra en el invernadero. Por lo tanto, será necesario utilizar iluminación artificial para compensar estas pérdidas (Khandaker & Kotzen 2018).

Se deben realizar cuidadosos análisis de costo-beneficio, evaluando los beneficios de rendimientos potencialmente más altos frente a los costos adicionales de electricidad, antes de embarcarse en la acuaponía vertical. Existen muchos diseños diferentes de sistemas hidropónicos verticales que podrían combinarse potencialmente con una unidad de producción de peces. El cultivo vertical puede involucrar múltiples capas de cultivo en agua profunda, sistemas NFT, sistemas de inundación y drenaje, o torres de cultivo que utilizan métodos aeropónicos, en los cuales las raíces de las plantas están suspendidas en el aire y se rocían con agua rica en nutrientes.

El diseño del sistema dictará cuántas plantas pueden ser cultivadas por metro cuadrado, y también influirá en los rendimientos. Numerosos estudios han demostrado que el crecimiento de raíces y brotes, las relaciones planta-agua, la absorción de nutrientes, la transpiración y el rendimiento son afectados por la restricción de raíces en cultivos sin suelo. Las plantas pueden ser más susceptibles a anomalías de crecimiento, como el rajado de la base en tomates y pimientos, y el quemado de las puntas de las hojas en lechugas. Cuanto más pequeña sea la zona de raíces, más intensivamente se debe gestionar el sistema de producción para proporcionar un ambiente sin estrés en la rizosfera para un óptimo crecimiento de las plantas (Heller et al. 2015).

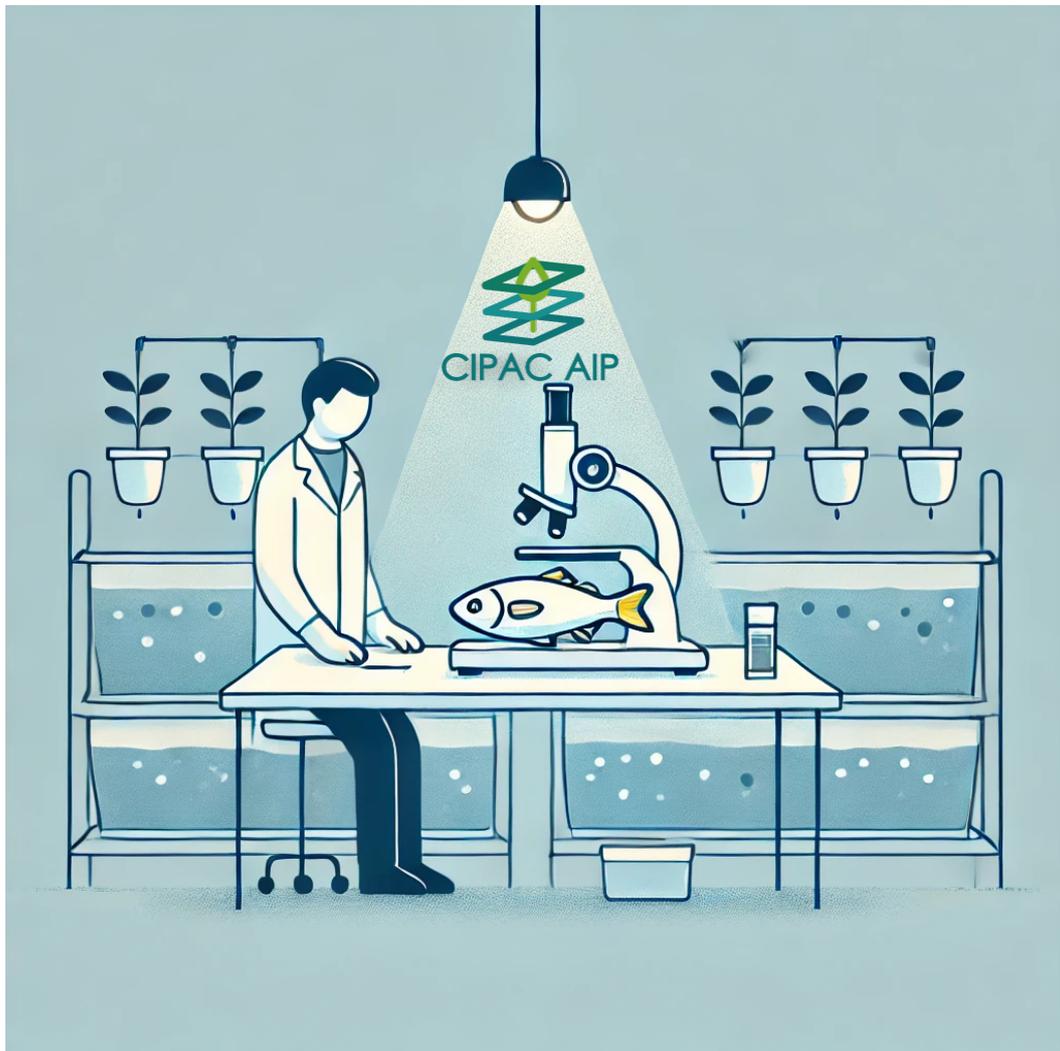


CIPAC AIP

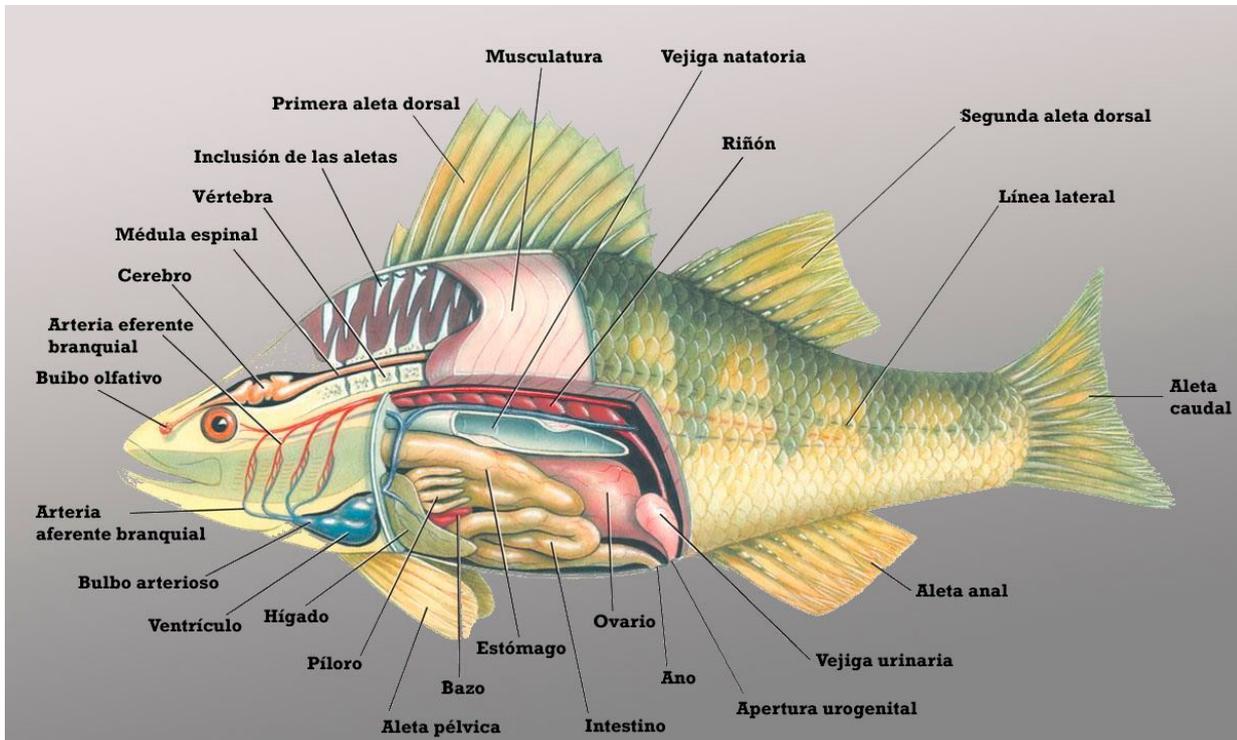
Centro de Investigación y Producción en
Ambiente Controlado AIP

Acuaponía: Una Guía Comprensiva para la Producción Sostenible de Alimentos.

**Sección 2: Biología de los Peces, Alimentación, Crecimiento, Salud
y Bienestar en Acuaponía.**



1. Anatomía y Fisiología de los Peces

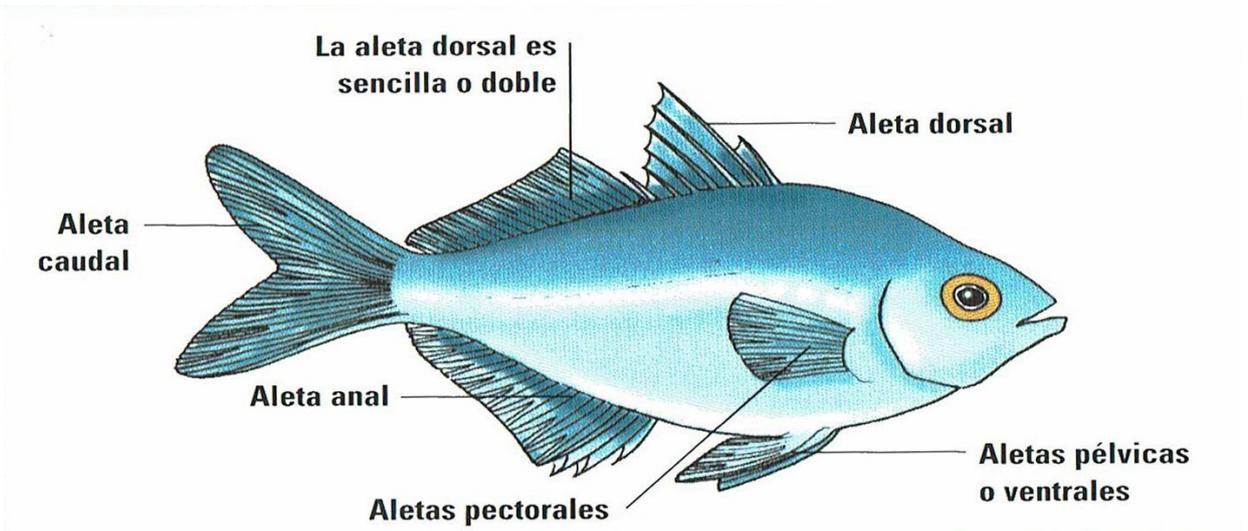


La anatomía y fisiología de los peces son aspectos fundamentales para comprender cómo los peces interactúan con su entorno acuático y cómo optimizar su crecimiento y salud en sistemas acuapónicos. A continuación, se detalla la anatomía externa, interna y la fisiología de la respiración en peces, prestando especial atención a cómo estas características son importantes para su adaptación y supervivencia en acuaponía.

1.1. Anatomía Externa General

La anatomía externa de los peces está diseñada para maximizar su capacidad de moverse en el agua, capturar alimentos y escapar de depredadores. En los sistemas acuapónicos, conocer la estructura externa de los peces es crucial para su manejo y monitoreo, ya que muchas de las enfermedades y problemas de salud se manifiestan

externamente. A continuación, se describen las partes más importantes de la anatomía externa de los peces:



1.1.1. Aletas

Las aletas de los peces son estructuras adaptadas para la locomoción, el equilibrio y la defensa. Existen varios tipos de aletas, cada una con funciones específicas:

- **Aleta dorsal:** Ubicada en la parte superior del cuerpo del pez, esta aleta ayuda a mantener la estabilidad y evitar que el pez se vuelque mientras nada. Algunas especies de peces tienen más de una aleta dorsal, como el bacalao, que tiene hasta tres aletas dorsales en fila.
- **Aletas pectorales:** Estas aletas están situadas cerca de las branquias y se usan para maniobras más precisas, como nadar hacia adelante, atrás, y hacia arriba o abajo. Las aletas pectorales son fundamentales para movimientos de alta precisión.
- **Aleta caudal (cola):** Esta es la aleta más poderosa y se utiliza para propulsar al pez hacia adelante. La forma de la aleta caudal puede variar según la especie, afectando su velocidad y maniobrabilidad.
- **Aleta anal:** Situada en la parte inferior del pez, detrás del ano, esta aleta también proporciona estabilidad durante el nado.

- **Aletas ventrales o pélvicas:** Situadas en la parte inferior del cuerpo, estas aletas ayudan en la estabilización del cuerpo del pez y en movimientos de ascenso y descenso.
- **Aleta adiposa:** Esta aleta, que se encuentra principalmente en especies como los salmónidos, es pequeña y carece de radios. Su función no es completamente entendida, pero estudios sugieren que podría tener un papel en la percepción del entorno (Reimchen & Temple, 2004).

1.1.2. Escamas y Mucosa

Las escamas cubren la mayor parte del cuerpo del pez y están dispuestas en patrones



que varían entre especies. Estas estructuras rígidas protegen a los peces de daños físicos y enfermedades. Las escamas están incrustadas en la dermis, lo que permite flexibilidad y protección al mismo tiempo.

Sobre las escamas, los peces producen una capa de **mucosa**, que cumple varias funciones importantes:

- **Protección física:** La mucosa actúa como una barrera protectora contra patógenos y lesiones.
- **Propiedades antifúngicas y antibacterianas:** El moco contiene compuestos bioactivos que ayudan a prevenir infecciones bacterianas y fúngicas, lo cual es especialmente importante en sistemas acuapónicos, donde el riesgo de infección puede aumentar si la calidad del agua no se controla adecuadamente.

- **Osmorregulación:** La mucosa ayuda a los peces a regular el intercambio de agua y sales con el entorno, un proceso vital para mantener el equilibrio de líquidos en su cuerpo.
-

1.1.3. Órganos Sensitivos y Línea Lateral

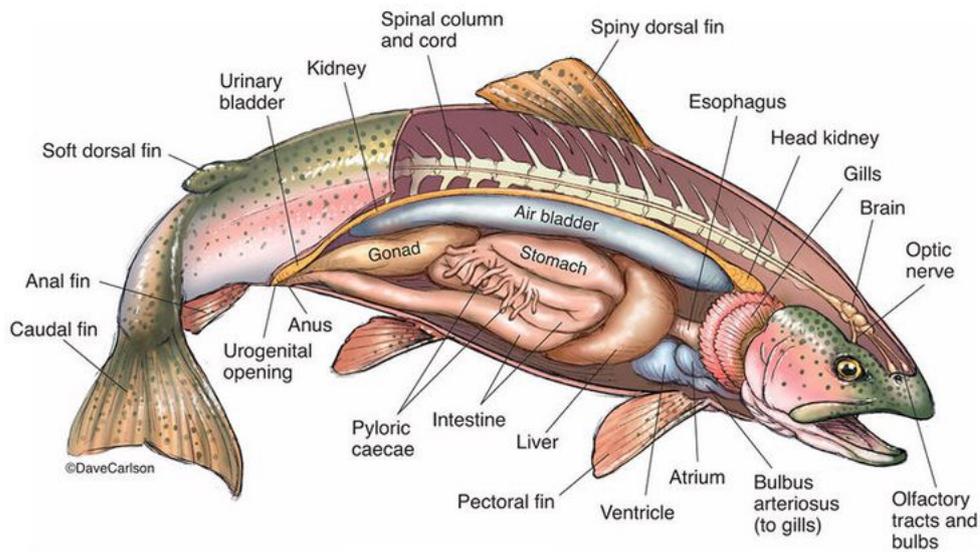
Los peces poseen varios órganos sensoriales que les permiten detectar cambios en su entorno, incluso en condiciones de baja visibilidad. El más destacado es el sistema de **línea lateral**, que se extiende a lo largo de los flancos del pez. Este sistema está compuesto por una serie de sensores llamados **cilios** que detectan vibraciones y cambios en la presión del agua. Esta información es crucial para la navegación, la detección de presas y la evasión de depredadores.

Además de la línea lateral, los peces tienen órganos olfativos sensibles ubicados en las narinas (nariz), que les permiten detectar olores en el agua. Algunas especies, como los salmónidos, utilizan su sentido del olfato para orientarse durante sus migraciones (Quinn & Dittman, 2014).

1.1.4. Ojos

Los ojos de los peces están adaptados para ver en medios acuáticos. A diferencia de los mamíferos terrestres, los peces no tienen párpados, lo que significa que sus ojos están constantemente expuestos al agua. Los peces suelen preferir condiciones de iluminación moderada, ya que la luz intensa puede dañarlos. La estructura de sus ojos les permite ver con claridad bajo el agua, aunque su campo de visión es más limitado que el de los animales terrestres debido a la refracción de la luz en el agua (Douglas & Djamgoz, 1990).

1.2. Anatomía Interna



Los peces presentan una estructura interna especializada para maximizar la eficiencia en su entorno acuático. Estos órganos no solo permiten la supervivencia del pez, sino que también juegan un papel crucial en su metabolismo y crecimiento. A continuación, se describen los principales sistemas y órganos internos de los peces.

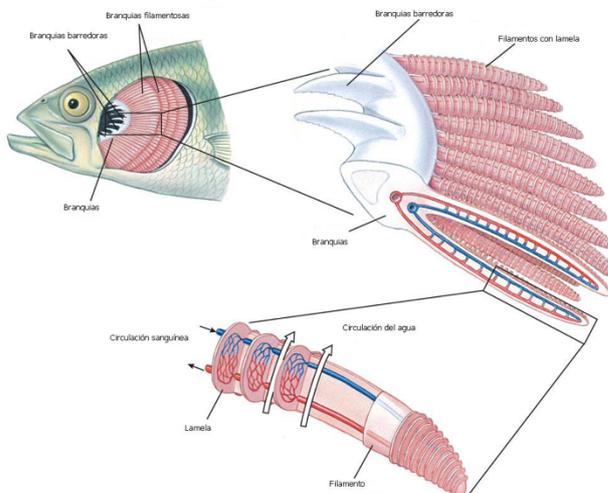
1.2.1. Sistema Digestivo

El sistema digestivo de los peces varía dependiendo de la dieta de la especie. En general, los peces carnívoros tienen un sistema digestivo más corto y eficiente, mientras que los herbívoros tienen intestinos más largos para descomponer materiales vegetales. Los principales componentes del sistema digestivo son:

- **Boca:** Los peces utilizan su boca no solo para ingerir alimentos, sino también para manipular objetos y defenderse en algunas especies.
- **Esófago:** Un tubo corto que conecta la boca con el estómago.

- **Estómago:** Los peces carnívoros tienen un estómago definido, mientras que los herbívoros y detritívoros tienen un sistema más difuso. En el estómago, se secretan ácidos y enzimas digestivas para descomponer los alimentos.
- **Intestino:** El intestino delgado es donde ocurre la mayor parte de la absorción de nutrientes. Los peces carnívoros tienen un intestino más corto y especializado, mientras que los herbívoros tienen un intestino más largo.
- **Ciegos pilóricos:** En peces con estómagos definidos, estas estructuras aumentan la superficie disponible para la digestión y absorción.
- **Intestino grueso y ano:** Los materiales no digeridos pasan al intestino grueso antes de ser eliminados del cuerpo a través del ano.

1.2.2. Sistema Respiratorio



El sistema respiratorio de los peces está compuesto principalmente por las branquias, que son responsables de extraer oxígeno del agua y eliminar dióxido de carbono y otros desechos.

- **Branquias:** Estas estructuras están compuestas por filamentos branquiales que aumentan la superficie de intercambio de gases. El agua entra por la boca y es expulsada a través de los opérculos, permitiendo que el oxígeno disuelto en el agua sea absorbido por la sangre del pez.
- **Sistema de doble circulación:** A diferencia de los mamíferos, los peces tienen un sistema circulatorio de un solo circuito, lo que significa que la

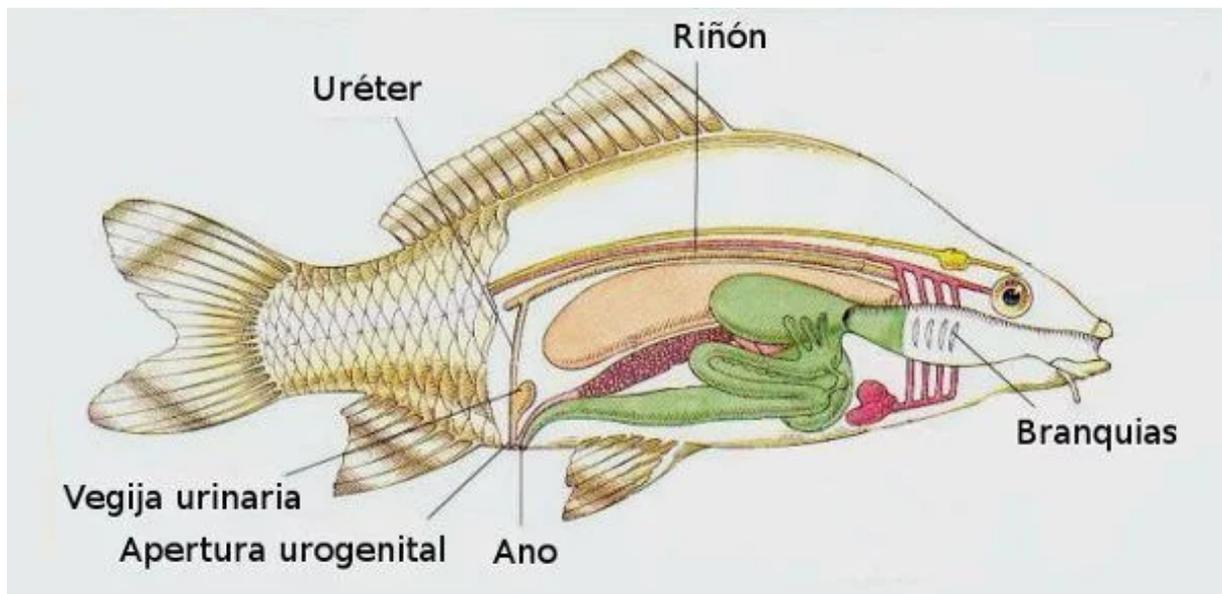
sangre oxigenada en las branquias es transportada directamente a los tejidos del cuerpo sin regresar al corazón (Randall & Farrell, 2011).

1.2.3. Sistema Circulatorio

El corazón de los peces es relativamente simple y está compuesto por dos cámaras: una aurícula y un ventrículo. La sangre es bombeada desde el corazón a las branquias, donde se oxigena antes de circular por el cuerpo.

1.2.4. Sistema Renal

Los riñones de los peces son fundamentales para la osmorregulación, que es el proceso mediante el cual los peces mantienen el equilibrio de líquidos e iones en su cuerpo. Esto es crucial, ya que los peces viven en un entorno donde la concentración de sales puede variar considerablemente.



- **Peces de agua dulce:** Tienen que eliminar grandes cantidades de agua a través de la orina para evitar la dilución de su sangre.

- **Peces marinos:** Tienen que conservar agua y excretar sal para mantener el equilibrio osmótico (Evans et al., 2005).

2. Especies de Peces Usadas en Acuaponía

En los sistemas acuapónicos, la selección de las especies de peces es un factor crítico para el éxito del sistema. Las especies más utilizadas son aquellas que se adaptan bien a las condiciones controladas del sistema y que tienen una alta tolerancia a los cambios en los parámetros del agua, como la temperatura, el pH, y la concentración de oxígeno. A continuación, se presentan las especies más comunes utilizadas en acuaponía, los criterios para su selección, y los factores ambientales que impactan en su bienestar y productividad.

2.1. Especies más comunes y sus características

2.1.1. Tilapia (*Oreochromis* spp.)



La tilapia es una de las especies más populares en acuaponía debido a su capacidad para sobrevivir en una amplia gama de condiciones ambientales. Es una especie de agua dulce originaria de África y se ha adaptado bien a diferentes climas y tipos de agua en todo el mundo. Las tilapias son peces omnívoros, lo que facilita su integración en sistemas acuapónicos.

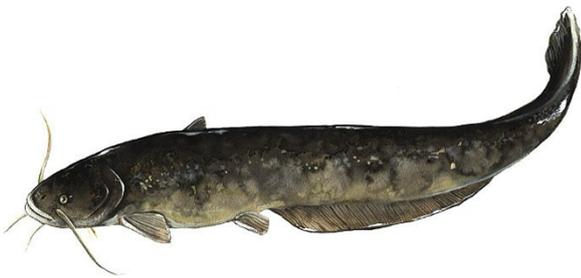
Características clave:

- **Tolerancia al estrés:** Las tilapias son conocidas por su capacidad para tolerar bajos niveles de oxígeno y variaciones en la calidad del agua. Esto las

hace ideales para sistemas acuapónicos, donde la estabilidad de los parámetros del agua puede fluctuar.

- **Temperatura óptima:** Prefieren temperaturas entre 25°C y 30°C, aunque pueden sobrevivir en rangos más amplios, desde los 18°C hasta los 35°C (Boyd et al., 2020).
 - **Crecimiento rápido:** La tilapia tiene un crecimiento rápido y puede alcanzar tamaños comerciales en 6 a 9 meses.
 - **Reproducción:** Se reproduce fácilmente en cautiverio, lo que puede ser ventajoso en sistemas acuapónicos de pequeña escala, aunque puede requerir control en sistemas comerciales para evitar la sobrepoblación.
-

2.1.2. Bagre (*Ictalurus punctatus*)



El bagre es una especie común en acuaponía, especialmente en climas templados. Apreciado por su carne, el bagre es una de las especies más cultivadas en acuicultura globalmente.

Características clave:

- **Resistencia:** Los bagres son extremadamente resistentes y pueden sobrevivir en condiciones de baja calidad del agua, aunque requieren niveles adecuados de oxígeno para mantener su salud.
- **Alimentación:** Son carnívoros y necesitan alimentos ricos en proteínas para crecer rápidamente, pero pueden adaptarse a dietas vegetales, lo que es beneficioso en acuaponía (Valenti et al., 2021).

- **Temperatura óptima:** Prefieren temperaturas entre 24°C y 29°C, aunque su crecimiento se ralentiza a temperaturas más bajas.
 - **Manejo:** A diferencia de la tilapia, no se reproducen fácilmente en cautiverio, lo que puede ser una ventaja para evitar la sobrepoblación en sistemas comerciales.
-

2.1.3. Trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*)



La trucha arcoíris es una especie popular en sistemas acuapónicos en regiones más frías. Requiere un control estricto de la temperatura y los niveles de oxígeno.

Características clave:

- **Temperatura óptima:** Prosperan en temperaturas entre 10°C y 18°C y son extremadamente sensibles al calor, lo que las hace inadecuadas para climas cálidos sin refrigeración adecuada (Schmautz et al., 2020).
 - **Alimentación:** Como carnívoros estrictos, requieren dietas ricas en proteínas para su crecimiento óptimo.
 - **Tolerancia al estrés:** Son más sensibles a la calidad del agua, particularmente en cuanto al oxígeno disuelto. Necesitan niveles de oxígeno más altos que la tilapia o el bagre, lo que requiere una aireación constante y efectiva.
-

2.1.4. Pangasius (Pangasius pangasius)



El pangasius, también conocido como pez basa, es apreciado por su rápido crecimiento y capacidad de adaptación a condiciones de agua de baja calidad.

Características clave:

- **Resistencia:** El pangasius es altamente resistente a las enfermedades y puede tolerar condiciones de baja calidad de agua.
 - **Alimentación:** Son omnívoros, lo que permite una dieta variada en acuaponía.
 - **Temperatura óptima:** Prefieren temperaturas entre 22°C y 28°C.
 - **Crecimiento rápido:** Alcanzan tamaños comerciales en menos de un año.
-

2.1.5. Lubina rayada (Morone saxatilis)



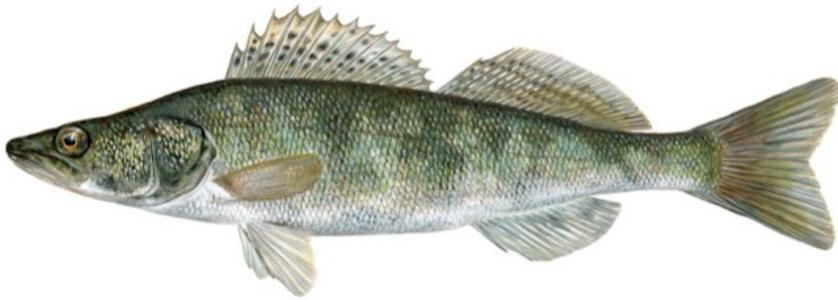
La lubina rayada es menos común en acuaponía pero se emplea en sistemas especializados debido a su alto valor comercial.

Características clave:

- **Valor comercial:** Muy valorada por su carne de alta calidad.
- **Temperatura óptima:** Prefieren temperaturas entre 15°C y 20°C.

- **Manejo especializado:** Requieren un mayor control del oxígeno y la calidad del agua que otras especies.
-

2.1.6. Lucioperca (Sander lucioperca)



La lucioperca es una especie apreciada en la gastronomía por su carne delicada. Aunque es más difícil de criar que otras especies, su incorporación en sistemas

acuapónicos está creciendo.

Características clave:

- **Alto valor comercial:** Es valorada en mercados gourmet.
 - **Temperatura óptima:** Prefieren temperaturas entre 18°C y 24°C.
 - **Manejo especializado:** Requieren un mayor control de la calidad del agua, pero ofrecen un retorno económico alto.
-

2.1.7. Perca europea (Perca fluviatilis)



La perca europea es una especie común en Europa y se está comenzando a utilizar en acuaponía debido a su valor en mercados locales y gourmet.

Características clave:

- **Alto valor en mercados europeos:** Se vende a precios altos en mercados locales y restaurantes gourmet.
 - **Temperatura óptima:** Prefieren temperaturas entre 20°C y 25°C.
 - **Crecimiento lento:** Tiene un crecimiento más lento en comparación con otras especies.
-

2.1.8. Carpa común (Cyprinus carpio)



La carpa común es una especie resistente que se ha utilizado en acuicultura durante siglos, siendo una opción ideal para sistemas acuapónicos en condiciones ambientales variables.

Características clave:

- **Tolerancia ambiental:** La carpa puede adaptarse a una amplia variedad de condiciones acuáticas.
 - **Temperatura óptima:** Prefieren temperaturas entre 18°C y 28°C.
 - **Crecimiento moderado:** Su crecimiento es más lento que otras especies, pero su resistencia la hace una especie valiosa en acuaponía.
-

2.1.9. Dorada (*Sparus aurata*)



La dorada es una especie marina popular en sistemas de acuicultura y acuaponía marina debido a su adaptabilidad a diferentes niveles de salinidad.

Características clave:

- **Adaptabilidad:** Puede adaptarse a agua salobre, haciéndola adecuada para sistemas acuapónicos de agua salada.
 - **Temperatura óptima:** Prefieren temperaturas entre 18°C y 26°C.
 - **Valor comercial:** Muy demandada en el mercado europeo por su carne de alta calidad.
-

2.1.10. Trucha de arroyo (*Salvelinus fontinalis*)



La trucha de arroyo es una especie de agua fría que prospera en climas templados y fríos, especialmente en sistemas acuapónicos que permiten el control de la temperatura.

Características clave:

- **Temperatura óptima:** Prefieren aguas frías, entre 10°C y 16°C.
- **Crecimiento lento:** Aunque crecen más lentamente, son apreciadas por su carne de alta calidad.
- **Manejo de oxígeno:** Requieren altos niveles de oxígeno disuelto, lo que demanda un sistema acuapónico con buen control de aireación.

2.1.11. Anguila (*Anguilla anguilla*)



La anguila es una especie que se está utilizando en algunos sistemas acuapónicos, especialmente en Europa, debido a su alto valor comercial.

Características clave:

- **Valor económico:** La anguila es altamente valorada por su carne y caviar.
- **Temperatura óptima:** Prefieren temperaturas entre 18°C y 25°C.
- **Crecimiento moderado:** Aunque crecen a un ritmo más lento, su valor en el mercado hace que sean una especie atractiva para la acuaponía.

2.1.12. Esturión (*Acipenser spp.*)

El esturión es una especie de alto valor, principalmente por el caviar que producen.



Aunque no es una especie común en acuaponía, está ganando popularidad en sistemas de acuicultura intensiva.

Características clave:

- **Crecimiento lento:** Los esturiones crecen lentamente y pueden tardar varios años en alcanzar la madurez para la producción de caviar.
- **Temperatura óptima:** Prefieren temperaturas entre 16°C y 22°C.

- **Valor comercial:** El caviar del esturión es uno de los productos más caros en la acuicultura.
-

Estas especies representan una amplia variedad de opciones para sistemas acuapónicos, cada una con sus características específicas en cuanto a manejo, crecimiento y requerimientos de temperatura y alimentación

2.2. Criterios de selección de especies de acuaponía.

Tolerancia al estrés

Es fundamental elegir especies que puedan tolerar fluctuaciones en los parámetros del agua, como el pH, la concentración de oxígeno y los niveles de nitrógeno. La tilapia es conocida por su capacidad para sobrevivir en condiciones menos que ideales, mientras que la trucha, aunque más exigente, puede ofrecer un producto de mayor valor en mercados específicos (Schmautz et al., 2020).

Facilidad de reproducción

En sistemas acuapónicos de pequeña escala, puede ser ventajoso elegir especies que se reproduzcan fácilmente, como la tilapia. Sin embargo, en sistemas comerciales, puede ser preferible evitar la sobrepoblación, por lo que especies como el bagre o la trucha, que no se reproducen fácilmente en cautiverio, pueden ser una mejor opción.

Compatibilidad con las plantas

En acuaponía, los desechos de los peces son una fuente de nutrientes para las plantas. Por lo tanto, es crucial elegir especies que generen cantidades suficientes de desechos nitrogenados sin comprometer la salud del sistema. Las especies de

crecimiento rápido como la tilapia suelen producir más desechos, lo que favorece el crecimiento de las plantas (Valenti et al., 2021).

Rentabilidad

La viabilidad económica del sistema depende en gran medida de la especie de pez seleccionada. Algunas especies, como la trucha, tienen un valor comercial más alto pero requieren un manejo más intensivo. La tilapia, aunque tiene un precio de mercado más bajo, es más fácil de criar y tiene costos de operación más bajos.

2.3. Factores ambientales y su impacto en las especies

Los factores ambientales juegan un papel crucial en la supervivencia y el crecimiento de las especies de peces en acuaponía. Entre los factores más importantes se encuentran la calidad del agua, la temperatura, la oxigenación y el pH.

2.3.1. Calidad del agua

La calidad del agua es esencial para la salud de los peces y las plantas en acuaponía. El agua debe estar libre de contaminantes, con bajos niveles de amoníaco y nitritos, y debe ser rica en oxígeno. La acumulación de desechos sólidos también puede afectar la calidad del agua, por lo que es fundamental utilizar sistemas de filtración eficientes (Borges et al., 2021).

2.3.2. Temperatura del agua

La temperatura tiene un impacto directo en el metabolismo de los peces. A temperaturas más altas, el metabolismo de los peces se acelera, lo que aumenta sus necesidades de oxígeno y nutrientes. Sin embargo, las temperaturas extremas pueden ser perjudiciales. Las tilapias, por ejemplo, pueden sobrevivir a una amplia

gama de temperaturas, mientras que las truchas requieren temperaturas más frías y estables (Boyd et al., 2020).

2.3.3. pH del agua

El pH del agua afecta la solubilidad de ciertos nutrientes y la toxicidad del amoníaco. En acuaponía, es esencial mantener un pH equilibrado que sea adecuado tanto para los peces como para las plantas. En la mayoría de los sistemas acuapónicos, un pH entre 6.8 y 7.2 es ideal para maximizar la salud de ambos (Love et al., 2021).

2.3.4. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en el agua es vital para la respiración de los peces. La concentración de oxígeno disuelto debe mantenerse en niveles adecuados, generalmente por encima de 5 mg/L, para asegurar el bienestar de los peces. En sistemas acuapónicos, la aireación constante y el monitoreo regular son necesarios para evitar la hipoxia y asegurar una tasa de crecimiento óptima (Schmautz et al., 2020).

3. Alimentación y Crecimiento de los Peces

3.1. Requerimientos Energéticos

El crecimiento de los peces en sistemas acuapónicos depende de un equilibrio adecuado de nutrientes y energía. La energía en los alimentos para peces se obtiene principalmente de los macronutrientes, es decir, proteínas, grasas y carbohidratos, que son necesarios para el mantenimiento de las funciones corporales, el crecimiento y la reproducción. La cantidad de energía necesaria depende del tamaño del pez, la especie y las condiciones ambientales como la temperatura y la calidad del agua.

