



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA  
OPCIÓN TERMINAL EN EL ÁREA ACUÍCOLA**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE *Chirostoma estor* Y *Algansea lacustris* EN  
POLICULTIVO Y ANÁLISIS DEL PROCESO DE BIOMINERALIZACIÓN  
AERÓBICA DE SEDIMENTOS DE LOS EFLUENTES PRODUCIDOS**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA**

**PRESENTA**

**MVZ WENDY ELIZABETH LIÑÁN LEÓN**

**DIRECCIÓN:**

**DR. CARLOS CRISTIAN MARTÍNEZ CHÁVEZ**

**DR. JORGE FONSECA MADRIGAL**

**COMITÉ TUTORAL:**

**DR. CARLOS ANTONIO MARTÍNEZ PALACIOS**

**M. en C. JUAN ANTONIO TELLO BALLINAS**

**IBAC. CARLOS LEÓN RAMOS**

## AGRADECIMIENTOS

Al Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera de Pátzcuaro (CRIAP) del Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (INAPESCA) por haber facilitado los organismos de *A. lacustris* para este trabajo.

A la Maestra Sibila Concha por la capacitación en el uso de equipos de laboratorio, y apoyarme con mis dudas metodológicas.

A la Dra. Gisela Ríos por su apoyo en el manejo e interpretación de los datos obtenidos.

A la Dra. Pamela por impulsarme a realizar todos los trámites para llegar hasta aquí.

A mi comité revisor por sus observaciones a lo largo de todo el experimento y escritura de tesis.

A todos los chicos de servicio social, prácticas o tesistas que en algún momento apoyaron con montaje, realización y culminación del experimento, ustedes saben quiénes son... pero si se les olvida, gracias, Alix, Ruth, Migue, Lalo, Dany, Eleazar, Benja, Jenny, Frida e Iván.

A Lucy, Karen e Isa por siempre darme una mano para sacar el trabajo adelante, aunque eso les representara trabajo o tiempo extra.

A Irma, Sandy y Olaf por echarme porras y despejar mi mente.

A Danny por, además de las porras, darme un ejemplo de vida.

A la Dra. Maira Alcalá por siempre creer que lo lograría.

A la señorita Moka Banana y al Rey Mantanganxoan por ser mi motivación a levantarme cuando sentía que no podía.

Especialmente a mis padres por entender la distancia y el tiempo y siempre apoyarme a seguir creciendo.

## DEDICATORIA

A mis dos grandes amores,

uno por apoyarme al inicio (sin ti no hubiera sido posible empezar),

y otro por quedarse hasta el final (sin ti no hubiera podido seguir adelante).

## ÍNDICE

RESUMEN .....	8
ABSTRACT .....	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. ANTECEDENTES .....	13
III. JUSTIFICACIÓN .....	15
IV. HIPÓTESIS.....	15
V. OBJETIVOS.....	15
4.1 Generales .....	15
4.2 Particulares .....	15
VI. MATERIALES Y MÉTODOS .....	16
4.1 Diseño experimental .....	16
4.2 Dieta y alimentación .....	17
4.3 Calidad de agua .....	17
4.4 Manejo de peces .....	18
4.5 Tratamiento del sedimento .....	18
4.5 Cálculos de desempeño zootécnico.....	19
4.6 Análisis estadístico .....	20
VII. RESULTADOS .....	21
7.1 Calidad de agua.....	21
7.2 Crecimiento en peso y talla.....	21
7.3 Frecuencia de pesos y tallas.....	23
7.4 Indicadores de desempeño en crecimiento.....	23
7.5 Análisis químico proximal de los peces.....	24
7.6 Análisis de ácidos grasos .....	25
7.7 Comportamiento de biorreactores .....	28
VIII. DISCUSIÓN.....	29
8.1 Calidad de agua.....	29
8.2 Comportamiento.....	29
8.2.1 Monocultivo de Pescado Blanco .....	29
8.2.2 Monocultivo de Acúmara.....	30
8.2.3 Policultivo de <i>Chirostoma estor</i> y <i>Algansea lacustris</i> .....	30

8.3 Crecimiento .....	31
8.4 Composición química proximal de los peces .....	32
8.5 Análisis de ácidos grasos .....	32
8.6 Biomineralización aerobia.....	33
IX. CONCLUSIÓN.....	35
X. RECOMENDACIONES.....	36
XI. REFERENCIAS.....	37
A N E X O .....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Modelo experimental.....	16
Figura 2. Diagrama de manejo del sedimento de estanques a biorreactores .....	19
Tabla 1. Parámetros de calidad de agua durante el experimento (promedio $\pm$ DE). .....	21
Tabla 2. Peso, longitud patrón y factor de condición de Fulton inicial y final de los organismos en los diferentes tratamientos.....	21
Figura 3.1. Peso promedio de Acúmara por tratamiento. * = diferencias significativas entre tratamientos al final del experimento (91 días).....	22
Figura 3.2. Peso promedio de Pescado Blanco por tratamiento. * = diferencias significativas entre tratamientos al final del experimento (91 días).....	22
Figura 3.3. Factor de condición de Fulton promedio de Acúmara por tratamiento. Sin diferencia significativa entre tratamientos (91 días). .....	22
Figura 3.4. Factor de condición de Fulton promedio de Pescado Blanco por tratamiento. * = diferencias significativas entre tratamientos al final del experimento (91 días).....	22
Tabla 3. Parámetros para la evaluación del desempeño en crecimiento de los peces por tratamiento .....	23
Tabla 4. Análisis bromatológico de los peces.....	24
Tabla 5. Perfil de ácidos grasos (%) en músculo de Acúmara y Pescado Blanco. ....	25
Tabla 6. Perfil de ácidos grasos (%) en grasa perivisceral de Acúmara y Pescado Blanco.....	26
B) DHA .....	27
Figura 4.1. Concentración de A) EPA y B) DHA en músculo de Acúmara n=6 y Pescado Blanco n=6. * = diferencia significativa entre tratamientos por especie. ....	27
Figura 4.2. Concentración de A) EPA y B) DHA en grasa perivisceral de Acúmara n=4 y Pescado Blanco n=6. * = diferencia significativa entre tratamientos por especie. ....	27
Tabla 7.1, 7.2 y 7.3. Concentraciones de nutrientes en mg/L en 3 biorreactores diferentes por cada cultivo.....	28
Tabla 8.1. Concentraciones de nutrientes calculadas a partir de los datos obtenidos en este trabajo, asumiendo un volumen de 1kg de sedimento a la entrada de un biorreactor, y su comparación con el intervalo de nutrientes reportado para soluciones nutritivas comerciales. ....	34
Figura 5.1. Frecuencia de pesos en estanques de Acúmara en A) monocultivo, B) policultivo. ....	40
Figura 5.2. Frecuencia de pesos en estanques de Pescado Blanco en A) monocultivo, B) policultivo.....	40
Figura 5.3. Frecuencia de tallas en estanques de Acúmara en A) monocultivo, B) policultivo. ....	40
Figura 5.4. Frecuencia de tallas en estanques de Pescado Blanco en A) monocultivo, B) policultivo.....	41
Figura 5.5. Frecuencia de factor de condición de Fulton en estanques de Acúmara en A) monocultivo, B) policultivo. ....	41
Figura 5.6. Frecuencia de factor de condición de Fulton en estanques de Pescado Blanco en ..... A) monocultivo, B) policultivo.....	41
Figura 6.1.1 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 1 de Acúmara. 8ml/L sedimento inicial .....	42

Figura 6.1.2 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 1 de Acúmara. 8ml/L sedimento inicial .....	42
Figura 6.2.1 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 2 de Acúmara. 62ml/L sedimento inicial .....	42
Figura 6.2.2 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 2 de Acúmara. 62ml/L sedimento inicial .....	43
Figura 6.3.1 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 3 de Acúmara. 36ml/L sedimento inicial .....	43
Figura 6.3.2 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 3 de Acúmara. 36ml/L sedimento inicial .....	43
Figura 6.4.1 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 1 de Pescado Blanco. 29ml/L sedimento inicial.....	43
Figura 6.4.2 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 1 de Pescado Blanco. 29ml/L sedimento inicial .....	44
Figura 6.5.1 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 2 de Pescado Blanco. 65ml/L sedimento inicial.....	44
Figura 6.5.2 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 2 de Pescado Blanco. 65ml/L sedimento inicial .....	44
Figura 6.6.1 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 3 de Pescado Blanco. 40ml/L sedimento inicial.....	44
Figura 6.6.2 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 3 de Pescado Blanco. 40ml/L sedimento inicial .....	45
Figura 6.7.1 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 1 de Policultivo. 11ml/L sedimento inicial .....	45
Figura 6.7.2 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 1 de Policultivo. 11ml/L sedimento inicial .....	45
Figura 6.8.1 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 2 de Policultivo. 39ml/L sedimento inicial .....	45
Figura 6.8.2 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 2 de Policultivo. 39ml/L sedimento inicial .....	46
Figura 6.9.1 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 3 de Policultivo. 25ml/L sedimento inicial .....	46
Figura 6.9.2 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 3 de Policultivo. 25ml/L sedimento inicial .....	46

## RESUMEN

El Pescado Blanco (*Chirostoma estor*) y Acúmara (*Algansea lacustris*) son dos especies endémicas de gran valor cultural, económico y nutricional del Lago de Pátzcuaro con un estatus de cultivo comercial incipiente. La FAO recomienda diversificar las especies utilizadas en acuicultura a través del aprovechamiento de especies nativas de cada región como estas. En este trabajo se demostró por primera vez su potencial de engorda en policultivo. Durante un período experimental de 91 días, ambas especies presentaron cambios de comportamiento; *C. estor* pasó de ser muy selectivo con su alimento y generar mucho desperdicio a consumir de manera más voraz, lo que se vio reflejado en un crecimiento final del 55.9% sobre 32.67% de aquellos en monocultivo. Por otro lado, *A. lacustris* mostró una adaptación más rápida al manejo y alimentación a diferencia de aquellas en monocultivo. Se encontraron diferencias significativas en términos de mayor concentración de proteína en el cuerpo de Acúmaras en policultivo de 65.84% comparado a sólo un 48.55% en aquellas en monocultivo; además de una significativamente menor concentración de grasa total en cuerpo en policultivo de 20.67% contra 42.58% en aquellas en monocultivo. Aunado a esto, el perfil de ácidos grasos de las primeras tuvieron una proporción mayor de poli-insaturados de cadena larga, mientras que las últimas contenían una mayor proporción de ácidos grasos saturados de cadena corta, lo cual tiene implicaciones para la calidad del filete. Para ambas especies, la modificación de comportamiento en policultivo fue positiva. Incluso, se observó que, el comportamiento diferencial de *A. lacustris* en policultivo fue permanente al separarlas de *C. estor* (retorno a monocultivo) después de finalizado el experimento.

Por otra parte, se observó una elevación continua en los compuestos nitrogenados (amonio, nitritos, nitratos) a lo largo de 5, 10 y 15 días en los bioreactores aeróbios y fluctuaciones aparentemente cíclicas de fósforo y potasio asociadas posiblemente al microbioma existente en cada biorreactor, como son los géneros *Pseudomonas*, *Gemmatimonas*, *Paracoccus*, *Flavobacterium*, *Thaurea* y *Burkholderia* reportados por Yogev, et. al., (2020) o *Accumulibacter* y *Tetrasphaera* mencionados por Lovanov, et. al., (2021). De manera general se concluye, que estas dos especies nativas, filtrador y omnívoro, producen desechos que se pueden aprovechar para la producción de fertilizante orgánico altamente biodisponible mediante remineralización, igual que aquellas especies carnívoras más comerciales.

Palabras clave: crecimiento, comportamiento, bromatológico, biorreactor aeróbico, solución nutritiva.

## ABSTRACT

Despite their incipient status, Pike silverside (*Chirostoma estor*) and Acúmara (*Algansea lacustris*) are endemic species with relevant cultural, commercial and nutritional value from Pátzcuaro Lake. The FAO recommends diversifying the species used in aquaculture by using native species of each region, such as these. This research proves for the first time the growth potential of these two species in polyculture. After a 91 days experimental period, both species changed their behavior: *C. estor* went from being highly food (particle) selective and generating much waste to becoming more voracious, reflecting on a final weight gain of 55.9% over 32.67% of those in monoculture. On the other hand, *A. lacustris* adapted faster to handling and feeding than those in monoculture. Significant differences were found regarding higher protein concentration in Acúmara in polyculture (65.84%) over those in monoculture (48.55%); additionally, a significantly lower amount of total fat in polyculture of 20.67% against 42.58% of those in monoculture. In addition, the fatty acid profile of the former had a higher proportion of long-chain polyunsaturated fatty acids, while the latter contained a higher proportion of short-chain saturated fatty acids, which has implications for fillet quality. For both species, the behavior modification was favorable after polyculture. It was even observed that the differential behavior of *A. lacustris* in polyculture was permanent when they were separated from *C. estor* (return to monoculture) after the end of the experiment.

On the other hand, a continuous elevation in nitrogenous compounds (ammonium, nitrites, nitrates) was observed over 5, 10 and 15 days in the aerobic bioreactors and apparently cyclical fluctuations of phosphorus and potassium possibly associated with the existing microbiome in each bioreactor, such as the genera *Pseudomonas*, *Gemmatimonas*, *Paracoccus*, *Flavobacterium*, *Thaurea* and *Burkholderia* reported by Yogev et al., (2020) or *Accumulibacter* and *Tetrasphaera* mentioned by Lovanov et al., (2021). In general, it is concluded that these two native species, filter feeder and omnivore, produce waste that can be used to produce highly bioavailable organic fertilizer through remineralization, just like those more commercial carnivorous species.

## I. INTRODUCCIÓN

La acuicultura es la actividad productiva que se refiere a la reproducción y engorda de organismos acuáticos en sistemas artificiales, que inició su crecimiento sostenido a partir de 1950. Según la FAO (2020), al año 2018 estos sistemas contribuyeron con el 62.5% de los peces y mariscos para consumo a nivel mundial tanto en sistemas en aguas continentales como en cultivos en aguas marinas.

A nivel nacional, las principales especies producidas son la tilapia (*Oreochromis niloticus*) con una producción anual total de 168,359 ton, las carpas (*Cyprinus* sp.) con 48,126 ton y la trucha (*Oncorhynchus mykiss*) con 13,454 ton en 2018 (CONAPESCA, 2018). Estas especies tienen en común el ser exóticas, introducidas al país debido a la facilidad de su manejo o al desarrollo tecnológico que han tenido en otros países.