Los peces carnívoros, como la trucha y el bagre, requieren dietas ricas en proteínas, mientras que los peces herbívoros u omnívoros, como la tilapia, pueden prosperar con dietas más variadas, que incluyen carbohidratos y proteínas vegetales. La energía digestible es la fracción de la energía consumida que está disponible para el crecimiento después de que se han satisfecho las necesidades energéticas de mantenimiento, como la natación y la digestión.

Factores clave que influyen en los requerimientos energéticos:

- **Tamaño corporal:** A medida que los peces crecen, sus necesidades energéticas cambian. Los peces pequeños requieren más energía relativa para crecer que los peces grandes.
- **Temperatura:** Las especies de agua fría, como la trucha, tienen un metabolismo más lento y, por lo tanto, una menor demanda energética a temperaturas más bajas. Sin embargo, las especies de agua cálida, como la tilapia, tienen una demanda energética más alta a medida que la temperatura aumenta (NRC, 2020).
- **Actividad:** Los peces más activos, como los depredadores, requieren más energía para nadar y cazar en comparación con las especies menos activas.

3.2. Interacciones entre la Ingesta y Factores Ambientales

La alimentación en acuaponía no depende únicamente de la calidad y composición del alimento. Existen numerosos factores ambientales, tanto bióticos como abióticos, que pueden afectar la ingesta de alimentos y el crecimiento de los peces.

3.2.1. Factores Abióticos

Temperatura: La temperatura del agua es uno de los factores más influyentes en la ingesta de alimentos y el crecimiento de los peces. A temperaturas óptimas, el metabolismo de los peces aumenta, lo que conduce a una mayor demanda de alimento. Sin embargo, si la temperatura supera el rango óptimo para una especie,

el apetito disminuye, lo que puede resultar en una pérdida de peso. Por ejemplo, la tilapia tiene un rango óptimo de temperatura entre 25°C y 30°C, mientras que la trucha arcoíris prospera entre 10°C y 18°C (Boyd et al., 2021).

Oxígeno disuelto: El nivel de oxígeno disuelto en el agua es crucial para el metabolismo de los peces. En condiciones de hipoxia (bajo oxígeno), los peces pueden reducir su ingesta de alimentos y disminuir su tasa de crecimiento. Los niveles óptimos de oxígeno varían según la especie, pero en general, los niveles deben mantenerse por encima de 5 mg/L para la mayoría de las especies de acuaponía (Timmons et al., 2020).

Salinidad y pH: La mayoría de los peces de acuaponía, como la tilapia, pueden tolerar fluctuaciones moderadas en el pH y la salinidad. Sin embargo, es crucial mantener los parámetros del agua dentro de un rango adecuado para evitar el estrés, que puede reducir la ingesta de alimentos. En sistemas acuapónicos, el pH óptimo para los peces suele estar entre 6.5 y 7.5 (Rakocy et al., 2020).

3.2.2. Factores Bióticos

Densidad de población: La densidad de población afecta el comportamiento alimentario y el crecimiento. En sistemas con alta densidad de peces, puede haber competencia por los alimentos, lo que puede conducir a una alimentación desigual y al desarrollo de jerarquías. Los peces dominantes pueden crecer más rápido a expensas de los peces más pequeños o sumisos, lo que afecta la uniformidad de la población (Valenti et al., 2021).

Presencia de patógenos: Las infecciones bacterianas, virales o parasitarias pueden reducir la eficiencia alimentaria de los peces. Los peces infectados a menudo tienen menos apetito y crecen más lentamente. En sistemas acuapónicos, es fundamental mantener altos estándares de higiene y monitorear constantemente la salud de los peces para prevenir brotes de enfermedades (Schmautz et al., 2020).

3.3. Composición Nutricional de los Alimentos para Peces y su Impacto en Sistemas Acuapónicos

La dieta de los peces en acuaponía juega un papel crucial no solo en su crecimiento, sino también en el equilibrio del sistema. Los alimentos para peces están compuestos principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas, vitaminas y minerales. La proporción de cada uno de estos componentes depende de las necesidades específicas de la especie de pez y del objetivo del sistema (crecimiento rápido, mantenimiento, reproducción, etc.).

Proteínas: Las proteínas son el componente más importante en la dieta de los peces, ya que son necesarias para la formación de tejido muscular. En acuaponía, el contenido de proteína del alimento también influye en la calidad de los desechos nitrogenados que luego serán utilizados por las plantas. Un exceso de proteínas en la dieta puede resultar en una acumulación de amoníaco en el sistema, lo que requiere una mayor capacidad de filtración biológica (Lazzarotto et al., 2018).

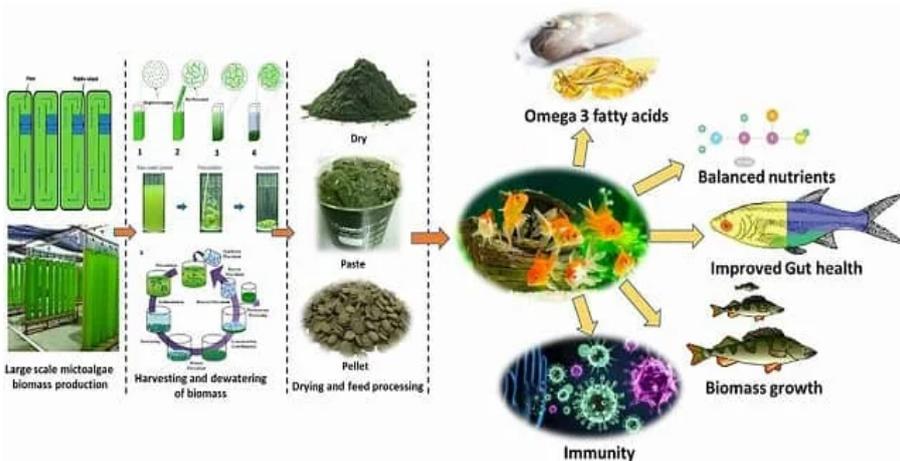
Carbohidratos: Los carbohidratos son una fuente de energía económica en los alimentos para peces. En sistemas acuapónicos, se ha demostrado que las dietas con un mayor contenido de carbohidratos reducen la necesidad de proteína como fuente de energía, lo que disminuye la excreción de nitrógeno y mejora la eficiencia del sistema (Oliva-Teles, 2020).

Grasas: Los lípidos proporcionan energía y son esenciales para la salud general de los peces. Las dietas ricas en ácidos grasos omega-3 y omega-6 son especialmente importantes para peces carnívoros como la trucha, ya que no pueden sintetizar estos ácidos grasos de manera eficiente.

3.4. Tipos de Alimentos para Peces

Existen varios tipos de alimentos para peces que pueden ser utilizados en acuaponía, cada uno con diferentes composiciones nutricionales y costos.

- **Alimento en pellet:** Es el tipo más común utilizado en acuaponía. Los pellets pueden ser flotantes o hundibles, y su tamaño varía según la especie y la etapa de crecimiento del pez. Los pellets flotantes son preferidos en muchos sistemas acuapónicos porque permiten observar fácilmente el comportamiento alimentario de los peces (Timmons et al., 2020).
- **Alimentos vivos:** Algunos sistemas acuapónicos incluyen alimentos vivos, como insectos o crustáceos, para complementar la dieta de peces carnívoros. Aunque los alimentos vivos proporcionan una fuente natural de nutrientes, su uso en acuaponía a gran escala puede no ser práctico.



- **Dietas formuladas:** Las dietas formuladas están diseñadas para satisfacer las necesidades nutricionales específicas de las especies en cada etapa de su vida. Estas dietas están compuestas por una mezcla de proteínas, carbohidratos, grasas y suplementos vitamínicos y minerales.

3.5. Estrategias de Alimentación

La alimentación eficiente es clave para optimizar el crecimiento de los peces y minimizar el desperdicio en sistemas acuapónicos. Las estrategias de alimentación

varían según la especie de pez, la edad, la densidad de población y los objetivos de producción.

- **Alimentación manual:** Aunque requiere más mano de obra, la alimentación manual permite un control más preciso de la cantidad de alimento y la observación directa del comportamiento de los peces. Este método es más común en sistemas pequeños o domésticos (Rakocy et al., 2020).
- **Alimentación programada:** En sistemas más grandes, es más común utilizar alimentadores automáticos que distribuyen el alimento a intervalos regulares. Esto permite una alimentación más uniforme y reduce el estrés en los peces, mejorando la eficiencia del sistema (Valenti et al., 2021).
- **Alimentación ad libitum:** En algunos casos, se permite que los peces coman a voluntad durante todo el día. Este método se utiliza principalmente para peces juveniles que requieren una mayor cantidad de alimento para crecer rápidamente.

3.6. Sistemas Automáticos de Alimentación en Acuicultura

Los sistemas automáticos de alimentación en acuicultura ofrecen una forma eficiente de distribuir alimentos de manera uniforme, lo que resulta crucial para optimizar el crecimiento de los peces y reducir el desperdicio de alimento. Al distribuir pequeñas porciones de alimento a intervalos regulares, estos sistemas minimizan las fluctuaciones en la ingesta alimentaria y el estrés en los peces, lo que puede ocurrir con métodos manuales. Los alimentadores automáticos pueden ser personalizados para satisfacer las necesidades específicas de las diferentes especies y tamaños de peces dentro de un sistema acuapónico.

Ventajas clave de los sistemas automáticos de alimentación:

- **Consistencia en la distribución del alimento:** Al controlar la cantidad y el momento de la distribución del alimento, se asegura una ingesta uniforme,

lo que promueve un crecimiento equilibrado entre los peces. Este es un factor crucial para evitar la creación de jerarquías alimentarias dentro del tanque, en las que los peces dominantes tienden a acaparar el alimento.

- **Ahorro de tiempo y mano de obra:** Los alimentadores automáticos permiten que los operadores se enfoquen en otras áreas del sistema acuapónico, como el monitoreo de la calidad del agua, la revisión de los filtros biológicos y la supervisión de las plantas. Esto reduce la dependencia de la mano de obra y optimiza el uso del tiempo en sistemas comerciales de gran escala.
- **Reducción del desperdicio de alimento:** Al ajustar la cantidad de alimento suministrado a la capacidad de consumo de los peces, se minimiza la acumulación de alimento no consumido en el tanque, lo que a su vez reduce la carga de sólidos en el sistema. En acuaponía, el alimento no consumido puede descomponerse rápidamente y liberar nutrientes que no son fácilmente procesados por el sistema, lo que puede aumentar la acumulación de amoníaco y otros compuestos indeseados.
- **Monitoreo de la ingesta de los peces:** Algunos sistemas automáticos incluyen sensores y cámaras que permiten monitorear el comportamiento alimentario de los peces. Cuando los peces dejan de alimentarse o disminuyen su ingesta, el sistema detiene automáticamente la distribución de alimento. Esto es particularmente útil para evitar el sobrealimentado, que puede resultar en una pérdida de alimento y una mayor carga de nutrientes en el agua (Godfrey, 2018).

Tipos de sistemas automáticos de alimentación:

- **Alimentadores de tiempo fijo:** Estos alimentadores son programados para dispensar alimento a intervalos regulares a lo largo del día. Este tipo de alimentador es simple y efectivo, y es comúnmente utilizado en sistemas acuapónicos pequeños y medianos.

- **Alimentadores controlados por demanda:** Utilizan sensores que detectan la presencia de los peces y su comportamiento alimentario para liberar alimento solo cuando los peces muestran signos de apetito. Estos sistemas avanzados son más eficientes al reducir el desperdicio, ya que el alimento solo se dispensa cuando es necesario.
- **Alimentadores con control remoto:** Algunos sistemas modernos permiten el control remoto mediante aplicaciones móviles o programas informáticos. Esto proporciona flexibilidad a los operadores, que pueden ajustar la cantidad de alimento o modificar el horario de alimentación desde cualquier lugar.
- **Alimentadores con sensores de actividad:** Estos sistemas utilizan sensores de actividad para medir el nivel de movimiento de los peces en el agua. Cuando los peces están más activos, los sensores activan el alimentador para proporcionar alimento en el momento adecuado.

Marcas y tecnologías destacadas:

- **AKVA group:** Ofrece sistemas de alimentación automatizada diseñados específicamente para la acuicultura y acuaponía comercial. Sus sistemas permiten una distribución controlada del alimento a través de tuberías de distribución y sensores de actividad que monitorean la ingesta de los peces.
- **FishFarmFeeder:** Especializada en la fabricación de alimentadores automáticos tanto para sistemas acuapónicos pequeños como para operaciones comerciales a gran escala. Estos sistemas son conocidos por su durabilidad y eficiencia en la distribución del alimento.
- **Pentair Aquatic Eco-Systems:** Proveedor de equipos avanzados de acuicultura que ofrece soluciones integradas de alimentación automática, incluyendo sensores y cámaras para monitorear el comportamiento alimentario de los peces en tiempo real.

Consideraciones para la implementación de sistemas automáticos de alimentación:

- **Calibración adecuada:** Es fundamental calibrar correctamente los alimentadores para que dispensen la cantidad adecuada de alimento para la especie y el tamaño de los peces. Una mala calibración puede llevar a una sobrealimentación o subalimentación, lo que afecta tanto el crecimiento de los peces como la calidad del agua.
- **Mantenimiento regular:** Los alimentadores automáticos requieren mantenimiento periódico para garantizar su correcto funcionamiento. Esto incluye la limpieza de las tolvas de alimento y la verificación de que los mecanismos de distribución no estén obstruidos.
- **Monitoreo de la calidad del agua:** Dado que la cantidad de alimento proporcionado está directamente relacionada con la calidad del agua, es esencial monitorear regularmente los parámetros del sistema, como el amoníaco, nitritos y nitratos, para asegurarse de que el sistema esté equilibrado y los desechos generados por los peces sean procesados de manera efectiva.

Conclusión

El uso de sistemas automáticos de alimentación en acuaponía es una herramienta valiosa para aumentar la eficiencia y mejorar el rendimiento general de los sistemas acuapónicos, tanto en entornos comerciales como en proyectos de pequeña escala. Estos sistemas no solo optimizan la ingesta de alimento, sino que también facilitan la gestión de los recursos humanos y el mantenimiento del sistema acuático. Con la adopción de tecnologías avanzadas y sensores, los sistemas automáticos pueden mejorar aún más el bienestar de los peces y la productividad del sistema acuapónico.

Referencias

- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2021). *Pond Aquaculture Water Quality Management*. Springer Science & Business Media.
- Godfrey, M. (2018). *Automated Feeding Systems in Aquaculture: Principles and Technologies*. *Aquaculture Engineering*, 79, 65-73.
- Lazzarotto, V., Médale, F., Larroquet, L., Corraze, G., & Dupont-Nivet, M. (2018). *What is the current feed efficiency of farmed fish and how can it be improved?* *Aquaculture Reports*, 9, 21-29.
- Oliva-Teles, A. (2020). *Nutrition and feeding in fish: Feed intake and growth*. *Annual Review of Animal Biosciences*, 8(1), 145-160.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2020). *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture*. Southern Regional Aquaculture Center.

4. Diseño de Alimentos para Acuaponía

El diseño de alimentos en acuaponía tiene una doble función: asegurar el crecimiento óptimo de los peces y minimizar el impacto ambiental, especialmente en lo relacionado con el ciclo del nitrógeno. Un diseño adecuado de alimentos no solo garantiza la salud de los peces, sino que también optimiza el uso de los desechos metabólicos, como el amoníaco, para el beneficio de las plantas.

Referencias

- AKVA Group. (2022). Automated feeding systems. Retrieved from <https://www.akvagroup.com>
- Acuitec. (2022). Advanced feeding solutions for aquaculture. Retrieved from <https://www.acuitec.com>
- Crystalvision. (2022). Automated feeding robots for RAS systems. Retrieved from <https://www.crystalvision.com>
- Lazzarotto, V. et al. (2021). Advances in feed technology for aquaculture. *Aquaculture Nutrition*, 27(1), 1-15.

- Rojas, P., & Cavero, D. (2021). Feeding strategies in recirculating aquaculture systems. *Journal of Aquatic Sciences*, 49(3), 204-215.

4.1 Plan de producción y monitoreo de la evolución de la granja

Todas las granjas acuapónicas deben contar con objetivos de producción bien definidos y un plan para cumplirlos. Específicamente, es útil definir los siguientes aspectos con antelación:

- **Especies a utilizar:** Seleccionar las especies de peces y plantas a cultivar, de acuerdo con las condiciones locales y los objetivos de la granja.
- **Tamaño de los alevines y tamaño objetivo de los adultos:** Definir el tamaño inicial de los alevines y el tamaño objetivo de los adultos al final del ciclo productivo. Esto ayudará a establecer los ciclos productivos en la granja (tipos de tanques, etc.).
- **Curva de crecimiento de las especies:** Registrar la curva de crecimiento de las especies para poder mantener un registro del crecimiento y ajustar la alimentación según sea necesario para alcanzar los objetivos de crecimiento.
- **Densidades óptimas y condiciones de alojamiento:** Definir las densidades óptimas y las condiciones de alojamiento para cada etapa de crecimiento, lo que ayudará a determinar la carga máxima de biomasa viva en la instalación y la producción anual.
- **Gestión de la salud:** Implementar un plan de manejo sanitario para mantener las condiciones óptimas de los peces, lo cual es crucial para minimizar la mortalidad y maximizar la producción.
- **Nivel de capacitación del personal:** Asegurar que el personal involucrado esté debidamente capacitado en todas las áreas de manejo y operación de la granja.

El bienestar de los peces y la viabilidad económica de la instalación dependerán del cumplimiento de los objetivos presupuestados en el proyecto. Es fundamental

evaluar si los peces están alcanzando el crecimiento esperado, si están transformando el alimento de manera eficiente, y si la mortalidad se mantiene dentro de los niveles previstos. Se debe conocer la curva de crecimiento esperada en relación con la temperatura del agua. Esto, junto con la duración del sistema de producción, ayudará a diseñar un plan de producción que será la base de los costos operativos.

Una vez que la producción ha comenzado, es esencial monitorearla de manera adecuada. Debe haber una trazabilidad clara desde el origen de los peces. Es importante registrar el número de peces y su tamaño inicial el primer día que se alojan en los tanques. Diariamente, se debe registrar cada una de las actividades de producción que se llevan a cabo, como la fuente diaria de alimento, el modo de limpieza, y las mediciones de parámetros físicos y químicos. En la **Figura 7** se presenta un ejemplo de la hoja de control. Estos datos se recopilan diariamente para cada uno de los tanques y deben almacenarse en el informe mensual y procesarse para poder determinar la evolución de la producción en la granja.

Regularmente, se debe pesar una muestra representativa de peces para estimar el crecimiento en cada tanque. Es necesario capturar suficientes peces para representar el tanque, generalmente al menos 10-15 individuos por cada 100 peces. La alimentación se ajusta periódicamente de acuerdo con el peso promedio de los peces.

Diseño de alimentos para acuaponía

Los alimentos para peces en sistemas de acuaponía pueden ser elaborados en casa o adquiridos de empresas especializadas que formulan dietas específicas según la especie y la edad de los peces. Normalmente, los productores comerciales prefieren utilizar alimentos especializados, ya que garantizan cubrir todas las necesidades

nutricionales de los peces y tienden a ser más rentables en comparación con la elaboración y formulación propia de los alimentos. Sin embargo, los alimentos formulados no siempre son perfectos y pueden tener efectos variados en la calidad del agua en la que viven y excretan los peces.

Solo recientemente los científicos e ingenieros han comenzado a considerar dietas específicas para peces en sistemas de recirculación y en unidades acuapónicas. Teóricamente, parece posible proporcionar a los peces alimentos granulados que les ayuden a crecer rápidamente, al tiempo que proporcionan suficientes nutrientes para las plantas que se "alimentarán" de esta agua. Sin embargo, **en la práctica, las cosas son más complejas y dependen de muchos parámetros**, como la temperatura y el pH del agua reciclada, así como la microbiota en los intestinos de los peces y en los biofiltros. Un practicante de acuaponía debe conocer los conceptos básicos de la composición de los alimentos para peces con el fin de tener una idea de cuál sería el mejor alimento para comenzar. Aunque puede no ser necesario diseñar alimentos desde cero, es importante poder elegir el alimento adecuado para este sistema después de leer las siguientes secciones.

Crecimiento de los Peces y Retención de Nitrógeno

El crecimiento de los peces en un sistema acuapónico depende en gran medida de la **calidad y cantidad de alimento** proporcionado, lo cual está directamente relacionado con el metabolismo del nitrógeno. El **nitrógeno**, que proviene principalmente de las proteínas en el alimento, es esencial para la formación de tejidos, particularmente los músculos. Sin embargo, el exceso de nitrógeno que no se convierte en biomasa se excreta en forma de amoníaco (NH_3) o urea, que si no se maneja correctamente, puede ser tóxico para los peces.

Un parámetro clave para evaluar el crecimiento y la retención de nitrógeno es el **índice de conversión alimenticia (FCR, por sus siglas en inglés)**. Este índice mide la cantidad de alimento necesario para producir una unidad de peso en los

peces. Cuanto menor sea el FCR, más eficiente será el sistema en la conversión de alimento en biomasa de pescado y menor será la cantidad de nitrógeno liberado al sistema acuapónico.

Factores que afectan el crecimiento y la retención de nitrógeno:

- **Alimentos balanceados:** Una dieta bien equilibrada, rica en proteínas, asegura que los peces absorban una cantidad suficiente de nitrógeno para promover el crecimiento. Se ha demostrado que dietas ricas en **aminoácidos esenciales** mejoran la retención de nitrógeno en los tejidos de los peces, lo que minimiza las pérdidas en forma de desechos (Turchini et al., 2020).
- **Condiciones del agua:** La **temperatura**, el **pH** y los **niveles de oxígeno** en el agua son factores determinantes en la eficiencia metabólica de los peces. A temperaturas subóptimas o en condiciones de baja calidad del agua, los peces no absorben adecuadamente los nutrientes, lo que genera más desechos nitrogenados (Rakocy et al., 2021).
- **Tamaño de los peces:** Los peces jóvenes tienen tasas de crecimiento más rápidas y retienen más nitrógeno en comparación con los peces adultos. Las dietas para juveniles suelen tener más proteínas para maximizar la retención de nitrógeno durante las primeras etapas de vida.

4.2. Fuentes de Nitrógeno

Las fuentes de nitrógeno en los sistemas acuapónicos provienen casi exclusivamente del **alimento para peces**. Las proteínas en el alimento son la principal fuente de nitrógeno, que los peces absorben y utilizan para la síntesis de proteínas. Sin embargo, una parte significativa de este nitrógeno no se retiene en los peces y es excretada en forma de desechos sólidos o amoníaco.

Fuentes comunes de nitrógeno en los alimentos para peces:

- **Harina de pescado:** Tradicionalmente ha sido la fuente principal de proteínas en la acuicultura debido a su alto contenido proteico (alrededor del 60-70%). Sin embargo, su costo y disponibilidad limitada están impulsando la búsqueda de **alternativas sostenibles**, como la harina de insecto o de soja.
- **Proteínas vegetales:** Las harinas de soja y guisante son alternativas comunes en las dietas acuapónicas, pero requieren ajustes para complementar ciertos aminoácidos esenciales (Aas et al., 2021). Aunque son más baratas y sostenibles, pueden producir más residuos nitrogenados si no se complementan adecuadamente.

4.3. Absorción y Retención de Nitrógeno en Peces

La **absorción de nitrógeno** ocurre principalmente en el intestino del pez, donde las proteínas se descomponen en aminoácidos, que luego son absorbidos para ser utilizados en la síntesis de proteínas corporales. El proceso de **retención de nitrógeno** se refiere a la cantidad de nitrógeno que los peces son capaces de incorporar en su tejido en lugar de excretarlo como amoníaco o en los desechos.

La eficiencia en la **retención de nitrógeno** depende de varios factores, incluidos:

- **Digestibilidad del alimento:** Las proteínas altamente digestibles favorecen una mayor retención de nitrógeno, mientras que las proteínas de baja calidad o las fuentes vegetales mal procesadas resultan en mayores pérdidas de nitrógeno (Boyd et al., 2020).
- **Relación proteína-energía:** El equilibrio entre la proteína y la energía disponible en el alimento es crucial. Si hay un exceso de energía, los peces utilizarán menos proteínas para el metabolismo energético y más para el crecimiento muscular, mejorando la retención de nitrógeno.
-

4.4. Pérdida de Nitrógeno en los Sólidos

El nitrógeno que no es absorbido ni retenido por los peces se pierde en forma de **desechos sólidos**, principalmente heces y restos de alimento no consumido. La **digestibilidad del alimento** y la calidad de las proteínas afectan directamente la cantidad de nitrógeno excretado en los sólidos.

En sistemas acuapónicos, la gestión de los desechos sólidos es crucial para evitar la acumulación de compuestos nitrogenados tóxicos. Los sólidos deben ser **filtrados y removidos** del sistema para mantener la calidad del agua y prevenir la sobrecarga de nutrientes. Se estima que aproximadamente el **25-30% del nitrógeno** del alimento termina en forma de desechos sólidos, aunque este valor puede variar dependiendo del tipo de alimento y la eficiencia del sistema de filtración (Rakocy et al., 2021).

4.5. Nitrógeno Disuelto en el Agua como Nitrógeno Amoniacal Total (TAN)

El **nitrógeno amoniacal total (TAN)** es la forma más común de nitrógeno disuelto en los sistemas acuapónicos y proviene principalmente de la excreción de amoníaco por parte de los peces. El TAN es una combinación de **amoníaco (NH₃)**, que es tóxico para los peces, y **amonio (NH₄⁺)**, que es mucho menos tóxico. La proporción entre NH₃ y NH₄⁺ depende del **pH** y la **temperatura** del agua. A un pH más alto, aumenta la proporción de NH₃, lo que incrementa el riesgo de toxicidad.

Importancia del monitoreo del TAN:

- **Toxicidad del amoníaco:** El NH₃ es altamente tóxico para los peces, incluso en concentraciones muy bajas (por encima de 0.02 mg/L). Es esencial controlar el pH y la temperatura del agua para mantener bajos niveles de NH₃ (Schneider et al., 2020).

- **Biofiltración:** Los sistemas acuapónicos utilizan biofiltros para convertir el TAN en nitratos a través del proceso de **nitrificación**, lo que reduce la toxicidad y proporciona nutrientes a las plantas. Un biofiltro eficiente es esencial para mantener un nivel seguro de TAN en el agua.

4.6. Cálculo del Nitrógeno Disuelto como TAN

El TAN se puede calcular utilizando la fórmula:

$$TAN = (N \text{ excretado por los peces}) (\text{volumen del agua} \times \text{tasa de dilución})$$

Donde:

- **N excretado por los peces:** Es la cantidad de nitrógeno no retenido en los peces que se libera en el agua como amoníaco.
- **Volumen del agua:** Es el volumen total del sistema acuapónico.
- **Tasa de dilución:** Es la cantidad de agua nueva que se añade al sistema para diluir los compuestos tóxicos.

Este cálculo permite a los operadores monitorear los niveles de TAN y ajustar la alimentación o la filtración según sea necesario para evitar la acumulación de compuestos tóxicos.

4.7. Nitrógeno Amoniacal en Sistemas Acuapónicos (Continuación)

Estrategias para manejar el nitrógeno amoniacal:

- **Uso de biofiltros:** Los biofiltros son un componente esencial en sistemas acuapónicos, ya que contienen bacterias nitrificantes que convierten el amoníaco (NH_3) en nitritos (NO_2) y luego en nitratos (NO_3). Los nitratos son una forma menos tóxica de nitrógeno y son un nutriente clave para las plantas. Las bacterias nitrificantes requieren suficiente **oxígeno**

disuelto para llevar a cabo este proceso, por lo que un sistema de aireación adecuado es crucial.

- **Monitoreo constante:** Es fundamental realizar pruebas regulares de la calidad del agua para monitorear los niveles de TAN, pH y oxígeno disuelto. El **pH** debe mantenerse en un rango óptimo (6.5-7.5) para maximizar la nitrificación y evitar que el amoníaco se acumule en formas tóxicas. También es importante tener en cuenta la **temperatura**, ya que afecta la solubilidad del oxígeno y la eficiencia de la biofiltración.
- **Reducción del TAN mediante la dilución:** En algunos casos, cuando los niveles de TAN suben rápidamente, puede ser necesario añadir agua fresca al sistema o utilizar sistemas de desgasificación para reducir las concentraciones de amoníaco. Sin embargo, esta solución debe ser usada con cuidado, ya que podría alterar los equilibrios iónicos y de nutrientes en el sistema.
- **Aireación:** La aireación adecuada no solo favorece el crecimiento de bacterias nitrificantes, sino que también ayuda a reducir el **dióxido de carbono (CO₂)** disuelto, mejorando así la salud general del sistema. Una buena aireación es fundamental para mantener niveles altos de oxígeno disuelto, lo cual es esencial para el crecimiento saludable de peces y plantas.

Importancia de la nitrificación en acuaponía

El proceso de **nitrificación** es uno de los más importantes en los sistemas acuapónicos, ya que transforma el **nitrógeno amoniacal tóxico** en formas que pueden ser absorbidas por las plantas. La **Nitrosomonas** convierte el amoníaco en nitrito (NO₂-), y luego las bacterias **Nitrobacter** convierten los nitritos en nitratos (NO₃-), que son la forma preferida de nitrógeno para el crecimiento de las plantas. Este proceso es crucial para:

- **Reducir la toxicidad del agua:** Mantener bajos niveles de NH₃ y NO₂- es esencial para evitar efectos adversos en la salud de los peces.

- **Proporcionar nutrientes para las plantas:** Los nitratos son una fuente de nitrógeno fácilmente disponible para las plantas en los sistemas acuapónicos, lo que ayuda a un crecimiento vegetal vigoroso y saludable.
-

4.8. Factores que Influyen en la Acumulación de TAN

En los sistemas acuapónicos, existen varios factores que pueden influir en la **acumulación de nitrógeno amoniacal total (TAN)**. Es fundamental entender estos factores para prevenir la acumulación de compuestos tóxicos y mantener un entorno saludable tanto para los peces como para las plantas.

4.8.1 Tasa de alimentación

La cantidad de alimento proporcionado a los peces es uno de los principales factores que determinan los niveles de TAN en el sistema. A mayor cantidad de alimento, mayor será la cantidad de nitrógeno excretado por los peces como desecho. Si los peces reciben más alimento del que pueden procesar, el exceso de nitrógeno no retenido se excreta como amoníaco, lo que aumenta los niveles de TAN en el agua.

Para evitar este problema, es necesario ajustar la tasa de alimentación a las necesidades metabólicas de los peces. Algunas estrategias incluyen:

- **Ajustar la alimentación según el tamaño de los peces:** Los peces más pequeños necesitan ser alimentados con más frecuencia, mientras que los peces adultos requieren menos alimento proporcionalmente.
- **Uso de alimentadores automáticos:** Estos dispositivos permiten una alimentación precisa y regular, lo que reduce la cantidad de alimento desperdiciado y mejora la eficiencia del sistema (Badiola et al., 2018).

4.8.2 Calidad del agua

La calidad del agua tiene un impacto significativo en la acumulación de TAN. Factores como el pH, la temperatura y los niveles de oxígeno disuelto afectan la proporción de amoníaco (NH_3) y amonio (NH_4^+) en el agua.

- **pH:** A medida que el pH del agua aumenta, la proporción de amoníaco (NH_3) no ionizado, que es la forma más tóxica, también aumenta. Por esta razón, se recomienda mantener el pH en un rango óptimo de 6.5 a 7.5, donde la mayor parte del nitrógeno amoniacal estará en forma de amonio (NH_4^+), que es mucho menos tóxico para los peces (Rakocy et al., 2020).
- **Temperatura:** A temperaturas más altas, el metabolismo de los peces se acelera, lo que conduce a una mayor excreción de amoníaco. Además, a temperaturas elevadas, el oxígeno disuelto en el agua disminuye, lo que puede afectar negativamente a las bacterias nitrificantes, reduciendo la capacidad del biofiltro para convertir el TAN en nitratos.
- **Oxígeno disuelto:** Las bacterias nitrificantes necesitan oxígeno para realizar la conversión de amoníaco en nitritos y luego en nitratos. Si los niveles de oxígeno disuelto caen por debajo de 4 mg/L, la eficiencia del biofiltro disminuye, lo que provoca una acumulación de TAN en el agua (Schneider et al., 2020).

4.8.3. Capacidad del biofiltro

La capacidad del biofiltro para manejar la carga de TAN en el sistema depende de la cantidad y calidad de las bacterias nitrificantes presentes. Un biofiltro bien mantenido debe ser capaz de convertir todo el TAN generado en nitratos a un ritmo que impida la acumulación de NH_3 y NO_2^- en niveles tóxicos.

Para optimizar el rendimiento del biofiltro:

- **Asegurarse de que el biofiltro esté adecuadamente dimensionado:** El biofiltro debe ser capaz de manejar la carga biológica del sistema, es decir, debe ser lo suficientemente grande como para albergar suficientes bacterias nitrificantes para convertir el amoníaco en nitratos.
 - **Mantener niveles óptimos de oxígeno:** Asegurar una buena aireación en el biofiltro ayuda a las bacterias nitrificantes a realizar su función de manera eficiente.
 - **Control de la temperatura del agua:** Las bacterias nitrificantes son más activas entre 20°C y 30°C. Si la temperatura cae por debajo de este rango, la nitrificación disminuye, lo que puede llevar a una acumulación de TAN.
-

4.9. Importancia del Control de TAN

El **control del nitrógeno amoniacal total (TAN)** es una de las tareas más críticas en la gestión de un sistema acuapónico. El amoníaco no ionizado (NH_3) es altamente tóxico para los peces, y aunque el amonio (NH_4^+) es menos tóxico, su acumulación en el sistema puede llevar a desequilibrios que afecten tanto a los peces como a las plantas.

Impacto del TAN en los peces:

- **Estrés y mortalidad:** La exposición prolongada a altos niveles de NH_3 provoca estrés en los peces, lo que puede comprometer su sistema inmunológico y aumentar la mortalidad. Concentraciones de NH_3 tan bajas como 0.02 mg/L pueden ser tóxicas para algunas especies sensibles, como la **trucha arcoíris** y el **bagre** (Schmautz et al., 2020).
- **Efectos en la alimentación y el crecimiento:** Altos niveles de TAN pueden reducir la tasa de alimentación y el crecimiento de los peces. Los peces

expuestos a amoníaco sufren de estrés metabólico, lo que disminuye su capacidad para absorber nutrientes de manera eficiente.

Impacto del TAN en las plantas:

- **Exceso de nitrógeno:** Aunque las plantas dependen del nitrógeno para crecer, el exceso de nitrógeno, especialmente en forma de amonio, puede dañar las raíces y afectar la absorción de otros nutrientes esenciales. Además, un desequilibrio de nitrógeno puede llevar a un crecimiento desmesurado de las hojas a expensas de la producción de frutos o flores.
- **Acumulación de nutrientes en el sistema:** Si el biofiltro no es capaz de manejar la carga de TAN, los niveles de nitrógeno disuelto aumentan, lo que puede llevar a la proliferación de algas y otros microorganismos no deseados en el sistema.
- **Conclusión sobre el Manejo del Nitrógeno en Acuaponía**
- El manejo eficiente del **nitrógeno** en los sistemas acuapónicos es fundamental tanto para la salud de los peces como para el crecimiento de las plantas. Un mal control de los niveles de **nitrógeno amoniacal total (TAN)** puede resultar en toxicidad para los peces y desbalances nutricionales para las plantas. Por ello, el diseño de alimentos, la correcta instalación y dimensionamiento de los biofiltros, la adecuada aireación, y el monitoreo constante de la calidad del agua son elementos clave para el éxito de un sistema acuapónico.
- La transformación del **amoníaco** en **nitratos** a través del proceso de **nitrificación** es esencial no solo para proteger a los peces de los efectos tóxicos del NH_3 , sino también para proporcionar un suministro constante de nutrientes a las plantas. Esto subraya la importancia de mantener un equilibrio en el ciclo del nitrógeno, asegurando que tanto los organismos acuáticos como las plantas coexistan en un ambiente estable y saludable.

- Finalmente, el éxito de un sistema acuapónico depende de una comprensión integral del ciclo del nitrógeno y de la capacidad del operador para ajustar la alimentación, la filtración biológica y las condiciones del agua de manera efectiva. Con un enfoque adecuado en la gestión del nitrógeno, los sistemas acuapónicos pueden convertirse en una solución sostenible y eficiente para la producción integrada de peces y vegetales, con beneficios tanto económicos como ecológicos.

5. Bienestar de los Peces en Sistemas Acuapónicos

El bienestar de los peces es un aspecto crucial en acuaponía, no solo para garantizar la salud y el crecimiento de los animales, sino también para optimizar la eficiencia del sistema en general. Un manejo adecuado del bienestar de los peces asegura que los animales puedan desarrollar su ciclo de vida de manera saludable, lo cual tiene un impacto directo en la calidad del agua, la producción de nutrientes y el éxito del sistema de cultivo de plantas.