Debido a lo anterior, existe poca diversificación de especies producidas a través de la acuicultura en el país, por lo que la competencia es grande y el valor en el mercado disminuye. Además, se depende de la importación de semilla para renovar el material genético existente y a pesar de que a lo largo de los años, ha crecido el número de unidades de producción, llegando a identificarse 9,565 unidades en abril del 2020 (CONAPESCA, 2020), la mayoría de los productores (6 de 10) viven en condiciones de pobreza y con altos riesgos nutricionales, porque mantienen una capacidad productiva baja y por lo tanto se sigue dependiendo de las importaciones de estas especies para satisfacer la demanda de productos acuícolas (Chibras, 2015).

Parte del problema de productividad, es el hecho de que las especies exóticas provienen de otras regiones con climas diferentes a los nuestros, como la tilapia, que se desarrolla mejor en temperaturas de 31-36°C (FAO, 2009), o la trucha arcoíris que prefiere temperaturas de 13-18°C (FAO, 2014), por lo que ciertas regiones del país con clima templado no son óptimas para una u otra especie por tener aguas muy cálidas para las especies de climas fríos o muy frías para las especies tropicales; sin embargo, en ese intervalo intermedio de temperaturas, ya existen especies adaptadas, que son nativas de cada región, y con alto valor comercial. Algunas de estas especies nativas, como el pescado blanco de Pátzcuaro (*Chirostoma estor*) o la acúmara (*Algansea lacustris*), ahora cuentan con el desarrollo tecnológico de su cultivo que, aunque cultivadas a nivel piloto, representan oportunidades latentes de negocios

rentables. Con el cultivo de especies nativas se prevé que la competencia en el mercado de productos acuícolas sea menor, pues no compiten con las especies importadas, además de representar una nueva oportunidad para el aprovechamiento de estas especies y contribuir a la soberanía alimentaria de cada región (Martínez-Chávez *et. al.*, 2022).

Otro factor importante por considerar y que es el recurso base de la actividad acuícola, es la disponibilidad de agua aprovechable, ya que, debido al mal uso de esta, se ha perdido el 60% de disponibilidad mundial. De seguir así, se proyecta que para el año 2050 con el aumento de la población, se perderá otro 50% de lo que tenemos en la actualidad (FAO, 2018). Tan sólo en el país, el 73% de los cuerpos de agua nacionales se encuentran contaminados (Chibras, 2015), por lo que ya es un recurso limitante para la actividad, teniendo que recurrir a nuevas formas eficientes y sostenibles de producción.

Como alternativa para la acuicultura tradicional, existen los sistemas agroacuícolas integrados cuyos principios llevan en uso desde tiempos ancestrales por culturas asiáticas y prehispánicas en México. Dichos sistemas consisten en combinar la producción de organismos acuáticos con vegetales, animales o ambos de manera simultánea. Un ejemplo es la acuaponía, sistema que está definido por la integración de un sistema acuícola y un sistema de producción vegetal hidropónico; es decir, sin necesidad de suelo agrícola para su desarrollo (FAO, 2004).

### **Consideraciones generales de sistemas agroacuícolas integrados**

De manera general, el agua proveniente de acuicultura tiene menor cantidad de nutrientes que los que se consideran óptimos en los sistemas hidropónicos; a pesar de esto, las plantas tienen crecimiento similar e incluso mejor que en agricultura tradicional. El balance de nutrientes en el efluente de un cultivo acuícola está ampliamente ligado al tipo de dieta que se suministre a los animales, por la concentración de nutrientes base, el porcentaje de proteína y si es de origen vegetal o animal. Se ha demostrado, por ejemplo, que el uso de alimentos que poseen proteína vegetal en concentraciones elevadas, favorece el crecimiento de la mayoría de los peces, como lo hacen los alimentos basados en proteína animal, con la desventaja de que se pueden presentar factores antinutricionales, como en el caso del fósforo

que se encuentra en forma de fitatos, que especies como el salmón y la trucha son incapaces de asimilar (Timmons y Ebeling, 2013; Goddek *et. al.*, 2019).

Se debe considerar que, a partir de la dieta ofrecida, siempre habrá un porcentaje de alimento no consumido por los peces que se degradará en el agua (aproximadamente 5%). De la porción consumida por los animales, en promedio los peces asimilan un 30% del Nitrógeno contenido en la dieta, el 70% restante es excretado; los peces suelen usar cantidades muy bajas de Potasio en su metabolismo (aproximadamente 7%), por lo que de manera comercial las dietas poseen bajas concentraciones del mismo; del Fósforo, se excreta de un 30 a 65% en las excretas sólidas, donde se fija y se elimina de manera mecánica en los filtros de sólidos sedimentables o también llamados sedimentadores, por lo que en un sistema acuapónico, este elemento no es capaz de llegar al cultivo de plantas para su aprovechamiento; por esta razón se considera necesario utilizar un biorreactor de remineralización para volver este elemento soluble de nuevo (FAO, 2014; Khakyzadeh *et. al.*, 2015; Goddek *et. al.*, 2019).

Del Carbono presente en la dieta, 22% es aprovechado por los peces, y el 78% restante es excretado; por otra parte, el Calcio excretado suele ser de un 26.8% y Magnesio de 20.3%. Por lo que se puede concluir que los efluentes acuícolas normalmente son deficientes en Potasio, Fósforo y Calcio para los cultivos hidropónicos (Rafiee y Saad, 2005; Timmons y Ebeling, 2013).

Los elementos para el desarrollo y crecimiento de las plantas se dividen en dos grandes grupos, los macronutrientes (N, K, P, Ca, Mg y S) que son los que requieren en mayor medida, divididos a su vez en primarios (N, K, P) y secundarios (Ca, Mg, S), además de los micronutrientes (B, Cl, Mn, Fe, Zn, Cu, Mb, Ni, Se, Na) que utilizan en menores concentraciones (Mancilla, M., 2020). De manera comercial en cultivos hidropónicos, se adicionan soluciones nutritivas con mezclas de estos elementos en las proporciones necesarias para las hortalizas, por lo que se puede disminuir el aporte de manera artificial a través del aprovechamiento de los sistemas agroacuícolas integrados, como paso a la sostenibilidad.

Además de lo anterior, para explorar nuevos sistemas sostenibles, se busca la diversificación de las especies producidas en cautiverio y en pro de la soberanía alimentaria, la FAO (2016) recomienda el uso de especies nativas de cada región, tanto animales como vegetales; por lo

que en el caso de los peces, se buscan especies que puedan crecer, alimentarse y reproducirse en cautiverio, tolerando los niveles de estrés que esto conlleva, además de preferir organismos de eslabones bajos en la cadena trófica que no sean altamente demandantes de proteína en la dieta para su desarrollo.

Algunas especies nativas del lago de Pátzcuaro como son Acúmara y Pescado Blanco cumplen con estas características, la primera al ser una carpa nativa de hábitos omnívoros con preferencia al consumo de algas y el segundo al ser un organismo filtrador zooplanctófono (Martínez-Palacios *et. al.*, 2017; Toomey *et. al.*, 2020).

Ambas son especies endémicas del lago de Pátzcuaro, que fueron pesquerías importantes en la región. Debido a la sobreexplotación y al detrimento de los lagos se redujo de manera considerable la pesquería de pescado blanco de Pátzcuaro de 160 toneladas en 1980 a menos de una tonelada a partir del año 2000 a la fecha (Hernández-Martínez, 2018). La pesquería de Acúmara reportó datos de captura de 650 toneladas en 1988 disminuyendo a sólo 50 toneladas en 1991 sin datos de captura recientes (Ramírez-Herrejón, 2014).

Ambas son especies de gran importancia cultural (tradicción y turismo de la región), económica (con precios que van de \$200 a \$400/kg para acúmara y de \$600 a \$1000/kg para Pescado Blanco) y nutricional, pudiéndose considerar como alimentos nutraceuticos por sus altos contenidos en ácidos grasos omega 3, como el DHA y EPA.

## **II. ANTECEDENTES**

Los biorreactores son espacios aerobios, o anaerobios e incluso sistemas mixtos en los que existe la presencia de microorganismos que solubilizan elementos fijados a materia orgánica a través de su degradación para obtener así los nutrientes para su propio metabolismo y desarrollo. Los biorreactores se han utilizado principalmente en el tratamiento de aguas negras para la captación y correcto desecho de elementos tales como Carbono y Fósforo; mientras que, en acuicultura, recientemente se ha visto como una oportunidad de aprovechar nutrientes fijados en el sedimento de los estanques para su uso como fertilizante orgánico al igual que para evitar la descarga de algunos elementos que pueden causar contaminación o eutroficación de otros cuerpos de agua (Yogev, *et. al.* 2020; Lobanov *et. al.*, 2021).

Esta tecnología puede acoplarse a un sistema de recirculación (RAS) contribuyendo a mantener una calidad de agua estable para los peces producidos al igual que los biofiltros y que permite concentrar todos los elementos que ya no se requieren en los estanques y que después del proceso se vuelven biodisponibles para plantas, permitiendo así el aprovechamiento de un efluente (previamente considerado un desecho) como un fertilizante natural para cultivos hidropónicos (Yogev, *et. al.* 2020; Lobanov *et. al.*, 2021).

Se ha constatado que el agua proveniente de acuicultura no es capaz de cubrir satisfactoriamente los requerimientos nutricionales de los diferentes cultivos; por lo que la remineralización a través de biorreactores ofrece la oportunidad de aumentar la concentración de nutrientes en el agua con una mayor biodisponibilidad que aquellos aplicados en soluciones nutritivas comerciales según un estudio de Lobanov *et. al.* (2021). Por lo tanto, actualmente se ha comenzado a estudiar el comportamiento que tienen las soluciones de remineralización en diferentes especies a través de procesos aeróbicos, anaeróbicos o mixtos para identificar puntos clave que favorezcan este propósito y buscar la optimización del proceso para su aplicación a nivel comercial (Lobanov *et. al.*, 2021; Yogev, *et. al.* 2020). Lo anterior conlleva entonces a la mejora de un proceso productivo orientado a la sostenibilidad de los sistemas agroacuícolas.

Tanto en el caso de biorreactores anaeróbicos con Bagre africano (*Clarias gariepinus*) como modelo experimental (Yogev, *et. al.* 2020); como utilizando un sistema mixto de aireación y anaerobiosis con sedimentos de Trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) (Lobanov *et. al.*, 2021), se ha observado un aumento en las formas biodisponibles de los macro y micronutrientes solubles en el agua que posteriormente pueden ser utilizados como fertilizantes orgánicos en lugar de requerir de los tradicionales fertilizantes químicos, ya sea en suelo o en hidroponía.

### **III. JUSTIFICACIÓN**

Actualmente, la acuicultura requiere de tecnologías que optimicen el consumo de agua y aprovechen al máximo los nutrientes mientras que al mismo tiempo se diversifiquen las especies en cultivo. En esta investigación se trabajó con dos de las especies de mayor valor cultural y comercial del estado de Michoacán: el Pescado Blanco de Pátzcuaro (*Chirostoma estor*) y la Acúmara (*Algansea lacustris*). Así, el presente trabajo pretende por primera vez evaluar su policultivo; así como, la concentración de compuestos nitrogenados, fosfato y potasio en los efluentes de sus cultivos posterior a un proceso de remineralización en biorreactores aeróbicos, con la finalidad de volverlos biodisponibles para plantas en subsecuentes sistemas de producción como hidroponia. Los resultados de este trabajo podrán sentar las bases para el cultivo de estas especies en conjunto, así como hacer más eficiente el uso de nutrientes en sistemas acuapónicos.

### **IV. HIPÓTESIS**

El policultivo de especies nativas del Lago de Pátzcuaro como Acúmara y Pescado Blanco es viable y permite la obtención de sedimentos orgánicos utilizables en biorreactores.

### **V. OBJETIVOS**

#### **4.1 Generales**

Determinar la viabilidad del policultivo de especies nativas (*Chirostoma estor* y *Algansea lacustris*), así como la biodisponibilidad y concentración de los nutrientes resultantes de sus efluentes, antes y posterior a un proceso de remineralización aerobia.

#### **4.2 Particulares**

- Evaluar la compatibilidad de *Chirostoma estor* y *Algansea lacustris* en policultivo.
- Comparar el crecimiento de *Chirostoma estor* y *Algansea lacustris* en monocultivo y policultivo.
- Evaluar la cantidad de compuestos nitrogenados, fosfato y potasio del efluente del cultivo previo y posterior al proceso de remineralización aerobia.

## VI. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IIAF) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Michoacán.

### 4.1 Diseño experimental

El diseño experimental (Figura 1) constó de 3 tratamientos: monocultivo de Pescado Blanco (*Chirostoma estor*), monocultivo de Acúmara (*Algansea lacustris*) y policultivo de ambas especies, cada unidad experimental con 3 réplicas, y un total de 9 estanques de 2500 L dentro de un invernadero en condiciones ambientales y luz natural. Un total de 720 organismos de *C. estor* se obtuvieron de la planta de producción del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, de un peso promedio de  $24.08 \pm 1.4$  g con una longitud estándar promedio de  $12.79 \pm 1.2$  cm, que se distribuyeron aleatoriamente en 6 estanques; 3 estanques con 160 peces para el tratamiento de monocultivo, y 3 estanques con 80 peces cada uno en los estanques de policultivo. Por otro lado, 900 organismos de *A. lacustris* fueron facilitadas por parte del Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera de Pátzcuaro (CRIAP) del Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (INAPESCA), de  $8.44 \pm 2.9$  g de peso promedio y  $7.98 \pm 1.33$  cm de longitud estándar, distribuidas aleatoriamente en 6 estanques; 3 de ellos con 200 peces en estanques de monocultivos y 3 con 100 peces para policultivo.

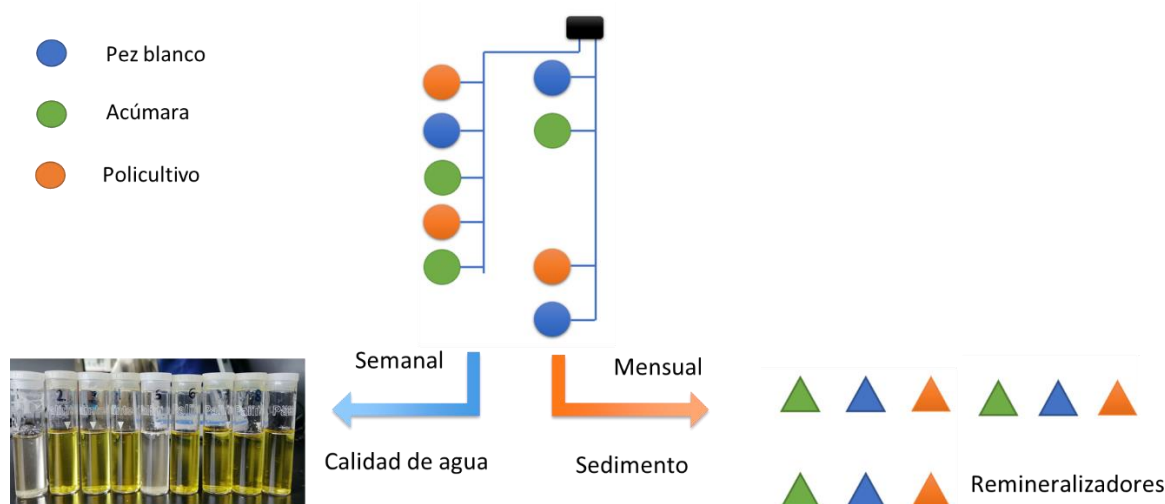


Figura 1. Modelo experimental

El día 14 de julio de 2021, se realizó la siembra de *A. lacustris*, que pasaron por un período de aclimatación de aproximadamente 1 mes, durante el que se adaptaron a la dieta nueva. Una vez pasado el periodo de aclimatación se procedió a la siembra de *C. estor*, el experimento dio inicio el día 12 de agosto de 2021, siendo el primer día que interactuaron los animales en policultivo.

## **4.2 Dieta y alimentación**

Se utilizó pellet formulado para Pescado Blanco producido en el IIAF – Unidad San Juanito, con 44.24% de PC, 7.97% de extracto etéreo, 6% de humedad y 11.61% de cenizas. La frecuencia alimenticia fue cada 2 horas en 6 raciones al día en los siguientes horarios: 8:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00 y 18:00.

La estrategia de alimentación fue a saciedad aparente.

## **4.3 Calidad de agua**

La temperatura y concentración de oxígeno disuelto de cada estanque se registró 2 veces al día, por la mañana y por la tarde sin interferir con los horarios de alimentación. Cada semana se tomaron muestras de agua para medir pH y conductividad eléctrica, y cada dos semanas; para medición control de amonio.

La temperatura se midió con un termómetro digital (Accurate, no.serie ST-9261C), y se corroboró la lectura con el sensor (termómetro) del oxímetro (YSI, modelo 55-12FT, número de serie 05J1216) también usado para determinar concentración de oxígeno disuelto en el agua. Además, se hizo un registro de temperatura de tres estanques aleatorios (uno por tratamiento) tomado con 3 termógrafos (Thermocron iButton modelo DS1921G) sumergidos a media agua configurados para tomar lecturas cada 30 minutos durante 25 días.

El pH fue medido con un potenciómetro (Fisher Scientific, modelo accumet BASIC AB15) que fue calibrado con 3 buffers estándar previo a cada serie de lecturas en el día: pH 4 – biftalato, pH 7 – fosfato, pH 10 – borato.

La conductividad eléctrica se determinó con un conductímetro (HACH, modelo HQ40d) para el que se preparó una solución patrón de NaCl a  $199\mu\text{S}/\text{m}$  para la validación de la calibración del equipo previo a las lecturas correspondientes del día de muestreo.

La medición de amonio se realizó utilizando un fotómetro (YSI, modelo 9500 Eco Sense).

#### **4.4 Manejo de peces**

Para evaluar de manera completa el desempeño de los organismos en los diferentes tratamientos, al final del experimento se sexaron, pesaron y midieron todos los ejemplares de pescado blanco; las acúmaras no se pudieron sexar a simple vista, únicamente se midieron algunas debido a la dificultad del manejo y a la alta probabilidad de causar mortalidades innecesarias, únicamente fue el peso el dato obtenido de todas las acúmaras.

El sexado de *C. estor* fue mediante identificación visual por la distancia del poro anal y genital con las aletas anales (Martínez-Chávez *et, al.*, 2018), el pesaje se realizó con una báscula digital (Travessa, modelo BZ-2) con capacidad de 5kg y para las mediciones se utilizó un ictiómetro de madera con una regla metálica existente en el laboratorio.

Además, de cada estanque se tomaron 2 peces por especie de los que se extrajeron muestras de músculo y grasa perivisceral para análisis de ácidos grasos; y finalmente, un pez extra por estanque para análisis bromatológico de la composición de los peces.

#### **4.5 Tratamiento del sedimento**

Semanalmente, los desechos de los peces y restos de alimento encontrados en el fondo de los estanques, fueron retirados por sifoneo (succión por gravedad por manguera). Una vez al mes el sedimento recolectado se utilizó para el proceso de remineralización aeróbica. Esto es, de cada réplica de estanque (de cada tratamiento) se colectó y mezcló el sedimento en biorreactores diferentes para tener un total de 3 repeticiones por cada tratamiento, es decir, 9 biorreactores en total.

Cada biorreactor con su respectivo sedimento se aforó a 56.7L, se colocaron 2 mangueras de aireación con piedra difusora y una malla en la parte superior (Figura 2). En cada colecta una vez homogeneizada el agua, se tomaron muestras para la estimación del volumen de sólidos sedimentables por litro de agua mediante un cono Imhoff siguiendo la NMX-AA-004-SCFI-

2013 y para su análisis por medio del fotómetro YSI 9500 midiendo la concentración en mg/L de amonio, nitritos, nitratos, fosfatos y potasio disuelto en el agua inicial el día de la colecta del sedimento (Día 0) y 3 mediciones posteriores de monitoreo cada 5 días (Día 5, 10 y 15).

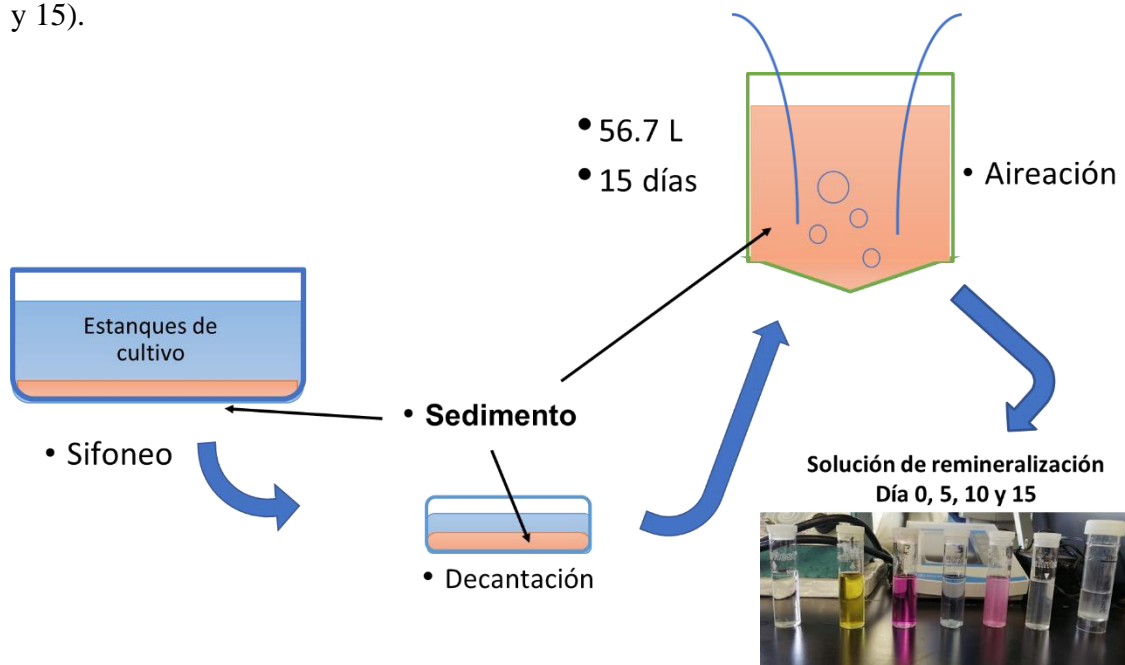


Figura 2. Diagrama de manejo del sedimento de estanques a biorreactores

#### 4.5 Cálculos de desempeño zootécnico

Con los datos obtenidos de peso y longitud patrón de cada organismo, además de calcular el peso ganado por día por organismo en mg y en porcentaje, se calculó la tasa específica de crecimiento, la tasa de conversión alimenticia, el porcentaje de sobrevivencia y el factor de condición de Fulton.

La tasa de crecimiento específica permite conocer la velocidad de crecimiento de los peces; mientras que la tasa de conversión alimenticia se refiere a que tan eficientemente se usa el alimento mediante la relación entre la cantidad de alimento consumida y la cantidad de peso ganado. Mientras que el factor de condición de Fulton es un indicador de bienestar animal indirecto asociado a la relación entre la talla del pez y su peso.

Tasa de crecimiento específica:

$$SGR = \left( \frac{\text{Ln peso final} - \text{Ln peso inicial}}{\text{periodo experimental}} \right) \times 100$$

Tasa de conversión alimenticia:

$$FCR = \frac{\text{g de alimento consumido}}{\text{g de peso ganado}}$$

Factor de condición de Fulton:

$$FC \text{ Fulton} = \frac{\text{peso del pez (g)}}{\text{longitud del pez (cm)}}$$

#### **4.6 Análisis estadístico**

Los datos fueron analizados con un paquete estadístico (Prism8) para evaluar normalidad de los datos e igualdad de varianza. Toda vez que cumplieron con ello, se procedió a comparar los parámetros de crecimiento, bromatológicos y composición de ácidos grasos entre los organismos de la misma especie en los dos distintos tratamientos (mono y policultivo) mediante una T de Student no pareada con  $\alpha = 0.05$ . Los datos se presentan como media  $\pm$  desviación estándar.

Los gráficos presentados fueron realizados con el mismo software, a excepción de las gráficas de distribución poblacional que se realizaron en Excel.

## VII. RESULTADOS

### 7.1 Calidad de agua

Los valores promedio de los parámetros de calidad de agua de los estanques durante el periodo experimental, se mantuvieron dentro de los intervalos normales para ambas especies de peces (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua durante el experimento (promedio  $\pm$  DE).

OD (mg/L)	Temperatura (°C)	pH	Amonio (mg/L NH <sub>4</sub> )	CE ( $\mu$ S/cm)
5.48 $\pm$ 0.72	21.37 $\pm$ 1.36	8.08 $\pm$ 0.11	<0.16	317 - 816

OD: Oxígeno disuelto; CE: Conductividad eléctrica

### 7.2 Crecimiento en peso y talla

En cuanto a las biometrías realizadas al final del experimento, se observan diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) en la ganancia de peso final en monocultivo de acúmaras mientras que el mayor peso en pescado blanco se observó en los organismos en policultivo. En cuanto a talla no se observaron diferencias significativas en ningún tratamiento (Tabla 2).

Tabla 2. Peso, longitud patrón y factor de condición de Fulton inicial y final de los organismos en los diferentes tratamientos.

	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Longitud patrón inicial (cm)	Longitud patrón final (cm)	Factor de condición inicial	Factor de condición final
<i>A. lacustris</i> monocultivo	8.44 $\pm$ 2.8	<b>14.88 <math>\pm</math> 5.6*</b>	7.98 $\pm$ 1.1	9.57 $\pm$ 1.3	1.05 $\pm$ 0.3	1.66 $\pm$ 0.4
<i>A. lacustris</i> policultivo	8.44 $\pm$ 2.8	<b>12.66 <math>\pm</math> 4.5</b>	7.98 $\pm$ 1.1	9.62 $\pm$ 1.1	1.05 $\pm$ 0.3	1.56 $\pm$ 0.3
<i>C. estor</i> monocultivo	22.52 $\pm$ 4.8	<b>29.65 <math>\pm</math> 8.5</b>	12.8 $\pm$ 1.1	13.87 $\pm$ 1.2	1.75 $\pm$ 0.2	<b>2.13 <math>\pm</math> 2.4</b>
<i>C. estor</i> policultivo	22.52 $\pm$ 4.8	<b>35.15 <math>\pm</math> 10.2*</b>	12.8 $\pm$ 1.1	14.38 $\pm$ 1.6	1.75 $\pm$ 0.2	<b>2.36 <math>\pm</math> 0.4*</b>

\* = diferencias significativas entre tratamientos por especie al final del experimento (91 días)

El peso ganado final en el caso de Acúmara fue de 52% en policultivo, mientras que fue mayor en aquellas en monocultivo con una ganancia de peso de 76.26% (Fig. 3.1). Lo opuesto ocurrió en el caso de los tratamientos de Pescado Blanco en los que el mayor crecimiento se presentó en el policultivo con una ganancia de peso del 55% y menor en los organismos en monocultivo con una ganancia únicamente del 32% (Fig. 3.2).

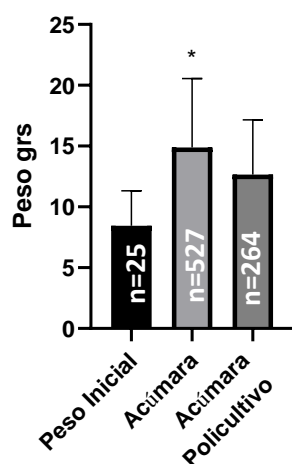


Figura 3.1. Peso promedio de Acúmara por tratamiento. \* = diferencias significativas entre tratamientos al final del experimento (91 días).

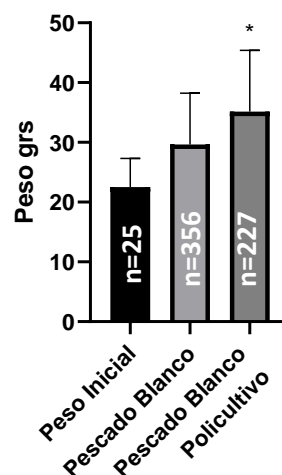


Figura 3.2. Peso promedio de Pescado Blanco por tratamiento. \* = diferencias significativas entre tratamientos al final del experimento (91 días).