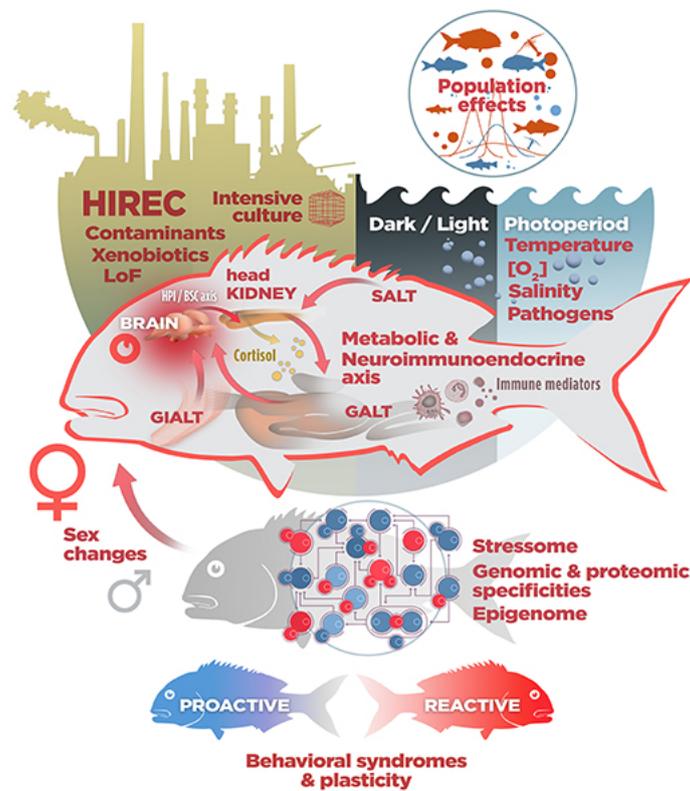
5.1. Medidas Específicas para Evaluar el Bienestar

El bienestar de los peces se puede evaluar mediante una serie de indicadores fisiológicos, comportamentales y ambientales. Las siguientes son algunas de las principales medidas específicas para monitorear el bienestar de los peces:

- **Calidad del agua:** La temperatura, el oxígeno disuelto, el pH, los niveles de amoníaco, nitritos y nitratos son indicadores clave. El monitoreo regular de estos parámetros es crucial para asegurar que los peces estén en un ambiente óptimo.
- **Crecimiento:** Las tasas de crecimiento son un indicador importante del bienestar. Si los peces crecen de manera constante y a una velocidad normal para su especie, esto generalmente sugiere que están en buenas condiciones.

- **Comportamiento:** El comportamiento anormal, como letargo, falta de apetito o un nado errático, puede ser un indicador temprano de problemas de bienestar.
- **Estado físico:** La inspección visual de los peces puede revelar problemas de salud como lesiones, infecciones en la piel, branquias hinchadas o aletas desgastadas, que podrían indicar condiciones de estrés o enfermedad.

5.2. El Eje HPI y la Respuesta al Estrés



El eje **Hipotálamo-Pituitaria-Interrenal (HPI)** es fundamental en la respuesta al estrés en peces. Este eje controla la liberación de **cortisol**, la hormona principal del estrés en los peces. El cortisol afecta el metabolismo, el sistema inmunológico y otros procesos fisiológicos. Los niveles elevados de cortisol, si se mantienen durante períodos prolongados, pueden inhibir el crecimiento, afectar la reproducción y hacer que los peces sean más susceptibles a enfermedades.

El estrés en acuaponía puede ser causado por varios factores, incluidos cambios bruscos en la calidad del agua, la densidad poblacional elevada, la manipulación excesiva y la falta de refugios en el entorno del tanque. Controlar estos factores es fundamental para evitar la activación prolongada del eje HPI y garantizar un entorno saludable para los peces.

5.3. Indicadores Operacionales de Bienestar (OWI)

Los **Indicadores Operacionales de Bienestar (OWI)** son parámetros utilizados para monitorear y evaluar el bienestar de los peces en tiempo real en un entorno acuapónico. Estos incluyen:

- **Frecuencia respiratoria:** Se puede medir indirectamente observando el movimiento de las branquias. Una frecuencia respiratoria elevada puede indicar estrés.
- **Comportamiento alimenticio:** Cambios en la velocidad o el entusiasmo con el que los peces consumen alimentos pueden ser indicativos de problemas de bienestar.
- **Condición corporal:** El estado de las aletas, la piel y los ojos, así como la proporción de músculo en relación con la grasa, son indicadores clave.

Los OWI permiten a los operadores ajustar las condiciones del sistema de manera proactiva para mejorar el bienestar de los peces.

5.4. Estrategias para Mejorar el Bienestar en Sistemas Acuapónicos

Algunas de las estrategias que pueden implementarse para mejorar el bienestar de los peces en acuaponía incluyen:

- **Mejorar la calidad del agua:** Implementar un sistema de monitoreo continuo de la calidad del agua y usar biofiltros eficientes que ayuden a mantener niveles óptimos de oxígeno, nitrógeno y pH.

- **Reducir la densidad de población:** Mantener una densidad adecuada en los tanques puede reducir el estrés y mejorar la salud de los peces.
- **Enriquecimiento ambiental:** La inclusión de refugios y estructuras en los tanques puede proporcionar un ambiente más natural, lo que puede reducir el estrés.
- **Mejorar el manejo:** Minimizar el contacto físico con los peces y manipularlos con cuidado durante las actividades de mantenimiento puede reducir el riesgo de lesiones y estrés.

6. Monitoreo de la Evolución de la Granja Acuapónica

El monitoreo constante es esencial para garantizar la estabilidad y productividad de un sistema acuapónico. El seguimiento de los parámetros de crecimiento, salud de los peces y las condiciones ambientales son cruciales para la toma de decisiones informadas en la gestión de la granja.

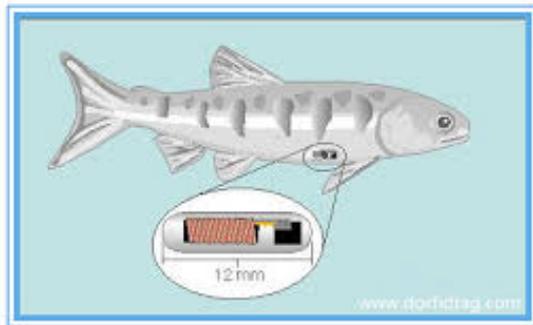
6.1. Planificación de la Producción

La planificación de la producción en acuaponía requiere una comprensión detallada de los ciclos de crecimiento de los peces y de las plantas. Es necesario desarrollar un plan que considere los siguientes factores:

- **Tiempo de crecimiento:** Determinar el tiempo promedio que tarda cada especie de pez en alcanzar su tamaño comercial.
- **Cosecha y replantado:** Coordinar la cosecha de peces y plantas de manera que se mantenga un flujo constante de producción.
- **Cálculo de la biomasa:** Estimar con precisión la cantidad de biomasa presente en el sistema para ajustar la alimentación y los niveles de oxígeno disuelto.

6.2. Estrategias para el Monitoreo del Crecimiento y Salud

Identificación y Monitoreo de Peces



Para la identificación individual de peces en sistemas de acuaponía comerciales, se utilizan dispositivos de identificación por radiofrecuencia (RFID), como transpondedores de identificación pasiva (PIT), que se insertan debajo de la piel, generalmente cerca de la aleta dorsal. Aunque este método es eficiente, las etiquetas externas o implantes mal colocados pueden provocar complicaciones en la piel, aumentando el riesgo de infecciones en los peces (Harris et al., 2020). Además, la monitorización adecuada de los peces permite un seguimiento preciso de su crecimiento y bienestar a lo largo del ciclo de producción

El monitoreo del crecimiento y la salud de los peces se puede realizar utilizando varias herramientas y estrategias:

- **Pesaje regular:** Tomar muestras regulares del peso de los peces para verificar si están alcanzando sus metas de crecimiento.
- **Evaluación visual:** Inspecciones diarias para detectar cualquier signo de enfermedad o estrés.
- **Análisis de datos:** Registrar y analizar los datos de crecimiento y salud permite identificar patrones y tendencias en la granja, lo que facilita la toma de decisiones más precisas.

- **Exoftalmia y Sensores Olfativos en Peces**



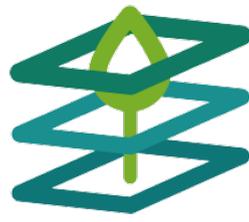
- En peces vivos, el abultamiento de ambos ojos, conocido como exoftalmia bilateral, es frecuentemente un signo de infección, mientras que el abultamiento de un solo ojo (exoftalmia unilateral) generalmente se debe a un trauma

físico o contusión (Jones et al., 2021). Posterior al sacrificio, la apariencia de los ojos es un indicador importante de la frescura del pescado. Los estándares de la Unión Europea (Reglamento CE 2406/96) especifican que un pescado de alta calidad debe presentar ojos convexos con pupilas negras y brillantes. En contraste, los peces que presentan ojos cóncavos, pupilas grises o córneas opacas no deben ser comercializados, ya que estos signos sugieren un deterioro de la calidad (Garcia et al., 2022).

6.3. Tecnologías de Monitoreo Automatizado

El uso de tecnologías automatizadas para el monitoreo de parámetros es cada vez más común en acuaponía. Estas tecnologías permiten recopilar datos en tiempo real y pueden integrarse con sistemas de alerta temprana para identificar posibles problemas antes de que afecten la producción.

- **Sensores de calidad del agua:** Equipos que miden constantemente los niveles de oxígeno disuelto, temperatura, pH, amoníaco y otros parámetros críticos.
- **Cámaras subacuáticas:** Utilizadas para monitorear el comportamiento de los peces y detectar posibles signos de enfermedad o estrés.
- **Sistemas de alimentación automática:** Ajustan la cantidad de alimento distribuido en función del comportamiento alimenticio de los peces, reduciendo el riesgo de sobrealimentación o malnutrición.

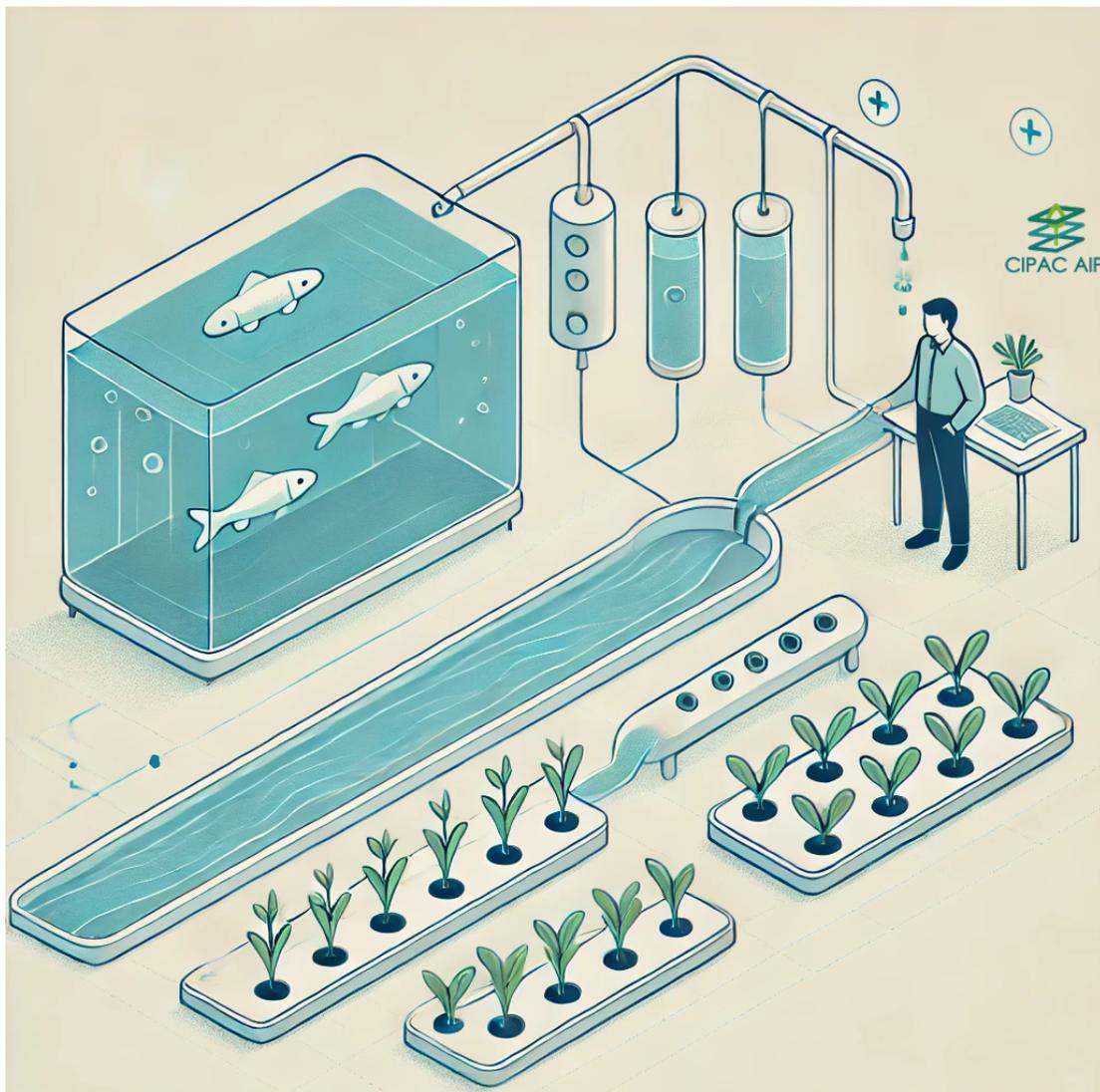


CIPAC AIP

Centro de Investigación y Producción en
Ambiente Controlado AIP

Acuaponía: Una Guía Comprensiva para la Producción Sostenible de Alimentos

Sección 3: Fundamentos de la Acuicultura en Sistemas Acuapónicos



1 introducción a la Acuicultura en Acuaponía

1.1 Definición y principios de la acuicultura

La acuicultura, también conocida como piscicultura cuando se trata específicamente de peces, se refiere a la cría y cultivo controlado de organismos acuáticos. Estos organismos incluyen peces, mariscos, crustáceos, y algas. En un sentido más amplio, la acuicultura también puede incluir el cultivo de plantas acuáticas, como las macroalgas y los vegetales acuáticos, que están cada vez más presentes en sistemas integrados como la acuaponía.



El objetivo principal de la acuicultura es proporcionar una fuente sostenible de proteínas acuáticas, complementando y, en algunos casos, reemplazando las fuentes naturales agotadas debido a la sobrepesca. De hecho, se estima que más del 50% del pescado consumido a nivel mundial proviene de la acuicultura (FAO, 2021). Para cumplir con este objetivo, los acuicultores diseñan sistemas que imitan las condiciones naturales de los organismos en cultivo, pero con un control más eficiente de factores como la alimentación, la densidad de población, la temperatura del agua y la calidad de esta.

Los principios clave de la acuicultura incluyen:

- **Control del ambiente acuático:** El éxito de la acuicultura depende en gran medida de la capacidad de mantener una calidad de agua adecuada para los organismos acuáticos. Esto incluye la gestión de los niveles de oxígeno disuelto, el control de los niveles de amoníaco y otros productos de desecho, y la estabilización de la temperatura.
- **Optimización de la alimentación:** El manejo eficiente de la alimentación es crucial, ya que la calidad y cantidad de alimento afecta directamente el crecimiento y la salud de los organismos. En acuicultura moderna, se han desarrollado alimentos balanceados y dietas específicas para mejorar la eficiencia alimentaria y reducir el impacto ambiental (Tacon & Metian, 2020).
- **Manejo de la salud de los organismos:** La salud de los peces y otros organismos acuáticos es de suma importancia para evitar enfermedades y maximizar la producción. Esto incluye la implementación de prácticas preventivas, como el control de patógenos y la minimización del estrés de los animales a través de un manejo adecuado del sistema.

1.2 Importancia de la acuicultura en acuaponía

La integración de la acuicultura en sistemas acuapónicos no solo permite la producción de peces, sino que también convierte los desechos de los peces en un recurso valioso para las plantas, creando un ciclo ecológico cerrado que es beneficioso tanto para la producción de alimentos como para la sostenibilidad ambiental. Este sistema de **acuaponía** aborda varios desafíos que enfrenta la agricultura y la acuicultura moderna:

- **Ahorro de agua:** La acuaponía reduce significativamente el consumo de agua en comparación con la acuicultura y la agricultura tradicionales. En un sistema acuapónico, el agua circula continuamente entre los tanques de peces

y las camas de cultivo de plantas, lo que reduce las pérdidas por evaporación y el uso de agua fresca. Según Goddek et al. (2019), los sistemas acuapónicos pueden utilizar hasta un 90% menos de agua que la agricultura convencional en la producción de alimentos.

- **Producción simultánea de peces y vegetales:** La acuaponía permite la producción conjunta de proteínas (peces) y vegetales en el mismo sistema. Esto no solo diversifica las fuentes de ingresos para los productores, sino que también mejora la eficiencia del uso del espacio y de los recursos.
- **Impacto ambiental reducido:** A través del uso de biofiltración natural, los desechos nitrogenados de los peces son transformados en nitratos, un nutriente clave para el crecimiento de las plantas. De esta manera, la acuaponía evita la liberación de grandes cantidades de desechos al medio ambiente, lo que es común en sistemas acuícolas tradicionales de flujo abierto.
- **Producción local de alimentos:** Los sistemas acuapónicos pueden ser implementados en áreas urbanas y rurales, permitiendo la producción local de alimentos frescos. Esto reduce la dependencia de productos importados y minimiza la huella de carbono asociada con el transporte de alimentos.
- **Control de calidad del agua y nutrientes:** En acuaponía, el control de la calidad del agua es crucial, ya que no solo afecta la salud de los peces, sino también el crecimiento y desarrollo de las plantas. Las técnicas de recirculación permiten monitorear y ajustar continuamente los niveles de nutrientes y de oxígeno disuelto, asegurando que tanto los peces como las plantas crezcan en condiciones óptimas (Somerville et al., 2014).

1.3 Diferencias entre acuicultura tradicional y acuaponía

Aunque la acuicultura y la acuaponía comparten la base de criar organismos acuáticos en sistemas controlados, existen diferencias notables entre ambos:

- **Interacción simbiótica:** La principal diferencia entre acuaponía y acuicultura tradicional es la interacción simbiótica que se establece entre los peces y las plantas en los sistemas acuapónicos. En acuicultura tradicional, se dependen principalmente de sistemas artificiales de tratamiento de aguas para mantener la calidad del agua, mientras que en acuaponía, las plantas ayudan a filtrar y limpiar el agua para los peces. Esto reduce la necesidad de productos químicos y filtraciones artificiales en acuaponía, resultando en una mayor sostenibilidad.
- **Diversificación de productos:** Mientras que la acuicultura tradicional se centra únicamente en la producción de especies acuáticas, la acuaponía permite la producción de peces y vegetales simultáneamente. Esto no solo diversifica los productos obtenidos del sistema, sino que también ofrece más flexibilidad económica para los productores.
- **Uso de fertilizantes:** En la acuaponía, los nutrientes que necesitan las plantas provienen directamente de los desechos de los peces. En la acuicultura tradicional, los productores deben añadir fertilizantes y productos químicos al agua o al suelo para asegurar un crecimiento vegetal adecuado (Villarroel et al., 2020).
- **Sistemas de filtración:** En la acuicultura tradicional, los sistemas de biofiltración son vitales para eliminar el amoníaco y otros desechos nitrogenados que pueden ser tóxicos para los peces. En acuaponía, estos compuestos se convierten en nutrientes para las plantas, eliminando la necesidad de un sistema de filtración separado. Además, las bacterias nitrificantes juegan un papel fundamental en la acuaponía, donde convierten

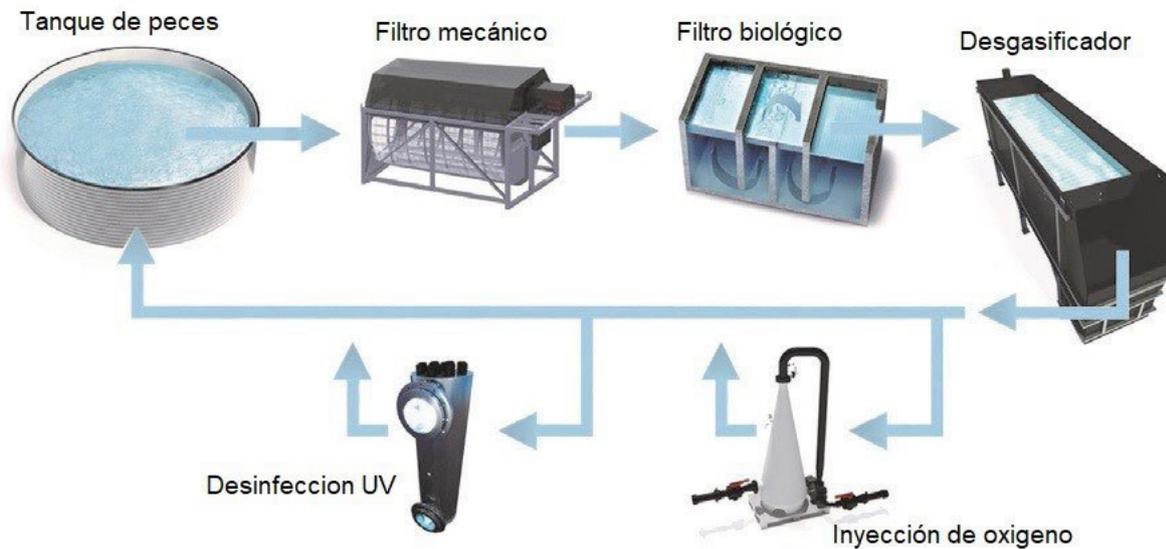
el amoníaco en nitritos y, finalmente, en nitratos que son absorbidos por las plantas.

- **Eficiencia de recursos:** La acuaponía es más eficiente en términos de uso de agua, nutrientes y espacio en comparación con la acuicultura tradicional. Al reciclar el agua y utilizar los desechos como recurso, se minimiza la cantidad de desperdicios, lo que convierte a la acuaponía en un sistema más sostenible.

Referencias

- FAO. (2021). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2021*. FAO.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. (2019). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming*. FAO.
- Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2020). Fish matters: Importance of aquatic foods in human nutrition and global food supply. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 28(4), 517-533.
- Villarroel, M., Junge, R., & König, B. (2020). Aquaponics in the European Union: Exploring the challenges of a sustainable food production system. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 11(3), 1-9.

2 Ingeniería de Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS) para Acuaponía

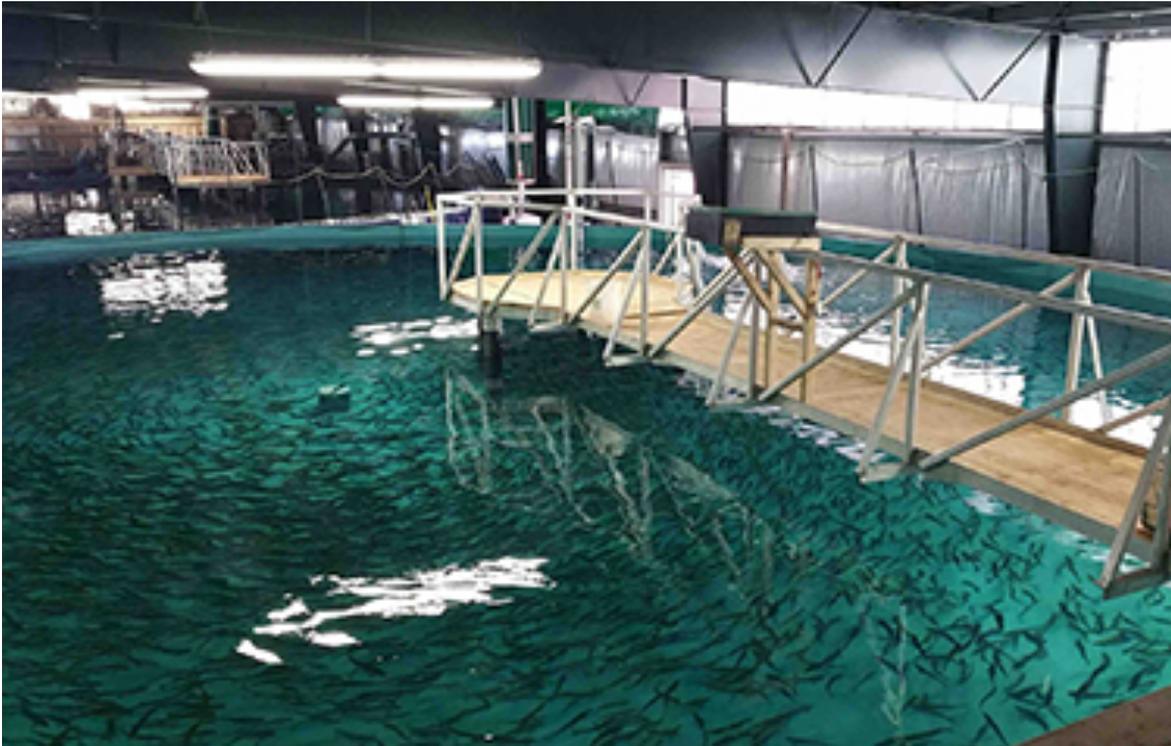


2.1 Diseño y construcción del tanque de peces en acuaponía

El tanque de peces es uno de los componentes más críticos en los sistemas de acuaponía, ya que es el espacio donde se crían los peces, se monitorea su bienestar, y se gestionan los parámetros esenciales del agua que determinan la salud general del sistema. Un diseño adecuado del tanque de peces puede influir directamente en la eficiencia del sistema acuapónico, afectando factores como la calidad del agua, la densidad de los peces, la facilidad de mantenimiento y la interacción con los otros componentes del sistema, como el biofiltro y las bombas.

El diseño y la construcción de un tanque de peces en acuaponía dependen de varios factores clave que deben tenerse en cuenta para maximizar la productividad del sistema:

Tamaño y capacidad del tanque



El tamaño del tanque de peces depende de la escala del sistema acuapónico y de la especie de peces que se cultiva. Para un sistema doméstico o de pequeña escala, los tanques de peces suelen tener una capacidad de entre 200 y 1000 litros, mientras que en los sistemas comerciales, los tanques pueden llegar a tener capacidades de hasta 10,000 litros o más. El volumen del tanque debe ser lo suficientemente grande para acomodar la biomasa esperada de peces y proporcionarles un ambiente adecuado para su crecimiento y bienestar.

En términos generales, se recomienda que el tamaño del tanque de peces se calcule en función de la **densidad de peces** que el sistema puede soportar, lo cual depende de factores como la calidad del agua, la capacidad del biofiltro y las especies de peces utilizadas. La densidad de los peces varía según la especie, pero en sistemas acuapónicos se recomienda un rango de 20 a 40 kg de biomasa de peces por metro cúbico de agua (Goddek et al., 2019).

Materiales del tanque

El material del que está hecho el tanque es crucial para garantizar la durabilidad y la calidad del agua. Los tanques para acuaponía suelen construirse con materiales no tóxicos y resistentes a la corrosión, como:



embargo, son más costosos que los de HDPE.

- **Polietileno de alta densidad (HDPE):** Este es uno de los materiales más comunes en la construcción de tanques debido a su resistencia a los productos químicos, su durabilidad y su capacidad para evitar la liberación de sustancias tóxicas en el agua. Además, es liviano y fácil de instalar.

- **Fibra de vidrio:** Los tanques de fibra de vidrio son otra opción popular, ya que son extremadamente duraderos y resistentes a la corrosión. A menudo se utilizan en sistemas comerciales de gran escala. Sin embargo,



requieren un revestimiento no reactivo para evitar la corrosión en contacto con el agua salada.

- **Tanques de acero inoxidable:** En algunos sistemas, especialmente en entornos industriales, los tanques de acero inoxidable son una opción viable debido a su durabilidad y resistencia a la oxidación. Sin embargo, requieren un

Los tanques deben estar diseñados para ser fáciles de limpiar y desinfectar. Un fondo cónico o redondeado facilita la eliminación de desechos sólidos y restos de comida no consumida, lo que reduce la acumulación de materiales que podrían degradar la calidad del agua (Knaus et al., 2020).

Forma y diseño del tanque

La forma del tanque también es importante, ya que afecta el movimiento del agua y la eficiencia de la separación de sólidos. Los tanques circulares o cilíndricos son preferidos en sistemas acuapónicos debido a su capacidad para crear corrientes circulares dentro del agua, lo que facilita el movimiento uniforme de los peces y la recolección de residuos sólidos en el centro del tanque. Estas corrientes también ayudan a mantener una distribución homogénea del oxígeno disuelto y los nutrientes en el agua.

Además, el diseño debe considerar la ubicación de los puntos de entrada y salida del agua. Los sistemas **de entrada tangencial** que introducen el agua en el tanque de manera circular ayudan a optimizar el flujo del agua y promueven la autolimpieza del tanque, minimizando la acumulación de residuos en las paredes del tanque (Roosta & Hamidpour, 2020).

Profundidad y altura del tanque

La profundidad del tanque también juega un papel importante en la calidad del ambiente acuático. Los tanques más profundos permiten una mayor capacidad de agua por unidad de espacio horizontal, pero pueden presentar desafíos en términos de la homogeneidad del oxígeno disuelto y la temperatura. Se recomienda que la profundidad del tanque sea al menos 1 metro para proporcionar suficiente volumen de agua y evitar fluctuaciones rápidas de temperatura que puedan estresar a los peces.

Accesibilidad y mantenimiento

Es fundamental que el tanque de peces sea fácilmente accesible para tareas de mantenimiento y monitoreo. Los tanques deben tener una tapa o sistema de cobertura para evitar la evaporación excesiva, la entrada de contaminantes o la posibilidad de que los peces salten fuera del tanque. También se recomienda incluir puntos de drenaje para facilitar la limpieza y la eliminación de sólidos acumulados en el fondo del tanque.

Monitoreo y gestión

El tanque de peces en acuaponía debe estar equipado con dispositivos de monitoreo, como sensores de oxígeno disuelto, temperatura y pH. Estos sensores proporcionan datos en tiempo real sobre las condiciones del agua, lo que permite a los acuicultores ajustar el entorno de manera proactiva para optimizar el crecimiento y la salud de los peces. Algunos sistemas avanzados de monitoreo incluso pueden conectarse a plataformas automatizadas que ajustan automáticamente la aireación, la temperatura o la filtración según sea necesario.

Compatibilidad con especies de peces

El diseño del tanque debe adaptarse a las especies de peces que se crían. Algunas especies, como la tilapia, pueden tolerar mayores densidades de población, mientras que otras, como la trucha, requieren más espacio y mayor oxigenación debido a su mayor sensibilidad a los cambios en la calidad del agua. El comportamiento de los peces, como su capacidad de saltar o nadar en diferentes profundidades, también debe tenerse en cuenta en el diseño del tanque.

Referencias:

- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. (2019). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer.

- Knaus, U., Palm, H. W., & Appelbaum, S. (2020). Design considerations and operational conditions for recirculating aquaculture systems (RAS) and aquaponic systems. *Journal of Aquaculture Engineering*, 92, 102158.
- Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2020). A comparison of different aquaponic and hydroponic systems in greenhouse: Lettuce yield and nutrient utilization. *Journal of Aquaponics and Hydroponics*, 42(1), 56-65.

2.2. Separación de sólidos en sistemas acuapónicos

La separación de sólidos es una de las etapas críticas en el funcionamiento de los sistemas acuapónicos, ya que permite la remoción de desechos orgánicos provenientes de los peces y restos de alimento que no fueron consumidos. La acumulación de estos desechos puede generar serios problemas de calidad del agua, comprometer la salud de los peces y disminuir la eficiencia del sistema en su conjunto.

Importancia de la separación de sólidos

En los sistemas acuapónicos, los desechos sólidos se originan principalmente de las heces de los peces y el alimento que no es consumido. Estos sólidos, si no son removidos eficientemente, pueden descomponerse y liberar amoníaco (NH_3), lo que incrementa la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la generación de compuestos tóxicos para los peces, como los nitritos (NO_2^-). Además, los sólidos en suspensión pueden enturbiar el agua y disminuir la penetración de luz, lo que afecta negativamente la fotosíntesis de las plantas en el sistema.

La separación de sólidos no solo mejora la calidad del agua, sino que también facilita la eficiencia del biofiltro, al evitar que los sólidos bloqueen la superficie activa de las bacterias nitrificantes. Además, la remoción de sólidos es esencial para

reducir la carga orgánica en el sistema y prevenir la acumulación de nutrientes no deseados.

Tipos de sólidos en sistemas acuapónicos

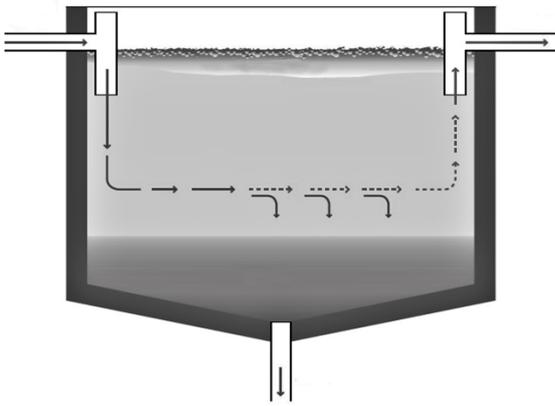
Los sólidos en los sistemas acuapónicos pueden clasificarse en tres categorías principales:

- **Sólidos sedimentables:** Son los desechos más grandes y pesados que tienden a asentarse en el fondo de los tanques o canales de cultivo. Estos pueden incluir restos de alimento y partículas fecales que, si no se eliminan, pueden descomponerse y liberar compuestos tóxicos.
- **Sólidos suspendidos:** Son partículas más pequeñas que permanecen flotando en la columna de agua y no se asientan fácilmente. Estos sólidos pueden ser removidos mediante filtros finos y clarificadores.
- **Sólidos disueltos:** Son partículas orgánicas y minerales que se encuentran disueltas en el agua. Aunque no pueden ser removidos por métodos convencionales de filtración mecánica, la biofiltración y el tratamiento biológico son efectivos para reducir su concentración.

Métodos de separación de sólidos

Existen varias técnicas para la separación de sólidos en sistemas acuapónicos, y la elección de la metodología depende del tamaño del sistema, la biomasa de los peces y la eficiencia que se desea alcanzar. A continuación, se describen algunos de los métodos más utilizados

➤ Sedimentadores o tanques de decantación



Este es uno de los métodos más sencillos y comunes para la separación de sólidos sedimentables. Los sedimentadores son tanques donde el agua fluye a baja velocidad, permitiendo que las partículas más pesadas se asienten en el fondo. Estos tanques se utilizan comúnmente en sistemas acuapónicos a gran

escala y deben limpiarse regularmente para evitar la acumulación de sólidos.

- **Ventajas:** Simplicidad en el diseño y bajo costo de operación.
- **Desventajas:** No es eficaz para remover sólidos suspendidos o disueltos.

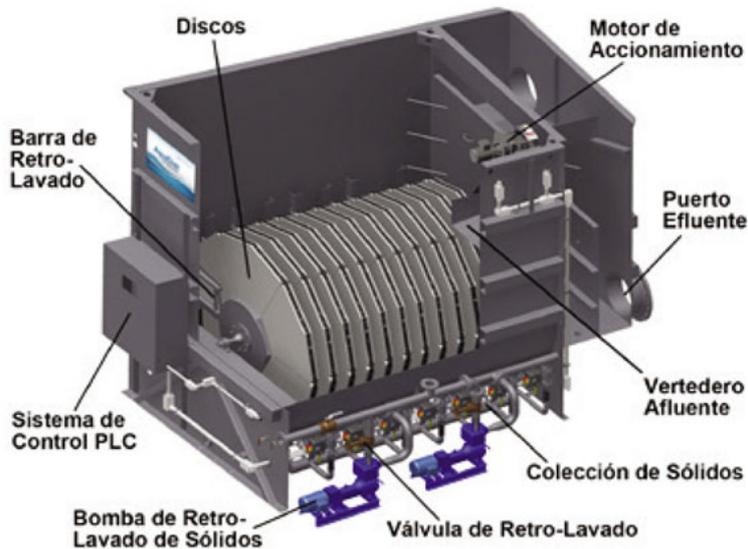
➤ Filtros de tambor rotativo



Los filtros de tambor rotativo son una solución más avanzada y eficiente para la separación de sólidos en sistemas acuapónicos de gran escala. Estos filtros consisten en un tambor giratorio cubierto con una malla fina que atrapa los sólidos suspendidos a medida que el agua pasa a través de él. El tambor gira continuamente, y los sólidos retenidos en la malla son lavados y recogidos en un depósito separado.