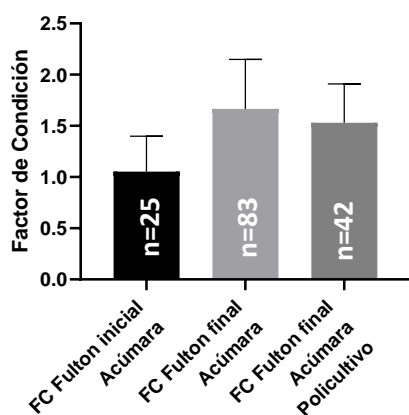


Figura 3.3. Factor de condición de Fulton promedio de Acúmara por tratamiento. Sin diferencia significativa entre tratamientos (91 días).

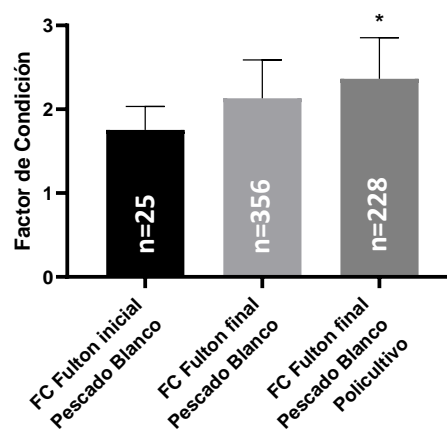


Figura 3.4. Factor de condición de Fulton promedio de Pescado Blanco por tratamiento. \* = diferencias significativas entre tratamientos al final del experimento (91 días).

Por otra parte, el Factor de condición de Fulton fue significativamente mayor en *C. estor* en policultivo, que indica una mejor condición corporal ligado al bienestar de los animales. En los tratamientos de Acúmara no hubo diferencia significativa (Fig. 3.3 y 3.4).

### 7.3 Frecuencia de pesos y tallas

Con el fin de analizar el comportamiento de los tratamientos como población, se realizaron gráficas de frecuencia de tallas en peso, longitud y factor de condición, en las que se observa en su mayoría una curva Gaussiana, que permite apreciar que el crecimiento de los animales no fue homogéneo, por lo que se piensa que se puede aumentar la alimentación ofrecida para obtener mejores desempeños en futuros experimentos. El desglose de los datos se encuentra como gráficas en el ANEXO.

### 7.4 Indicadores de desempeño en crecimiento

A través de los parámetros específicos para la evaluación del crecimiento de los peces, se hacen más notables las diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) de ganancia de peso al día en *C. estor* en policultivo, mientras que no se presentan en el caso de las Acúmaras (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros para la evaluación del desempeño en crecimiento de los peces por tratamiento

Tratamiento	Peso ganado individual (mg/día)	Peso ganado (%)	SGR (%/día)	FCR	Sobrevivencia (%)
Acúmara monocultivo	70.7 ±4.5	76.3 ±4.79	0.62 ±0.03	2.27 ±0.2	97.89 ±1.89 <sup>A</sup>
Acúmara policultivo	48.2 ±15.95	52.01 ±17.2	0.45 ±0.13	---	86.29 ±4.79 <sup>B</sup>
Pescado Blanco monocultivo	80.8 ±13.88 <sup>b</sup>	32.6 ±5.61 <sup>b</sup>	0.3 ±0.05 <sup>b</sup>	2.77 ±0.47	88.26 ±3.13
Pescado Blanco policultivo	138.5 ±12.38 <sup>a</sup>	55.9 ±5 <sup>a</sup>	0.4 ±0.04 <sup>a</sup>	---	94.58 ±3.14

Superíndices diferentes en minúscula indican diferencias significativas entre tratamientos de Pescado Blanco. Superíndices en mayúscula indican diferencias significativas entre tratamientos de Acúmara.

SGR: Tasa de crecimiento específica; FCR: Tasa de conversión alimenticia.

## 7.5 Análisis químico proximal de los peces

Se realizaron análisis bromatológicos de la composición de 3 peces completos por tratamiento, con 3 réplicas metodológicas de cada prueba y a partir de los datos obtenidos, se calculó el porcentaje de extracto libre de nitrógeno. Además, se tienen como referencia los datos de Acúmaras de vida libre que nos permiten observar la capacidad que mostraron de acumular grasa en su cuerpo en este experimento.

Las únicas diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) que se presentan entre cultivos son de Acúmara; ya que aquellas en policultivo presentan mayor cantidad de proteína cruda mientras que las de monocultivo acumulan mayor porcentaje de extracto etéreo (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis bromatológico de los peces

Tratamiento	% Humedad	% PC	% EE	% Cenizas	% ELN
Acúmara vida libre	72.54 $\pm$ 0.48	54.04 $\pm$ 3.38	37.48 $\pm$ 0.12	9 $\pm$ 0.07	No detectable
Acúmara monocultivo	66.61 $\pm$ 0.3	48.55 $\pm$ 2.4	42.58 $\pm$ 0.83*	10.1 $\pm$ 0.74	No detectable
Acúmara policultivo	75.48 $\pm$ 2.3*	65.84 $\pm$ 8.4*	20.67 $\pm$ 10.31	13.31 $\pm$ 2.37	0.17
Pescado Blanco monocultivo	71.56 $\pm$ 2.5	67.12 $\pm$ 4.8	18.65 $\pm$ 3.98	13.15 $\pm$ 1.2	1.06
Pescado Blanco policultivo	70.15 $\pm$ 2.5	61.85 $\pm$ 4.9	27.3 $\pm$ 4.64	11.91 $\pm$ 0.97	No detectable

\* = diferencia significativa entre tratamientos de Acúmara al final del experimento (91 días).

PC: Proteína Cruda; EE: Extracto Etéreo; ELN: Extracto Libre de Nitrógeno.

## 7.6 Análisis de ácidos grasos

Mediante cromatografía de gases, se determinaron los porcentajes de ácidos grasos presentes en músculo y grasa perivisceral de 6 organismos de *C. estor* y *A. lacustris* por tratamiento. Cabe señalar que no todas las Acúmaras presentaron grasa perivisceral. En rojo se resaltan las diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) en las que se aprecia una mayor concentración de ácidos grasos de cadena larga en el caso de Acúmara en policultivo (Tabla 5 y 6).

Tabla 5. Perfil de ácidos grasos (%) en músculo de Acúmara y Pescado Blanco.

Ácido graso	Acúmara		Pescado Blanco	
	Monocultivo	Policultivo	Monocultivo	Policultivo
14:0	3.44 ±0.42	3.67 ±0.46	3.85 ±1.95	4.45 ±1.4
15:0	0.33 ± 0.04	0.41 ±0.04*	0.46 ±0.11	0.46 ±0.1
16:0	24.35 ±1.25	26.98 ±1.98*	31.1 ±4.5	28.81 ±4.61
18:0	8.19 ±3.74	8.02 ±1.87	6.5 ±2.55	6.16 ±2.25
Saturados totales	36.31 ±3.36	39.08 ±2.25	41.91 ±5.13	39.88 ±5.29
16:1n-9	0.48 ±0.33	0.65 ±0.19	0.72 ±0.21	0.66 ±0.16
16:1n-7	7.23 ±0.8*	5.54 ±1.03	4.14 ±2.27	5 ±1.64
18:1n-9	36.15 ±3.31	30.04 ±2.77	19.03 ±3.68	21.83 ±5.6
18:1n-7	1.65 ±0.75	2.23 ±1.08	2.89 ±1.17	3.07 ±0.38
20:1n-9 n-11	1.09 ±0.15*	0.66 ±0.32	0.36 ±0.19	0.4 ±0.3
Monoinstaurados totales	46.61 ±3.26*	39.13 ±3.7	27.13 ±6.18	30.97 ±6.79
18:2n-6	8.17 ±0.96	9.16 ±0.99	11.10 ±3.20	11.89 ±2.71
18:3n-6	0.22 ±0.05	0.28 ±0.07	0.58 ±0.15	0.45 ±0.32
20:4n-6 (ARA)	0.73 ±.10	1.14 ±0.38*	1.17 ±0.65	0.92 ±0.35
Omega 6 totales	9.11 ±0.97	10.58 ±0.70*	12.86 ±2.77	13.26 ±2.77
16:4n-3	0.24 ±0.05	0.31 ±0.06	0.17 ±0.27	0.39 ±0.31
18:3n-3	0.95 ±0.16	0.96 ±0.35	1.19 ±0.54	1.23 ±0.75
18:4n-3	0.31 ±0.07	0.47 ±0.29	0.32 ±0.35	0.50 ±0.34
20:4n-3	0.21 ±0.03	0.13 ±0.14	0.07 ±0.11	0.20 ±0.10*
20:5n-3 (EPA)	2.42 ±0.45	2.72 ±0.60	2.99 ±0.78	2.77 ±0.13
22:5n-3	0.54 ±0.11	0.75 ±0.21	1.33 ±0.27	1.20 ±0.37
22:6n-3 (DHA)	3.31 ±0.55	5.87 ±2.07*	12.04 ±4.85	9.60 ±4.35
Omega 3 totales	7.98 ±1.21	11.21 ±2.41*	18.10 ±4.95	15.89 ±4.34
Poliinsaturados totales	17.09 ±1.47	21.79 ±2.69*	30.96 ±3.71	29.15 ±5.37

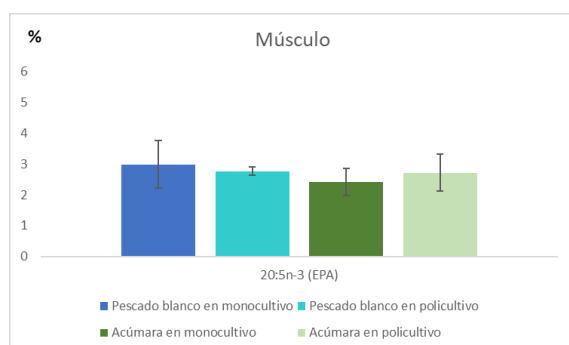
Tabla 6. Perfil de ácidos grasos (%) en grasa perivisceral de Acúmara y Pescado Blanco.

Ácido graso	Acúmara		Pescado Blanco	
	Monocultivo	Policultivo	Monocultivo	Policultivo
14:0	4.01 ±0.51	4.55 ±1.03	5.94 ±0.55	6.67 ±0.54
15:0	0.34 ±0.05	0.43 ±0.10	0.51 ±0.07	0.45 ±0.16
16:0	24.95 ±2.19*	21.93 ±1.47	19.68 ±2.24	21.18 ±2.06
18:0	10.23 ±6.34	8.30 ±4.10	4.13 ±1.49	7.72 ±8.34
Saturados totales	39.53 ±7.56	35.20 ±4.52	30.26 ±3.59	36.03 ±7.05
16:1n-9	1.68 ±3.24	0.54 ±0.20	0.74 ±0.23	0.79 ±0.37
16:1n-7	5.76 ±2.82	5.79 ±0.98	6.47 ±0.45	7.23 ±0.51*
18:1n-9	30.16 ±6.58	28.06 ±4.43	19.42 ±1.42	18.25 ±8.62
18:1n-7	5.93 ±10.23	2.76 ±0.67	3.08 ±0.48	2.28 ±1.07
20:1n-9 n-11	1.15 ±0.22	0.92 ±0.36	0.47 ±0.17	0.62 ±0.35
22:1n-9 n-11		0.27 ±0.43	0.13 ±0.01	0.28 ±0.24
Monoinstaurados totales	44.68 ±5.25	38.33 ±3.99	30.21 ±1.55	29.28 ±9.39
18:2n-6	7.80 ±3.57	12.95 ±1.96*	16.68 ±0.97	16.34 ±1.34
18:3n-6	0.22 ±0.14	0.84 ±0.33*	0.82 ±0.23	0.92 ±0.21
20:4n-6 (ARA)	0.27 ±0.06	0.29 ±0.20	0.59 ±0.11	0.46 ±0.09
Omega 6 totales	8.29 ±3.66	14.08 ±1.80*	18.09 ±1.15	17.72 ±1.52
16:4n-3	0.36 ±0.04	0.48 ±0.25	0.81 ±0.25	0.78 ±0.30
18:3n-3	1.03 ±0.53	1.65 ±0.68*	2.46 ±0.29	2.27 ±0.20
18:4n-3	0.51 ±0.39	0.65 ±0.25	1.21 ±0.24	1.01 ±0.21
20:4n-3	0.23 ±0.05	0.26 ±0.17*	0.26 ±0.20	0.24 ±0.13
20:5n-3 (EPA)	2.35 ±0.24	3.01 ±0.45*	4.27 ±1.03	3.19 ±0.71
22:5n-3	0.59 ±0.10	1.20 ±0.57*	2.25 ±0.35	1.81 ±0.37
22:6n-3 (DHA)	2.43 ±0.27	5.14 ±2.84*	10.04 ±1.40*	7.67 ±1.62
Omega 3 totales	7.50 ±0.58	12.39 ±4.57*	21.30 ±3.31	16.97 ±3.26
Poliinsaturados totales	15.80 ±3.51	26.47 ±6.22*	39.54 ±3.93	34.69 ±4.03

\* = diferencias significativas entre tratamientos por especie.

De manera puntual, se comparó la concentración de ácido eicosapentaenoico (EPA) y ácido docosahexaenoico (DHA) que son los de mayor interés en estos organismos; lo que demostró un porcentaje significativamente mayor ( $\alpha = 0.05$ ) de DHA en músculo de Acúmara en policultivo y DHA en grasa perivisceral de Pescado Blanco en monocultivo y Acúmara en policultivo (Fig. 4.1 a 4.4).

A) EPA



B) DHA

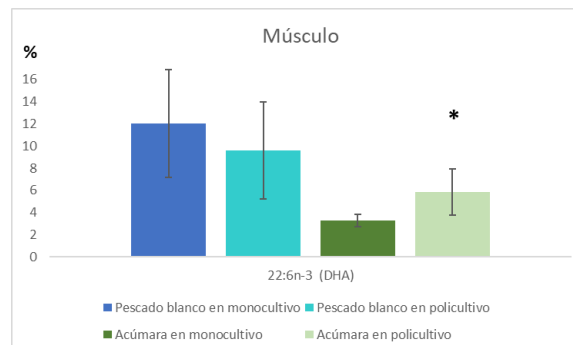
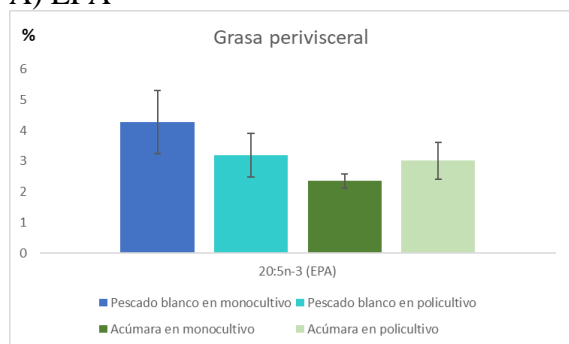


Figura 4.1. Concentración de A) EPA y B) DHA en músculo de Acúmara n=6 y Pescado Blanco n=6. \* = diferencia significativa entre tratamientos por especie.

A) EPA



B) DHA

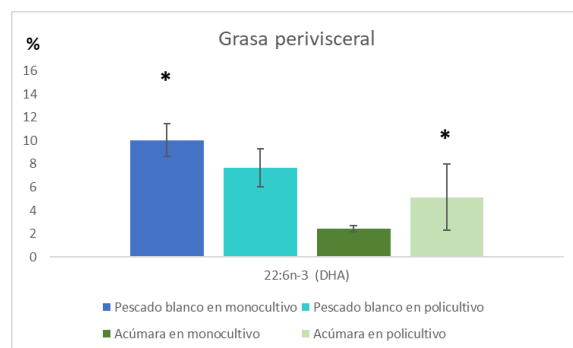


Figura 4.2. Concentración de A) EPA y B) DHA en grasa perivisceral de Acúmara n=4 y Pescado Blanco n=6. \* = diferencia significativa entre tratamientos por especie.

## 7.7 Comportamiento de biorreactores

A pesar de que cada biorreactor se comporta de manera diferente, en todos ellos existen fluctuaciones con tendencia cíclica de las concentraciones biodisponibles de los nutrientes evaluados, los valores fueron estandarizados a 100 ml de sedimento por litro de agua para que puedan compararse entre sí. El desglose de los datos de cada repetición se muestra en gráficas en el ANEXO. Respecto a los compuestos nitrogenados, las concentraciones de nitritos y nitratos tienden a elevarse a lo largo de los días y en algunos casos vuelven a bajar y mostrar fluctuaciones, esto asociado a la actividad de las bacterias presentes en los biorreactores (Lobanov, *et. al.*, 2021; Yogevev, *et. al.*, 2020), al igual que se aprecia la tendencia a una mayor concentración general de fósforo en forma de fosfato (más fácilmente asimilable por las plantas) y de potasio (Tablas 7.1 a 7.3).

Tabla 7.1, 7.2 y 7.3. Concentraciones de nutrientes en mg/L en 3 biorreactores diferentes por cada cultivo.

	Acúmara											
	Biorreactor 1				Biorreactor 2				Biorreactor 3			
	Día 0	Día 5	Día 10	Día 15	Día 0	Día 5	Día 10	Día 15	Día 0	Día 5	Día 10	Día 15
Amonio (mg/L NH4)	<<	<<	0.38	<<	0.02	<<	0.02	0.06	0.03	0.03	0.03	0.42
Nitritos (mg/L NO2)	8.25	1.88	15.00	43.13	3.15	0.97	1.13	0.73	0.97	2.92	0.28	0.97
Nitratos (mg/L NO3)	56.25	44.50	40.00	75.00	12.58	8.06	21.29	74.19	62.50	83.33	150.00	188.89
Fosfatos (mg/L PO4)	18.13	44.38	137.50	109.38	8.47	8.47	11.69	12.90	22.22	14.58	11.94	19.44
Potasio (mg/L K)	81.25	106.25	175.00	181.25	24.19	18.55	19.35	8.87	26.39	37.50	16.67	25.00

	Pescado Blanco											
	Biorreactor 1				Biorreactor 2				Biorreactor 3			
	Día 0	Día 5	Día 10	Día 15	Día 0	Día 5	Día 10	Día 15	Día 0	Día 5	Día 10	Día 15
Amonio (mg/L NH4)	0.14	0.21	<<	<<	<<	0.23	0.75	0.34	<<	0.28	0.23	0.40
Nitritos (mg/L NO2)	0.72	25.86	82.76	113.79	5.69	2.62	1.85	4.00	1.38	15.00	48.50	0.50
Nitratos (mg/L NO3)	6.21	19.31	155.17	10.00	13.54	7.38	21.54	43.69	7.90	65.00	350.00	260.00
Fosfatos (mg/L PO4)	36.21	11.72	11.90	11.90	4.69	20.77	25.38	12.69	19.38	18.75	16.25	15.00
Potasio (mg/L K)	81.03	67.24	31.03	43.10	18.46	80.77	32.31	23.08	35.00	71.25	32.50	31.25

	Policultivo											
	Biorreactor 1				Biorreactor 2				Biorreactor 3			
	Día 0	Día 5	Día 10	Día 15	Día 0	Día 5	Día 10	Día 15	Día 0	Día 5	Día 10	Día 15
Amonio (mg/L NH4)	<<	0.27	0.73	0.82	0.08	0.10	0.03	0.10	0.04	0.04	0.24	0.44
Nitritos (mg/L NO2)	0.82	4.36	2.27	3.64	5.90	3.97	2.44	4.10	1.80	4.80	9.00	17.60
Nitratos (mg/L NO3)	11.27	29.45	32.73	35.64	4.46	16.92	7.38	11.79	140.00	112.00	272.00	200.00
Fosfatos (mg/L PO4)	21.82	28.64	19.55	17.27	12.82	19.87	15.38	41.03	36.00	29.00	29.00	28.00
Potasio (mg/L K)	181.82	163.64	95.45	109.09	28.21	41.03	30.77	33.33	40.00	54.00	66.00	50.00

<< = valores por debajo de 0.01 mg/L

## **VIII. DISCUSIÓN**

### **8.1 Calidad de agua**

A pesar de que no se controlaron aspectos del cultivo como el fotoperiodo y la temperatura, los parámetros de calidad de agua se mantuvieron en niveles seguros (Boyd, 2012) para ambas especies durante la ejecución del experimento. Lo anterior demuestra la factibilidad de estas especies nativas que, a diferencia de especies exóticas como la Tilapia y la Trucha, están adaptadas a las condiciones medioambientales de la región.

### **8.2 Comportamiento**

Respecto al comportamiento de los animales en cultivo, con los 20 años de experiencia en la producción de Pescado Blanco se sabe que es una especie que no tolera el manejo, como la manipulación manual o por redes, como otras especies; sin embargo, dentro de su misma naturaleza se ha adaptado a la vida en cautiverio. Por otra parte, la Acúmara tiene menos tiempo siendo cultivada en cautiverio. Durante este trabajo experimental, fue notable que el periodo de aclimatación definido por el tiempo que pasó desde su siembra hasta que se adaptaron a su nuevo ambiente y alimento se alargó hasta un mes.

Durante el periodo experimental (3 meses) se notaron evidentes diferencias entre los tratamientos (monocultivo de Pescado Blanco, monocultivo de Acúmara y policultivo).

#### **8.2.1 Monocultivo de Pescado Blanco**

En monocultivo de Pescado Blanco se suele encontrar a los peces nadando en la superficie, se acercan a comer cuando se les ofrece el alimento, los peces parecen observar el alimento sumergirse un poco para posteriormente seleccionar la mejor partícula, dejando caer al fondo del estanque aquellas que consideren demasiado pequeñas o grandes. Los peces, en estas condiciones, suelen tomarse su tiempo en consumir lo administrado, por lo que la recomendación es alimentar a saciedad con pequeñas porciones esperando a que consuman todo el alimento durante su descenso hasta el fondo del estanque entre cada porción. Cuando es evidente que el alimento deja de ser un estímulo y la comida cae al fondo, se deja de alimentar, por lo que, de manera general, la especie tiende a desperdiciar un porcentaje de alimento ofrecido. Lo anterior se vio reflejado en una mayor cantidad de sedimentos

colectados de los tres estanques de este tratamiento. Adicionalmente, en este tipo de cultivo, los organismos de *C. estor* se sintieron en condiciones adecuadas para reproducirse y desovar, al igual que aquellos (fuera del experimento) destinados como reproductores.

### **8.2.2 Monocultivo de Acúmara**

Las Acúmaras en monocultivo por otra parte, no se acercan cuando se les aproxima. Se van a nadar al extremo opuesto del estanque muy cerca del fondo, y al momento de alimentar, dejan que el alimento llegue a media agua antes de aproximarse a comer, de manera muy rápida y voraz, consumiendo todo el alimento al fondo, pero parando si ven algún movimiento brusco incluso si éste es para continuar alimentándolas. Por lo anterior, se podían ofrecer porciones un poco más grandes que a *C. estor* dejando que consumieran todo el alimento antes de ofrecer de nuevo. A diferencia de los estanques de pescado blanco, estos estanques se mantuvieron más limpios sin residuos de alimento.

### **8.2.3 Policultivo de *Chirostoma estor* y *Algansea lacustris***

En los estanques de policultivo se comprobó que *Chirostoma estor* y *Algansea lacustris* pueden convivir en un mismo estanque sin encontrar ningún tipo de agresión, a pesar de no haber sido grupos completamente homogéneos en cuanto a tallas. Sin embargo, se observó que el comportamiento de ambas especies se vio modificado por la presencia de la otra. Por un lado, las acúmaras se mostraron menos tímidas, al acercarse velozmente a comer cuando se les ofrecía alimento, consumiendo alimento en superficie y residuos en fondo. Por otro lado, *C. estor* se comportó menos selectivos con el alimento y lo consumieron en mayor cantidad y con mayor rapidez, dejando caer menos residuos alimenticios al fondo del estanque. Este hallazgo de competencia inter-especie se reporta por primera vez y como resultado, los estanques (al igual que los de Acúmara en monocultivo), se mantuvieron más limpios. Otra observación interesante fue que en este tratamiento no se registró presencia de huevos de ninguna de las dos especies, lo que sugiere que posiblemente las acúmaras consumieron algún desove de pescado blanco.

Este policultivo mostró varias diferencias interesantes al compararlo con el desempeño de las especies de manera individual, algo que no siempre es esperado, ya que en otros sistemas agroacuícolas integrados con policultivo de especies nativas como Cachama híbrida

(*Piaractus* sp.) con Bocachico (*Prochilodus magdalenae*) en Colombia, no se encontraron diferencias significativas en cuanto al crecimiento de las especies en monocultivo ni se reportan cambios de comportamiento en los estanques (Durán-Izquierdo, *et. al.*, 2020). De igual manera en policultivo de Dormilón gordo del pacífico (*Dormitator latifrons*) con Tilapia (*O. niloticus*) no existieron interacciones negativas, y tampoco se reportan cambios de comportamiento. En cuanto al desempeño, mencionan rendimientos menores a un policultivo de un experimento previo en *D. latifrons*, asociado a la densidad de siembra de los cultivos; de igual manera, se mencionan otros policultivos de Tilapia con pez de ornato Rey Midas (*Amphilophus citrinellus*) y con Barbo (*Carasobarbus luteus*), un cíclido y un cyprinido respectivamente, en los que el desempeño de la tilapia varía dependiendo de la densidad de siembra de los organismos, aunque no se mencionan cambios de comportamiento (Palma-Cancino, *et. al.*, 2021).

*Algansea lacustris* se mostró mucho más activa y menos estresada ante los manejos diarios de una manera notoria incluso al finalizar el experimento, ya que, una vez concluido el período experimental, los organismos fueron separados por especie y por tratamiento. De manera interesante, inclusive a un año después de finalizado el experimento, las acúmaras que siempre se mantuvieron en monocultivo se mantienen en un cardumen visiblemente más compacto en el fondo del estanque con el mínimo desplazamiento; mientras que aquellas que convivieron con *C. estor*, conservaron su comportamiento más dinámico nadando por todo el estanque y subiendo a alimentarse mientras el alimento se comienza a hundir, lo que deja ver que el aprendizaje interespecie y la modificación de su comportamiento, fue permanente.

### **8.3 Crecimiento**

Los cambios de comportamiento observados en los estanques de policultivo pueden asociarse al mayor crecimiento de ambas especies. El crecimiento mayor para las acúmaras fue en el tratamiento de monocultivo y en el caso de pescado blanco en policultivo (Fig. 3.1 y 3.2). Esta asociación puede ser explicada por la convivencia inter-especie, ya que como se dijo con anterioridad, *C. estor* se estimula a consumir más alimento por competencia (en presencia de acúmaras), favoreciendo su ganancia de peso. Además, la variación de tallas alcanzadas de acúmaras al final del experimento en policultivo fue alta, con más organismos pequeños y menos tallas grandes (Fig. 5.2), mientras que lo opuesto ocurrió en el tratamiento de

monocultivo (Fig 5.1), lo que evidencia una falta de alimento debido a la competencia y asertividad de alimentación de *C. estor*, aunado a que es más complicado ver el consumo de acúmaras a media agua y en el fondo. Estas variables en conjunto con alternativas de tipos de alimento (flotante vs hundimiento) deberán considerarse en futuras experiencias en policultivo. Sin embargo, al momento de evaluar el desempeño de los peces mediante los parámetros de peso ganado individual en mg/día y porcentaje, el SGR y FCR, existe únicamente una diferencia estadística significativa de mejor rendimiento en el policultivo para *C. estor*, no así con las acúmaras, que no presentan diferencia significativa entre tratamientos.

#### **8.4 Composición química proximal de los peces**

Con respecto a la evaluación proximal de los organismos, se observó que las acúmaras en monocultivo acumularon más del doble de porcentaje de grasa comparado con aquellas en policultivo (Tabla 3), aunado a un aumento de proteína en aquellas en policultivo. Esto sugiere que la ganancia de peso en monocultivo fue en su mayoría acumulación de reservas lipídicas por una menor actividad física a diferencia de un mayor desarrollo muscular observado en el caso del policultivo. Lo anterior asociado nuevamente a los cambios en el comportamiento de la especie, que, al ser menos activas en monocultivo por su alto nivel de estrés, su ganancia de peso fue en su mayoría por acumulación de grasa; mientras que aquellas en policultivo al mostrarse más activas en un cardumen de dos especies, desarrollaron su ganancia de peso en forma de músculo.

#### **8.5 Análisis de ácidos grasos**

Al analizar el perfil de ácidos grasos de músculo y grasa perivisceral de los organismos de este experimento, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de Acúmara, principalmente con una concentración de ácidos grasos monoinsaturados mayor en aquellas mantenidas en monocultivo, mientras que se observó una concentración significativamente mayor de ácidos grasos poli-insaturados en las acúmaras de policultivo, principalmente de ácido araquidónico y DHA en músculo, y en la grasa (Tabla 5 y 6).