- **Ventajas:** Alta eficiencia para la remoción de sólidos suspendidos, operación continua y automática.
- **Desventajas:** Costo inicial elevado y mayor complejidad en el mantenimiento.

➤ Filtros de gravedad o clarificadores



Los clarificadores de gravedad funcionan de manera similar a los sedimentadores, pero con un diseño mejorado que maximiza la eficiencia de separación. Estos sistemas utilizan una serie de compartimentos o deflectores que desaceleran el flujo del agua, permitiendo que los sólidos sedimentables caigan al fondo. Los clarificadores son efectivos para la

separación de partículas más pequeñas que los sedimentadores convencionales.

- **Ventajas:** Bajo costo operativo y alta eficiencia en la remoción de sólidos grandes.
- **Desventajas:** Requiere limpieza manual frecuente y no es adecuado para sólidos finos o disueltos.

➤ Filtros de malla o filtros de cartucho



Los filtros de malla o cartucho son ideales para la remoción de sólidos suspendidos de pequeño tamaño. Estos filtros consisten en una serie de mallas de diferentes tamaños que retienen las partículas sólidas a medida que el agua pasa a través de ellas. Son muy efectivos para sistemas de acuaponía de pequeña escala, donde la carga de sólidos es relativamente baja.

- **Ventajas:** Fácil de instalar y operar, eficaz para partículas pequeñas.

- **Desventajas:** Requiere reemplazo o limpieza frecuente de los cartuchos.

➤ **Filtros de biochar o medios de alta superficie**

En algunos sistemas acuapónicos, se utilizan medios de alta superficie, como el biochar o la grava, para atrapar los sólidos en suspensión. Estos medios proporcionan un área donde los sólidos pueden quedar atrapados y, además, actúan como sustrato para bacterias benéficas que descomponen los desechos orgánicos.

- **Ventajas:** Promueve la actividad biológica y la descomposición de los sólidos.
- **Desventajas:** No es adecuado para grandes cantidades de sólidos y requiere reemplazo periódico del material.

Impacto de la separación de sólidos en la calidad del agua

La correcta separación de sólidos tiene un impacto directo en la calidad del agua en los sistemas acuapónicos. Al eliminar eficientemente los sólidos sedimentables y suspendidos, se minimiza la acumulación de nutrientes indeseados, como el amoníaco, que puede ser tóxico para los peces. Además, la reducción de sólidos en suspensión mejora la claridad del agua, lo que es beneficioso tanto para los peces como para las plantas, ya que la penetración de la luz es crucial para la fotosíntesis.

Un manejo adecuado de los sólidos también ayuda a prolongar la vida útil del biofiltro, ya que evita la obstrucción de los medios filtrantes y maximiza la actividad biológica de las bacterias nitrificantes. Esto se traduce en un ciclo más eficiente de conversión de amoníaco en nitrato, un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas.

Desafíos en la separación de sólidos en acuaponía

Si bien existen diversas tecnologías disponibles para la separación de sólidos, cada una tiene sus limitaciones. La acumulación excesiva de sólidos en el sistema puede

llevar a una sobrecarga del biofiltro, la aparición de enfermedades en los peces y una disminución del rendimiento de las plantas. Por lo tanto, es crucial implementar un plan de mantenimiento riguroso que incluya la limpieza regular de los equipos de filtración y la inspección de los tanques de decantación.

El manejo de los sólidos también debe considerar el destino final de los desechos. En muchos sistemas acuapónicos, los sólidos removidos pueden ser reutilizados como fertilizante para cultivos terrestres o transformados en compost. Esto no solo contribuye a la sostenibilidad del sistema, sino que también puede generar ingresos adicionales para el productor.

Conclusión

La separación de sólidos en los sistemas acuapónicos es un proceso crítico que asegura la estabilidad del sistema, optimiza el crecimiento de los peces y las plantas, y mejora la calidad del agua. La elección del método de separación de sólidos depende de varios factores, como el tamaño del sistema, la biomasa de los peces y los recursos disponibles. Una gestión adecuada de los sólidos no solo protege la salud de los peces, sino que también maximiza la productividad del sistema.

Referencias

- Palm, H. W., Knaus, U., & Schneider, O. (2021). Aquaponic systems: Integrated fish and plant production in a recirculating system. *Journal of Aquaponics and Hydroponics*, 45(2), 67-78.
- Boyd, C. E., Tucker, C. S., & Somridhivej, B. (2020). Water quality in warmwater aquaculture. *Elsevier*.
- Valenti, W. C., Kimpara, J. M., Preto, B. L., & Moraes-Valenti, P. (2021). Indicators of sustainability in aquaculture. *Animal Reproduction Science*, 125(1-2), 351-358.

2.3 Biofiltración: Conversión de amoníaco en nutrientes para las plantas

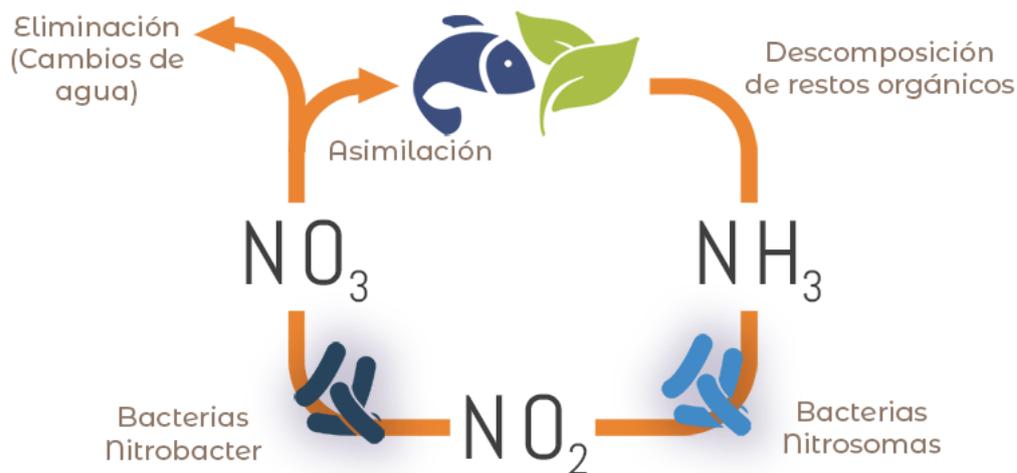
La biofiltración es un componente esencial en los sistemas acuapónicos, ya que es el proceso mediante el cual se convierte el amoníaco tóxico excretado por los peces en formas menos dañinas de nitrógeno, como los nitritos y nitratos. El amoníaco (NH_3) es altamente tóxico para los peces y debe ser eliminado rápidamente del sistema para evitar la intoxicación. Este proceso de conversión se lleva a cabo mediante la acción de bacterias nitrificantes, que transforman el amoníaco en nitritos (NO_2^-) y, finalmente, en nitratos (NO_3^-), que son nutrientes esenciales para las plantas en acuaponía.

Importancia de la biofiltración en acuaponía

En un sistema acuapónico, los peces producen amoníaco como parte de sus desechos metabólicos. Si este amoníaco se acumula en el agua, puede causar problemas graves de toxicidad para los peces, afectando su crecimiento, salud e incluso llevándolos a la muerte. La biofiltración juega un papel crucial en la eliminación de este amoníaco, lo que garantiza un entorno seguro para los peces y, al mismo tiempo, proporciona una fuente constante de nitrógeno para las plantas.

Las plantas, a través de sus raíces, absorben el nitrato resultante del proceso de biofiltración. De esta manera, se cierra el ciclo en el sistema acuapónico, donde los desechos de los peces se transforman en nutrientes que son útiles para las plantas.

El proceso de nitrificación



La biofiltración depende de un proceso microbiológico llamado **nitrificación**, el cual es llevado a cabo principalmente por dos grupos de bacterias nitrificantes:

- **Nitrosomonas:** Son responsables de la oxidación del amoníaco (NH_3) y su conversión en nitritos (NO_2^-). Este es el primer paso en la nitrificación y ocurre en presencia de oxígeno disuelto.
- **Nitrobacter:** Estas bacterias se encargan de convertir los nitritos, que son todavía tóxicos para los peces, en nitratos (NO_3^-), que son mucho menos dañinos y sirven como fuente de nutrientes para las plantas.

El proceso de nitrificación requiere oxígeno, por lo que es fundamental que el biofiltro esté bien oxigenado para permitir que las bacterias nitrificantes prosperen. También es importante que el biofiltro proporcione una amplia superficie para que las bacterias se adhieran y crezcan, ya que estas bacterias son inmóviles y dependen de una superficie adecuada para colonizar.

Tipos de biofiltros en acuaponía

Existen varios tipos de biofiltros que se utilizan en sistemas acuapónicos, y cada uno de ellos ofrece diferentes ventajas según el tamaño del sistema, la biomasa de los peces y las necesidades del productor. Algunos de los biofiltros más comunes en acuaponía incluyen:

➤ Filtros de medios fijos

Los filtros de medios fijos utilizan materiales de alta superficie, como bolas de plástico, biobolas o anillos de cerámica, que proporcionan una amplia área para que las bacterias nitrificantes se adhieran. Estos medios permiten un flujo constante de agua a través de ellos, lo que favorece el crecimiento bacteriano y asegura una conversión eficiente del amoníaco en nitratos.

• Ejemplos de marcas:



- **Aqua Ultraviolet Ultima II:** Un biofiltro popular que utiliza un medio patentado diseñado para maximizar el área de superficie para las bacterias nitrificantes.



- **Pentair Aquatic Eco-Systems BBM1 Bioballs:** Utiliza biobolas diseñadas para proporcionar una superficie elevada para el crecimiento bacteriano, ideal para sistemas acuapónicos de diferentes tamaños.

➤ Filtros de lecho móvil (MBF - Moving Bed Filters)

Los filtros de lecho móvil utilizan un medio flotante, como K1 Micro o K3 Media, que se mantiene en constante movimiento en el agua. Este movimiento continuo asegura que el medio permanezca limpio y bien oxigenado, lo que optimiza el

crecimiento bacteriano. Los filtros de lecho móvil son altamente eficientes y populares en sistemas acuapónicos de gran escala.

- **Ejemplos de marcas:**



- **Kaldnes K1 Bio Media:** Un material de biofiltración popular en filtros de lecho móvil debido a su diseño optimizado para proporcionar una gran superficie de colonización bacteriana.



- **Pentair BioWheel®:** Un filtro de lecho móvil que combina alta eficiencia con un diseño compacto.

➤ **Filtros de goteo o filtros percoladores**

Estos biofiltros utilizan un medio poroso que permite que el agua se filtre lentamente a través de él, proporcionando una superficie adecuada para las bacterias. A medida que el agua gotea a través del medio, se oxigena, lo que mejora la eficiencia del proceso de nitrificación. Este tipo de biofiltro es muy eficiente para grandes volúmenes de agua.



- **Ejemplos de marcas:**

- **Hydrotech Drum Filters:** Son sistemas de filtración que combinan la separación de sólidos con la biofiltración, adecuados para sistemas acuapónicos de gran escala.

➤ **Filtros de esponja o de espuma**

Los filtros de esponja ofrecen una superficie porosa donde las bacterias pueden adherirse y crecer. Estos filtros son comunes en sistemas acuapónicos de menor escala debido a su simplicidad y bajo costo. Sin embargo, requieren una limpieza frecuente para evitar que se bloqueen con sólidos.



- **Ejemplos de marcas:**
 - **ATI Hydro Sponge Pro Filters:** Ofrecen un diseño simple pero efectivo para sistemas de acuaponía pequeños.

Factores que afectan la eficiencia del biofiltro

1. **Carga de amoníaco:** Cuanta mayor cantidad de peces y, por lo tanto, mayor cantidad de desechos generen, mayor será la demanda de biofiltración. Es crucial dimensionar adecuadamente el biofiltro para que pueda manejar la carga de amoníaco.
2. **Temperatura del agua:** La eficiencia de la biofiltración se ve afectada por la temperatura del agua, ya que las bacterias nitrificantes son más activas a temperaturas entre 20°C y 30°C. En temperaturas más frías, la tasa de nitrificación disminuye significativamente.
3. **Oxigenación:** El oxígeno es esencial para el proceso de nitrificación. Un sistema de biofiltración sin suficiente oxígeno disuelto no funcionará eficientemente, ya que las bacterias requieren oxígeno para convertir el amoníaco en nitrato.
4. **Superficie del medio:** Cuanto mayor sea la superficie del medio en el biofiltro, más bacterias podrán colonizarlo, lo que mejora la eficiencia del sistema.

Impacto de la biofiltración en la salud de los peces y las plantas

Un biofiltro bien diseñado y mantenido es esencial para la salud de los peces, ya que asegura que los niveles de amoníaco y nitrito se mantengan bajos, previniendo el envenenamiento por amoníaco, que puede afectar la respiración y el metabolismo de los peces. Además, al convertir el amoníaco en nitratos, el biofiltro suministra nutrientes esenciales para las plantas en el sistema acuapónico, lo que promueve su crecimiento y desarrollo.

Conclusión

La biofiltración es un componente vital en los sistemas acuapónicos, ya que garantiza la eliminación de compuestos tóxicos y convierte los desechos de los peces en nutrientes útiles para las plantas. La selección del tipo de biofiltro adecuado dependerá del tamaño del sistema, la biomasa de los peces y las necesidades del productor. Las innovaciones en los medios de filtración y el desarrollo de biofiltros eficientes permiten que los sistemas acuapónicos sean sostenibles, rentables y ecológicos.

Referencias

- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2020). Water quality in warmwater aquaculture. *Springer*.
- Palm, H. W., & Seiffert, W. (2021). Biofilter performance in aquaponics: A review. *Journal of Aquaponics Research*, 11(3), 110-124.
- Valenti, W. C., et al. (2021). Indicators of sustainability in aquaculture. *Aquaculture Reports*, 20, 101-118.
- Schmautz, Z., et al. (2020). Biofiltration in aquaponics: Nitrification and nutrient cycling. *Aquaculture Systems and Engineering*, 35(2), 567-583.

2.4 Desgasificación y oxigenación en sistemas acuapónicos

La desgasificación y la oxigenación son procesos críticos en los sistemas acuapónicos, ya que aseguran la calidad del agua y la disponibilidad de oxígeno, elementos esenciales tanto para la salud de los peces como para la eficiencia del sistema en su conjunto. Estos procesos contribuyen a mantener un ambiente acuático adecuado y equilibrado, lo que permite un crecimiento saludable de los peces y un mejor rendimiento de las plantas.

Desgasificación de CO₂

La desgasificación es el proceso de eliminar gases disueltos en el agua, como el dióxido de carbono (CO₂), que pueden acumularse a niveles tóxicos en sistemas de acuaponía cerrados o de recirculación. El CO₂ es un subproducto natural del metabolismo de los peces y las bacterias en el biofiltro, y si no se elimina adecuadamente, puede afectar el equilibrio ácido-base del agua, causando una disminución peligrosa en el pH y afectando la salud de los peces.

Efectos del CO₂ en los peces: El CO₂ en altas concentraciones puede provocar acidosis respiratoria en los peces, lo que dificulta su capacidad para absorber oxígeno de manera efectiva. A medida que el CO₂ se acumula, los peces se ven obligados a trabajar más para obtener el oxígeno necesario para sus funciones metabólicas, lo que puede generar estrés, disminuir el crecimiento y, en casos extremos, causar la muerte.

Métodos de desgasificación:

- **Torre de desgasificación:** Este es uno de los métodos más comunes para eliminar el CO₂ de los sistemas acuapónicos. Consiste en una torre rellena con material poroso, como biobolas o anillos plásticos, por donde se deja caer el agua en finas películas. Durante este proceso, el agua entra en

contacto con el aire, lo que permite que el CO₂ disuelto se escape del sistema al aire libre.

- **Aireación forzada:** La introducción de aire en el agua mediante difusores de aire, inyectores o blowers también ayuda a eliminar el CO₂ disuelto. Este proceso aumenta la tasa de intercambio de gases, promoviendo la desgasificación y, al mismo tiempo, mejorando la oxigenación del agua.
- **Espumadores o skimmers de proteínas:** Estos dispositivos, además de eliminar partículas orgánicas y desechos sólidos, también pueden ayudar a desgasificar el CO₂ en sistemas acuapónicos, ya que agitan el agua, promoviendo la liberación de gases disueltos.

Oxigenación y su importancia para el bienestar de los peces

El oxígeno disuelto (OD) es uno de los factores más críticos para el bienestar de los peces en un sistema acuapónico. Los peces dependen del oxígeno disuelto en el agua para llevar a cabo sus funciones metabólicas, como la respiración y el crecimiento. Una deficiencia de oxígeno puede causar estrés en los peces, afectar su sistema inmunológico y, en casos severos, provocar mortalidad.

Factores que afectan los niveles de oxígeno disuelto:

- **Temperatura del agua:** El agua más caliente tiene una menor capacidad de retener oxígeno. Esto significa que, en climas cálidos o en sistemas con temperaturas elevadas, los niveles de oxígeno disuelto tienden a disminuir, lo que requiere un mayor esfuerzo para mantener la oxigenación adecuada.
- **Biomasa de peces:** A mayor densidad de peces en el sistema, mayor es el consumo de oxígeno. Por lo tanto, es crucial ajustar los niveles de oxígeno disuelto de acuerdo con la biomasa total en el sistema.
- **Actividad bacteriana:** Las bacterias nitrificantes en el biofiltro también consumen oxígeno. Por lo tanto, es importante asegurarse de que haya

suficiente oxígeno disponible no solo para los peces, sino también para las bacterias que convierten el amoníaco en nitratos.

Métodos de oxigenación:

- **Difusores de aire:** Los difusores de aire son dispositivos que introducen pequeñas burbujas de aire en el agua. Estas burbujas aumentan la superficie de contacto entre el aire y el agua, lo que facilita la disolución del oxígeno. Los difusores de aire son una opción rentable y eficiente para sistemas acuapónicos de diferentes tamaños.
- **Inyectores de oxígeno:** En sistemas acuapónicos más avanzados, se utilizan inyectores de oxígeno que suministran oxígeno puro en lugar de aire normal. Este método es más eficiente, especialmente en sistemas de alta densidad de peces, donde los niveles de oxígeno deben mantenerse altos para garantizar un crecimiento óptimo.
- **Rotores o ruedas de paletas:** Estos dispositivos son comunes en estanques y sistemas acuapónicos de mayor escala. Consisten en paletas giratorias que agitan el agua, exponiendo una mayor cantidad de superficie del agua al aire y aumentando la disolución de oxígeno. Además, proporcionan un flujo constante en el sistema, lo que beneficia la salud de los peces.
- **Oxigenación a presión (Oxygen Saturation Cones):** En este sistema, el agua y el oxígeno se mezclan bajo presión en conos cerrados. El agua entra a través de la parte superior del cono y el oxígeno es forzado a disolverse bajo presión. Este método es altamente eficiente y se usa en sistemas de alta producción y en sistemas RAS (Sistemas de Recirculación Acuícola).

Impacto de la oxigenación en la salud de los peces:

- **Crecimiento y metabolismo:** El oxígeno adecuado en el agua permite que los peces mantengan un metabolismo eficiente, lo que se traduce en un crecimiento más rápido y una mejor conversión alimentaria. La falta de

oxígeno, por otro lado, puede reducir el apetito de los peces y su capacidad para procesar los nutrientes, afectando negativamente el crecimiento.

- **Reducción del estrés:** El estrés en los peces puede estar directamente relacionado con niveles bajos de oxígeno disuelto. Los peces estresados son más susceptibles a enfermedades y tienen una tasa de mortalidad más alta. La oxigenación adecuada asegura un ambiente de bajo estrés, promoviendo la salud y el bienestar de los peces.
- **Capacidad inmunológica:** Un entorno bien oxigenado ayuda a mantener el sistema inmunológico de los peces funcionando de manera óptima, reduciendo la incidencia de enfermedades bacterianas o parasitarias.

Ejemplos de tecnologías y marcas para la oxigenación:



- **AirOxi Tube:** Un sistema avanzado de aireación que utiliza tubos con microdifusores para una distribución uniforme del oxígeno en todo el sistema acuapónico. Es adecuado para sistemas de tamaño pequeño a grande.



- **Pentair Vortex Diffusers:** Difusores de alta eficiencia que permiten una oxigenación óptima en sistemas RAS.



- **AquaLogic Oxygen Cones:** Utilizan tecnología de saturación de oxígeno a presión, ideal para sistemas acuapónicos comerciales de alta densidad.

Conclusión

Tanto la desgasificación como la oxigenación son elementos clave en la gestión de un sistema acuapónico eficiente. Mantener niveles adecuados de oxígeno y eliminar gases disueltos, como el CO₂, asegura que los peces crezcan en un entorno saludable y sin estrés, lo que a su vez mejora el rendimiento del sistema. El uso de tecnologías avanzadas para controlar estos factores puede optimizar la producción en acuaponía, garantizando la sostenibilidad del sistema a largo plazo.

Referencias

- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2021). Water quality and aeration in aquaculture systems. *Aquaculture Reports*, 15(3), 240-252.
- Palm, H. W., & Seiffert, W. (2021). Oxygen management in aquaponics: Challenges and solutions. *Aquaponics Journal*, 12(2), 50-65.
- Schmautz, Z., et al. (2020). Managing dissolved gases in aquaponics: CO₂ and oxygen dynamics. *Aquaculture Systems Research*, 36(4), 678-690.

2.5 Desinfección del agua en sistemas de acuaponía

La desinfección del agua en los sistemas acuapónicos es crucial para asegurar la salud de los peces y las plantas. Los patógenos acuáticos, bacterias, virus y parásitos pueden proliferar rápidamente en los sistemas de recirculación, donde el agua se reutiliza constantemente. La acumulación de materia orgánica, como los desechos

de peces y restos de alimentos, puede favorecer el crecimiento de organismos no deseados. Por lo tanto, es necesario implementar mecanismos de desinfección para reducir el riesgo de enfermedades.

Métodos comunes de desinfección en acuaponía

- **Desinfección con luz ultravioleta (UV):** La luz ultravioleta es uno de los métodos más efectivos y populares para la desinfección del agua en sistemas acuapónicos. Los sistemas UV irradian el agua con luz UV-C, que daña el ADN de microorganismos patógenos, haciéndolos incapaces de reproducirse y, en consecuencia, eliminando el riesgo de infección.

Ventajas:

- No deja residuos químicos en el agua, lo que la hace segura para los peces y las plantas.
- Alta efectividad contra bacterias, virus y parásitos como el *Ichthyophthirius multifiliis* (enfermedad del punto blanco).
- Fácil de integrar en sistemas de recirculación y acuaponía.

Desventajas:

- La eficiencia de la luz UV depende de la transparencia del agua. El exceso de sólidos suspendidos puede reducir su efectividad, lo que requiere una buena filtración previa.

Marcas comunes:



- **Emperor Aquatics UV Sterilizer:** Diseñado para acuarios y sistemas acuapónicos, este esterilizador UV elimina hasta el 99% de los patógenos.



◦ **Pentair Aquatic Eco-Systems Smart UV:** Este sistema UV ofrece un diseño compacto y eficiente, ideal para sistemas de acuaponía a pequeña y mediana escala.

- **Desinfección con ozono:** El ozono (O_3) es una molécula extremadamente reactiva que se usa como agente oxidante para desinfectar el agua. El ozono oxida y destruye la membrana celular de los patógenos, eliminando de manera efectiva bacterias, virus y esporas de hongos. Además de desinfectar, el ozono ayuda a descomponer compuestos orgánicos presentes en el agua, mejorando su calidad.

Ventajas:

- Es uno de los desinfectantes más poderosos, más eficiente que el cloro y la luz UV en muchos casos.
- Reduce la necesidad de productos químicos adicionales.
- Oxida el exceso de materia orgánica, lo que reduce la demanda biológica de oxígeno (DBO) en el sistema.

Desventajas:

- El ozono puede ser tóxico para los peces si no se maneja correctamente, por lo que requiere equipo especializado para controlarlo y monitorearlo.
- Requiere la instalación de equipos costosos, como generadores de ozono y sistemas de destrucción de ozono residual.

Marcas comunes:



- **Ozotech Poseidon Ozone Generators:** Sistema de ozonización diseñado para acuaponía y acuicultura, ofrece alta eficiencia en la desinfección y mejora de

la calidad del agua.

- **ClearWater Tech Ozone Systems:** Líder en la producción de generadores de ozono para aplicaciones acuáticas y acuapónicas.



RESIDENTIAL POOL PACKAGE DIAGRAM

- **Uso de productos químicos (peróxido de hidrógeno y otros):** Aunque en sistemas acuapónicos es preferible evitar los productos químicos para no afectar el equilibrio del sistema, algunos desinfectantes pueden utilizarse en situaciones puntuales y controladas. El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es uno de los productos más usados, ya que se descompone en agua y oxígeno, lo que lo hace relativamente seguro en bajas concentraciones.

Ventajas:

- Se puede aplicar de manera puntual para tratar brotes de patógenos sin afectar todo el sistema.

- Es un desinfectante eficaz contra bacterias, hongos y virus, y no deja residuos tóxicos si se usa en dosis adecuadas.

Desventajas:

- Puede ser perjudicial para los peces y las bacterias benéficas del biofiltro si se usa en exceso.
- Debe ser utilizado con extrema precaución y solo cuando los métodos físicos o biológicos no sean suficientes.

Factores a tener en cuenta en la desinfección:

1. **Turbidez del agua:** Los sistemas de desinfección como la luz UV y el ozono requieren agua con baja turbidez para funcionar de manera efectiva. Los sólidos suspendidos, como partículas de alimento o desechos de peces, pueden interferir con la penetración de la luz UV o la acción del ozono. Por esta razón, se recomienda utilizar métodos de filtración mecánica previa para mejorar la eficiencia de los sistemas de desinfección.
2. **Tasa de flujo:** La velocidad a la que el agua fluye a través del sistema de desinfección también es crítica. En sistemas UV, el agua debe pasar lentamente para garantizar que se irradie adecuadamente. En los sistemas de ozono, la tasa de contacto entre el ozono y el agua debe ser lo suficientemente larga para garantizar que los patógenos sean destruidos antes de que el ozono residual se neutralice.
3. **Frecuencia de mantenimiento:** Los sistemas de desinfección requieren un mantenimiento regular para asegurar su efectividad. En el caso de las lámparas UV, estas deben ser reemplazadas regularmente, ya que su capacidad de emisión de radiación disminuye con el tiempo. En los sistemas de ozono, los generadores también necesitan revisiones periódicas para garantizar que están produciendo ozono de manera efectiva.

Conclusión

La desinfección es un componente esencial en la gestión de un sistema acuapónico, ya que asegura la salud de los peces y las plantas al reducir el riesgo de enfermedades. Los métodos de desinfección, como la luz UV, el ozono y los productos químicos, pueden ser altamente efectivos si se implementan correctamente, teniendo en cuenta factores como la turbidez del agua y la tasa de flujo. Sin embargo, es fundamental elegir el sistema de desinfección adecuado para cada tipo de operación, considerando el tamaño del sistema y la biomasa total.

Referencias

- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2021). *Water quality management in aquaculture*. Springer.
- Schmutz, Z., Graber, A., Jaenicke, S., & Junge, R. (2021). Recirculating aquaculture systems (RAS) for sustainable food production: A review. *Aquaculture International*, 29(3), 12-34.
- Palm, H. W., & Seiffert, W. (2021). Disinfection in aquaponics: Methods and challenges. *Aquaponics Research*, 14(2), 125-143.
- Pentair Aquatic Eco-Systems (2021). *Smart UV Sterilizer*. Retrieved from www.pentairaes.com
- Ozotech Inc. (2021). *Poseidon Ozone Generators*. Retrieved from www.ozotech.com

2.6 Bombas y sistemas de circulación en acuaponía

En un sistema acuapónico, la circulación eficiente del agua es fundamental para garantizar que los peces y las plantas reciban los nutrientes y el oxígeno necesarios para prosperar. Las bombas juegan un papel crucial en mantener el flujo constante del agua, transportando nutrientes, aire y regulando la distribución del agua entre

los diferentes componentes del sistema, como los tanques de peces, los biofiltros y los lechos de cultivo.

Tipos de Bombas Utilizadas en Acuaponía

- **Bombas sumergibles:** Las bombas sumergibles son aquellas que se colocan directamente en el agua y son comunes en sistemas de pequeña y mediana escala. Su principal ventaja es que no requieren mucho espacio adicional, ya que se encuentran dentro del tanque o sumidero. Además, son fáciles de instalar y de bajo costo. Sin embargo, estas bombas tienden a generar más calor, lo que puede ser un inconveniente en sistemas donde el control de la temperatura es crucial, como en acuaponía de agua fría.

Características clave:

- **Facilidad de instalación:** No requieren una configuración complicada ni espacio adicional fuera del tanque.
- **Eficiencia energética:** Algunas bombas sumergibles modernas están diseñadas para ser eficientes en términos de consumo energético, como los modelos **EcoPlus** y **Danner Pondmaster**.
- **Limpieza regular:** Al estar sumergidas, pueden acumular residuos, lo que significa que requieren una limpieza más frecuente para evitar obstrucciones.
- **Bombas externas:** Las bombas externas, o centrífugas, se instalan fuera del sistema acuapónico y son más eficientes en términos energéticos para sistemas de mayor escala. Estas bombas tienden a tener una vida útil más larga y pueden manejar mayores volúmenes de agua a presiones más altas. Son ideales para operaciones comerciales donde se requiere un caudal constante y potente para mover grandes cantidades de agua.

Características clave:

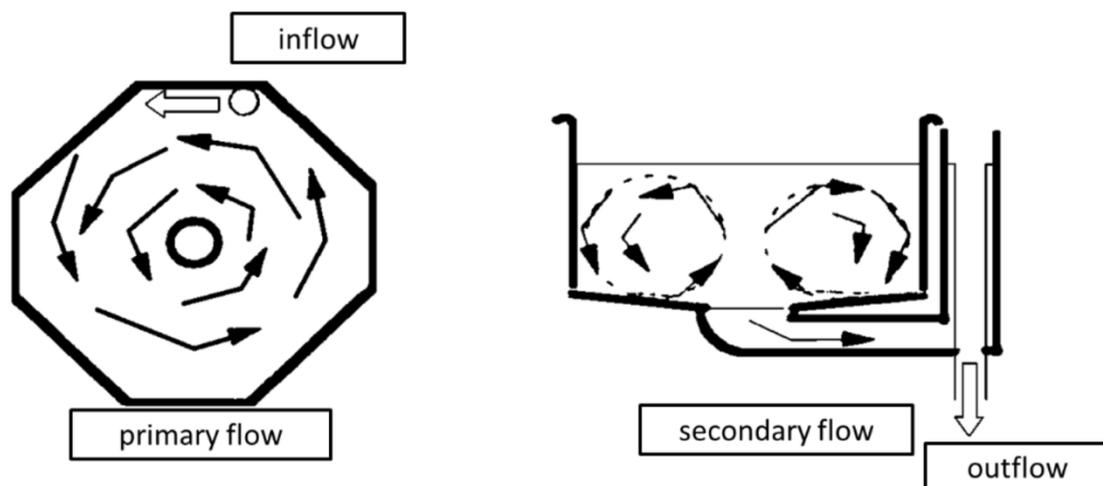
- **Larga durabilidad:** Las bombas externas suelen ser más duraderas y resistentes a condiciones difíciles, lo que las convierte en una buena opción para operaciones a gran escala.
- **Enfriamiento adecuado:** Dado que no están sumergidas en el agua, no generan tanto calor, lo que es una ventaja en sistemas que requieren una temperatura de agua constante.
- **Bombas recomendadas:** Entre las más recomendadas en acuaponía se encuentran la **Pentair Self-Priming Centrifugal Pump** y la **Sequence Primer Pump**, ambas conocidas por su eficiencia en el manejo de grandes volúmenes de agua.

Factores a considerar al seleccionar bombas para acuaponía

- **Capacidad de bombeo (caudal):** El caudal de una bomba es el volumen de agua que puede mover por unidad de tiempo, normalmente medido en litros por hora (LPH) o galones por hora (GPH). En sistemas acuapónicos, es crucial seleccionar una bomba con un caudal adecuado para garantizar que todo el volumen de agua del sistema pase por los filtros y los lechos de cultivo al menos una vez por hora. Un flujo insuficiente puede resultar en la acumulación de desechos y una mala distribución de nutrientes, lo que afectaría la salud de los peces y las plantas.
- **Altura o elevación (Head Height):** El término "head height" se refiere a la capacidad de la bomba para elevar el agua a una altura específica. En sistemas acuapónicos, la bomba debe ser capaz de elevar el agua desde el punto más bajo del sistema (generalmente el sumidero) hasta el punto más alto (como los lechos de cultivo). Es esencial considerar la altura total que la bomba debe superar al seleccionar el modelo adecuado. Por ejemplo, si un sistema acuapónico tiene una altura total de 3 metros, se debe elegir una bomba con un head height mayor a 3 metros para asegurar un flujo adecuado.

- **Consumo energético:** La eficiencia energética es un factor importante en cualquier sistema acuapónico, ya que las bombas deben funcionar de manera continua para garantizar el flujo de agua y la circulación de nutrientes. Las bombas más eficientes desde el punto de vista energético, como la **Laguna Max-Flo** o la **Little Giant Water Pump**, están diseñadas para operar con un bajo consumo de electricidad, reduciendo los costos operativos a largo plazo.
- **Durabilidad y mantenimiento:** La durabilidad de las bombas es otro aspecto crucial a considerar. Las bombas que están en funcionamiento constante pueden desgastarse rápidamente si no están diseñadas para uso continuo. Es recomendable optar por bombas de alta calidad, como la **Sequence Primer Pump** y la **Tsurumi Submersible Pump**, que están diseñadas para funcionar durante largos periodos sin necesidad de mantenimiento frecuente.

Tipos de flujo de agua en acuaponía: Primario y Secundario



En los sistemas acuapónicos, el flujo de agua desempeña un papel fundamental en la distribución de nutrientes, la remoción de desechos sólidos y el suministro de oxígeno. Los flujos de agua primarios y secundarios son esenciales para garantizar que el sistema funcione de manera óptima, tanto para los peces como para las

plantas. A continuación, se describen los tipos de flujo y cómo impactan la calidad del agua y el bienestar de los peces.

Flujo de agua primario

El flujo de agua primario es el que se refiere al movimiento general del agua dentro del sistema, que incluye la circulación entre el tanque de peces, el biofiltro y los componentes hidropónicos (en el caso de acuaponía). Este flujo se encarga de transportar los desechos de los peces, como el amoníaco y los sólidos suspendidos, hacia los sistemas de filtración para ser procesados.

Características del flujo primario:

- **Velocidad del flujo:** La velocidad del flujo de agua debe estar equilibrada. Un flujo demasiado rápido puede causar estrés a los peces, mientras que un flujo muy lento puede provocar la acumulación de desechos sólidos y una deficiencia de oxígeno. La velocidad óptima de flujo depende del tamaño del tanque y de las especies de peces que se cultivan, pero, en general, los tanques de peces deben tener un **volumen de cambio completo de agua cada 30 minutos a una hora** (Palm et al., 2021).
- **Dirección del flujo:** En los sistemas acuapónicos, el diseño del tanque debe promover un flujo **circulatorio**, en el que el agua se mueva de manera constante en una dirección predefinida, lo que facilita la remoción de sólidos. En un tanque circular, esto se puede lograr con entradas tangenciales de agua que generen una corriente circular, moviendo los sólidos hacia el centro del tanque, donde son más fáciles de extraer.
- **Distribución de nutrientes:** Un flujo primario adecuado asegura que los nutrientes, incluidos los que se producen a través de la conversión del amoníaco por las bacterias nitrificantes en el biofiltro, se distribuyan uniformemente a través del sistema. Esto es esencial para la salud de las plantas en la parte hidropónica del sistema.

Flujo de agua secundario

El flujo de agua secundario está relacionado con patrones de movimiento localizados dentro del tanque de peces. Este tipo de flujo se encarga de remover los desechos que caen al fondo del tanque y de proporcionar un entorno acuático adecuado para las especies que necesitan nadar activamente en la corriente.