Esto también asociado a la diferencia de comportamiento entre acúmara en monocultivo que tuvo menor actividad física, y por lo tanto su acumulación de grasa previamente mencionada,

mientras que nuevamente las acúmaras que se mantuvieron en policultivo, tuvieron mejores resultados por su comportamiento más activo al acostumbrarse al manejo gracias a la convivencia con *C. estor*.

Por otra parte, las concentraciones de ácidos grasos omega 3 en *C. estor*, en este experimento resultaron considerablemente más bajas que las previas obtenidas en otros experimentos y en vida libre; aunque presentan un porcentaje significativamente mayor de DHA en la grasa de los peces en monocultivo de este trabajo.

También es posible observar una aparente diferencia entre la acumulación de grasa entre los organismos de Pescado Blanco por sexo que, a pesar de que no se cuenta con evidencia suficiente, se sugiere la realización de otro estudio más específico para aclarar este fenómeno, posiblemente asociado al estado de maduración sexual de los peces.

## **8.6 Biomineralización aerobia**

A pesar de que las concentraciones de nutrientes a la salida de los biorreactores fueron variables, se observó una tendencia general de aumento, especialmente compuestos nitrogenados como el nitrato, ahora solubilizados en agua y con mayor capacidad de ser biodisponibles por plantas. Por otro lado, fosfatos y potasio presentan elevaciones y reducciones cíclicas, que sugieren al menos para el caso de fosfatos, la presencia de organismos denitrificantes acumuladores de fosfatos (denitrifying polyphosphate-accumulating organisms - DPAO) (Yogev, *et. al.*, 2020), que consumen y liberan fósforo de manera cíclica, explicando dicho fenómeno.

Es importante tomar en cuenta el diseño experimental, ingreso y egreso de efluentes para comparar los resultados obtenidos en este y trabajos previos; ya que, al ser los primeros reportes en su tipo existen variantes en cuanto al diseño utilizado. Por ejemplo, en el presente trabajo se colectó el sedimento de manera manual y se colocó en biorreactores completamente independientes; mientras que, Yogev, *et. al.*, (2020), utilizó un biorreactor anaeróbico que se encontraba integrado al sistema de recirculación de los peces en flujo continuo; y en uno más realizado por Lobanov, *et. al.*, (2021) se utilizó un sistema mixto de biorreactores aeróbicos y anaeróbicos de igual manera acoplado al sistema de recirculación de agua. Lo anterior hace que los resultados de este y de otros trabajos no sean directamente

comparables; sin embargo, nos permite ver en los tres modelos, que existen grupos de bacterias que son capaces de solubilizar los nutrientes fijados a las heces de los organismos acuícolas de manera significativa.

Para poder hacer una comparación con las reportadas en algunas soluciones comerciales recomendadas para cultivo de lechuga, se calculó con los datos obtenidos a partir de 100g de sedimento, la aproximación de cuánto se obtendría con 1kg de sedimento (Tabla 8.1), y se observa que las concentraciones de cada especie por separado y en policultivo, se encuentran en la misma magnitud de valores.

Tabla 8.1. Concentraciones de nutrientes calculadas a partir de los datos obtenidos en este trabajo, asumiendo un volumen de 1kg de sedimento a la entrada de un biorreactor, y su comparación con el intervalo de nutrientes reportado para soluciones nutritivas comerciales.

<i>Nutriente</i> (mg/L)	<b>Acúmara</b>	<b>Pescado Blanco</b>	<b>Policultivo</b>	<b>Solución nutritiva Steiner</b>	<b>Solución nutritiva Soluponics</b>	<b>Solución nutritiva Nutripónic</b>
<i>Nitrógeno total</i>	278.96	455.45	286.25	167	115	187.5-562.5
<i>Fósforo</i>	411.43	160.40	253.04	31	31	375-1125
<i>Potasio</i>	653.82	458.37	714.79	277	248	250-750

Solución nutritiva Steiner: Nitrato de Calcio, Nitrato de Potasio, Dihidrógeno Fosfato de Potasio, Sulfato de Potasio.  
<https://todohidroponico.com/2007/09/solucion-nutritiva-de-steiner.html>

Solución nutritiva Soluponics: Nitrógeno, Fósforo, Potasio.

[https://inverfarms.mercadoshops.com.mx/MLM-918873368-solucion-nutritiva-lechuga-1000l-soluponics-hidroponia-\\_JM](https://inverfarms.mercadoshops.com.mx/MLM-918873368-solucion-nutritiva-lechuga-1000l-soluponics-hidroponia-_JM)

Solución nutritiva Nutripónic: Nitrógeno total, Ortofosfato, Potasio

<http://www.ventdepot.net/mexico/fichastecnicas/Siembra-y-Cultivo-Acuapon%C3%ADa-GrowVeg-2.2.pdf>

Incluso usando una densidad de siembra baja de entre 1 a 1.5kg/m<sup>3</sup>, los intervalos de nutrientes encontrados durante el proceso de remineralización aeróbica, igualan e incluso superan en su mayoría a las concentraciones encontradas en las soluciones comerciales utilizadas para hidroponía las que, además, debido a sus estructuras químicas han demostrado ser menos biodisponibles para las plantas (Lobanov, *et. al.*, 2021). Por lo tanto, a reserva de

verificar las concentraciones de micronutrientes y realizar otro experimento para poner a prueba la solución de mineralización aeróbica contra soluciones comerciales, los efluentes de cultivos de estas dos especies nativas proporcionarían cantidades aceptables y competitivas de nutrientes comparables a las utilizadas a nivel comercial. Lo anterior confirma la viabilidad del uso de estas especies en sistemas acuapónicos, con el potencial de reducir costos de soluciones nutritivas de macronutrientes en el subsistema de hiroponia.

## IX. CONCLUSIONES

- Ambas especies pueden cultivarse de manera independiente, a pesar de que cada una tiene periodos de adaptación diferentes; siendo *A. lacustris* la especie más delicada en cuanto al comportamiento por estrés.
- En policultivo ambas especies conviven sin agredirse entre sí y aprovechando toda la columna de agua del estanque.
- En policultivo, *C. estor* mostró mayor voracidad al alimentarse, asociado a la competencia interespecie, y, por lo tanto, mejor desempeño en su crecimiento.
- En policultivo, *A. lacustris* tuvo un periodo de adaptación al manejo más corto evidenciando un claro comportamiento más relajado que en monocultivo.
- *A. lacustris* presentó una mayor proporción de proteína, y mejor calidad de grasa (ácidos grasos poli-insaturados de cadena larga) en policultivo, ambas características deseables para el consumo humano.
- El policultivo mostró ser benéfico para el desempeño zootécnico de ambas especies.
- Estas especies son capaces de producir nutrientes necesarios para que al pasar por un proceso de remineralización, los efluentes sean usados como fertilizante orgánico.

## **X. RECOMENDACIONES**

Este trabajo abre el panorama para nuevos diseños experimentales que puedan profundizar en sus interacciones para encontrar mejores técnicas o protocolos de alimentación que permitan un crecimiento más uniforme de los cultivos, a diferencia de lo encontrado en el estudio actual en que hubo una amplia variedad de tallas finales observadas en las biometrías. Además de que se requiere explorar los cambios de comportamiento y desempeño a diferentes densidades de siembra de las especies.

También es importante tomar en cuenta que desde la formulación de las dietas se puede modificar la concentración de nutrientes obtenidos al final del proceso y que se pueden incorporar nutrientes desde la alimentación y dependiendo del consumo que tenga cada especie, además de contar con alimentos con diferentes características físicas como la velocidad de hundimiento.

Por otra parte, se requiere realizar estudios posteriores de microbiómica que permitan identificar los principales géneros de microorganismos involucrados directamente con el proceso de biomineralización y su posteriores efectos como consorcios bacterianos para la captación de nutrientes por plantas en hidroponia.

## XI. REFERENCIAS

- Boyd, C. E., (2012). Water Quality. An Introduction. 3<sup>a</sup> ed. Springer Cham.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8>
- Chibras Guillermo, D. E. (2015). Sustentabilidad de la acuicultura en México: perspectivas desde un caso de estudio en la Costa Chica de Oaxaca. INTER DISCIPLINA, 3(7).  
<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2015.7.52390>
- CONAPESCA, (2018). Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2018.  
[https://www.conapesca.gob.mx/work/sites/cona/dgppe/2018/ANUARIO\\_2018.pdf](https://www.conapesca.gob.mx/work/sites/cona/dgppe/2018/ANUARIO_2018.pdf)
- CONAPESCA, (2020). Registro Nacional de Pesca y Acuicultura (RNPA)  
<https://www.gob.mx/conapesca/documentos/registro-nacional-de-pesca-y-acuicultura-rnpa>
- Durán-Izquierdo, J.C., Mindiola-Romo, R.J., Wills-Franco, G.A., Pardo-Carrasco, S.C., Muñoz-Ramírez, A.P. (2021) Uso de perifiton en un sistema de policultivo en agro acuicultura integrada en la comunidad indígena de Jimaín, Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). [Periphyton-based polyculture in an integrated agri-aqua-culture system at the indigenous community of Jimaín, Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia)]. Rev Med Vet Zoot. 67(3): 262-275.  
Doi: 10.15446/rfmvz.v67n3.93933.
- FAO, (2004). Agro-acuicultura integrada. Manual básico.  
<https://www.fao.org/3/y1187s/y1187s.pdf>
- FAO, (2009). *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758).  
[http://www.fao.org/tempref/FI/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/es/es\\_niletilapia.htm#:~:text=La%20tilapia%20del%20Nilo%20es%20una%20especie%20tropical%20que%20prefiere,entre%2031y%2036%20%C2%B0C](http://www.fao.org/tempref/FI/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/es/es_niletilapia.htm#:~:text=La%20tilapia%20del%20Nilo%20es%20una%20especie%20tropical%20que%20prefiere,entre%2031y%2036%20%C2%B0C).
- FAO, (2014). Manual Práctico para el Cultivo de la Trucha Arcoíris. Guatemala.  
<http://www.fao.org/3/a-bc354s.pdf>
- FAO, (2014). The State of World Fisheries and Aquaculture. Food and Agricultural Organization, Rome, Italy.
- FAO, (2016). Planning for aquaculture diversification: the importance of climate change and other drivers.  
<http://www.fao.org/3/a-i7358e.pdf>
- FAO, (2020). The State of World Fisheries and Aquaculture 2020.  
<http://www.fao.org/state-of-fisheries-aquaculture>

- Gallardo, D., Domínguez, L., (2015). Aplicación de modelos de balance de masa nutricional para la estimación de descargas en el cultivo de trucha arcoíris en ríos de altura del Austro Ecuatoriano. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*.
- <https://pdfs.semanticscholar.org/5539/07cddcf9424e6d17f0f4af9e2e5883d11543.pdf>
- Goddek, S. Joyce, A. Kotzen, B. Burnell, G., (2019). *Aquaponics Food Production Systems. Combined Aquaculture and Hydroponic. Production Technologies for the Future.* Springer Open.
- Hernández-Martínez, M., Tello-Ballinas, J. A., Sabanero-Meza, S., Román-Reyes, J. C., De la Cruz-González, F. J., Monroy-Dosta, M. C., León-Ceras, G., Luna-Raya, C., Rodríguez-Montes de Oca, G. A. (2018). *Manual para la producción de crías de pescado blanco.* INAPESCA.
- <https://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/transparencia/SIPOT/DGAIPP/Art70%20frXXXIII/Produccion%20de%20crias%20pescado%20blanco.pdf>
- Khakyzadeh, V., Luque, R., Zolfigol, M.A., Vahidian, H.R., Salehzadeh, H., Moradi, V., Soleymani, A.R., Moosavi-Zare, A.R., Xu, K. (2015) Waste to wealth: a sustainable aquaponic system based on residual nitrogen photoconversion. *Royal Society of Chemistry* 5:3917–3921. <https://doi.org/10.1039/C4RA15242E>
- Lobanov, V. P., Combot, D., Pelissier, P., Labbé, L. and Joyce, A. (2021). Improving Plant Health Through Nutrient Remineralization in Aquaponic Systems. *Frontiers in Plant Science*. 12:683690. doi: 10.3389/fpls.2021.683690
- Mancilla-Martínez, M., (2020). *Curso/Taller: Curso de hortalizas sin suelo (Hidroponia).* Morelia, Michoacán. 5 y 6 de diciembre 2020.
- Martínez-Chávez, C. C., Alarcón-Silva, E. M., Martínez-Palacios, C. A., Navarrete-Ramírez, P., Raggi, L., Corona-Herrera, G. A., ... Ross, L. G. (2018). Sexual Dimorphism in Pelvic Fin Length of Two Endangered Freshwater Atherinopsid Species with High Aquaculture Potential. *North American Journal of Aquaculture*, 80(3), 310–314. doi:10.1002/naaq.10036
- Martínez Chávez, C. C., Navarrete Ramírez, P., Raggi Hoyos, L., Ríos Durán, M. G., Fonseca Madrigal, J., Chávez Sánchez, M. C., Amillano Cisneros, J. M., & Martínez Palacios, C. A. (2022). Retos y perspectivas del sector acuícola rumbo al 2050. *Ciencia Nicolaita*, (83). <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.572>
- Martínez-Palacios, C. A., I. S. Racotta, M. G. Rios-Duran, E. Palacios, M. Toledo-Cuevas, and L. G. Ross. (2006). Advances in applied research for the culture of Mexican silversides (*Chirostoma*, Atherinopsidae). *Biocell* 30:137–148.
- Martínez-Palacios, C.A. Toledo, M. Fonseca, J. Ríos, G. Martínez, C. López, J. Santos, S. Navarrete, P. Raggi, L., (2017). *Laboratorio de Biotecnología Acuícola: Investigación que contribuye a la soberanía alimentaria, rumbo al 2050.* Laboratorio de Biotecnología Acuícola y Acuicultura; Laboratorio Nacional de Nutrigenómica y