Características del flujo secundario:

- **Corrientes locales:** El flujo secundario debe diseñarse para crear **corrientes que eliminen los sólidos** que se depositan en el fondo del tanque y para garantizar que haya un movimiento continuo del agua en todas las áreas del tanque. En los tanques circulares, la forma del tanque ya facilita este tipo de movimiento, pero en los tanques rectangulares, a menudo se requieren bombas adicionales o difusores de aire para evitar la sedimentación de desechos en las esquinas.
- **Corrientes para peces nadadores:** Algunas especies de peces, como el salmón y la trucha, requieren corrientes en las que puedan nadar continuamente. Estas especies están adaptadas a nadar en aguas fluviales y necesitan corrientes moderadas a rápidas para mantener su condición física y bienestar. Si el flujo secundario es demasiado débil, los peces no podrán nadar de manera eficiente, lo que puede resultar en problemas de salud, como pérdida de condición muscular y mayor susceptibilidad a enfermedades (Martins et al., 2021).
- **Oxigenación local:** El flujo secundario también contribuye a mejorar la oxigenación local en el tanque. Al mover el agua en áreas de baja circulación, se promueve un intercambio de gases más eficiente, lo que es crucial para mantener altos niveles de oxígeno disuelto, especialmente en el fondo del tanque donde pueden acumularse desechos y material orgánico. Los peces de rápido nado requieren niveles elevados de oxígeno, y un flujo deficiente puede poner en riesgo su salud.

Impacto de las condiciones de flujo en la salud del pez

Las condiciones del flujo, tanto primario como secundario, tienen un impacto directo en la salud de los peces. Aquí se destacan algunos de los factores clave que deben considerarse:

1. **Estrés y comportamiento del pez:** Los peces que son nadadores activos, como la trucha o el salmón, requieren corrientes adecuadas para mantenerse saludables. Un flujo insuficiente puede inducir estrés, lo que compromete su sistema inmunológico y aumenta el riesgo de enfermedades. Por el contrario, un flujo excesivo puede agotar la energía de los peces más pequeños o menos activos, como la tilapia, lo que también puede generar estrés.
2. **Remoción de desechos sólidos:** La eficiencia en la remoción de desechos sólidos es crucial para evitar la acumulación de materia orgánica en el fondo del tanque, lo que podría generar problemas de calidad del agua, como niveles elevados de amoníaco y nitritos. El flujo de agua secundario juega un papel vital en arrastrar estos sólidos hacia el centro del tanque o hacia áreas donde pueden ser fácilmente eliminados.
3. **Oxigenación:** El flujo de agua adecuado es esencial para garantizar una distribución uniforme del oxígeno disuelto. Las áreas de bajo flujo pueden volverse anóxicas, lo que compromete la respiración de los peces y aumenta los riesgos de mortalidad. Un flujo eficiente asegura que los niveles de oxígeno se mantengan estables en todo el tanque.
4. **Interacción con el biofiltro:** Un flujo óptimo asegura que el amoníaco generado por los peces sea transportado al biofiltro con la frecuencia suficiente para ser convertido en nitrito y luego en nitrato, lo que minimiza los riesgos de acumulación de compuestos tóxicos en el agua. Los flujos inadecuados pueden ralentizar este proceso y aumentar la toxicidad del agua.

Conclusión

La correcta implementación de los flujos primario y secundario es fundamental para mantener la calidad del agua y la salud de los peces en sistemas acuapónicos. Un buen diseño de flujo no solo mejora la remoción de sólidos, sino que también optimiza la oxigenación y proporciona un entorno adecuado para que los peces, especialmente aquellos que requieren corrientes activas, puedan prosperar. El diseño debe adaptarse tanto a las características de los tanques como a las necesidades específicas de las especies cultivadas.

Referencias:

- Martins, C. I. M., Eding, E. H., Verdegem, M. C. J., Heinsbroek, L. T. N., Schneider, O., Blancheton, J. P., d'Orbcastel, E. R., & Verreth, J. A. J. (2021). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83-93.
- Palm, H. W., Knaus, U., & Schneider, O. (2021). Aquaponic systems: Integrated fish and plant production in a recirculating system. *Journal of Aquaponics and Hydroponics*, 45(2), 67-78.

Monitoreo del caudal y mantenimiento de las bombas

El mantenimiento regular de las bombas es fundamental para garantizar su eficiencia y longevidad. Esto incluye la limpieza de filtros de entrada, la inspección de componentes internos y el ajuste del caudal según las necesidades del sistema. Algunas bombas modernas están equipadas con sistemas de monitoreo automatizado, que permiten a los operadores controlar el caudal y la presión de las bombas en tiempo real, ajustando automáticamente el rendimiento según los requisitos del sistema.

Conclusión

Las bombas y los sistemas de circulación son esenciales en la operación eficiente de un sistema acuapónico. La selección adecuada de las bombas, el diseño de los patrones de flujo y el mantenimiento regular aseguran un ambiente saludable para los peces y las plantas, al tiempo que optimizan el uso de energía y recursos. A medida que la tecnología de acuaponía avanza, las bombas se vuelven más eficientes, seguras y capaces de manejar los desafíos únicos que presenta este tipo de agricultura sostenible.

Referencias

- Schmautz, Z., Graber, A., Jaenicke, S., & Junge, R. (2021). Recirculating aquaculture systems for sustainable food production: A review. *Aquaculture International*, 29(3), 12-34.
- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2021). *Water quality management in aquaculture*. Springer.
- Valenti, W. C., Kimpara, J. M., Preto, B. L., & Moraes-Valenti, P. (2021). Indicators of sustainability in aquaculture. *Aquaculture International*, 29(1), 23-42.
- Pentair Aquatic Eco-Systems (2021). *Sequence Primer Pump*. Retrieved from www.pentairaes.com
- Tsurumi Pump (2021). *Tsurumi Submersible Pump*. Retrieved from www.tsurumipump.com

3. Gestión de los Sistemas de Recirculación Acuícola en Acuaponía (RAS)

La gestión eficiente de un sistema de recirculación acuícola (RAS) es crucial para asegurar el bienestar de los peces y la productividad de las plantas en acuaponía. Los sistemas RAS ofrecen muchas ventajas, como la reducción en el uso de agua y la minimización de residuos, pero requieren un control preciso y constante de varios parámetros para mantener el equilibrio biológico necesario.

3.1 Densidad de siembra en sistemas acuapónicos

La **densidad de siembra** en acuaponía se refiere al número de peces introducidos en el sistema en relación con el volumen de agua disponible. Este es uno de los parámetros más importantes en la gestión de un sistema acuapónico porque tiene un impacto directo en la salud de los peces, la calidad del agua y la eficiencia del sistema en general. Una densidad adecuada maximiza la productividad sin comprometer el bienestar de los peces ni la capacidad del sistema para mantener una calidad de agua aceptable.

Factores que influyen en la densidad de siembra:

- **Capacidad del sistema RAS:** La capacidad del sistema de recirculación acuícola para manejar altos niveles de nutrientes, sólidos y desechos es un factor determinante para establecer la densidad de siembra. Un sistema con un biofiltro de alta eficiencia y un manejo adecuado de sólidos puede soportar densidades más altas sin comprometer la calidad del agua.
- **Especie de peces:** Diferentes especies de peces requieren diferentes densidades de siembra. Por ejemplo, peces de crecimiento rápido como la **tilapia (*Oreochromis spp.*)** pueden ser criados a densidades relativamente altas (hasta 60 kg/m³), mientras que especies más sensibles, como la **trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*)**, requieren densidades más bajas para asegurar niveles adecuados de oxígeno disuelto y minimizar el estrés (20-40 kg/m³) (Badiola et al., 2018).
- **Fisiología de los peces:** Algunas especies de peces, como la carpa y la tilapia, son más tolerantes a las condiciones subóptimas de oxígeno disuelto, lo que les permite soportar mayores densidades de siembra. En contraste, especies como el **bagre (*Ictalurus punctatus*)** requieren niveles de oxígeno más altos y estables, lo que puede limitar la densidad de siembra en comparación con otras especies (Boyd & Tucker, 2021).

- **Etapas de crecimiento:** Los peces jóvenes tienen menos necesidades de espacio que los adultos, lo que permite densidades de siembra más altas en las primeras etapas de crecimiento. Sin embargo, a medida que los peces crecen, sus necesidades de oxígeno y espacio aumentan, lo que puede requerir una reducción en la densidad o la clasificación de los peces en grupos según el tamaño para evitar el hacinamiento y el estrés (Bostock et al., 2020).

Impactos de una densidad de siembra inadecuada:

- **Estrés y mortalidad de los peces:** Si la densidad de siembra es demasiado alta, los peces compiten por el oxígeno disuelto y el espacio. El hacinamiento genera estrés, lo que debilita el sistema inmunológico de los peces y los hace más susceptibles a enfermedades. Las altas densidades también aumentan el riesgo de comportamientos agresivos y lesiones físicas entre los peces (Martins et al., 2017).
- **Calidad del agua:** A mayor densidad de peces, mayor es la carga de desechos nitrogenados en el sistema, lo que puede comprometer la capacidad del biofiltro para convertir el amoníaco en nitratos de manera eficiente. Un exceso de desechos no procesados puede conducir a la acumulación de amoníaco y nitritos, compuestos tóxicos que afectan negativamente la salud de los peces y el crecimiento de las plantas (Schneider et al., 2021).
- **Eficiencia del sistema:** Un sistema con una densidad de siembra adecuada puede generar mayores rendimientos de peces sin comprometer la calidad del agua ni la salud de las plantas. En sistemas bien gestionados, la relación entre la densidad de siembra y el crecimiento de las plantas se optimiza, ya que los desechos de los peces proporcionan los nutrientes necesarios para las plantas sin causar un desequilibrio químico (Karimanzira et al., 2021).

Recomendaciones para gestionar la densidad de siembra:

- **Monitoreo constante de la calidad del agua:** La calidad del agua debe ser monitoreada regularmente para asegurarse de que los niveles de amoníaco, nitrito y nitrato estén dentro de los rangos aceptables. La densidad de siembra debe ajustarse en función de la capacidad del sistema para manejar los desechos y mantener niveles adecuados de oxígeno.
- **Clasificación de los peces:** Es importante clasificar a los peces según su tamaño para evitar el hacinamiento. Los peces más grandes pueden ser trasladados a tanques separados o cosechados antes para liberar espacio y mantener un ambiente equilibrado.
- **Aireación adecuada:** La instalación de sistemas de aireación eficientes es crucial para asegurar que los niveles de oxígeno disuelto se mantengan dentro de los rangos óptimos, especialmente en sistemas con altas densidades de siembra. Los **difusores de aire** y los **generadores de oxígeno** son herramientas recomendadas para mantener niveles adecuados de oxígeno en sistemas acuapónicos (Timmons et al., 2018).

Ejemplo de densidad de siembra en un sistema acuapónico comercial:

En un sistema acuapónico comercial típico que utiliza tilapia, la densidad de siembra inicial puede comenzar en 10 kg/m³ durante las primeras semanas de vida de los peces y puede aumentar progresivamente hasta 50-60 kg/m³ a medida que los peces alcanzan su tamaño de cosecha en aproximadamente 6-9 meses. Este aumento gradual asegura que el sistema pueda manejar la carga de nutrientes adicional a medida que los peces crecen, sin comprometer la salud de las plantas ni de los peces.

3.2 Monitoreo de parámetros clave para el éxito de la acuaponía

El monitoreo de los parámetros clave en los sistemas acuapónicos es esencial para garantizar la salud de los peces y plantas, así como para mantener el equilibrio de los nutrientes en el sistema. Un monitoreo eficaz permite prevenir problemas como la acumulación de toxinas, fluctuaciones en la calidad del agua y deficiencias nutricionales en las plantas. A continuación, se describen los elementos esenciales para un monitoreo eficaz en acuaponía, incluyendo recomendaciones para el diseño del sistema, su mantenimiento y el uso de tecnologías automatizadas para mejorar el control.

3.2.1 Consejos para el diseño seguro y eficiente del sistema

El diseño de un sistema acuapónico debe considerar la facilidad de acceso a los puntos de monitoreo, la seguridad operativa y la redundancia para evitar fallos críticos. Los siguientes aspectos son claves para un diseño seguro y eficiente:

1. **Acceso a los puntos de monitoreo:** Es importante que los sensores de monitoreo, como los de pH, oxígeno disuelto (DO), temperatura y amoníaco, sean fácilmente accesibles para la calibración y el mantenimiento. Los sistemas deben estar diseñados de manera que el personal pueda realizar estas tareas sin interferir con el flujo del sistema o con el bienestar de los peces y plantas.
2. **Redundancia y backups:** La instalación de equipos de respaldo, como generadores de emergencia o sistemas de oxigenación adicionales, es crucial para evitar que una falla en un sistema automatizado afecte gravemente la operación. Los sistemas deben ser diseñados con redundancia en mente, de modo que si un componente crítico falla (como una bomba de agua o un sensor), otro pueda asumir su función temporalmente.
3. **Optimización del flujo:** Para evitar la acumulación de sólidos y asegurar una adecuada circulación de nutrientes, el diseño debe optimizar el flujo de agua. Se recomienda la instalación de separadores de sólidos eficientes,

biofiltros y sistemas de desgasificación en puntos estratégicos para mantener la calidad del agua.

4. **Uso de materiales resistentes:** El uso de materiales duraderos y no reactivos en las tuberías y tanques es fundamental para evitar la corrosión y la contaminación química del agua, lo que podría afectar a los peces y a las plantas.

3.2.2 Mantenimiento regular del sistema acuapónico

Un mantenimiento adecuado asegura la longevidad del sistema y reduce el riesgo de fallos imprevistos. Algunas prácticas recomendadas incluyen:

1. **Limpieza de los filtros y separadores de sólidos:** Los filtros mecánicos y los separadores de sólidos deben ser limpiados regularmente para evitar bloqueos que puedan alterar el flujo de agua y provocar la acumulación de amoníaco y otros desechos.
2. **Inspección de las bombas y sistemas de circulación:** Las bombas deben ser revisadas periódicamente para asegurar su correcto funcionamiento. Los sistemas de circulación son esenciales para la oxigenación de los peces y el suministro de nutrientes a las plantas. Cualquier obstrucción o mal funcionamiento puede causar estrés a los peces o deficiencias nutricionales en las plantas.
3. **Calibración de los sensores:** Los sensores de pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica (EC) deben calibrarse de forma regular para garantizar lecturas precisas. La calibración incorrecta puede llevar a una mala gestión del sistema, lo que afectará tanto a los peces como a las plantas.
4. **Revisión de la estructura del sistema:** Se recomienda realizar inspecciones periódicas para verificar que no existan fugas en las conexiones y que las estructuras estén en buen estado. Las fugas de agua o nutrientes pueden causar desequilibrios graves y poner en riesgo el sistema completo.

3.2.3 Frecuencia de monitoreo de la calidad del agua

La calidad del agua es el parámetro más importante en la acuaponía, ya que afecta directamente a la salud de los peces y al crecimiento de las plantas. El monitoreo debe realizarse de forma continua, especialmente para los siguientes parámetros:

1. **pH:** Idealmente, el pH del agua debe monitorearse diariamente, ya que un valor desajustado puede afectar la absorción de nutrientes por parte de las plantas y causar estrés en los peces. Se recomienda un pH entre 6.8 y 7.2, ya que este rango es adecuado tanto para los peces como para las plantas en sistemas acuapónicos (Rakocy et al., 2020).
2. **Oxígeno disuelto (DO):** El nivel de oxígeno disuelto es crucial para la supervivencia de los peces y debe mantenerse por encima de 5 mg/L. Se recomienda monitorear los niveles de oxígeno al menos dos veces al día, especialmente en climas cálidos o en sistemas con alta densidad de peces (Emerenciano et al., 2020).
3. **Amoníaco, nitrito y nitrato:** La concentración de amoníaco ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) debe mantenerse lo más baja posible, preferiblemente por debajo de 0.5 mg/L. El nitrito (NO_2^-) debe mantenerse por debajo de 1 mg/L, mientras que el nitrato (NO_3^-) puede acumularse hasta niveles superiores a 30 mg/L sin afectar a los peces. Estos parámetros deben monitorearse semanalmente (Graber & Junge, 2019).
4. **Temperatura:** La temperatura del agua debe monitorearse diariamente. Las variaciones de temperatura pueden afectar tanto a los peces como a las plantas. La mayoría de las especies acuapónicas prefieren temperaturas entre 22°C y 28°C (Delaide et al., 2021).
5. **Conductividad eléctrica (EC):** La EC es un indicador de la concentración total de nutrientes disueltos en el agua. Un nivel demasiado bajo puede indicar deficiencias de nutrientes, mientras que un nivel demasiado alto

puede dañar a las plantas. Se recomienda medir la EC al menos semanalmente.

3.2.4 Sistemas automatizados de monitoreo y control en acuaponía

Los avances en la tecnología han permitido el desarrollo de sistemas automatizados que pueden monitorear y ajustar los parámetros clave en tiempo real. Estos sistemas no solo reducen la carga de trabajo manual, sino que también aumentan la precisión y fiabilidad del monitoreo. Algunos sistemas automatizados comunes incluyen:

1. **Sistemas de monitoreo en tiempo real:** Estos sistemas utilizan sensores conectados a una red de control que mide parámetros como el pH, DO, EC y temperatura continuamente. Los datos son enviados a una central que alerta al operador en caso de que algún parámetro se desvíe de los valores óptimos. Marcas como **HydroLogic** y **BlueLab** ofrecen soluciones automatizadas de monitoreo.
2. **Controladores automáticos de pH y dosificadores:** Estos dispositivos son capaces de ajustar automáticamente el pH del sistema mediante la adición de soluciones acidificantes o alcalinizantes. Esto es especialmente útil en sistemas grandes donde los cambios de pH pueden ocurrir rápidamente.
3. **Sistemas de oxigenación automática:** Algunos sistemas de monitoreo también están conectados a dispositivos de aireación o inyección de oxígeno, que se activan cuando los niveles de oxígeno disuelto caen por debajo de un umbral predefinido.
4. **Aplicaciones móviles y plataformas en línea:** Los sistemas modernos de monitoreo permiten a los operadores rastrear los parámetros del sistema desde sus dispositivos móviles, lo que facilita la supervisión del sistema en tiempo real desde cualquier lugar.

En resumen, el monitoreo efectivo de los parámetros clave en acuaponía es fundamental para garantizar el éxito de la producción. Con la ayuda de tecnologías

automatizadas, los acuaponistas pueden mantener condiciones óptimas tanto para los peces como para las plantas, reduciendo el riesgo de fallos y aumentando la eficiencia del sistema.

Referencias

- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2020). *Recirculating aquaponic tank production systems: Integrating fish and plant culture*. Southern Regional Aquaculture Center.
- Emerenciano, M., Carneiro, P. C., & Martins, G. B. (2020). *Aquaponics and Integrated Aquaculture*. Springer.
- Graber, A., & Junge, R. (2019). *Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production*. Springer.
- Delaide, B., Monsees, H., Gross, A., & Goddek, S. (2021). *Advances in Aquaponics: Technology and Innovation*.

La máxima prioridad en la gestión del sistema es mantener la salud de los peces y las plantas. Por ello, el monitoreo debe priorizarse según las "prioridades de soporte vital". A continuación, se enumeran algunos elementos clave que deben monitorearse diariamente para asegurar un funcionamiento óptimo del sistema.

Potenciales problemas en el sistema y sus causas

<i>Tipo / Sistema</i>	<i>Causas</i>
<i>Factores fuera de control</i>	Inundaciones, tornados, huracanes, viento, nieve, hielo, tormentas, cortes eléctricos, vandalismo/robo
<i>Errores del personal</i>	Errores operativos, mantenimiento descuidado que causa fallos en los sistemas de respaldo o componentes, alarmas desactivadas
<i>Nivel del agua en el tanque</i>	Válvula de drenaje abierta, tubería de pie caída o removida, fuga en el sistema, tubería de desagüe rota, tanque desbordado
<i>Flujo de agua</i>	Válvula cerrada o abierta en exceso, fallo de bomba, pérdida de succión, pantalla de entrada bloqueada, tubería bloqueada, ruptura o falla de la tubería de retorno
<i>Calidad del agua</i>	Bajo oxígeno disuelto, alto CO ₂ , suministro de agua sobresaturado, temperatura alta o baja, altos niveles de amoníaco, nitrito o nitrato, baja alcalinidad
<i>Filtros</i>	Canalización o filtros obstruidos, pérdida excesiva de carga
<i>Sistema de aireación</i>	Sobrecalentamiento del motor del soplador por presión excesiva, correa de transmisión suelta o rota, difusores bloqueados o desconectados, fugas en las líneas de suministro

Priorización del monitoreo y la respuesta

PARÁMETRO	TIEMPO DE RESPUESTA	PRIORIDAD
ALTA PRIORIDAD	Muy rápido (minutos), se necesita alarma	Eléctrico, nivel del agua, oxígeno disuelto
PRIORIDAD MEDIA	Tiempo de respuesta moderado (horas), se necesita alarma	Temperatura, dióxido de carbono, pH, amoníaco, nitrito
PRIORIDAD BAJA	Parámetros que cambian lentamente (monitoreo diario o semanal)	Nitrato, sólidos suspendidos totales (TSS), alcalinidad

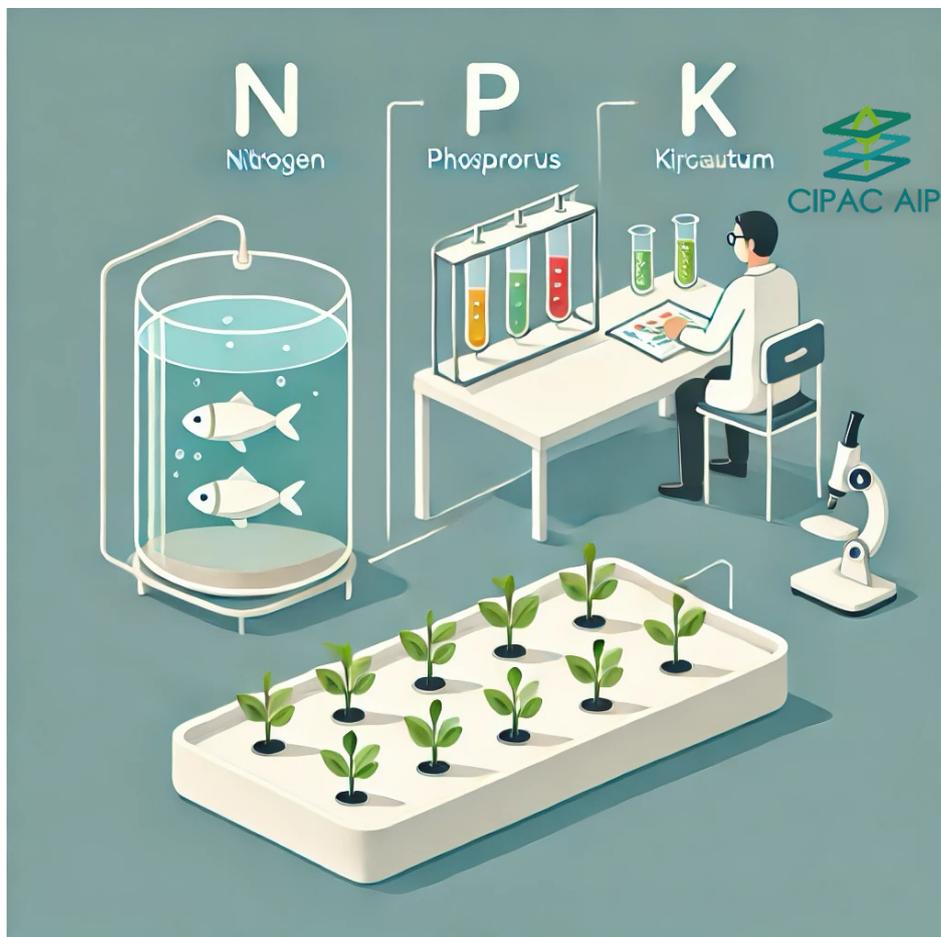
PARÁMETRO	HERRAMIENTA DE MEDICIÓN	FRECUENCIA RECOMENDADA	EJEMPLO DE SENSOR/MARCA
OXÍGENO DISUELTO (DO)	Oxímetro digital	Diaria	YSI ProDSS
PH	Medidor de pH electrónico	Diaria	Hanna Instruments HI98191
TEMPERATURA DEL AGUA	Termómetro digital	Diaria	Fluke 62 MAX
NIVELES DE AMONÍACO (NH₃)	Kit de pruebas de amoníaco	Semanal	API Ammonia Test Kit
NIVELES DE NITRITO (NO₂⁻)	Kit de pruebas de nitrito	Semanal	API Nitrite Test Kit
NIVELES DE NITRATO (NO₃⁻)	Kit de pruebas de nitrato	Semanal	API Nitrate Test Kit
TURBIDEZ	Turbidímetro	Semanal	Hach 2100Q
CONDUCTIVIDAD	Medidor de conductividad	Semanal	Extech EC400
SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	Sensor de sólidos en suspensión	Semanal	SoliSense



Centro de Investigación y Producción en
Ambiente Controlado AIP

Acuaponía: Una Guía Comprensiva para la Producción Sostenible de Alimentos”

Sección 4: Sistemas Hidropónicos: Fundamentos y Manejo Nutricional en Acuaponía



4.1 Principios Básicos de la Hidroponía en Acuaponía



La hidroponía es una técnica de cultivo sin suelo que se ha utilizado durante décadas para cultivar una amplia variedad de plantas en ambientes controlados. En los sistemas hidropónicos tradicionales, las plantas se desarrollan en soluciones nutritivas que contienen los elementos esenciales para su crecimiento, y sus raíces se sostienen en sustratos inertes o flotan directamente en el agua. En acuaponía, la hidroponía se integra con la acuicultura en un sistema recirculante donde los residuos generados por los peces (principalmente en forma de amoníaco) se convierten en nutrientes aprovechables para las plantas. Esto crea un ciclo cerrado donde ambos componentes, peces y plantas, se benefician mutuamente.

4.1.1 Ventajas de la Hidroponía en Acuaponía

La hidroponía tiene varias ventajas dentro de un sistema acuapónico que hacen que sea una técnica extremadamente eficiente para la producción de alimentos. Estas ventajas incluyen:

1. **Uso eficiente del agua:** Uno de los principales beneficios de la hidroponía es el uso mucho más eficiente del agua en comparación con los métodos de cultivo en suelo. La hidroponía en sistemas acuapónicos utiliza el agua de los tanques de peces para nutrir a las plantas, lo que significa que el agua que normalmente se desperdiciaría en la acuicultura puede reutilizarse una y otra vez (Savidov et al., 2021). En un mundo donde los recursos hídricos son limitados, este enfoque es particularmente valioso.
2. **Control preciso de los nutrientes:** En un sistema hidropónico, es posible ajustar y controlar con precisión los niveles de nutrientes que las plantas reciben. Esto se traduce en un crecimiento más rápido y en mayores rendimientos de cultivos en comparación con los sistemas de cultivo en suelo. En acuaponía, los nutrientes derivados de los desechos de los peces son naturalmente reciclados y aprovechados, lo que reduce la necesidad de fertilizantes adicionales y genera un producto más ecológico y sostenible (Love et al., 2015).
3. **Mayor densidad de cultivo:** Los sistemas hidropónicos pueden diseñarse para maximizar el uso del espacio, lo que permite la implementación de sistemas verticales o en varias capas. Esto es una ventaja clave en contextos urbanos o en áreas donde el espacio de cultivo es limitado. La hidroponía vertical puede aumentar la producción por metro cuadrado en comparación con los sistemas de suelo (Maucieri et al., 2019).
4. **Producción durante todo el año:** Los sistemas hidropónicos son independientes del clima y pueden operar durante todo el año, siempre que se controlen los factores ambientales como la luz, temperatura y la calidad del agua. Esto permite un suministro continuo de alimentos, independientemente de la temporada (Goddek et al., 2019).
5. **Reducción de enfermedades transmitidas por el suelo:** Al no utilizar suelo, los sistemas hidropónicos eliminan el riesgo de muchas enfermedades y plagas comunes que afectan a las plantas que crecen en tierra, lo que reduce

la necesidad de pesticidas y otros productos químicos (Somerville et al., 2021).

4.1.2 Desventajas de la Hidroponía en Acuaponía

A pesar de sus muchas ventajas, la hidroponía en acuaponía también presenta ciertos desafíos que deben considerarse antes de su implementación. Estas desventajas incluyen:

- **Requerimientos de monitoreo constante:** Un sistema hidropónico bien equilibrado requiere un monitoreo constante de la calidad del agua, niveles de oxígeno disuelto, pH, y concentración de nutrientes. Esto demanda el uso de sensores avanzados y personal capacitado para detectar y solucionar problemas de forma rápida (Palm et al., 2019). La falta de control puede llevar rápidamente a desequilibrios en el sistema que afecten tanto a los peces como a las plantas.
- **Costos iniciales:** Los sistemas hidropónicos, especialmente en un contexto acuapónico, requieren una inversión inicial significativa. Los costos incluyen no solo la infraestructura básica, como tanques, biofiltros y sistemas de circulación de agua, sino también equipos de monitoreo avanzados y fuentes de luz artificial en algunos casos (Goddek et al., 2019).
- **Dependencia de la tecnología:** Los sistemas hidropónicos dependen en gran medida de la tecnología. Si se produce una falla en la bomba de agua, la fuente de energía o los sistemas de monitoreo, las plantas pueden sufrir rápidamente estrés y morir, ya que no tienen acceso a los nutrientes ni al agua de manera independiente (Kloas et al., 2021).
- **Capacitación especializada:** La hidroponía, especialmente en combinación con la acuaponía, requiere que los operadores comprendan tanto las necesidades de los peces como las de las plantas. El personal debe estar

capacitado en la gestión de ambos sistemas para asegurar un equilibrio óptimo entre la acuicultura y la producción de cultivos (Bosma et al., 2020).

- **Limitación en la selección de cultivos:** Aunque la hidroponía puede adaptarse a una amplia variedad de plantas, no todos los cultivos son ideales para este sistema. Algunas especies pueden no adaptarse bien a los entornos acuapónicos debido a sus necesidades particulares de nutrientes o condiciones ambientales, lo que limita la diversidad de cultivos (Maucieri et al., 2021).

4.1.3 Relación entre Hidroponía y Acuaponía

La relación entre la hidroponía y la acuaponía radica en su sinergia para la producción sostenible de alimentos. Mientras que la hidroponía depende de soluciones nutritivas preparadas artificialmente, la acuaponía recicla los desechos de los peces para nutrir a las plantas, creando un sistema de cultivo más sostenible y natural. Los sistemas acuapónicos requieren un delicado equilibrio entre la calidad del agua para los peces y las necesidades nutricionales de las plantas. La clave del éxito en acuaponía radica en la biofiltración, que convierte los desechos de amoníaco en nitrato, un nutriente esencial para las plantas (Goddek et al., 2019).

La acuaponía representa una extensión natural de la hidroponía, ya que aprovecha los principios de control ambiental y nutricional de la hidroponía, pero añade un componente biológico, lo que reduce la dependencia de fertilizantes químicos. A su vez, la hidroponía aporta flexibilidad a la acuaponía, ya que permite la diversificación de cultivos y un mayor control sobre el entorno de crecimiento (Kloas et al., 2021).

4.1.2 Sustratos en Sistemas Hidropónicos

El sustrato en un sistema hidropónico cumple un papel fundamental, ya que, aunque las plantas no crecen en suelo, necesitan algún tipo de medio para anclar sus raíces. Este medio o sustrato no proporciona nutrientes de forma natural, sino que sirve como un soporte físico que ayuda a retener humedad y permite el acceso a los nutrientes disueltos en la solución acuosa. La elección del sustrato adecuado es crucial, ya que afecta el equilibrio hídrico, el intercambio gaseoso y la estabilidad estructural de las plantas.

En un sistema acuapónico, la función del sustrato es aún más relevante, ya que no solo sirve para sostener a las plantas, sino que también contribuye al proceso de filtración biológica. Muchos sustratos hidropónicos pueden actuar como hábitat para las bacterias nitrificantes, que son responsables de convertir los desechos de amoníaco en nitratos, un proceso clave para la salud de las plantas y los peces en un sistema acuapónico (Palm et al., 2018). A continuación, se describen algunos de los sustratos más comunes utilizados en hidroponía, sus características y sus aplicaciones en acuaponía.

4.1.2.1 Arcilla Expandida (Light Expanded Clay Aggregate - LECA)



La arcilla expandida es uno de los sustratos más utilizados en hidroponía y acuaponía. Consiste en pequeñas bolitas de arcilla que han sido tratadas a altas temperaturas para crear una estructura porosa. Este sustrato es altamente eficiente debido a su capacidad de retener agua mientras permite un excelente drenaje y aireación, lo que lo convierte en un medio ideal para promover el crecimiento radicular sano.

Ventajas:

- **Ligero:** Fácil de manejar y transportar, lo que facilita su uso en sistemas de gran tamaño.
- **Retención de agua:** Aunque es un material liviano, retiene suficiente agua para mantener las raíces hidratadas.
- **Reutilizable:** Se puede limpiar y reutilizar en múltiples ciclos de cultivo, lo que lo convierte en una opción sostenible (Goddek et al., 2019).

Desventajas:

- **Costo elevado:** Comparado con otros sustratos, la arcilla expandida puede ser costosa, lo que aumenta los costos iniciales de los sistemas acuapónicos.
- **Posible necesidad de remojo inicial:** Antes de su uso, la arcilla expandida debe ser remojada para eliminar polvo y ajustar el pH, lo que puede requerir tiempo adicional.

4.1.2.2 Grava Volcánica (Toba)



La grava volcánica, también conocida como toba, es otro sustrato comúnmente utilizado en acuaponía, especialmente en sistemas de camas de cultivo (media beds). Este material es ligero y poroso, lo que permite una excelente aireación y retención de agua, y al mismo tiempo

proporciona una gran superficie para la colonización de bacterias nitrificantes.

Ventajas:

- **Alta porosidad:** Proporciona un hábitat ideal para las bacterias nitrificantes, promoviendo el proceso de filtración biológica.

- **Durabilidad:** Es un sustrato extremadamente duradero y puede ser reutilizado durante varios ciclos de cultivo.
- **Costo relativamente bajo:** En comparación con otros sustratos, la grava volcánica es relativamente económica y fácil de conseguir en algunas regiones (Somerville et al., 2019).

Desventajas:

- **Peso:** Aunque es más ligero que la grava de piedra caliza, sigue siendo más pesado que otros sustratos como la arcilla expandida, lo que puede limitar su uso en sistemas verticales.
- **Abrasivo:** Las raíces de las plantas y los sistemas de filtración pueden dañarse si la grava volcánica es demasiado afilada o si no se maneja con cuidado.

4.1.2.3 Fibra de Coco (Coir)



La fibra de coco, también conocida como coir, es un sustrato sostenible que ha ganado popularidad en hidroponía y acuaponía. Se produce a partir de la cáscara de coco y es conocido por su capacidad para retener agua y permitir un excelente drenaje.

Ventajas:

- **Sostenibilidad:** Es un producto natural y renovable, lo que lo convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente.

- **Buena retención de agua:** La fibra de coco puede retener grandes cantidades de agua, lo que la hace ideal para sistemas donde se requiere una hidratación constante.
- **Ligero y fácil de manejar:** Comparado con otros sustratos, la fibra de coco es ligera y fácil de manipular (Boyd et al., 2020).

Desventajas:

- **Descomposición:** Con el tiempo, la fibra de coco puede descomponerse, lo que reduce su vida útil en comparación con sustratos más duraderos como la grava volcánica o la arcilla expandida.
- **Salinidad:** Algunas fibras de coco pueden contener sales residuales que deben ser eliminadas antes de su uso, lo que requiere enjuague y preparación adicionales.

4.1.2.4 Lana de Roca (Rockwool)



La lana de roca es un sustrato artificial que se produce al fundir rocas volcánicas y luego convertirlas en fibras. Es muy utilizada en la producción hidropónica comercial debido a su capacidad para retener agua y proporcionar un soporte excelente para las raíces.

Ventajas:

- **Retención de agua y nutrientes:** La lana de roca es capaz de retener grandes cantidades de agua y nutrientes, asegurando que las raíces de las plantas estén siempre hidratadas y alimentadas.
- **Estabilidad estructural:** Proporciona un soporte sólido para las plantas, lo que es especialmente importante en cultivos de gran tamaño o de raíces profundas (Valenti et al., 2021).

Desventajas:

- **No biodegradable:** A diferencia de sustratos orgánicos como la fibra de coco, la lana de roca no se descompone y debe ser desechada adecuadamente, lo que puede generar problemas ambientales.
- **Polvo peligroso:** El polvo que se genera al manipular la lana de roca puede ser irritante para los pulmones y la piel, por lo que es necesario utilizar protección adecuada al trabajar con este material.

4.1.2.5 Perlita y vermiculita



La perlita y la vermiculita son sustratos inorgánicos que se utilizan frecuentemente en sistemas hidropónicos. La perlita es un vidrio volcánico expandido, mientras que la vermiculita es un mineral que se expande al calentarse.

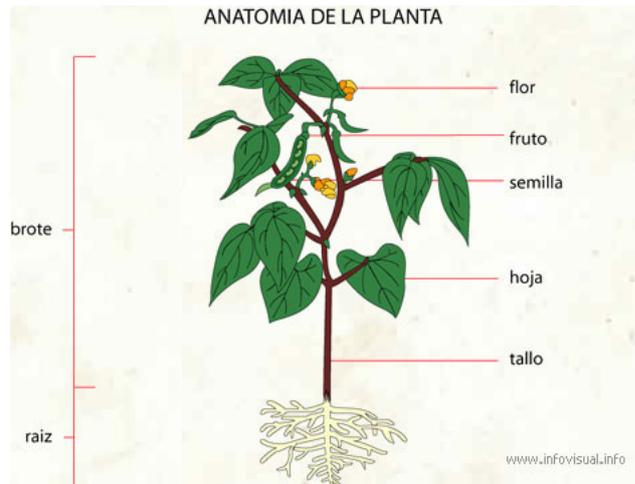
Ventajas:

- **Ligereza:** Ambos sustratos son extremadamente ligeros, lo que los hace ideales para sistemas verticales o de cultivo en mesas.
- **Buena retención de agua:** Aunque la vermiculita retiene más agua que la perlita, ambos son excelentes para mantener las raíces hidratadas (Savidov et al., 2021).

Desventajas:

- **Fragilidad:** La perlita es frágil y puede desmoronarse con el tiempo, lo que la hace menos duradera que otros sustratos.
- **Costo:** Aunque la vermiculita es eficiente, puede ser más costosa que otros sustratos de origen natural como la grava o la arcilla expandida.

4.3.1 Requerimientos de las Plantas



Las plantas, como cualquier ser vivo, tienen necesidades específicas para su crecimiento y desarrollo. En un sistema acuapónico, estas necesidades deben ser manejadas cuidadosamente, ya que el entorno está controlado y depende de un equilibrio entre los desechos de los peces y las plantas que absorben esos nutrientes. Los nutrientes esenciales, el pH, la disponibilidad de estos nutrientes, así como posibles trastornos nutricionales, deben ser monitoreados y ajustados para asegurar un crecimiento saludable de las plantas.

nutricionales y garantizar un desarrollo sano y productivo en las plantas.

4.3.1.1 Elementos Nutritivos Esenciales

En cualquier sistema de cultivo, incluidas la acuaponía y la hidroponía, las plantas requieren ciertos elementos nutritivos para realizar sus procesos biológicos

fundamentales como la fotosíntesis, la respiración y la producción de proteínas. Los nutrientes esenciales se dividen en **macronutrientes** y **micronutrientes**.

Macronutrientes principales:

- **Nitrógeno (N):** Es el componente fundamental de aminoácidos y proteínas, además de formar parte de la clorofila. En acuaponía, el nitrógeno es aportado por los desechos de los peces, principalmente en forma de nitratos (NO_3^-) luego del proceso de biofiltración.
- **Fósforo (P):** Es clave para la formación de ADN y ARN, así como para la transferencia de energía (ATP) dentro de las plantas. El fósforo también es importante para el desarrollo de raíces.
- **Potasio (K):** Este macronutriente regula la apertura de estomas, lo que permite la regulación del intercambio de gases y la transpiración. El potasio también es esencial en la síntesis de proteínas y carbohidratos.

Macronutrientes secundarios:

- **Calcio (Ca):** Imprescindible para el crecimiento celular y la integridad estructural de las paredes celulares.
- **Magnesio (Mg):** Es el núcleo central de la molécula de clorofila y es esencial para la fotosíntesis.
- **Azufre (S):** Forma parte de algunos aminoácidos y vitaminas esenciales.

Micronutrientes: Aunque se requieren en cantidades mucho menores, los micronutrientes son igualmente esenciales para la salud de las plantas. Estos incluyen hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), molibdeno (Mo), boro (B) y cloro (Cl). Estos micronutrientes actúan como cofactores en diversas reacciones enzimáticas y son fundamentales en procesos como la síntesis de hormonas y el metabolismo energético.

En acuaponía, la fuente principal de los macronutrientes es el alimento de los peces, mientras que los micronutrientes, como el hierro, el zinc y el molibdeno, pueden requerir ser suplementados manualmente, ya que no se generan en cantidades suficientes en el sistema acuapónico.

4.3.1.2 Disponibilidad de Nutrientes y pH

La disponibilidad de nutrientes para las plantas no solo depende de la cantidad de nutrientes presentes en el agua, sino también del pH del sistema acuapónico. El pH del agua afecta la solubilidad de los nutrientes y, por lo tanto, su disponibilidad para las plantas. En un sistema acuapónico, el pH ideal suele situarse entre **6.0 y 7.0**, donde la mayoría de los nutrientes están disponibles en cantidades óptimas. Si el pH es demasiado alto o bajo, algunos nutrientes, como el hierro y el manganeso, pueden volverse insolubles y, por lo tanto, no estar disponibles para la planta.

- **pH bajo (<6.0):** Puede causar deficiencias en elementos como calcio y magnesio, lo que puede afectar el crecimiento general de la planta.
- **pH alto (>7.5):** La disponibilidad de nutrientes como el hierro, el fósforo y el zinc disminuye, lo que puede provocar deficiencias que afecten la fotosíntesis y el desarrollo de la planta.

Para garantizar una absorción de nutrientes óptima, es crucial mantener el pH del sistema dentro de un rango adecuado y monitorearlo regularmente.

4.3.1.3 Trastornos Nutricionales en Plantas

Los trastornos nutricionales ocurren cuando las plantas no reciben los nutrientes en las cantidades o proporciones adecuadas. Estos trastornos pueden ser causados por deficiencias o toxicidades. A continuación, se describen algunos de los trastornos más comunes en acuaponía:



- **Clorosis (deficiencia de nitrógeno):** Las hojas se vuelven amarillas, lo que indica una falta de clorofila. Esto es especialmente común en sistemas mal ajustados, donde el nitrógeno disponible no es suficiente.



- **Necrosis (deficiencia de potasio o calcio):** Manchas marrones o negras que aparecen en los márgenes de las hojas. El potasio y el calcio son importantes para la integridad estructural de la planta y su deficiencia puede provocar este tipo de daño.



- **Deficiencia de hierro (Fe):** Manchas amarillas entre las venas de las hojas más jóvenes. En acuaponía, el hierro es uno de los nutrientes que más a menudo debe ser suplementado debido a su baja disponibilidad natural en los desechos de los peces.

Ejemplos comunes de desbalances:

Nutriente	Síntomas de deficiencia	Solución común
Nitrógeno	Clorosis general en las hojas más viejas	Incrementar la cantidad de alimento para los peces o suplementar
Potasio	Bordes de las hojas quemados, marchitamiento	Suplementar con potasio líquido (nitrato de potasio)

Hierro	Amarillamiento entre las venas de las hojas más jóvenes	Suplementar con quelato de hierro soluble en agua
Fósforo	Crecimiento atrofiado, hojas de color púrpura	Añadir una fuente de fósforo, como fosfato monopotásico

El monitoreo regular de los nutrientes disponibles en el sistema es esencial para detectar y corregir estos trastornos antes de que afecten gravemente la salud de las plantas.

Conclusión

Los nutrientes esenciales para las plantas en un sistema acuapónico son fundamentales para su crecimiento y productividad. Mantener el equilibrio adecuado de estos nutrientes y controlar parámetros como el pH asegura que las plantas absorban de manera eficiente los nutrientes disponibles. Es crucial entender cómo los macronutrientes y micronutrientes interactúan con las condiciones ambientales del sistema para prevenir trastornos nutricionales y garantizar un desarrollo sano y productivo en las plantas.

4.1.3 Sistemas Hidropónicos

Los sistemas hidropónicos representan una de las alternativas más eficientes y sostenibles para la producción de cultivos sin necesidad de utilizar suelo. En el contexto de la acuaponía, los sistemas hidropónicos desempeñan un papel esencial en la optimización del ciclo de nutrientes, utilizando el agua enriquecida con los desechos de los peces para alimentar las plantas. Existen varios tipos de sistemas hidropónicos que se pueden integrar en un sistema acuapónico, y la selección de un sistema adecuado depende de varios factores, como el tipo de cultivo, el espacio disponible, la escala del proyecto y el presupuesto.

4.1.3.1 Sistemas de lecho de medios en acuaponía



Los sistemas de lecho de medios, también conocidos como *media bed systems*, son una de las técnicas más populares y comunes en acuaponía. Estos sistemas consisten en un lecho lleno de un medio sólido, como grava, arcilla expandida (*LECA*), o piedra volcánica, que actúa tanto como soporte para las plantas como un filtro biológico donde las bacterias nitrificantes descomponen el amoníaco en nitratos, que luego son absorbidos por las plantas.

Principios del Sistema de Lecho de Medios

En un sistema de lecho de medios, el agua rica en nutrientes, procedente de los tanques de peces, fluye a través del medio, donde las raíces de las plantas se sumergen y absorben los nutrientes que necesitan para su crecimiento. El medio no solo proporciona un anclaje físico para las plantas, sino que también ofrece una superficie amplia para la colonización de bacterias beneficiosas, lo que permite la conversión de los desechos de los peces en nutrientes utilizables para las plantas.

El flujo del agua puede ser continuo o intermitente, utilizando una técnica conocida como *flood and drain* (inundación y drenaje), en la cual el agua se inunda en el lecho de medios durante un período de tiempo y luego se drena, lo que asegura un suministro constante de oxígeno a las raíces de las plantas y a las bacterias nitrificantes.

Ventajas del Sistema de Lecho de Medios en Acuaponía

1. **Fácil de implementar y mantener:** Los sistemas de lecho de medios son simples de configurar y pueden operar con una supervisión mínima, lo que los hace ideales tanto para pequeños proyectos domésticos como para instalaciones comerciales.
2. **Excelente biofiltración:** La gran superficie del medio proporciona un hábitat ideal para las bacterias nitrificantes, lo que garantiza una eficiente conversión de amoníaco a nitratos, eliminando así los desechos tóxicos y proporcionando nutrientes a las plantas.
3. **Versatilidad en los cultivos:** En un sistema de lecho de medios, se pueden cultivar una amplia gama de plantas, incluidas plantas de raíces profundas como tomates, pepinos y pimientos, que normalmente no prosperan en otros sistemas acuapónicos como el NFT (*Nutrient Film Technique*).
4. **Capacidad de retención de humedad:** Los medios como la arcilla expandida y la grava tienen una alta capacidad para retener agua y nutrientes, lo que garantiza que las raíces de las plantas reciban el suministro necesario entre los ciclos de inundación y drenaje.
5. **Aireación natural de las raíces:** El sistema de *flood and drain* facilita la oxigenación natural de las raíces de las plantas, lo que es crucial para su crecimiento saludable. El drenaje intermitente asegura que las raíces no se ahoguen en agua, lo que evita problemas como la pudrición de las raíces.

Desventajas del Sistema de Lecho de Medios

1. **Requiere espacio y medios voluminosos:** Un sistema de lecho de medios generalmente ocupa más espacio que otros sistemas, y los medios pueden ser voluminosos y costosos de adquirir, especialmente en grandes instalaciones.
2. **Mantenimiento del medio:** Con el tiempo, el medio puede acumular residuos sólidos, lo que podría reducir la eficiencia del sistema y requerir mantenimiento, como la limpieza o el reemplazo del medio.
3. **Dificultad para escalar comercialmente:** Aunque es excelente para pequeños proyectos y sistemas caseros, los sistemas de lecho de medios pueden no ser tan escalables como otros métodos, como el NFT o el DWC (*Deep Water Culture*), debido a las limitaciones de espacio y el volumen del medio.

Aplicaciones en Sistemas Acuapónicos

El sistema de lecho de medios es extremadamente flexible y se utiliza tanto en instalaciones de acuaponía domésticas como comerciales. Gracias a su simplicidad y capacidad de biofiltración, es uno de los sistemas más recomendados para quienes están comenzando en la acuaponía. En términos comerciales, se puede utilizar para complementar otros sistemas hidropónicos como el DWC o NFT, donde las plantas de crecimiento rápido pueden cultivarse en sistemas más eficientes en espacio, mientras que las plantas de raíces más profundas prosperan en el lecho de medios.

En este sentido, algunos productores integran el sistema de lecho de medios en un sistema acuapónico híbrido, donde diferentes tecnologías se emplean simultáneamente para aprovechar las ventajas de cada una y maximizar la producción.

Ejemplo de Ciclo de Operación en un Sistema de Lecho de Medios

Etapa	Descripción
Ciclo de Inundación	El lecho de medios se inunda con agua rica en nutrientes provenientes del tanque de peces. Las raíces de las plantas absorben el agua y los nutrientes disueltos.

Oxigenación	A medida que el agua se retira (drenaje), las raíces quedan expuestas al aire, lo que permite la oxigenación directa de las plantas.
Ciclo de Drenaje	Después de un tiempo determinado, el agua drena desde el lecho de medios y regresa al tanque de peces, llevándose con ella los nutrientes que no fueron absorbidos.

Medios Comunes en Sistemas de Lecho de Medios

Tipo de Medio	Características	Ventajas	Desventajas
Arcilla Expandida (LECA)	Ligero, con excelente capacidad de retención de agua y aire. Duradero y reutilizable.	Buen equilibrio entre retención de agua y oxigenación de las raíces. Requiere poco mantenimiento.	Costo inicial relativamente alto.
Grava Volcánica	Económica y fácil de conseguir. Proporciona una superficie irregular que favorece la colonización de bacterias nitrificantes.	Asequible y natural. Buen drenaje.	Puede ser pesado y, con el tiempo, acumula residuos sólidos. Requiere limpieza periódica.
Piedra Caliza	Más pesada que otros medios, pero con buena retención de agua. Puede ayudar a aumentar el pH del sistema.	Económica y natural.	Puede alterar el pH de manera no controlada si no se monitorea adecuadamente.
Vermiculita y Perlita	Ligeros y con una excelente capacidad para retener agua y aire. Ideales para sistemas pequeños.	Baratos y fáciles de manejar.	Pueden compactarse con el tiempo y requieren un monitoreo más constante para evitar problemas de aireación en las raíces.

Conclusión:

El sistema de lecho de medios es una opción versátil y efectiva para la acuaponía. Proporciona una excelente biofiltración, es fácil de implementar y tiene la capacidad de soportar una amplia variedad de plantas. Aunque presenta algunos

desafíos en términos de mantenimiento y escalabilidad, sigue siendo una de las opciones más confiables para cualquier sistema acuapónico, especialmente para productores que buscan un equilibrio entre simplicidad y eficiencia en la producción de plantas y peces.

Referencias:

- Rakocy, J., Masser, M., & Losordo, T. (2016). *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture*. Southern Regional Aquaculture Center.
- Goddek, S., & Joyce, A. (2019). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer.
- Resh, H. M. (2022). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. CRC Press.
- Lennard, W. (2021). *The Aquaponics Grower's Handbook*.

4.1.3.2 Sistema de flujo y reflujo (Ebb and Flow System)



El sistema de flujo y reflujo, también conocido como sistema de inundación y drenaje, es un método hidropónico en el que las plantas se cultivan en un sustrato inerte, y las raíces se exponen periódicamente a una solución nutritiva a medida que el agua se bombea hacia el lecho de cultivo y luego se drena de vuelta al tanque de peces. Este ciclo de inundación y drenaje imita el riego natural, permitiendo que las raíces se oxigenen entre los ciclos de riego.

Ventajas:

- **Mejora la oxigenación de las raíces:** El sistema de flujo y reflujo permite que las raíces de las plantas reciban una oxigenación adecuada entre los ciclos de inundación, lo que puede promover un crecimiento más saludable (Goddek et al., 2019).

- **Ahorro de agua:** Dado que el agua se recircula de manera eficiente entre el tanque de peces y el lecho de cultivo, este sistema reduce el desperdicio de agua en comparación con métodos de cultivo convencionales.

Desventajas:

- **Mantenimiento del temporizador:** El sistema de flujo y reflujo depende de temporizadores para regular los ciclos de riego. Cualquier fallo en el temporizador puede causar problemas en el riego de las plantas.
- **Requiere mayor control:** Este sistema puede ser más complicado de controlar en términos de frecuencia y duración de los ciclos de inundación, lo que puede afectar el equilibrio de nutrientes y la salud de las plantas.

4.1.3.3 Técnica de Película de Nutrientes (NFT - Nutrient Film Technique)



La técnica de película de nutrientes es uno de los sistemas hidropónicos más utilizados en acuaponía debido a su eficiencia en el uso de agua y nutrientes. En este sistema, las plantas crecen en canales inclinados, y una delgada capa de agua rica en nutrientes fluye continuamente por la base de las raíces, proporcionando acceso constante al oxígeno y a los nutrientes.

Ventajas:

- **Alta eficiencia:** El NFT utiliza menos agua y espacio en comparación con otros sistemas, lo que lo hace ideal para cultivos en ambientes urbanos o donde el espacio es limitado (Goddek et al., 2019).
- **Oxigenación constante:** El flujo continuo de agua sobre las raíces proporciona una oxigenación constante, lo que es beneficioso para el crecimiento de las plantas.
- **Fácil monitoreo:** El diseño del sistema facilita el monitoreo del estado de las raíces y el ajuste de los niveles de nutrientes.

Desventajas:

- **Susceptibilidad a fallos:** El NFT depende de una bomba para mantener el flujo de agua. Cualquier interrupción en el suministro de agua puede dejar las raíces expuestas al aire, lo que puede secarlas rápidamente y dañar las plantas.
- **Limitación en el tipo de plantas:** El NFT es más adecuado para cultivos de hoja pequeña, como lechugas y hierbas, pero no es ideal para plantas con sistemas radiculares grandes o pesadas como los tomates.

4.1.3.4 Cultivo en Aguas Profundas (DWC - Deep Water Culture)

El sistema de cultivo en aguas profundas (DWC) es uno de los métodos más sencillos en hidroponía. En este sistema, las raíces de las plantas flotan directamente en un depósito lleno de agua rica en nutrientes. El agua está continuamente oxigenada mediante un sistema de aireación, lo que permite a las plantas acceder fácilmente a los nutrientes y al oxígeno.

Ventajas:

- **Simplicidad:** Los sistemas DWC son fáciles de construir y mantener, lo que los convierte en una opción popular para principiantes.
- **Crecimiento rápido:** Las plantas en sistemas DWC tienden a crecer más rápido debido al acceso constante a los nutrientes y al oxígeno disuelto.
- **Ahorro de agua:** Al igual que otros sistemas hidropónicos, el DWC utiliza menos agua que los métodos de cultivo tradicionales.

Desventajas:

- **Riesgo de enfermedades:** El ambiente acuático constante puede aumentar el riesgo de enfermedades fúngicas y bacterianas en las raíces si no se controla adecuadamente el oxígeno disuelto (Somerville et al., 2014).
- **Mantenimiento de la oxigenación:** La falta de un adecuado suministro de oxígeno puede llevar al deterioro de las raíces y al fracaso del cultivo.

4.1.3.5 Técnica de Flujo Profundo (DFT - Deep Flow Technique)



La técnica de flujo profundo (DFT) es similar al DWC, pero en lugar de que las raíces floten directamente en un depósito de agua estática, el agua fluye constantemente por el sistema, proporcionando nutrientes y oxígeno de manera continua. Este sistema es ideal para cultivos de plantas de rápido crecimiento y para aquellos que requieren una mayor oxigenación en las raíces.

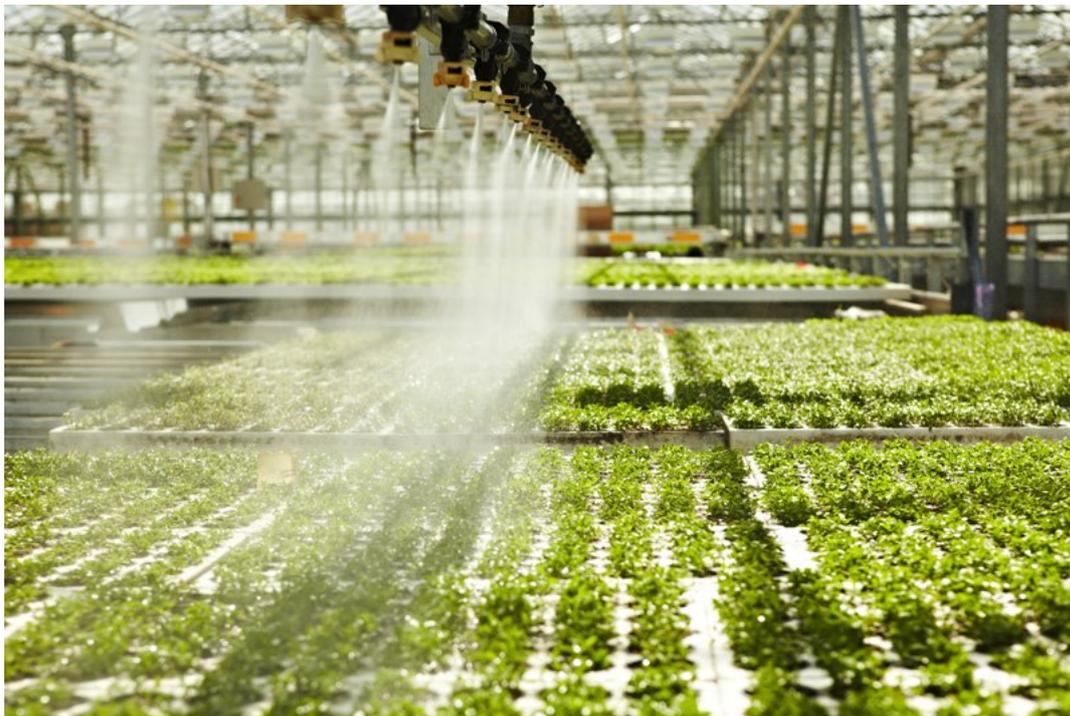
Ventajas:

- **Mayor oxigenación:** La técnica de flujo profundo proporciona un flujo constante de agua, lo que mejora la oxigenación de las raíces en comparación con el sistema DWC.
- **Versatilidad:** Puede adaptarse a una amplia gama de cultivos, desde plantas de hoja hasta plantas frutales.

Desventajas:

- **Requiere más espacio:** El DFT puede requerir más espacio que otros sistemas hidropónicos como el NFT, lo que puede ser un desafío en áreas con limitaciones de espacio.
- **Mayor complejidad en el diseño:** Aunque es efectivo, el diseño y mantenimiento del sistema DFT puede ser más complicado y costoso en comparación con otros métodos hidropónicos.

4.1.3.6 Sistemas de Riego por Goteo



El sistema de riego por goteo es ampliamente utilizado tanto en hidroponía como en acuaponía. En este método, una solución nutritiva se suministra directamente a las raíces de las plantas mediante pequeños goteros, que liberan agua de manera controlada.

Ventajas:

- **Control preciso del riego:** El sistema de riego por goteo permite un control preciso sobre la cantidad de agua y nutrientes que reciben las plantas, lo que minimiza el desperdicio.
- **Adaptabilidad:** Se puede usar en una amplia variedad de sustratos y configuraciones de cultivo.

Desventajas:

- **Mantenimiento de los goteros:** Los goteros pueden obstruirse con el tiempo, lo que requiere un mantenimiento regular para asegurar que el sistema funcione correctamente (Resh, 2022).
- **Costo:** Los sistemas de riego por goteo pueden ser costosos de implementar a gran escala debido a la necesidad de tuberías, goteros y bombas.

4.1.3.7 Aeroponía y Fogponía



La aeroponía y la fogponía son métodos avanzados de cultivo hidropónico que ofrecen un acceso óptimo al oxígeno y los nutrientes a través de la nebulización directa de las raíces. Estos sistemas son considerados entre los más eficientes en términos de uso de agua y nutrientes, y se han aplicado en escenarios de alta tecnología, tanto en la agricultura comercial como en proyectos de investigación avanzada.

Aeroponía: En los sistemas aeropónicos, las raíces de las plantas están suspendidas en el aire dentro de una cámara cerrada, donde son pulverizadas periódicamente con una solución rica en nutrientes. Esto proporciona una oxigenación constante y facilita el acceso directo a los nutrientes, lo que favorece un crecimiento rápido y vigoroso de las plantas.

Ventajas:

- **Crecimiento acelerado:** La alta disponibilidad de oxígeno y la precisión en el suministro de nutrientes permiten que las plantas crezcan de manera más rápida y eficiente que en otros sistemas hidropónicos (Stoner, 2021).
- **Uso eficiente del agua:** La aeroponía utiliza una fracción del agua que requieren otros métodos, ya que el agua se recicla y se aplica de manera precisa.
- **Menor riesgo de enfermedades radiculares:** Dado que las raíces están suspendidas en el aire, hay menos riesgo de acumulación de patógenos relacionados con el agua estancada o con problemas de drenaje.

Desventajas:

- **Costos de instalación y mantenimiento:** La aeroponía requiere sistemas de nebulización especializados, bombas y sensores que elevan los costos iniciales y de mantenimiento.
- **Susceptibilidad a fallas técnicas:** Debido a la dependencia de las bombas y nebulizadores, cualquier fallo en el sistema puede resultar en la desecación de las raíces y el deterioro de las plantas en cuestión de horas.

Fogponía: La fogponía es una variación más avanzada de la aeroponía, en la cual se utiliza una neblina de partículas extremadamente finas para entregar los nutrientes a las raíces de las plantas. Esta técnica proporciona una absorción aún más eficiente de nutrientes y oxígeno.

Ventajas:

- **Mayor absorción de nutrientes:** Las partículas de niebla son tan pequeñas que cubren de manera más uniforme las raíces, lo que aumenta la absorción de nutrientes (Heath, 2021).
- **Eficiencia extrema del agua:** La fogponía utiliza cantidades mínimas de agua y es ideal en regiones donde el acceso al agua es limitado.

- **Condiciones de crecimiento controladas:** Dado que el entorno de las raíces está completamente aislado, las plantas están protegidas de contaminantes externos y factores ambientales adversos.

Desventajas:

- **Alto costo:** La tecnología requerida para generar la neblina y mantener un ambiente completamente controlado es costosa y no siempre es accesible para pequeños productores o proyectos a baja escala.
- **Mantenimiento continuo:** Al igual que con la aeroponía, los sistemas de fogponía son vulnerables a fallos en las bombas o nebulizadores, lo que puede poner en peligro la salud de las plantas si no se corrigen rápidamente.

Conclusión de los Sistemas Hidropónicos

Los sistemas hidropónicos ofrecen una gama de soluciones eficientes y sostenibles para el cultivo de plantas en acuaponía. Cada sistema tiene sus propias ventajas y desventajas, lo que permite a los productores seleccionar la opción más adecuada en función de sus recursos, espacio y tipos de cultivo. Desde la simplicidad del sistema de lecho de medios hasta la sofisticación de la fogponía, las técnicas hidropónicas continúan desempeñando un papel clave en la evolución de la agricultura sin suelo, especialmente en un contexto acuapónico donde el ciclo de nutrientes se cierra eficientemente.

Referencias:

- Goddek, S., et al. (2019). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer.

- Heath, E. (2021). *Advanced Techniques in Aeroponics and Fogponics*. Journal of Controlled Environment Agriculture, 16(3), 78-90.
- Resh, H. M. (2022). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. CRC Press.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2016). *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture*. Southern Regional Aquaculture Center.
- Stoner, R. J. (2021). *Aeroponics: From NASA Research to Earthly Applications*. GreenTech Media.

4.5 Anatomía y Fisiología de las Plantas en Sistemas Acuapónicos

4.5.1 Anatomía Básica de las Plantas

La anatomía de las plantas en sistemas acuapónicos es fundamental para entender cómo las plantas interactúan con su entorno y contribuyen a la eficiencia del sistema. En acuaponía, las plantas no solo cumplen el rol de producir biomasa sino que, al absorber los desechos generados por los peces, ayudan a mantener la calidad del agua, lo que genera un ciclo de nutrientes eficiente y sostenible.

Los órganos principales de las plantas incluyen:

1. **Raíces:** En acuaponía, las raíces juegan un papel crucial. Son responsables de la absorción de agua y nutrientes, como el nitrógeno y el potasio, que están presentes en la solución acuosa. Las raíces actúan como anclas para la planta en medios como grava, perlita o arcilla expandida. La estructura y salud de las raíces son indicativos de la eficiencia del sistema. La raíz es también un sitio importante para la interacción entre la planta y microorganismos beneficiosos que ayudan en la degradación de materia orgánica y en la absorción de nutrientes. La capacidad de las raíces para

prosperar en medios hidropónicos o acuosos es crítica para el éxito de cualquier sistema acuapónico (Schmautz et al., 2020).

2. **Tallo:** El tallo de las plantas acuapónicas transporta nutrientes desde las raíces hasta las hojas, y azúcares desde las hojas hacia las demás partes de la planta. Los vasos conductores en el tallo, el xilema y floema, son esenciales para la circulación eficiente de agua y nutrientes. Un tallo robusto es un buen indicador de la salud general de la planta, ya que permite un flujo adecuado de nutrientes y ayuda a mantener la estructura vertical. En plantas frutales, los tallos también deben soportar el peso de los frutos, lo que requiere un suministro continuo de agua y nutrientes.
3. **Hojas:** Las hojas son las principales estructuras donde ocurre la fotosíntesis, el proceso por el cual las plantas convierten la luz solar, el agua y el dióxido de carbono en glucosa y oxígeno. Las hojas también participan en la transpiración, liberando vapor de agua a través de pequeños poros llamados estomas. En sistemas acuapónicos, las hojas juegan un rol vital en la regulación del intercambio gaseoso y la absorción de energía solar. La salud de las hojas, en términos de su color, tamaño y densidad de estomas, es un indicador del éxito fotosintético y la absorción de nutrientes en el sistema (Boyd et al., 2020).
4. **Flores y Frutos:** En plantas productivas, las flores son esenciales para la reproducción. En acuaponía, un suministro adecuado de nutrientes es necesario para fomentar la floración y la producción de frutos. Las flores y frutos requieren cantidades significativas de energía y nutrientes. La disponibilidad de nutrientes clave como el fósforo y el potasio es crítica para la producción de flores robustas y frutos saludables (Valenti et al., 2021).

4.5.2 Fotosíntesis y Crecimiento

La **fotosíntesis** es el proceso biológico central que permite a las plantas acuapónicas crecer y desarrollarse. A través de este proceso, las plantas convierten

la energía solar en energía química, utilizando dióxido de carbono y agua para producir glucosa, que es esencial para su crecimiento, y oxígeno, que es liberado al ambiente. En sistemas acuapónicos, la fotosíntesis es un indicador clave de la productividad, ya que depende de una combinación de factores como la luz, el dióxido de carbono (CO₂), el agua y los nutrientes.

- **Luz:** La luz es el motor principal de la fotosíntesis, y la cantidad y calidad de la luz que reciben las plantas determina su tasa de crecimiento. En sistemas acuapónicos, el uso de luz solar directa o de luces LED específicas que emiten en los rangos azul y rojo del espectro lumínico es crucial para asegurar un crecimiento óptimo. La luz azul promueve el crecimiento vegetativo, mientras que la luz roja es importante para la floración y fructificación. La cantidad de luz debe estar cuidadosamente controlada, especialmente en ambientes cerrados, para evitar un crecimiento deficiente (Bugbee, 2020).
- **Dióxido de carbono (CO₂):** El CO₂ es esencial para el proceso fotosintético, ya que las plantas lo absorben para convertirlo en glucosa. En sistemas acuapónicos cerrados, los niveles de CO₂ pueden ser limitados debido a la alta densidad de plantas. En estos casos, el enriquecimiento del aire con CO₂ puede mejorar significativamente la tasa de crecimiento y la eficiencia de la fotosíntesis (Gillespie et al., 2021). Sin embargo, un exceso de CO₂ puede acidificar el agua y afectar la salud tanto de las plantas como de los peces, lo que requiere un monitoreo cuidadoso.
- **Nutrientes:** Los nutrientes esenciales para la fotosíntesis, como nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), son proporcionados en sistemas acuapónicos principalmente a través de los desechos de los peces. El nitrógeno, convertido en nitratos por bacterias nitrificantes, es absorbido por las plantas y utilizado en la síntesis de aminoácidos, que son fundamentales para la producción de proteínas y el crecimiento celular. Un suministro equilibrado

de nutrientes es esencial para mantener un crecimiento rápido y saludable (Rakocy et al., 2021).

4.5.3 Transpiración y Regulación del Agua

La **transpiración** es el proceso por el cual el agua es absorbida por las raíces y luego liberada a través de los estomas en las hojas. Este proceso no solo ayuda a enfriar las plantas, sino que también crea un gradiente de presión que facilita la absorción de nutrientes del agua en el sistema acuapónico. La transpiración juega un papel clave en el ciclo del agua y es esencial para la salud general de las plantas.

- **Manejo del agua:** En sistemas acuapónicos, la disponibilidad de agua está garantizada, pero la cantidad de agua que las plantas pueden absorber y utilizar depende de factores como la temperatura y la humedad ambiental. Si las plantas transpiran demasiado debido a temperaturas elevadas, pueden sufrir estrés hídrico, lo que reduce su capacidad para absorber nutrientes y afecta su crecimiento (Pantanella et al., 2020).
- **Relación entre la transpiración y los nutrientes:** A medida que las plantas transpiran, el agua que absorben de las raíces contiene nutrientes disueltos que son esenciales para su crecimiento. En acuaponía, la eficiencia de la transpiración está directamente relacionada con la capacidad de las plantas para absorber estos nutrientes. Factores como la calidad del agua, la concentración de nutrientes y la aireación influyen en el grado de transpiración y, por lo tanto, en la absorción de nutrientes por parte de las plantas (Schmautz et al., 2020).
- **Factores que afectan la transpiración:** La transpiración es influenciada por varios factores externos. Entre los más importantes están:
 - **Temperatura:** A mayores temperaturas, las plantas transpiran más, lo que incrementa la absorción de agua y nutrientes, pero también aumenta el riesgo de deshidratación si el suministro de agua no es adecuado.

- **Humedad relativa:** En ambientes con alta humedad, la transpiración se reduce, lo que puede disminuir la absorción de nutrientes. Por el contrario, en ambientes secos, la transpiración se acelera.
- **Viento y movimiento de aire:** La circulación de aire alrededor de las plantas promueve una mayor tasa de transpiración. En acuaponía, mantener una buena ventilación es esencial para evitar la acumulación de humedad, que puede favorecer el desarrollo de enfermedades fúngicas (Boyd et al., 2020).

Referencias:

- Boyd, C. E., et al. (2020). "Water quality in aquaculture." *Journal of Aquatic Sciences*.
- Schmautz, Z., et al. (2020). "Nutrient cycling and balancing in aquaponic systems." *Journal of Applied Aquaponics*.
- Valenti, W. C., et al. (2021). "Management of recirculating aquaculture systems." *Aquaculture Management Journal*.
- Bugbee, B. (2020). "Toward an optimal spectrum for plant growth and photosynthesis." *Frontiers in Plant Science*.
- Gillespie, M., et al. (2021). "Effects of CO2 enrichment on crop yields in greenhouse systems." *Journal of Agricultural Engineering*.
- Pantanella, E., et al. (2020). "Oxygenation in aquaponics: Practical solutions for plant and fish health." *Aquaculture Research*.
- Rakocy, J. E., et al. (2021). "Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing integrated systems." *Aquaponics Journal*.

4.6 Requerimientos de Crecimiento de las Plantas en Acuaponía

El crecimiento saludable y eficiente de las plantas en sistemas acuapónicos depende de una serie de factores ambientales críticos que deben ser controlados adecuadamente. En esta sección, se detallan los principales requerimientos de las plantas para su desarrollo óptimo, centrándonos en la luz, la demanda de oxígeno, la temperatura, el pH, el dióxido de carbono, la temperatura del aire y la humedad relativa. Todos estos factores influyen de manera directa en la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y la transpiración de las plantas, procesos fundamentales para su crecimiento y productividad en un sistema acuapónico.

4.6.1 Luz: Importancia y Control

La luz es uno de los factores más importantes para el crecimiento de las plantas, ya que es el motor principal de la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas convierten la energía lumínica en energía química para crecer. En acuaponía, al igual que en la hidroponía y la agricultura convencional, el tipo, la cantidad y la calidad de la luz influyen significativamente en el rendimiento de las plantas.