- Microbiómica Digestiva Animal CONACyT, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. *Ciencia Nicolaita* 71:129-141
- Martínez-Palacios, C.A., Concha-Santos, S., Toledo-Cuevas, E. M., Navarrete-Ramírez, P., Raggi, L., Strussmann, C., Hualde, J. P., Demicheli, M. A. & Fonseca-Madrugal, J., (2020). High levels of docosaheptaenoic acid are present in eight New World silversides (Pisces: Atherinopsidae). *Neotropical Ichthyology*. 18 (2).
- Palma-Cancino, D.J., Vega-Villasante, F., Basto-Rosales, M.E.R., Martínez-García, R., Álvarez-González, C.A., Chong Carrillo, O. (2021). Crecimiento, supervivencia y rendimiento de canal en un bicultivo del Dormilón Gordo del Pacífico (*Dormitator latifrons*) y la Tilapia Nilótica (*Oreochromis niloticus*). Universidad de Guadalajara. Jalisco, México.
- [https://www.researchgate.net/profile/David-Palma-Cancino/publication/359398781\\_Crecimiento\\_supervivencia\\_y\\_rendimiento\\_de\\_canal\\_en\\_un\\_bicultivo\\_del\\_dormilon\\_gordo\\_del\\_Pacifico\\_Dormitator\\_latifrons\\_y\\_la\\_tilapia\\_nilotica\\_Oreochromis\\_niloticus/links/6239e42dfc85a373aa5feab9/Crecimiento-supervivencia-y-rendimiento-de-canal-en-un-bicultivo-del-dormilon-gordo-del-Pacifico-Dormitator-latifrons-y-la-tilapia-nilotica-Oreochromis-niloticus.pdf](https://www.researchgate.net/profile/David-Palma-Cancino/publication/359398781_Crecimiento_supervivencia_y_rendimiento_de_canal_en_un_bicultivo_del_dormilon_gordo_del_Pacifico_Dormitator_latifrons_y_la_tilapia_nilotica_Oreochromis_niloticus/links/6239e42dfc85a373aa5feab9/Crecimiento-supervivencia-y-rendimiento-de-canal-en-un-bicultivo-del-dormilon-gordo-del-Pacifico-Dormitator-latifrons-y-la-tilapia-nilotica-Oreochromis-niloticus.pdf)
- Rafiee, G., Saad, C.R., (2005). Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 244:109–118. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2004.10.029>
- Ramírez-Herrejón, J., Zambrano, L., Mercado-Silva, N., Torres-Téllez, A., Pineda-García, F., Caraveo-Patiño, J., & Balart, E. (2017). Long term changes in the fish fauna of Lago de Pátzcuaro in Central México. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(1), 137-149. doi:<http://dx.doi.org/10.3856/vol42-issue1-fulltext-11>
- <http://lajar.cl/index.php/rlajar/article/view/vol42-issue1-fulltext-11/364>
- Timmons, M.B., Ebeling, J.M. (2013) *Recirculating aquaculture*. Thaca Publishing Company, Ithaca. 788p
- Toomey, L., Lecocw, T., Bokor, Z., Espinat. L., Ferincz, Á., Goulon, C., Vesala, S., Baratçabal, M., Mamadou-Diouhe, B., Gouret, M., Gouron, C., Staszny, Á., Mauduit, E., Mean, V., Muller, I., Schlick, N., Speder, K., Thumerel, R., Piatti, C., Pasquet, A., Fontaine, P., (2020). Comparison of single- and multi-trait approaches to identify best wild candidates for aquaculture shows that the simple way fails. *Sci Rep* 10, 11564
- Yogev, U., Vogler, M., Nir, O., Lonfong, J. and Gross, A. (2020). Phosphorus recovery from a novel recirculating aquaculture system followed by its sustainable reuse as a afertilizer. *Elsevier. Science or the Total Environment*. 722:137949.
- doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137949>

# ANEXO

## Frecuencias de peso, talla y factor de condición de Fulton

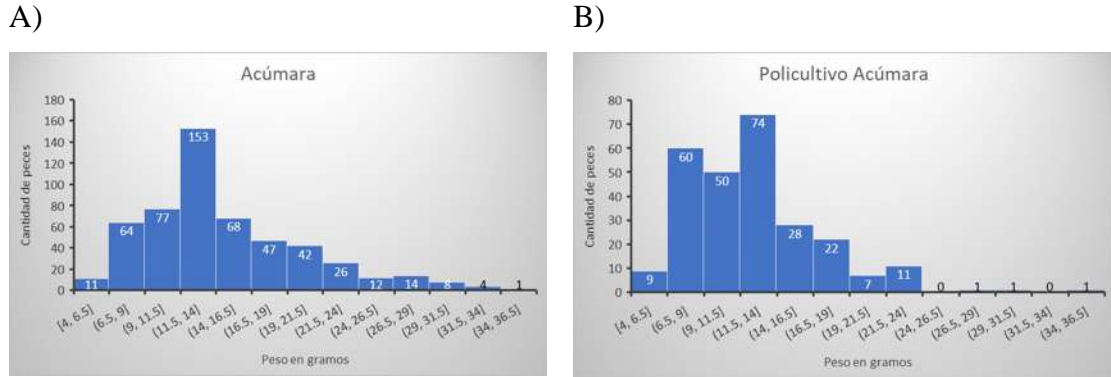


Figura 5.1. Frecuencia de pesos en estanques de Acúmara en A) monocultivo, B) policultivo.

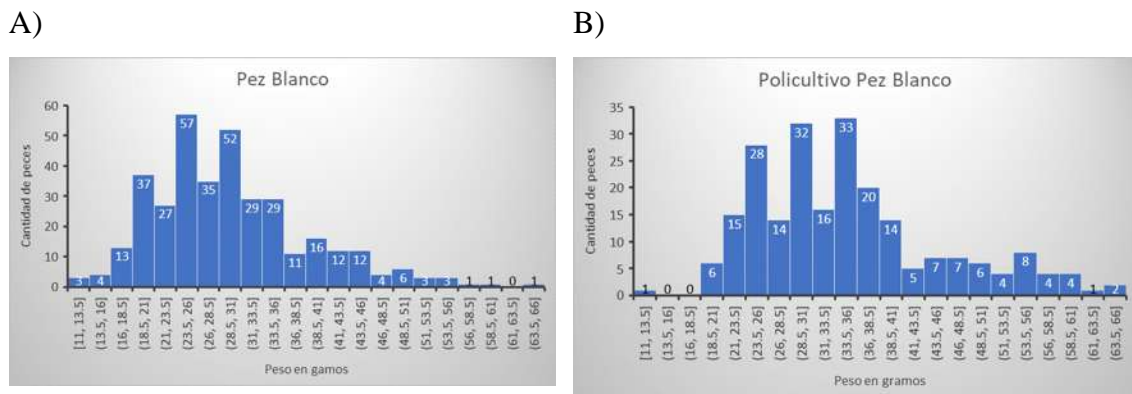


Figura 5.2. Frecuencia de pesos en estanques de Pescado Blanco en A) monocultivo, B) policultivo.

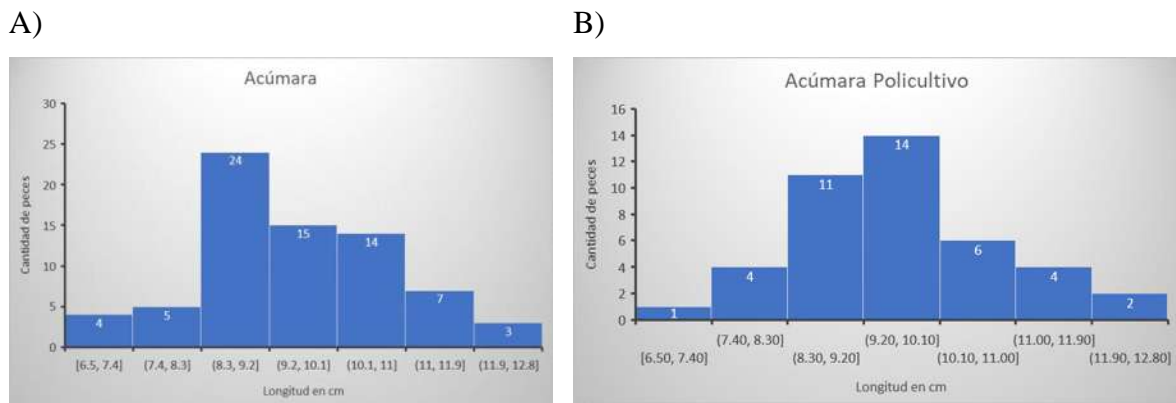
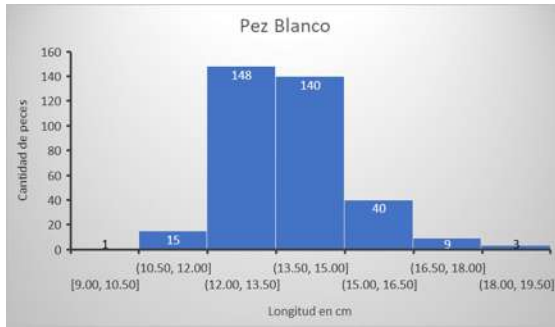


Figura 5.3. Frecuencia de tallas en estanques de Acúmara en A) monocultivo, B) policultivo.

A)



B)

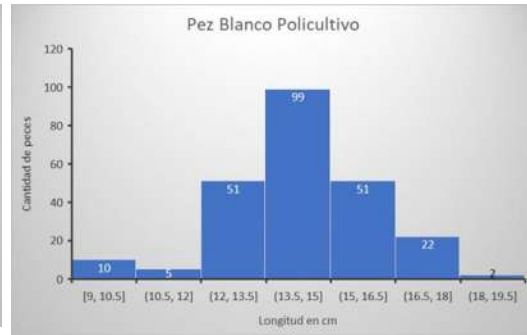
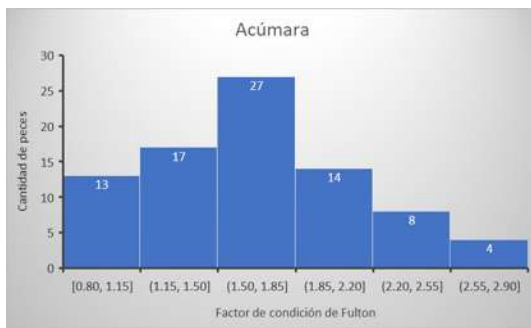


Figura 5.4. Frecuencia de tallas en estanques de Pesca Blanco en A) monocultivo, B) policultivo.

A)



B)

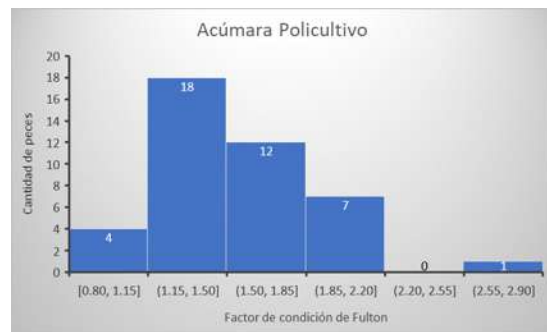
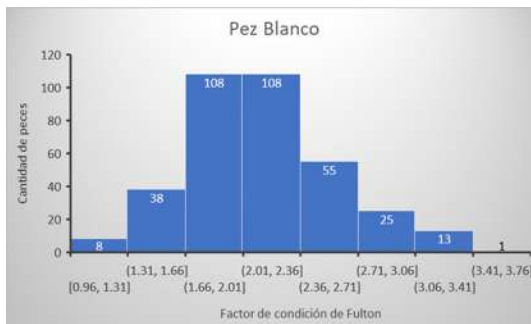


Figura 5.5. Frecuencia de factor de condición de Fulton en estanques de Acúmara en A) monocultivo, B) policultivo.

A)



B)



Figura 5.6. Frecuencia de factor de condición de Fulton en estanques de Pesca Blanco en A) monocultivo, B) policultivo.

## Comportamiento de los biorreactores

Figura 6.1.1  
Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 1 de Acúmara. 8ml/L sedimento inicial

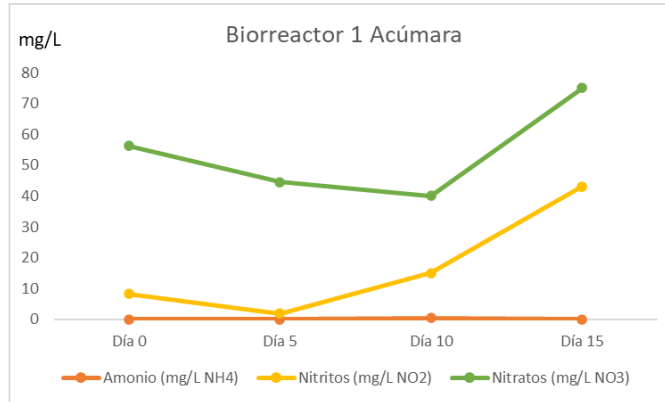


Figura 6.1.2  
Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 1 de Acúmara. 8ml/L sedimento inicial

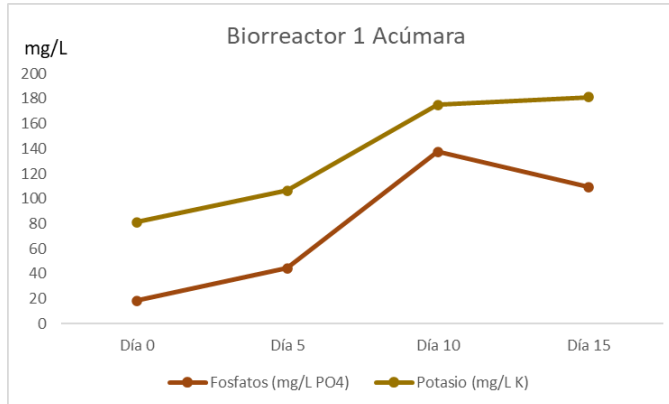


Figura 6.2.1  
Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 2 de Acúmara. 62ml/L sedimento inicial

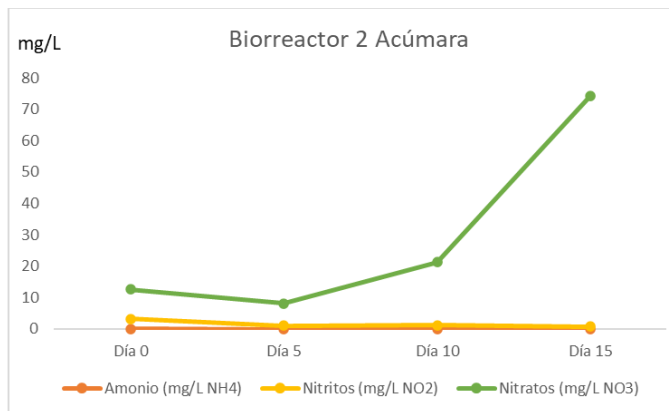


Figura 6.2.2  
 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 2 de Acúmara. 62ml/L sedimento inicial

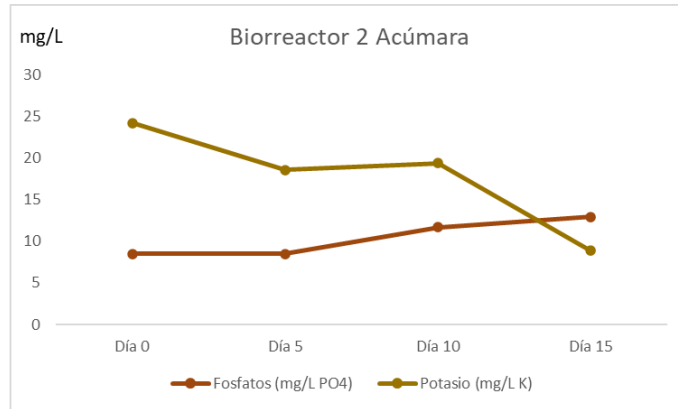


Figura 6.3.1  
 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 3 de Acúmara. 36ml/L sedimento inicial

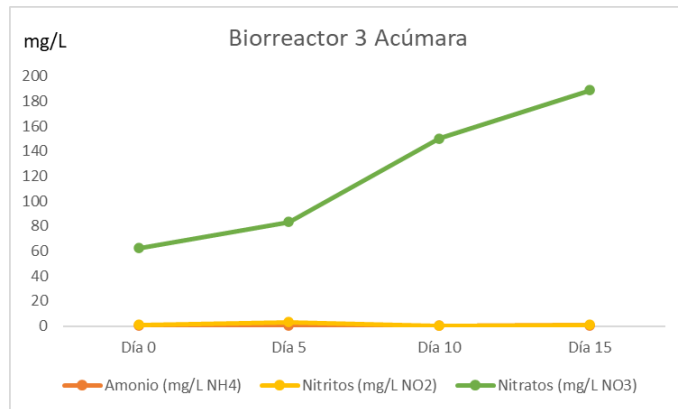


Figura 6.3.2  
 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 3 de Acúmara. 36ml/L sedimento inicial

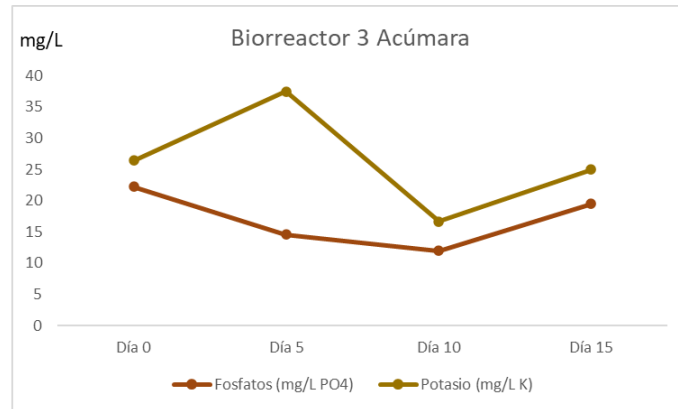


Figura 6.4.1  
 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 1 de Pescado Blanco. 29ml/L sedimento inicial

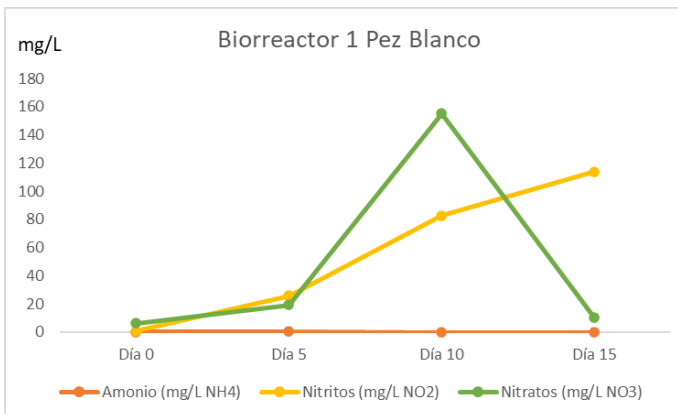


Figura 6.4.2  
Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 1 de Pescado Blanco. 29ml/L sedimento inicial

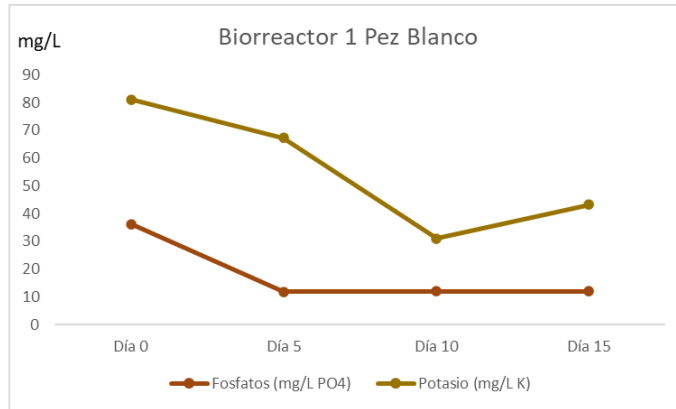


Figura 6.5.1  
Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 2 de Pescado Blanco. 65ml/L sedimento inicial

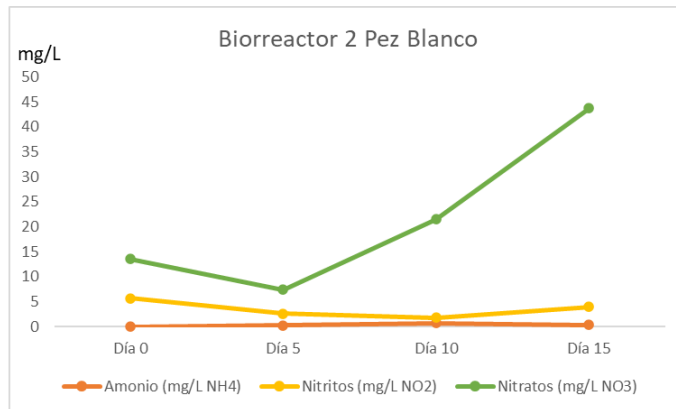


Figura 6.5.2  
Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 2 de Pescado Blanco. 65ml/L sedimento inicial

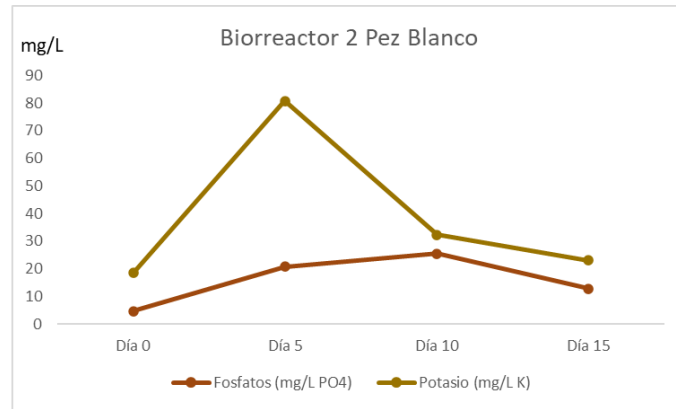


Figura 6.6.1  
Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 3 de Pescado Blanco. 40ml/L sedimento inicial

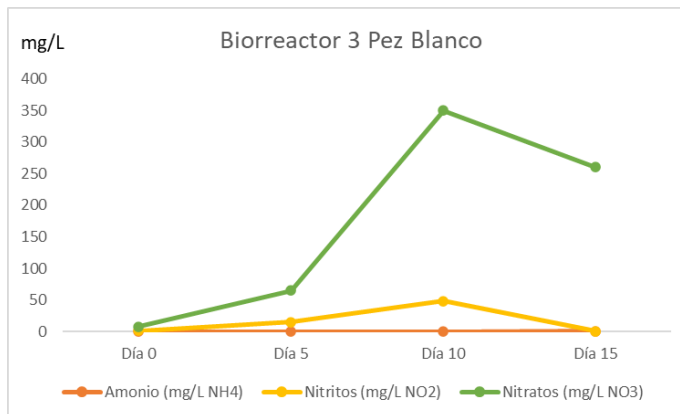


Figura 6.6.2  
 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 3 de Pescado Blanco. 40ml/L sedimento inicial

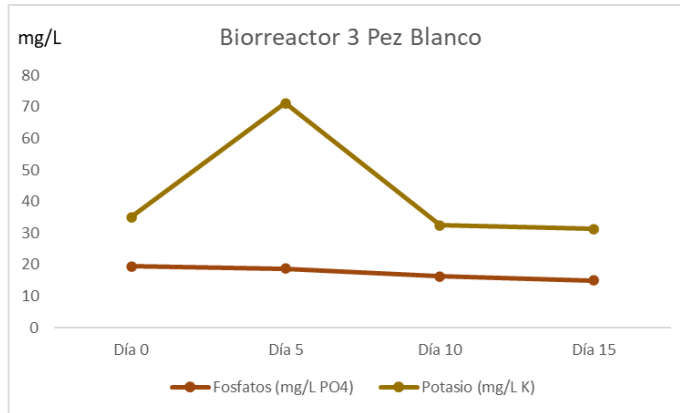


Figura 6.7.1  
 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 1 de Policultivo. 11ml/L sedimento inicial

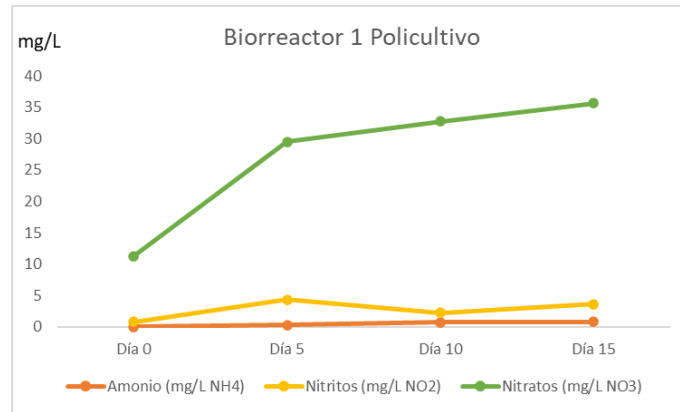


Figura 6.7.2  
 Concentración de fosfatos y potasio en biorreactor 1 de Policultivo. 11ml/L sedimento inicial

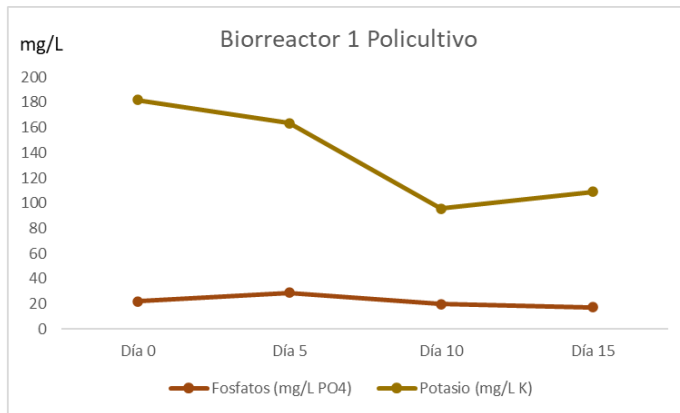


Figura 6.8.1  
 Concentración de compuestos nitrogenados en biorreactor 2 de Policultivo. 39ml/L sedimento inicial

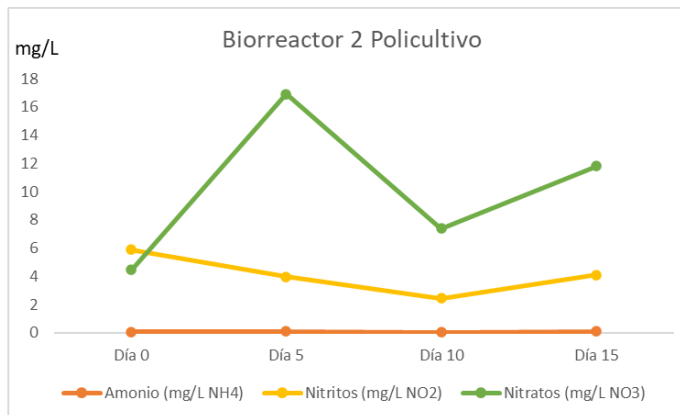


Figura 6.8.2  
 Concentración de  
 fosfatos y potasio  
 en biorreactor 2  
 de Policultivo.  
 39ml/L  
 sedimento inicial

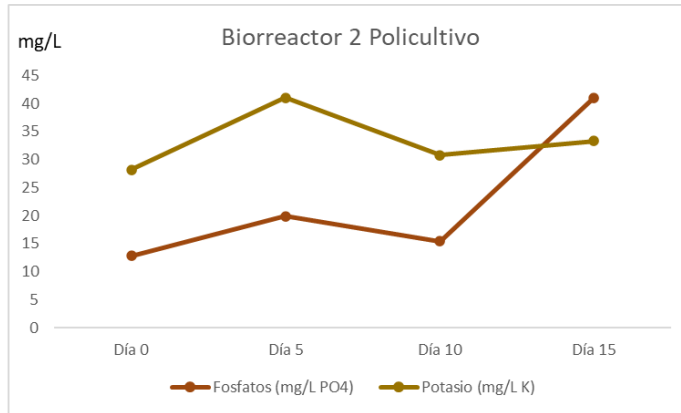


Figura 6.9.1  
 Concentración de  
 compuestos  
 nitrogenados en  
 biorreactor 3 de  
 Policultivo.  
 25ml/L  
 sedimento inicial

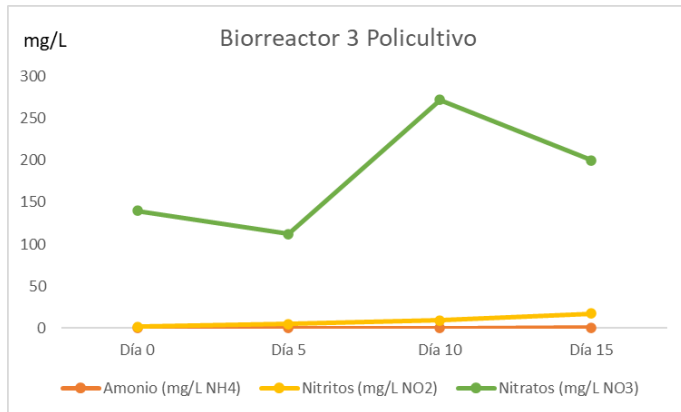


Figura 6.9.2  
 Concentración de  
 fosfatos y potasio  
 en biorreactor 3  
 de Policultivo.  
 25ml/L  
 sedimento inicial