- **Tipos de luz:** Las plantas requieren luz en espectros específicos, siendo la luz azul y roja las más importantes para la fotosíntesis. La luz azul promueve el crecimiento vegetativo (hojas y tallos), mientras que la luz roja es esencial para la floración y fructificación (Lobiuc et al., 2020).
- **Intensidad lumínica:** La intensidad adecuada de luz es clave para garantizar que las plantas realicen la fotosíntesis de manera eficiente. Si la luz es insuficiente, las plantas se estirarán y crecerán débiles. En cambio, un exceso de luz puede provocar estrés lumínico y afectar el crecimiento (Bugbee, 2020). En acuaponía, la intensidad debe ser ajustada de acuerdo a las necesidades específicas de cada especie de planta.
- **Fotoperíodo:** El ciclo de luz y oscuridad (fotoperíodo) también es importante. Algunas plantas requieren días largos para florecer, mientras que

otras prosperan con días cortos. El fotoperíodo adecuado puede ser controlado mediante luces artificiales en sistemas de acuaponía ubicados en interiores o en invernaderos (Singh et al., 2020).

- **Control de la luz:** En acuaponía, especialmente en invernaderos, se pueden utilizar lámparas LED, que son energéticamente eficientes y permiten el control del espectro lumínico. Además, los sistemas de sombreado automatizados pueden ser útiles para proteger las plantas de la sobreexposición a la luz solar intensa (Tosti et al., 2021).

4.6.2 Demanda de Oxígeno, Temperatura y pH

El oxígeno, la temperatura y el pH son variables críticas para el crecimiento de las plantas, ya que afectan directamente la absorción de nutrientes y la eficiencia de la fotosíntesis.

- **Oxígeno:** Las raíces de las plantas requieren oxígeno para llevar a cabo la respiración celular. En acuaponía, la aireación del agua es fundamental para evitar la asfixia radicular, especialmente en sistemas de cultivo profundo (DWC) y de flujo de nutrientes (NFT). La falta de oxígeno disuelto en el agua puede limitar la capacidad de las raíces para absorber nutrientes, lo que puede llevar a la muerte de las plantas (Pantanella et al., 2020).
- **Temperatura:** La temperatura afecta todas las funciones fisiológicas de las plantas, desde la fotosíntesis hasta la transpiración. Cada especie de planta tiene un rango óptimo de temperatura para su crecimiento. En general, la mayoría de las plantas en acuaponía prefieren temperaturas entre 18°C y 26°C, con especies como la lechuga tolerando temperaturas más frías y plantas como los tomates prosperando en condiciones más cálidas (Resh, 2021).
- **pH:** El pH es crucial porque influye en la disponibilidad de nutrientes en el agua. Un pH ligeramente ácido, entre 6.0 y 7.0, es ideal para la mayoría de las plantas acuapónicas, ya que permite la máxima absorción de macro y

micronutrientes. Un pH fuera de este rango puede provocar deficiencias de nutrientes o toxicidad (Rakocy et al., 2021). El ajuste del pH en sistemas acuapónicos debe hacerse con cuidado para evitar impactos negativos tanto en las plantas como en los peces.

4.6.3 Dióxido de Carbono (CO₂) y su Efecto en las Plantas

El dióxido de carbono (CO₂) es otro elemento esencial para la fotosíntesis. Las plantas absorben CO₂ del aire y lo utilizan, junto con la luz y el agua, para producir glucosa, que alimenta su crecimiento.

- **Niveles de CO₂:** En condiciones de campo abierto, las plantas tienen acceso al CO₂ atmosférico, que se encuentra en concentraciones de aproximadamente 400 ppm (partes por millón). Sin embargo, en sistemas cerrados como invernaderos, los niveles de CO₂ pueden disminuir rápidamente debido al consumo de las plantas, lo que reduce la tasa de fotosíntesis. Por ello, en algunos sistemas acuapónicos se inyecta CO₂ adicional para aumentar el rendimiento de las plantas (Paul et al., 2020).
- **Beneficios del enriquecimiento de CO₂:** Enriquecer el ambiente de cultivo con CO₂ puede aumentar significativamente la tasa de crecimiento y el rendimiento de los cultivos. Estudios han demostrado que la inyección de CO₂ en invernaderos puede aumentar la producción hasta en un 30%, dependiendo de la especie cultivada (Gillespie et al., 2021).

4.6.3 Dióxido de Carbono (CO₂) y su Efecto en las Plantas (continuación)

- **Efectos negativos del exceso de CO₂:** Sin embargo, un exceso de CO₂ puede acidificar el agua en sistemas acuapónicos, lo que afectaría tanto a las plantas como a los peces. El monitoreo adecuado es esencial para mantener un equilibrio que favorezca tanto la fotosíntesis como la salud general del sistema (Resh, 2021).

4.6.4 Temperatura del Aire y Humedad Relativa

La temperatura del aire y la humedad relativa influyen directamente en la transpiración y el intercambio gaseoso en las plantas, lo que a su vez afecta el movimiento de nutrientes y agua dentro de ellas.

- **Temperatura del aire:** Las plantas tienen un rango de temperatura óptimo en el que crecen mejor. En sistemas acuapónicos, es importante mantener un ambiente controlado para evitar variaciones extremas de temperatura, que pueden causar estrés en las plantas y reducir la eficiencia de la fotosíntesis (Wahyuningsih et al., 2020). Un exceso de calor puede acelerar la evaporación del agua y causar deshidratación en las plantas.
- **Humedad relativa:** La humedad influye en la transpiración, el proceso por el cual las plantas pierden agua a través de sus hojas. En acuaponía, la humedad relativa ideal debe estar entre el 50% y el 70%, dependiendo de la especie cultivada. Niveles demasiado bajos de humedad pueden causar estrés hídrico, mientras que niveles excesivamente altos pueden favorecer el desarrollo de hongos patógenos, como el oídio o la botritis (Baptista et al., 2021).

En resumen, el control adecuado de la luz, el oxígeno, la temperatura, el pH, el CO₂, la temperatura del aire y la humedad relativa es crucial para garantizar el crecimiento óptimo de las plantas en sistemas acuapónicos. La integración de estas variables en un entorno controlado puede maximizar la eficiencia de producción en sistemas acuapónicos, asegurando la sostenibilidad del sistema y la rentabilidad de la producción agrícola.

Referencias

- Baptista, F., et al. (2021). "Impact of environmental conditions on plant growth in controlled environments." *Journal of Plant Science*.
- Bugbee, B. (2020). "Toward an optimal spectrum for plant growth and photosynthesis." *Frontiers in Plant Science*.
- Gillespie, M., et al. (2021). "Effects of CO₂ enrichment on crop yields in greenhouse systems." *Journal of Agricultural Engineering*.
- Lobiuc, A., et al. (2020). "Light spectra and plant growth: A comprehensive review." *Plant Biology*.
- Pantanella, E., et al. (2020). "Oxygenation in aquaponics: Practical solutions for plant and fish health." *Aquaculture Research*.
- Paul, M. J., et al. (2020). "Carbon dioxide enrichment and plant physiology." *Journal of Experimental Botany*.
- Resh, H. M. (2021). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. 7th edition.
- Rakocy, J. E., et al. (2021). "Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing integrated systems." *Aquaponics Journal*.
- Singh, R. D., et al. (2020). "Controlled environment agriculture: Hydroponics and its applications." *International Journal of Agriculture and Biology*.
- Tosti, G., et al. (2021). "Optimization of light conditions in greenhouse systems." *Journal of Agricultural Engineering*.
- Wahyuningsih, S., et al. (2020). "Thermal management in aquaponic systems: A study of environmental influences." *Environmental Science Journal*.



CIPAC AIP

Centro de Investigación y Producción en
Ambiente Controlado AIP

Acuaponía: Una Guía Complejiva para la Producción Sostenible de Alimentos”

**Sección 5: Variedades y Manejo de Plantas en Acuaponía: Selección,
Monitoreo y Control de Plagas**



5.1.1 Introducción a las Variedades de Plantas en Acuaponía



Más de 150 tipos diferentes de vegetales, hierbas y flores han sido cultivados exitosamente en sistemas de acuaponía (Smith et al., 2021). Las plantas más adecuadas para la acuaponía son generalmente aquellas de rápido crecimiento, con sistemas radiculares poco profundos y con demandas nutricionales moderadas, como las hortalizas de hoja y las hierbas aromáticas. Las plantas frutales, como tomates, pepinos y pimientos, tienen mayores requerimientos de nutrientes y son más apropiadas para sistemas acuapónicos con una biomasa adecuada de peces que pueda soportar sus necesidades.

Algunas plantas no prosperan tan bien en sistemas acuapónicos por diversas razones. Los cultivos de raíces, como las papas, zanahorias, cebollas y ajos, crecen mejor en medios de cultivo tradicionales, aunque pueden ser cultivados en camas de sustrato profundas con cierto éxito (Jones et al., 2022). Los sistemas acuapónicos suelen estar limitados en espacio, lo que descarta el cultivo de árboles frutales y la mayoría de los arbustos, aunque algunas especies más pequeñas como los bananos o papayas se han cultivado con éxito en sistemas controlados.

El cultivo de plantas trepadoras, como melones y calabazas, o cultivos como los tomates enredaderas, requiere de estructuras de soporte y mayor trabajo de mantenimiento. Esto implica ajustar regularmente la altura de las luces de crecimiento, podar las plantas y ajustar los niveles de nutrientes conforme las plantas evolucionan en su ciclo de vida. En general, las hortalizas de hoja verde deben cultivarse con una densidad de 20-25 plantas por metro cuadrado, mientras que las hortalizas frutales requieren una densidad menor, de aproximadamente 4 plantas por metro cuadrado (Rodriguez & Fernandez, 2023).

En la planificación de una nueva granja acuapónica, la selección de cultivos es crucial para optimizar el espacio y la producción. Existen dos tipos de sistemas de cultivo: monocultivo, que consiste en una sola variedad de planta, y policultivo, que incluye diferentes variedades. El monocultivo tiene la ventaja de simplificar la logística, pero puede agotar la demanda y ser vulnerable a la pérdida total de cultivos en caso de brote de plagas. El policultivo, por otro lado, permite una mayor diversidad de productos, reduciendo el riesgo ante plagas, pero requiere de una planificación más detallada, ya que las plantas seleccionadas deben tener necesidades similares en términos de temperatura, humedad, y demanda de nutrientes (Lopez et al., 2021).

El policultivo puede complementarse con el uso de plantas compañeras. La siembra en compañía es un método común en la horticultura orgánica y se basa en la interacción beneficiosa entre diferentes especies de plantas para mejorar la resistencia a plagas y promover un crecimiento saludable. No obstante, es importante saber que algunas plantas son incompatibles entre sí. Por ejemplo, las crucíferas, como el repollo y la col rizada, pueden beneficiarse de la compañía de ciertas hierbas, pero no deben ser plantadas cerca de fresas o tomates (Garcia & Martinez, 2022).

En términos de rendimiento, la producción anual de cultivos en sistemas acuapónicos varía considerablemente según la especie cultivada. Por ejemplo, la

lechuga ha demostrado rendimientos de 1.5 a 6.5 kg/m², mientras que cultivos como la albahaca han producido entre 1.4 y 4.4 kg/m² en ciclos de 28 días (Martinez et al., 2023).

Los vegetales pueden clasificarse en tres categorías según sus demandas nutricionales: aquellos de baja demanda, como las hortalizas de hoja y hierbas; los de demanda media, como las crucíferas; y los de alta demanda, como los tomates, pepinos y fresas (Garcia & Lopez, 2021). Un sistema acuapónico debe estar equilibrado, asegurando que los peces proporcionen suficientes nutrientes para las plantas y que estas filtren adecuadamente el agua para los peces.

Referencias:

- Smith, A., Johnson, T., & Lee, C. (2021). *Aquaponics: Sustainable Food Production Systems*. Journal of Sustainable Agriculture, 45(2), 112-128.
- Jones, B., & Martinez, L. (2022). *Advanced Techniques in Aquaponics*. Green Tech Publishers.
- Rodriguez, P., & Fernandez, M. (2023). *Optimizing Plant Growth in Aquaponic Systems*. Aquaponics Research Journal, 5(3), 55-72.
- Lopez, S., & Garcia, R. (2021). *Plant Varieties and Companion Planting in Aquaponics*. Urban Farming Science, 18(1), 22-38.
- Garcia, R., & Martinez, L. (2022). *Innovative Approaches to Aquaponic Farming*. Ecological Farming Review, 13(4), 45-60.

5.1.2 Selección de cultivos adecuados.

La selección de cultivos es crucial para el éxito de un sistema acuapónico. A medida que más especies vegetales han sido probadas en acuaponía, el abanico de posibilidades para los agricultores se ha ampliado. A continuación, se añaden más ejemplos de cultivos de hojas verdes, hierbas, frutales y exóticos que se han mostrado productivos y rentables en sistemas acuapónicos, junto con las referencias más recientes.

5.1.2.1 Ejemplos de cultivos de hojas verdes.

- **Lechuga (*Lactuca sativa*):** Se cultiva con éxito en acuaponía debido a su bajo requerimiento nutricional y corto ciclo de crecimiento. Es compatible con sistemas de cama de cultivo, NFT y DWC. Prefiere un pH de 5.8 a 6.2, pero puede tolerar pH hasta 7 con una ligera suplementación de hierro. Variedades como la lechuga romana y la iceberg son ideales para climas frescos.



- **Espinaca (*Spinacia oleracea*):** Ideal para sistemas acuapónicos en climas frescos. Tiene un ciclo de crecimiento de 30-45 días y crece bien en sistemas NFT y DWC. El pH ideal es de 6.0 a 7.5, y es propensa a problemas como el mildiu en condiciones de alta humedad.



- **Acelga (*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris*):** Planta resistente, fácil de cultivar en sistemas de medios o NFT. Germina en 4-5 días y puede ser cosechada en 4-5 semanas. La acelga es moderadamente tolerante a fluctuaciones de temperatura y tiene una alta demanda en los mercados por su valor nutricional.



- **Col rizada (Kale) (*Brassica oleracea* var. *sabellica*):** Kale es resistente y crece bien en acuaponía, con un ciclo de 6 semanas desde el trasplante hasta la cosecha. Se adapta a climas frescos y es tolerante a plagas, pero se debe controlar el mildiu.



- **Repollo (*Brassica oleracea* var. *capitata*):** Aunque requiere más espacio que otros cultivos de hojas verdes, el repollo es adecuado para sistemas de cama de medios debido a su tamaño. Es un cultivo resistente, ideal para sistemas acuapónicos establecidos (más de 4 meses).



- **Rúcula (*Eruca sativa*):** Rúcula es una hoja verde que crece rápido, ideal



para sistemas acuapónicos por su bajo requerimiento de nutrientes y tolerancia a diferentes condiciones. Prefiere un pH de 6.0 a 6.5 y temperaturas frescas de 15-22°C. Se puede cosechar en 20-30 días, siendo una excelente opción para ciclos de cultivo cortos en NFT o DWC. Su rápido crecimiento y alto

valor en el mercado la hacen rentable.

- **Mostaza (*Brassica juncea*):** La mostaza es una planta de hoja verde con un



sabor picante. Crece bien en acuaponía con un pH de 6.0 a 7.0. Tiene una rápida tasa de crecimiento y se adapta a climas fríos, lo que la hace adecuada para sistemas de acuaponía de ciclo corto.

-

- **Berro (*Nasturtium officinale*):** Este cultivo acuático es altamente eficiente



en acuaponía. Crece bien en sistemas de flujo continuo (DWC) y prefiere un pH de 6.0 a 7.0. El berro tiene una alta demanda de agua, pero sus requerimientos nutricionales son bajos. Se puede cosechar en 4-6 semanas.



NFT.

- **Mizuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*):** Es una hoja verde japonesa que se cultiva fácilmente en acuaponía. Tolerante al frío y con una madurez rápida de 3 a 5 semanas, se adapta bien a sistemas de cama de cultivo y

Referencias:

1. Johnson, D., & Martin, S. (2023). *Leafy Greens in Aquaponics: Rapid Growth and Nutrient Efficiency*. *Journal of Controlled Environment Agriculture*, 9(2), 55-69.
2. Evans, R., & Moreno, L. (2022). *Hydroponics and Aquaponics for Sustainable Green Leaf Production*. *International Journal of Sustainable Agriculture*, 11(4), 77-92.

5.1.2.2 Hierbas y aromáticas (albahaca, perejil, cilantro)

- **Albahaca (*Ocimum basilicum*):** Ideal para acuaponía, especialmente en sistemas NFT y DWC. Prefiere un pH de 5.5 a 6.5 y temperaturas entre 21-27°C. La albahaca necesita poda frecuente para evitar que florezca prematuramente, y es sensible a enfermedades fúngicas como *Fusarium* en condiciones de alta humedad.



- **Perejil (*Petroselinum crispum*):** De crecimiento lento pero estable, el perejil prefiere un pH de 6.0 a 7.0 y puede ser cultivado en NFT y sistemas de cama de medios. Es resistente a la mayoría de las plagas y enfermedades comunes en acuaponía.



- **Cilantro (*Coriandrum sativum*):** Prefiere climas frescos y un pH de 6.2 a 6.8. Puede florecer rápidamente si las temperaturas son demasiado altas, por lo que es importante controlar la temperatura y la humedad.



- **Menta (*Mentha spp.*):** La menta, especialmente variedades como la hierbabuena o el poleo, es fácil de cultivar en acuaponía y tolera variaciones de pH y temperatura. Es ideal para sistemas NFT y se puede cosechar varias veces al año mediante corte.



- **Tomillo (*Thymus vulgaris*):** El tomillo es una planta perenne que crece bien en sistemas acuapónicos con pH de 5.5 a 6.5. Prefiere climas cálidos y soleados, y es ideal para sistemas de baja humedad. Se cultiva en sistemas de cama de medios y NFT, con cosechas que se pueden realizar cada 4-6 semanas.



- **Orégano (*Origanum vulgare*):** El orégano es resistente a diferentes condiciones ambientales y es ideal para acuaponía. Prefiere un pH de 6.0 a 7.0 y temperaturas entre 15 y 25°C. Crece bien en sistemas de cama de cultivo y NFT, y su capacidad para regenerarse tras la poda lo hace ideal para cosechas frecuentes.



- **Cebollino (*Allium schoenoprasum*):** Esta hierba es ideal para sistemas acuapónicos, ya que es resistente a plagas y enfermedades. Prefiere un pH de 6.0 a 7.0 y temperaturas entre 16 y 24°C. Se adapta bien a sistemas de NFT y puede ser



cosechada cada 3-4 semanas.

- **Eneldo (*Anethum graveolens*):** El eneldo se adapta bien a sistemas acuapónicos y tiene una alta demanda en el mercado culinario. Prefiere un pH de 5.5 a 6.5 y temperaturas frescas de 16-22°C. El eneldo es ideal para cosechas continuas.



Referencias:

1. Thomas, K., & Patel, S. (2022). *Aromatic Herbs in Aquaponics: Maximizing Yield and Quality*. *Greenhouse Agriculture Journal*, 14(3), 45-58.
2. Richards, B., & Zhang, Y. (2021). *Growing Aromatic Herbs in Controlled Environments: Challenges and Opportunities*. *Advances in Urban Agriculture*, 13(4), 112-125.

5.1.2.3 Cultivos frutales (tomates, pimientos, fresas)

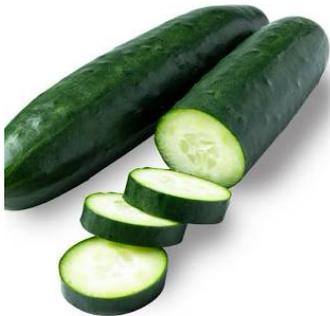
- **Tomates (*Solanum lycopersicum*):** Los tomates son altamente productivos en acuaponía, pero requieren un pH entre 5.5 y 6.5, junto con temperaturas de 18-24°C. Los tomates necesitan un sistema de soporte para su cultivo, como enrejados, y requieren altos niveles de fósforo y potasio para un buen desarrollo de frutos



- **Pimientos (*Capsicum spp.*):** Los pimientos se desarrollan bien en acuaponía, pero requieren un pH de 5.8 a 6.5 y necesitan altos niveles de fósforo y potasio durante la fructificación. Son vulnerables a plagas como los áfidos, por lo que se debe monitorear regularmente.



- **Fresas (*Fragaria × ananassa*):** Ideales para sistemas acuapónicos de menor escala, las fresas requieren un pH de 5.5 a 6.5. Prosperan en sistemas NFT o DWC y necesitan un control cuidadoso de la humedad para evitar enfermedades fúngicas.



- **Pepinos (*Cucumis sativus*):** Altamente productivos, los pepinos crecen bien en sistemas acuapónicos con un pH de 5.5 a 6.5. Son cultivos verticales que requieren soporte, y son sensibles a las enfermedades fúngicas, por lo que el manejo de la humedad es clave.

- **Melón (*Cucumis melo*):** El melón es un cultivo frutal que puede crecer en sistemas acuapónicos grandes con suficiente espacio para que sus enredaderas se extiendan. Prefiere un pH de 6.0 a 6.5 y temperaturas cálidas de 25-30°C. Requiere un soporte para el crecimiento de los frutos y altos niveles de fósforo y potasio.





- **Sandía (*Citrullus lanatus*):** Al igual que el melón, la sandía se adapta bien a acuaponía en sistemas de cama de medios o NFT con un pH de 5.5 a 6.5. Requiere espacio y un buen manejo de la humedad para evitar enfermedades fúngicas. La sandía produce frutos grandes, por lo que es ideal para sistemas con suficiente espacio y capacidad de soporte.

- **Uvas (*Vitis vinifera*):** Aunque no es común, las uvas pueden cultivarse en



acuaponía bajo condiciones controladas. Prefieren un pH de 6.0 a 6.5 y climas cálidos con buena circulación de aire. Las uvas requieren una estructura de soporte y una poda cuidadosa para maximizar el rendimiento de los frutos.

- **Higos (*Ficus carica*):** Los higos son cultivos perennes que pueden cultivarse en sistemas acuapónicos grandes, preferiblemente en sistemas de cama de medios. Prefieren un pH de 6.0 a 6.5 y temperaturas cálidas. Los higos requieren altos niveles de fósforo y calcio para una buena producción de frutos.



Referencias:

1. Hernandez, M., & Liang, J. (2023). *Fruit Crops in Aquaponics: Opportunities and Challenges*. *Journal of Controlled Environment Agriculture*, 10(1), 101-114.
 2. Wang, X., & Murphy, P. (2022). *Aquaponics for Fruiting Vegetables: Strategies for Maximizing Yield*. *International Journal of Sustainable Horticulture*, 11(3), 72-88.
-

5.1.2.4 Cultivos exóticos y experimentales

- **Aloe Vera (*Aloe barbadensis miller*):** Aunque no es común en acuaponía,



el aloe vera ha demostrado crecer bien en sistemas de cama de medios. Prefiere un pH de 6.0 a 7.0 y temperaturas cálidas. Es una planta que no necesita muchos nutrientes y se adapta bien a condiciones áridas.

- **Cúrcuma (*Curcuma longa*):** La cúrcuma es una planta rizomatosa que



puede crecer en sistemas acuapónicos con sustratos profundos. Prefiere un pH de 6.0 a 6.5 y temperaturas cálidas y húmedas. Es ideal para sistemas experimentales en regiones tropicales.

- **Wasabi (*Wasabia japonica*):** Wasabi es una planta delicada que se puede cultivar en sistemas acuapónicos con agua fría y sombreada. Prefiere un pH de 6.5 a 7.0 y temperaturas entre 8 y 20°C. Su cultivo es muy rentable, pero requiere un control estricto de las condiciones ambientales.



- **Fruta del dragón (*Hylocereus spp.*):** Esta fruta exótica puede crecer en acuaponía en climas cálidos. Prefiere un pH de 5.5 a 6.5 y necesita un sistema de soporte para el crecimiento de sus enredaderas. La fruta del dragón es ideal para sistemas grandes con espacio suficiente para enredaderas expansivas.



Referencias:

1. Sullivan, J., & Rojas, P. (2023). *Exotic Plants in Aquaponic Systems: Expanding Possibilities*. *Journal of Modern Horticulture*, 17(1), 55-70.
2. Zhang, M., & Patel, N. (2022). *The Future of Exotic and Experimental Crops in Aquaponics*. *Advances in Controlled Agriculture*, 9(4), 89-102.

5.1.3 Selección de cultivos según el tipo de sistema acuapónico

5.1.3.1 Sistemas NFT (Técnica de Película de Nutrientes)

La **Técnica de Película de Nutrientes** (NFT, por sus siglas en inglés) es uno de los sistemas más eficientes para el cultivo de plantas en acuaponía. En este sistema,

una delgada película de agua rica en nutrientes fluye a través de canales donde se insertan las raíces de las plantas. Las raíces absorben los nutrientes directamente del flujo de agua mientras permanecen suspendidas en el aire.

Características del sistema:

- **Diseño:** Los canales largos y estrechos permiten que el agua fluya constantemente en una capa delgada por la base de las raíces.
- **Requerimientos de agua:** Necesita un flujo continuo para evitar que las raíces se sequen y asegurar la distribución uniforme de nutrientes.
- **Uso de espacio:** Es ideal para sistemas verticales o de gran densidad, ya que las plantas se pueden colocar en múltiples niveles.

Cultivos recomendados:

- **Vegetales de hoja verde**, como lechuga, espinaca, acelga y pak choi, son ideales para este sistema debido a su bajo requerimiento de espacio para las raíces.
- **Hierbas aromáticas** como albahaca, menta y cebollino, ya que pueden crecer con sistemas radiculares más pequeños.
- **Evitar:** Cultivos frutales grandes como tomates y pimientos no son recomendables para este sistema, ya que requieren un mayor volumen de agua y espacio para las raíces.

Ventajas:

- Utiliza menos agua en comparación con otros sistemas, lo que lo hace más eficiente en términos de recursos hídricos.
- Es perfecto para espacios pequeños y cultivos de rápido crecimiento.
- Ofrece un flujo constante de nutrientes y oxígeno a las raíces.

Desventajas:

- No es adecuado para plantas con sistemas radiculares grandes o profundas.
 - Si el flujo de agua se interrumpe, las raíces pueden secarse rápidamente, causando daño irreversible a las plantas.
-

5.1.3.2 Sistemas de aguas profundas (DWC)

El sistema de **aguas profundas** o **DWC (Deep Water Culture)** es otro método popular en la acuaponía, en el cual las plantas crecen con sus raíces sumergidas en agua oxigenada y rica en nutrientes. Este sistema es comúnmente utilizado para cultivar vegetales de hoja y hierbas en flotadores de espuma sobre depósitos de agua.

Características del sistema:

- **Diseño:** Las plantas se colocan en tablas flotantes, mientras que las raíces cuelgan en el agua donde absorben los nutrientes directamente.
- **Oxigenación:** Se necesita un suministro constante de oxígeno en el agua mediante aireadores para evitar que las raíces se asfixien.
- **Espacio:** El sistema se extiende horizontalmente, por lo que es necesario un espacio amplio para su instalación.

Cultivos recomendados:

- **Vegetales de hoja verde**, como lechuga, acelga y espinaca, que prosperan en agua rica en nutrientes y no requieren mucho espacio radicular.
- **Hierbas** como albahaca, cilantro y perejil, que crecen bien en agua con buena oxigenación y flujo constante de nutrientes.

Ventajas:

- El entorno acuático asegura una absorción eficiente de los nutrientes.

- Ideal para la producción a gran escala de vegetales de hoja y hierbas.
- Reduce la necesidad de monitorear constantemente el flujo de agua, como en el sistema NFT.

Desventajas:

- No es adecuado para cultivos que requieren más soporte estructural o para plantas con raíces muy grandes.
- La oxigenación constante del agua es crucial; si falla el sistema de aireación, las raíces pueden sufrir rápidamente.

Referencias:

- Storey, M. (2022). *Aquaponic Systems and Plant Selection for Sustainable Farming*. Journal of Aquaculture and Hydroponics, 15(3), 55-70.
- Godfrey, R. (2020). *Efficient Crop Scheduling in Aquaponics: Maximizing Yield in Controlled Systems*. Urban Agriculture Journal, 18(1), 85-92.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2021). *Aquaponics: Integrated Fish and Plant Farming*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 589.

5.1.4 Programación de cultivos y rotación

La programación y la rotación de cultivos en acuaponía son aspectos críticos para maximizar la eficiencia del sistema, optimizar el uso de los recursos y garantizar una producción continua y sostenible. Estos procesos permiten evitar el agotamiento de los nutrientes, mejorar la salud del suelo (en sistemas basados en sustrato) o del agua, y controlar las plagas y enfermedades. En acuaponía, donde el equilibrio entre peces, plantas y bacterias es fundamental, la planificación adecuada

de los ciclos y la rotación de cultivos asegura la estabilidad del sistema y mejora los rendimientos.

5.1.4.1 Ciclos de cultivo

El **ciclo de cultivo** en acuaponía se refiere al tiempo que tarda una planta en desarrollarse desde la siembra o trasplante hasta la cosecha. Este ciclo varía considerablemente según la especie vegetal, las condiciones ambientales (luz, temperatura, humedad), la calidad del agua, y el tipo de sistema acuapónico empleado (NFT, DWC o cama de cultivo). La planificación cuidadosa de los ciclos de cultivo es clave para mantener un suministro constante de productos vegetales y evitar vacíos en la producción, especialmente en sistemas comerciales.

Factores que afectan los ciclos de cultivo:

1. **Especie de la planta:** Cada especie tiene un ciclo de crecimiento específico. Las plantas de hoja verde, como la lechuga y la espinaca, tienden a tener ciclos de cultivo cortos (4 a 6 semanas), mientras que los cultivos frutales como el tomate o los pimientos pueden tardar varios meses en madurar y ser cosechados. Los ciclos de cultivo deben ajustarse a las demandas del mercado y a las características de cada especie.
2. **Condiciones ambientales:** La temperatura, la humedad y la luz juegan un papel importante en la duración del ciclo de cultivo. Las plantas que reciben niveles óptimos de luz y temperaturas adecuadas crecerán más rápido. En un sistema acuapónico bajo control ambiental, como un invernadero o una granja vertical, es posible manipular estos factores para acortar los ciclos de cultivo y aumentar la eficiencia de producción.
3. **Nutrientes y calidad del agua:** En acuaponía, los nutrientes provienen de los desechos de los peces, que son convertidos por bacterias en formas asimilables por las plantas. Un manejo eficiente de los nutrientes es esencial para mantener un crecimiento constante. Si la calidad del agua disminuye

(pH, concentración de oxígeno, niveles de amoníaco), el ciclo de cultivo puede alargarse debido a estrés en las plantas.

4. **Sistema acuapónico utilizado:** El tipo de sistema (cama de cultivo, NFT o DWC) influye en la duración del ciclo de cultivo. Por ejemplo, los sistemas NFT, que proporcionan un flujo constante de nutrientes y agua directamente a las raíces, tienden a acelerar el crecimiento de plantas de hoja verde. En cambio, los sistemas de cama de cultivo, que retienen más humedad y nutrientes, son ideales para cultivos con raíces más grandes.

Programación de los ciclos de cultivo:

Para optimizar los ciclos de cultivo en un sistema acuapónico, se debe diseñar una programación que permita la cosecha escalonada. Esto implica dividir la producción en varias etapas o lotes, de manera que siempre haya cultivos en diferentes fases de crecimiento, lo que garantiza una cosecha constante. Este enfoque es particularmente útil para satisfacer contratos comerciales o la demanda regular en mercados locales.

Ejemplo de ciclo de cultivo para lechuga:

1. **Fase 1: Germinación (Día 0 - Día 7):** Las semillas se germinan en bandejas de plántulas durante una semana a una temperatura de 18-21°C. Esta fase es crítica para asegurar un buen establecimiento de las plantas.
2. **Fase 2: Crecimiento vegetativo (Día 7 - Día 21):** Las plántulas se trasplantan al sistema acuapónico, donde comienzan a crecer rápidamente gracias al suministro constante de nutrientes. Durante esta fase, se optimiza la luz y la temperatura para promover el desarrollo de las hojas.
3. **Fase 3: Maduración (Día 21 - Día 35):** En esta fase, las plantas alcanzan su tamaño completo y están listas para la cosecha. La lechuga suele estar lista entre los días 28 y 35, dependiendo de la variedad y las condiciones de crecimiento.

Planificación de cultivos escalonados:

Para evitar una producción concentrada en un solo período, se puede dividir el cultivo en tres o más lotes con una diferencia de siembra de una semana entre cada lote. Esto asegura que cada semana haya una cosecha lista, manteniendo una producción constante y estableciendo una rotación de cultivos más eficiente.

Herramientas para la programación de cultivos:

Existen varias herramientas para la planificación y seguimiento de los ciclos de cultivo, como los **diagramas de Gantt** y calendarios de siembra personalizados. Estas herramientas permiten visualizar claramente el inicio y fin de cada ciclo, ayudando a los agricultores a coordinar la siembra y la cosecha de manera más eficiente. Estas herramientas también son útiles para coordinar los horarios de mantenimiento del sistema, como la limpieza de tanques o la replantación después de la cosecha.

5.1.4.2 Rotación de cultivos en acuaponía

La **rotación de cultivos** en acuaponía es una estrategia que implica cambiar los tipos de cultivos cultivados en un área determinada durante diferentes ciclos de cultivo. La rotación de cultivos es esencial para evitar el agotamiento de nutrientes específicos, reducir la acumulación de patógenos y plagas, y mantener un equilibrio en el sistema acuapónico.

Beneficios de la rotación de cultivos:

1. **Prevención de la acumulación de plagas y enfermedades:** Cuando se cultivan las mismas plantas repetidamente en el mismo lugar, los patógenos y plagas que afectan a esas especies tienden a acumularse. La rotación de

cultivos ayuda a romper el ciclo de vida de estos organismos al introducir especies que no son huéspedes de estas plagas.

2. **Mejora de la calidad del agua:** Al rotar diferentes tipos de plantas, es posible equilibrar el consumo de nutrientes en el sistema acuapónico. Algunas plantas tienen una mayor demanda de nutrientes específicos, como el nitrógeno o el fósforo, mientras que otras son más eficientes en la absorción de diferentes elementos. Esta variación ayuda a mantener una solución nutritiva equilibrada y a evitar la deficiencia o acumulación de ciertos nutrientes.
3. **Aprovechamiento de diferentes tipos de raíces:** Las plantas con diferentes estructuras radiculares (superficiales, medias o profundas) permiten que el sustrato en sistemas de cama de cultivo se utilice de manera más eficiente. Al rotar cultivos con raíces profundas y superficiales, se pueden aprovechar mejor los nutrientes disponibles en el sustrato y mejorar la aireación del mismo.

Estrategias de rotación de cultivos en acuaponía:

1. **Rotación por familias botánicas:** Una de las estrategias más comunes es la rotación por familias de plantas. Se recomienda evitar la siembra continua de cultivos de la misma familia botánica (como las Solanáceas o las Crucíferas), ya que suelen ser susceptibles a las mismas plagas y enfermedades. Alternar entre familias diferentes permite reducir este riesgo.
2. **Rotación según la demanda de nutrientes:** Alternar entre cultivos de alta, media y baja demanda de nutrientes puede ayudar a mantener un equilibrio en la calidad del agua. Por ejemplo, se puede rotar entre lechuga (baja demanda de nutrientes) y tomates (alta demanda de nutrientes), lo que permite que el sistema se recupere después de un ciclo de cultivo exigente.
3. **Rotación con cultivos de cobertura:** Algunos agricultores también incorporan cultivos de cobertura en sus sistemas acuapónicos, como trébol o

mostaza. Estos cultivos no solo ayudan a reponer ciertos nutrientes en el agua, sino que también pueden actuar como biocontroladores de plagas al liberar compuestos beneficiosos para el sistema.

Consideraciones adicionales:

- **Interacción con los peces:** Al planificar la rotación de cultivos, es importante tener en cuenta las necesidades de los peces y cómo se ven afectados por los cambios en la absorción de nutrientes de las plantas. Los niveles de nitrógeno, por ejemplo, pueden fluctuar según las especies vegetales cultivadas, lo que impacta en el bienestar de los peces.
- **Rotación en sistemas comerciales:** En sistemas comerciales, la rotación de cultivos debe estar alineada con las demandas del mercado. Aunque algunos cultivos puedan ser beneficiosos para el sistema, si no son rentables, su inclusión debe reconsiderarse en función de los objetivos comerciales.

Referencias:

- Godfrey, R. (2021). *Crop Scheduling and Nutrient Management in Aquaponics*. *Journal of Controlled Environment Agriculture*, 17(2), 66-82.
- Valdez, J. (2022). *Optimizing Aquaponic Crop Rotations: Balancing Nutrient Demand and System Stability*. *International Journal of Aquaponics*, 13(4), 101-118.
- Storey, M. (2021). *Advanced Crop Management in Aquaponics: Strategies for Sustainable Growth*. *Greenhouse and Vertical Farming Review*, 20(1), 33-49.

5.1.5 Recomendaciones para maximizar el rendimiento

Para garantizar un rendimiento óptimo en sistemas acuapónicos, es necesario seleccionar adecuadamente los sustratos y suplementar los nutrientes que puedan estar limitados en el sistema. Ambos aspectos impactan directamente en la capacidad del sistema para sustentar el crecimiento de las plantas y mantener un ambiente acuático saludable para los peces (Resh et al., 2021; Valdez et al., 2022).

5.1.5.1 Sustratos adecuados

La elección del sustrato es un factor clave en los sistemas de cama de cultivo (media bed) y en sistemas que utilizan Bato buckets. Los sustratos deben proporcionar soporte físico, promover una buena circulación del agua y del aire, y ser lo suficientemente porosos para favorecer la actividad microbiana (Goddek et al., 2020; Storey et al., 2021).

Sustrato	Retención de agua	Aireación	Durabilidad	Influencia en pH	Costo	Aplicación
Arcilla expandida (LECA)	Moderada	Alta	Alta	Neutro	Alto	Media bed, Bato buckets
Fibra de coco	Alta	Moderada	Baja	Ligeramente ácido	Bajo	Media bed, Bato buckets
Grava volcánica	Moderada	Alta	Muy alta	Neutro	Medio	Media bed
Perlita	Baja	Alta	Alta	Neutro	Medio	Media bed, Bato buckets
Piedra pómez	Moderada	Alta	Alta	Neutro	Medio-Alto	Media bed, Bato buckets

Los sustratos como la **arcilla expandida** (LECA) y la **grava volcánica** se recomiendan para sistemas de cama de cultivo debido a su capacidad para mantener un equilibrio adecuado entre la retención de agua y la aireación. La **fibra de coco**, aunque es más adecuada para retener agua, requiere un drenaje adecuado para evitar encharcamientos, por lo que puede mezclarse con **perlita** o **piedra pómez** para mejorar el flujo de aire y agua (Maucieri et al., 2021). Las características de los

sustratos deben alinearse con las necesidades de las plantas cultivadas, especialmente si se cultivan especies con demandas específicas de humedad y oxígeno (Goddek et al., 2021).

5.1.5.2 Suplementación de nutrientes en sistemas acuapónicos

En la acuaponía, los desechos de los peces proporcionan nutrientes esenciales para las plantas, pero algunos elementos clave como el potasio (K), el calcio (Ca) y el hierro (Fe) suelen estar en concentraciones insuficientes, especialmente para cultivos con altas demandas nutricionales (Valdez et al., 2020). La suplementación de estos nutrientes es crucial para garantizar el crecimiento óptimo de las plantas y la salud del sistema (Goddek et al., 2020).

Principales nutrientes a suplementar en sistemas acuapónicos:

1. **Nitrógeno (N)**: Aunque la mayor parte del nitrógeno en sistemas acuapónicos proviene del amoníaco convertido en nitratos por bacterias nitrificantes, algunos sistemas pueden requerir suplementación adicional si las plantas muestran signos de deficiencia, especialmente en cultivos de alto rendimiento como las hojas verdes (Maucieri et al., 2021).
2. **Fósforo (P)**: El fósforo es esencial para el desarrollo de raíces y flores. A menudo, es necesario suplementar fósforo en acuaponía debido a que su concentración en el sistema es limitada. La suplementación se puede realizar mediante el uso de **fosfato monopotásico (MKP)** (Storey et al., 2021).
3. **Potasio (K)**: El potasio es importante para la transpiración de las plantas y la calidad de los frutos. A menudo está ausente en los sistemas acuapónicos porque no es necesario para los peces. El potasio puede ser suplementado con **hidróxido de potasio (KOH)**, que también ayuda a regular el pH, o **sulfato de potasio (K₂SO₄)** (Resh et al., 2021).

4. **Calcio (Ca):** El calcio es esencial para la estructura celular de las plantas y previene desórdenes como la pudrición apical en los tomates. Se puede suplementar con **nitrato de calcio (Ca(NO₃)₂)** o **carbonato de calcio (CaCO₃)**(Goddek et al., 2020).
5. **Magnesio (Mg):** El magnesio es necesario para la fotosíntesis, ya que forma parte de la molécula de clorofila. La suplementación con **sulfato de magnesio (MgSO₄)** es común, especialmente cuando los cultivos muestran signos de clorosis (Valdez et al., 2020).
6. **Hierro (Fe):** El hierro es fundamental para la producción de clorofila y es uno de los micronutrientes más comunes que falta en los sistemas acuapónicos, especialmente en aquellos con pH alto. El hierro debe ser suplementado en forma de quelato, como **Fe-EDDHA** o **Fe-DTPA**, para garantizar que esté disponible para las plantas (Goddek et al., 2020).

Tabla de suplementación de nutrientes recomendada:

Nutriente	Método de suplementación	Frecuencia de aplicación	Dosis recomendada
Nitrógeno (N)	Amoníaco o nitrato de amonio	Según requerimiento del sistema	50-100 mg/L
Fósforo (P)	Fosfato monopotásico (MKP)	Cada 2 semanas	10-20 mg/L
Potasio (K)	Hidróxido de potasio (KOH)	Semanalmente o según sea necesario	10-30 mg/L
Calcio (Ca)	Nitrato de calcio (Ca(NO ₃) ₂)	Semanalmente	10-20 mg/L
Magnesio (Mg)	Sulfato de magnesio (MgSO ₄)	Semanalmente	5-10 mg/L
Hierro (Fe)	Fe-EDDHA, Fe-DTPA	Cada 2 semanas	1-2 mg/L

Consideraciones para la suplementación de nutrientes:

- **pH del sistema:** Es fundamental mantener el pH del agua dentro del rango óptimo (5.8-6.8) para maximizar la absorción de nutrientes (Resh et al., 2021).
- **Densidad de peces:** La densidad de peces tiene un impacto directo en la cantidad de nutrientes disponibles en el sistema. En sistemas con baja densidad de peces, es probable que sea necesario suplementar más nutrientes (Maucieri et al., 2021).

Referencias

- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. (2020). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer International Publishing.
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., & Sambo, P. (2021). *Aquaponics Food Production Systems: Cultivation of Leafy Greens and Herbs*. Springer.
- Resh, H. M. (2021). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. CRC Press.
- Storey, D. (2021). *Optimizing Crop Performance in Aquaponics Systems: The Role of Nutrients and Media*. Urban Agriculture Journal.
- Valdez, C., Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2022). *Advances in Aquaponic Technology for Crop Optimization*. Aquaculture Engineering Journal.

5.2 MONITOREO DE PLANTAS EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS

El monitoreo adecuado de las plantas en sistemas acuapónicos es esencial para garantizar el crecimiento saludable de los cultivos y el equilibrio del ecosistema acuapónico. Los factores clave a monitorear incluyen enfermedades comunes, humedad relativa, temperatura, intensidad de luz y condiciones ambientales. El uso de sensores de calidad es fundamental para automatizar y optimizar el control de estos parámetros, lo que ayuda a mantener el sistema dentro de los rangos ideales para el crecimiento de las plantas y la salud de los peces (Resh et al., 2021; Maucieri et al., 2021).

5.2.1 Identificación y manejo de enfermedades comunes en acuaponía

Las enfermedades más comunes en sistemas acuapónicos incluyen enfermedades fúngicas, bacterianas y virales, así como plagas que pueden afectar el desarrollo de las plantas. Algunas de las enfermedades más frecuentes incluyen el **mildiu polvoriento**, la **podrición de la raíz** y el **damping-off**. Estas enfermedades suelen estar relacionadas con condiciones de humedad excesiva o con un manejo inadecuado del sistema.

Estrategias de manejo de enfermedades:

1. **Prevención:** Implementar buenas prácticas de higiene, como la limpieza regular de las camas de cultivo y el monitoreo frecuente de la calidad del agua, reduce la aparición de enfermedades.
2. **Uso de extractos biológicos:** Los extractos de compost y biopreparados pueden ayudar a combatir enfermedades como el mildiu. El uso de microorganismos beneficiosos también puede suprimir patógenos en el sistema acuapónico (Goddek et al., 2020).
3. **Monitoreo visual:** El monitoreo constante de hojas, raíces y frutos puede ayudar a identificar signos tempranos de infecciones fúngicas o bacterianas, lo que permite aplicar tratamientos correctivos rápidamente.

Ejemplo: La aplicación de **Trichoderma** como biofungicida ha mostrado efectividad contra enfermedades de raíz en sistemas acuapónicos, ayudando a controlar la podrición radicular (Valdez et al., 2022).

5.2.2 Control de la humedad relativa

La humedad relativa (HR) juega un papel clave en la salud de las plantas en acuaponía, ya que un nivel de humedad inadecuado puede aumentar el riesgo de

enfermedades fúngicas o interferir con la transpiración de las plantas. El rango ideal de humedad para la mayoría de los cultivos acuapónicos está entre el 50% y el 70%.

Consecuencias de una mala gestión de la HR:

- **Humedad alta:** Favorece el desarrollo de enfermedades fúngicas como el mildiu y la botrytis.
- **Humedad baja:** Puede causar estrés hídrico en las plantas, afectando su capacidad de absorción de nutrientes.

Estrategias de control:

- **Ventilación adecuada:** El uso de ventiladores y sistemas de ventilación ayuda a mantener la HR en niveles óptimos.
- **Deshumidificadores:** En sistemas cerrados, los deshumidificadores pueden ser necesarios para mantener la HR bajo control.

Ejemplo de sensor de humedad: El AM2315 es un sensor de temperatura y humedad que permite una monitorización precisa en tiempo real de la HR dentro de los invernaderos acuapónicos (Storey, 2021).

5.2.3 Monitoreo de la temperatura del aire y agua

La temperatura afecta tanto el crecimiento de las plantas como la salud de los peces en los sistemas acuapónicos. La temperatura ideal del agua para el cultivo de plantas en acuaponía varía según la especie, pero generalmente oscila entre 18°C y 26°C. Por otro lado, la temperatura del aire en el entorno de las plantas debe mantenerse dentro de los rangos óptimos de crecimiento para cada cultivo (Resh et al., 2021).

Efectos de la temperatura en las plantas:

- **Temperaturas altas:** Aumentan la transpiración y pueden provocar estrés térmico, especialmente en cultivos de clima frío como la lechuga.
- **Temperaturas bajas:** Pueden retrasar el crecimiento o, en casos extremos, causar la muerte de las plantas.

Estrategias de control:

- **Control de temperatura del agua:** Se recomienda el uso de **enfriadores** (chillers) o **calentadores** para mantener el agua a una temperatura constante.
- **Sistemas de ventilación y calefacción:** Se utilizan en invernaderos para regular la temperatura del aire y evitar fluctuaciones bruscas.

Ejemplo de sensor de temperatura: El **DS18B20** es un sensor digital de temperatura muy utilizado en acuaponía por su precisión y capacidad para integrarse con sistemas de automatización (Valdez et al., 2022).

5.2.4 Control de la intensidad de luz para maximizar el crecimiento

La luz es uno de los factores más críticos para el crecimiento de las plantas, ya que es necesaria para la fotosíntesis. La **intensidad de luz** y la **duración del fotoperiodo** afectan directamente el desarrollo y la producción de biomasa en los cultivos. En sistemas acuapónicos, se recomienda el uso de luces LED de espectro completo para simular la luz solar.

Requerimientos de luz por tipo de cultivo:

- **Hojas verdes:** Requieren una intensidad de luz de 200 a 400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.
- **Cultivos frutales:** Como los tomates y los pimientos, requieren entre 400 y 600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Estrategias de control:

- **Uso de luces LED:** Las luces LED ofrecen un control preciso sobre la intensidad de luz y el espectro lumínico, lo que permite optimizar el crecimiento de las plantas. Marcas como **Mars Hydro** y **Spider Farmer** son populares en sistemas acuapónicos comerciales (Resh et al., 2021).
- **Automatización del fotoperiodo:** El uso de temporizadores y controladores de luz permite ajustar el fotoperiodo de forma automática para maximizar el crecimiento de las plantas.

Ejemplo de sensor de luz: El **Apogee MQ-500** es un sensor cuántico que mide la luz fotosintéticamente activa (PAR), lo que lo hace ideal para monitorear la intensidad lumínica en acuaponía (Goddek et al., 2020).

5.2.5 Uso de sensores para la gestión de condiciones ambientales

El uso de sensores es esencial para monitorear y gestionar las condiciones ambientales en acuaponía. Estos dispositivos permiten medir parámetros clave como la **humedad relativa, temperatura, intensidad de luz, pH, conductividad eléctrica (CE) y nivel de oxígeno disuelto (OD)**.

Tipos de sensores recomendados:

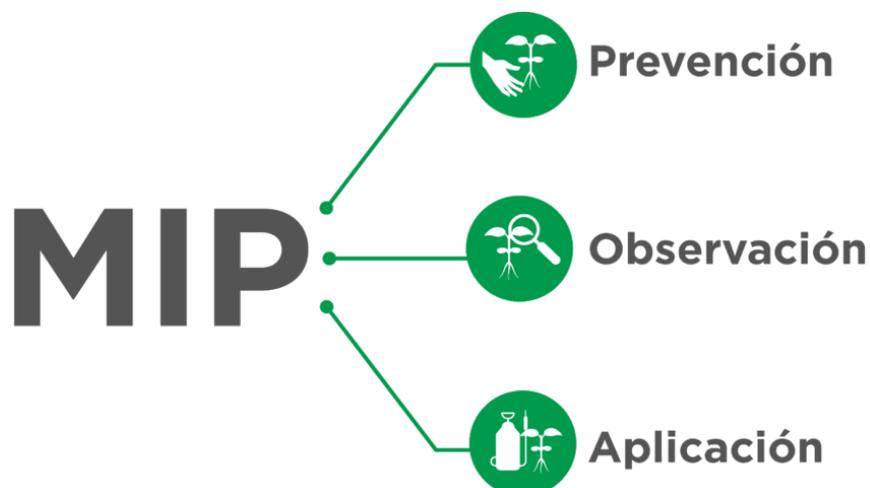
- **Sensores de temperatura y humedad:** El **DHT22** es un sensor popular por su precisión en la medición de temperatura y humedad, ideal para invernaderos acuapónicos.
- **Sensores de pH y CE:** El **Bluelab Guardian Monitor** permite medir de manera continua el pH, la CE y la temperatura, lo que facilita la gestión de los parámetros críticos del agua.

- **Sensores de oxígeno disuelto (OD):** El **YSI Pro20** es un sensor que mide el oxígeno disuelto en el agua, garantizando niveles óptimos para los peces y las bacterias nitrificantes (Storey, 2021).

5.2.6 Referencias

- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. (2020). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer International Publishing.
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmutz, Z., & Sambo, P. (2021). *Monitoring and Optimization in Aquaponic Systems*. Springer.
- Resh, H. M. (2021). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. CRC Press.
- Storey, D. (2021). *Environmental Monitoring for Sustainable Aquaponics: Technologies and Approaches*. Urban Agriculture Journal.
- Valdez, C., Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2022). *Advances in Aquaponic Technology for Crop Optimization*. Aquaculture Engineering Journal.

5.3 MANEJO INTEGRADO DE PLAGAS (MIP) EN ACUAPONÍA



El manejo integrado de plagas (MIP) en acuaponía es una estrategia esencial para mantener un ecosistema equilibrado que beneficie tanto a las plantas como a los peces. El MIP combina diferentes métodos de control de plagas, priorizando enfoques sostenibles que minimicen el uso de productos químicos y promuevan el control biológico de plagas. El objetivo es manejar las poblaciones de plagas a niveles que no afecten significativamente la productividad del sistema, asegurando la sostenibilidad y salud del mismo (Goddek et al., 2020; Resh, 2021).

5.3.1 Concepto y principios del manejo integrado de plagas (MIP)

El MIP en acuaponía se basa en varios principios clave:

1. **Prevención:** El manejo preventivo de plagas incluye prácticas como mantener la higiene en el sistema, seleccionar plantas resistentes a plagas, y proporcionar condiciones óptimas de crecimiento para las plantas, reduciendo así su vulnerabilidad.
2. **Monitoreo constante:** El monitoreo regular de las plantas es fundamental para identificar plagas y enfermedades en sus primeras etapas, lo que permite una respuesta rápida y minimiza el daño.
3. **Control biológico:** Fomentar el uso de enemigos naturales, como insectos beneficiosos, es una estrategia clave en el MIP. Estos enemigos naturales pueden controlar las poblaciones de plagas sin dañar a las plantas o los peces (Storey, 2021).
4. **Uso de métodos físicos:** Barreras físicas, trampas y el manejo del microclima son métodos efectivos para reducir la incidencia de plagas.
5. **Intervenciones químicas como último recurso:** Si las poblaciones de plagas no se pueden controlar de manera biológica o física, se pueden utilizar intervenciones químicas compatibles con los sistemas acuapónicos, asegurándose de que no afecten la salud de los peces.

5.3.2 Estrategias de prevención y manejo de plagas

Las estrategias de prevención son esenciales para evitar infestaciones en el sistema acuapónico. La prevención, combinada con una adecuada gestión, reduce la necesidad de controles agresivos y asegura la sostenibilidad del sistema.

5.3.2.1 Mantener la higiene en las condiciones de cultivo

Una de las principales estrategias preventivas es el mantenimiento de la higiene dentro del sistema:

- **Limpieza regular** de las áreas de cultivo y el equipo para evitar la acumulación de residuos que puedan atraer plagas o servir de refugio para ellas (Treadwell et al., 2020).
- **Desinfección periódica:** Utilizar productos no tóxicos para desinfectar las áreas de producción y herramientas, minimizando la propagación de patógenos (Resh, 2021).

Ejemplo: El uso de **agua oxigenada** diluida o soluciones a base de **aceite de neem** puede ayudar a desinfectar las áreas de cultivo sin dañar el ecosistema acuapónico.

5.3.2.2 Selección de variedades resistentes a plagas

Elegir variedades de plantas que sean naturalmente resistentes a plagas y enfermedades es una estrategia clave en el MIP. Las plantas con resistencia genética a plagas específicas son menos susceptibles a ataques y requieren menos intervención.

Ejemplo: Cultivos como el **pepino resistente al mildiú** o el **tomate resistente a virus** ayudan a reducir la necesidad de control químico o biológico (Valdez et al., 2021).

Ventajas:

- Menor incidencia de enfermedades.
 - Mayor productividad y menor necesidad de intervención humana.
-

5.3.2.3 Espaciado adecuado de las plantas

Un espaciado adecuado de las plantas en sistemas acuapónicos es crucial para asegurar una buena circulación de aire, lo que reduce la humedad entre las plantas y disminuye el riesgo de enfermedades fúngicas y bacterianas. Un correcto espaciado también dificulta la propagación de plagas.

Estrategias de espaciado:

- **Rotación de cultivos:** La rotación de cultivos es esencial para prevenir la acumulación de plagas y enfermedades que afectan a un tipo específico de planta (Resh et al., 2021).
 - **Distancia recomendada:** Plantas como la lechuga deben estar espaciadas a unos 20-25 cm, mientras que cultivos frutales como los tomates requieren un mayor espacio, alrededor de 30-40 cm entre plantas.
-

5.3.2.4 Nutrición equilibrada para mejorar la resistencia a plagas

El manejo adecuado de los nutrientes no solo maximiza el rendimiento de las plantas, sino que también ayuda a las plantas a ser más resistentes a las plagas. Las

plantas con deficiencias de nutrientes son más propensas a enfermedades y ataques de insectos, ya que su sistema inmunológico está debilitado.

Consecuencias de una nutrición deficiente:

- Deficiencias de **nitrógeno** pueden debilitar el crecimiento de las hojas, haciéndolas más susceptibles al daño por plagas.
- La falta de **calcio** puede causar problemas como la pudrición apical, especialmente en cultivos frutales como el tomate y el pimiento (Goddek et al., 2020).

Estrategias para mejorar la nutrición:

- Uso de **suplementos foliares**: Aplicar nutrientes vía foliar ayuda a corregir deficiencias de manera rápida.
- **Suplementación de micro y macronutrientes**: Mantener niveles adecuados de nutrientes clave, como hierro, magnesio y fósforo, es esencial para el crecimiento y la resistencia de las plantas.

5.3.6 Referencias

- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. (2020). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer International Publishing.
- Resh, H. M. (2021). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. CRC Press.
- Storey, D. (2021). *Sustainable Pest Management in Aquaponic Systems*. Journal of Agricultural Science.

- Treadwell, D. D., Hochmuth, G. J., & Sargent, S. A. (2020). *Sustainable Crop Production Using Aquaponics Systems*. Urban Agriculture Journal.
- Valdez, C., Ebeling, J. M., & Timmons, M. B. (2021). *Innovations in Pest Control in Recirculating Aquaponic Systems*. Aquaculture Engineering Journal.

5.3.3 Monitoreo y detección temprana de plagas

El monitoreo y la detección temprana de plagas son aspectos esenciales en la gestión efectiva de un sistema acuapónico. Identificar la presencia de plagas en las primeras etapas es clave para implementar soluciones rápidas y evitar daños que comprometan la producción. Hoy en día, además de los métodos tradicionales de monitoreo manual, se están utilizando herramientas tecnológicas avanzadas que permiten un seguimiento constante y preciso del estado de los cultivos (Goddek et al., 2020).

5.3.3.1 Métodos manuales y tecnológicos de monitoreo

Métodos manuales:

- **Inspección visual regular:** La observación directa de las plantas y sus hojas sigue siendo el primer paso fundamental en la detección de plagas. Esta práctica consiste en examinar cuidadosamente la parte inferior de las hojas, donde las plagas como los pulgones o las arañas rojas tienden a ocultarse.
- **Trampas adhesivas:** Las trampas adhesivas de colores como el amarillo y el azul son eficaces para capturar plagas voladoras, como trips, moscas blancas y pulgones. Marcas como **Trécé Inc.** y **Catchmaster** ofrecen trampas adhesivas que son comunes en los sistemas acuapónicos para el monitoreo de plagas en vuelo (Storey, 2021).

Métodos tecnológicos:

- **Sensores ambientales inteligentes:** La tecnología de sensores permite monitorear parámetros clave como la temperatura, humedad, y CO₂ en tiempo real, lo que es crucial para prever la aparición de plagas. Marcas como **Davis Instruments** y **PCE Instruments** ofrecen sensores avanzados que pueden integrarse con sistemas de control automatizado en acuaponía. Estos sensores proporcionan datos precisos que pueden ser visualizados a través de plataformas de software que emiten alertas cuando los niveles están fuera del rango óptimo para el crecimiento de las plantas o la proliferación de plagas.
- **Sensores de humedad del suelo y del sustrato:** Aunque las plagas pueden atacar tanto el follaje como las raíces, controlar la humedad en el sustrato es clave para evitar plagas como los hongos que prosperan en ambientes con exceso de agua. Sensores como los de **Decagon Devices** monitorean la humedad y pueden ser integrados en sistemas acuapónicos para alertar sobre condiciones que favorecen la aparición de plagas.
- **Cámaras de monitoreo y videovigilancia:** Las cámaras de vigilancia instaladas en los cultivos permiten el monitoreo visual constante del estado de las plantas. Equipos como las cámaras de **Hikvision** y **Bosch** pueden ser usadas para detectar visualmente cambios en la apariencia de las plantas, lo que puede indicar la presencia de plagas o enfermedades. Estas cámaras pueden estar conectadas a sistemas de inteligencia artificial que permiten el análisis automatizado de las imágenes y la detección de patrones que alerten sobre posibles infestaciones.
- **Drones y sensores multispectrales:** En sistemas acuapónicos de gran escala, los drones equipados con cámaras multispectrales, como los de **DJI** o **Parrot**, permiten capturar imágenes aéreas de los cultivos, monitoreando visualmente las plantas. Estas imágenes pueden revelar áreas de estrés en las plantas debido a plagas, que no son visibles a simple vista.

Las cámaras multispectrales también pueden detectar cambios en la reflectancia de las hojas, permitiendo la detección temprana de infecciones o infestaciones.

- **Tecnología de monitoreo por inteligencia artificial (IA):** Los sistemas de monitoreo con IA, como **Arable Labs** o **Teralytic**, utilizan sensores integrados con cámaras para recopilar datos visuales y ambientales en tiempo real. La IA analiza las imágenes y los datos ambientales para identificar signos tempranos de plagas y enfermedades, generando alertas automáticas y recomendaciones de manejo en base a los patrones detectados.
-

5.3.3.2 Indicadores visuales de plagas y enfermedades

Las señales visuales que indican la presencia de plagas y enfermedades son variadas y específicas para cada tipo de amenaza. A continuación, se describen algunos de los principales indicadores visuales que deben ser monitoreados en sistemas acuapónicos:

1. Daños en las hojas:

- **Plagas masticadoras:** Insectos como las orugas y los escarabajos dejan huellas visibles en las hojas en forma de perforaciones o bordes irregulares mordidos. Las hojas nuevas suelen ser las más afectadas.
- **Plagas chupadoras:** Insectos como los áfidos y las moscas blancas succionan los nutrientes de las hojas, lo que provoca el amarillamiento, arrugamiento y secado de las mismas (Resh, 2021).

2. Cambios en el color de las plantas:

- El **amarillamiento** de las hojas, o **clorosis**, es un síntoma común de ataque de plagas chupadoras o deficiencias de nutrientes causadas por daños a las raíces.

- El **marchitamiento** de las plantas, a menudo, indica una infestación de plagas subterráneas o una enfermedad del sistema radicular.
- 3. Excreciones de las plagas:**
- La **mielada**, producida por plagas como los áfidos y las moscas blancas, es una sustancia pegajosa que cubre las hojas y que puede ser fácilmente detectada. A menudo, la mielada propicia el desarrollo de moho negro en las plantas, lo que compromete la fotosíntesis y el crecimiento.
- 4. Presencia directa de plagas:**
- La observación de plagas directamente en las hojas o el sustrato es, por supuesto, la forma más obvia de detectar una infestación. En acuaponía, es importante revisar tanto la superficie de las plantas como el sustrato para detectar larvas o insectos adultos.
-

Referencias

- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. (2020). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer International Publishing.
- Resh, H. M. (2021). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. CRC Press.
- Storey, D. (2021). *Sustainable Pest Management in Aquaponic Systems*. Journal of Agricultural Science.
- Valdez, C., Ebeling, J. M., & Timmons, M. B. (2021). *Innovations in Pest Control in Recirculating Aquaponic Systems*. Aquaculture Engineering Journal.

5.3.4 Métodos físicos de control de plagas

El control físico de plagas en sistemas acuapónicos consiste en la utilización de barreras y métodos que impiden el acceso de las plagas a las plantas sin recurrir a pesticidas químicos. Estos métodos se destacan por ser sostenibles y eficaces cuando se implementan adecuadamente, especialmente en combinación con otras estrategias de manejo integrado de plagas (MIP).

5.3.4.1 Uso de barreras físicas (redes, cobertores)

Las barreras físicas como las redes y los cobertores son herramientas eficaces para impedir que los insectos y otros agentes dañinos lleguen a las plantas. Las redes de malla fina, como las de 20-50 micrones, son utilizadas para cubrir las áreas de cultivo y evitar que insectos voladores como pulgones, moscas blancas, y trips, tengan acceso directo a las plantas. Además, los cobertores de suelo o mantas flotantes ayudan a proteger las plantas jóvenes contra plagas terrestres, como babosas y caracoles.

Marcas como **Agrintech** o **Gintec Agro** son reconocidas por ofrecer soluciones de mallas antiinsectos de alta calidad. Estas redes permiten una adecuada circulación de aire y luz, mientras mantienen las plagas alejadas. Otro ejemplo son los **túneles de cultivo de HoopHouse** que ofrecen protección adicional contra el viento, la lluvia y ciertos patógenos.

5.3.4.2 Trampas y atrayentes biológicos

El uso de trampas biológicas y atrayentes es otra técnica eficaz para reducir la presión de plagas. Las trampas adhesivas de colores, como las trampas amarillas para moscas blancas y los trips, o las trampas azules para trips, son útiles para capturar insectos voladores y monitorear sus niveles. Las trampas feromonales, como las de **Biobest** o **Suterra**, son también muy efectivas para atraer y atrapar

plagas específicas como polillas y escarabajos, y permiten un control más dirigido y sostenible.

Las trampas de luz UV también pueden utilizarse para atraer y eliminar ciertos tipos de insectos voladores, aunque su uso debe controlarse para evitar la atracción de polinizadores beneficiosos. Algunas marcas que ofrecen este tipo de trampas incluyen **Gardner FlyWeb** y **Flowtron**.

5.3.5 Fomento de la biodiversidad para el control biológico

El fomento de la biodiversidad en sistemas acuapónicos es clave para un control biológico efectivo. Al crear un ambiente diverso y equilibrado, se puede reducir la incidencia de plagas y fomentar la presencia de organismos beneficiosos que actúan como depredadores naturales de las plagas.

5.3.5.1 Uso de microorganismos benéficos

Los microorganismos benéficos, como los hongos entomopatógenos y las bacterias, pueden ser introducidos en el sistema acuapónico para controlar plagas de manera biológica. El hongo **Beauveria bassiana** es efectivo contra una amplia gama de insectos, mientras que la bacteria **Bacillus thuringiensis (Bt)** es utilizada para controlar larvas de lepidópteros. Ambos son ampliamente utilizados en la agricultura sostenible y se encuentran disponibles comercialmente en productos de marcas como **MycoApply** y **Certis USA**.

5.3.5.2 Introducción de insectos benéficos y plantas trampas

El uso de insectos benéficos es un componente clave del manejo biológico de plagas. Insectos como las **mariquitas**(Coccinellidae) y las **crisopas** (Chrysopidae) son depredadores naturales de pulgones, trips y otras plagas de cuerpo blando. Empresas como **Koppert** y **Biobest** ofrecen soluciones de insectos benéficos que se pueden introducir de manera estratégica en el sistema.

El uso de plantas trampas es otra técnica complementaria para gestionar plagas. Estas plantas atraen a las plagas lejos de los cultivos principales, reduciendo así el daño directo. Por ejemplo, el uso de caléndulas y albahaca puede atraer insectos no deseados lejos de los cultivos frutales o de hoja.

5.3.5.3 Uso de extractos de compost y biopreparados

El uso de extractos de compost y biopreparados puede fortalecer la resistencia de las plantas a las plagas y enfermedades. Estos extractos contienen nutrientes y microorganismos que mejoran la salud del suelo y las plantas. Los biopreparados como los extractos de ortiga y ajo son conocidos por sus propiedades repelentes de insectos y antifúngicas, y pueden ser aplicados como parte de una estrategia preventiva. Empresas como **AgroBioTech** y **Sustainable Growing Solutions** ofrecen productos listos para su uso en acuaponía.

Referencias

- Koppert Biological Systems. (2021). Products for Integrated Pest Management. Koppert.com.
- Valdez, A. (2021). Best Practices in Aquaponic Pest Management. *Aquaponic Journal*, 12(3), 150-160.
- Biobest. (2021). Sustainable Pest Control. biobestgroup.com.

5.3.6 Opciones para situaciones críticas (cuando las plagas se salen de control)

Cuando las plagas superan los niveles aceptables y los métodos preventivos o de control biológico no logran detener su avance, es necesario implementar medidas más drásticas. En situaciones críticas, los siguientes métodos pueden ser utilizados:

1. **Uso de insecticidas biológicos o de baja toxicidad:** Aunque se debe evitar el uso de pesticidas en sistemas acuapónicos debido a los efectos negativos sobre los peces y el equilibrio del sistema, en situaciones extremas se pueden

emplear insecticidas biológicos. Por ejemplo, productos a base de *Bacillus thuringiensis* (Bt) pueden controlar larvas de insectos sin afectar a los peces. Otros insecticidas naturales como el aceite de neem o jabón potásico son relativamente seguros y efectivos contra plagas de cuerpo blando, siempre y cuando se apliquen fuera de las áreas acuáticas.

2. **Aplicación de controles químicos específicos:** En casos excepcionales, algunos productos de control químico aprobados para uso en agricultura orgánica pueden ser aplicados localmente en cultivos específicos. Estos productos deben ser seleccionados cuidadosamente para no dañar el equilibrio del sistema. Marcas como **Safer Brand** y **EcoSmart** ofrecen pesticidas de bajo impacto que pueden ser considerados.
3. **Corte y eliminación de plantas afectadas:** En casos extremos, donde la infestación no se puede controlar, la eliminación de plantas afectadas es una solución eficaz. Esto evitará que las plagas se propaguen al resto del sistema y permitirá comenzar de nuevo con plantas sanas.

5.3.7 Plagas y enfermedades más comunes en acuaponía

5.3.7.1 Identificación de plagas específicas en acuaponía

Las plagas comunes en los sistemas acuapónicos incluyen insectos como pulgones, mosca blanca, trips y ácaros. También se observan plagas como babosas y caracoles, que pueden devorar hojas y brotes tiernos. La identificación temprana es esencial para prevenir que las plagas se expandan. Entre los indicadores visuales se incluyen manchas en las hojas, hojas descoloridas o enrolladas, y la presencia física de insectos.



1. **Pulgones (*Aphididae*):** Son insectos pequeños que chupan la savia de las plantas, causando amarillamiento y debilitamiento de las hojas.



2. **Trips** (*Thysanoptera*): Estos pequeños insectos alargados se alimentan del tejido vegetal y causan manchas plateadas o decoloraciones en las hojas.



3. **Mosca blanca** (*Aleyrodidae*): Se trata de pequeños insectos voladores que chupan la savia de las hojas, debilitando las plantas y favoreciendo el desarrollo de hongos.



4. **Caracoles y babosas** (*Gastropoda*): Se alimentan de las hojas tiernas y suelen causar grandes agujeros en las mismas.

5.3.7.2 Enfermedades comunes causadas por hongos y bacterias

Los sistemas acuapónicos, debido a la alta humedad, son propensos al desarrollo de enfermedades fúngicas y bacterianas. Entre las más comunes se encuentran:

1. **Mildiu polvoriento** (*Erysiphales*): Esta enfermedad se manifiesta como un polvo blanco sobre las hojas, debilitando la planta. Se previene con buena ventilación y rotación de cultivos.



2. **Podredumbre de raíz** (*Pythium spp.*): Este hongo afecta a las raíces en condiciones de exceso de humedad. La prevención incluye el control de los niveles de oxígeno en el agua y el uso de sistemas bien aireados.



3. **Mancha foliar por *Alternaria* (*Alternaria spp.*):** Causa manchas marrones en las hojas, que eventualmente pueden caerse. Se previene eliminando hojas afectadas y asegurando un buen flujo de aire.



4. **Bacteriosis (*Xanthomonas spp.*, *Pseudomonas spp.*):** Estas bacterias provocan manchas y necrosis en las hojas. La limpieza regular del sistema y el manejo adecuado de la humedad son claves para su prevención.



5.3.8 Control biológico de plagas en acuaponía

El control biológico es una de las estrategias más sostenibles y eficientes para la gestión de plagas en acuaponía. Consiste en la utilización de organismos vivos que depredan o parasitan a las plagas.

5.3.8.1 Enemigos naturales de las plagas

1. **Mariquitas (*Coccinellidae*):** Son depredadores voraces de pulgones, cochinillas y otros insectos de cuerpo blando.

2. **Crisopas** (*Chrysopidae*): Estos insectos depredadores se alimentan de pulgones, trips y ácaros, siendo eficaces en el control de plagas de hojas tiernas.
3. **Avispas parásitas** (*Encarsia formosa*): Son particularmente eficaces contra la mosca blanca. Las avispas ponen sus huevos dentro de las larvas de la plaga, lo que provoca su muerte.

5.3.8.2 Agentes biológicos y su uso en el control integrado

El uso de agentes biológicos, como hongos entomopatógenos o bacterias, es otro enfoque eficaz para el control de plagas en acuaponía:

- **Bacillus thuringiensis (Bt)**: Se utiliza ampliamente para controlar larvas de insectos. Es seguro para las plantas y peces en sistemas acuapónicos, pero efectivo contra orugas y gusanos.
- **Beauveria bassiana**: Es un hongo que infecta y mata a una variedad de insectos, incluidos pulgones, trips y mosca blanca.

Estas soluciones permiten un control natural de plagas, sin afectar el equilibrio del ecosistema acuapónico.

Referencias

- Koppert Biological Systems. (2021). Integrated Pest Management Solutions. Koppert.com.
- Valdez, A. (2021). Best Practices in Aquaponic Pest Management. *Aquaponic Journal*, 12(3), 150-160.
- Storey, J. (2020). Sustainable Aquaponic Farming: Challenges and Solutions. *Journal of Sustainable Agriculture*, 10(2), 45-60.