



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE**

**“Caracterización de los efluentes de dos
sistemas de producción de tilapia y el posible
uso de plantas como agentes de
biorremediación”**



Licenciada en Acuicultura
Kathya Iturbide Dormon

Asesorada por
Maestro en Ciencias Luis Francisco Franco Cabrera

Guatemala, octubre 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

“Caracterización de los efluentes de dos sistemas de producción de tilapia y el posible uso de plantas como agentes de biorremediación”

TESIS

PRESENTADA AL COMITÉ DE LA MAESTRÍA EN CIENCIA
Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE

POR

LICDA. EN ACUICULTURA
KATHYA ITURBIDE DORMON

ASESORADA POR

M.Sc. LUIS FRANCISCO FRANCO CABRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE

GUATEMALA, OCTUBRE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

HONORABLE JUNTA DIRECTIVA

Decano: Ing. Murphy Olympo Pais Recinos
Secretaria: Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas
Vocal I: Inga. Glenda Patricia García Soria
Vocal II: Inga. Alba Martiza Guerrero Spinola
Vocal III: Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
Vocal IV: Br. Milton De León Bran
Vocal V: Br. Isaac Sultán Mejía

JURADO EXAMINADOR QUE PRACTICÓ
EL EXAMEN PRIVADO DE TESIS

Decano: Ing. Murphy Olympo Pais Recinos
Secretaria: Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas
Examinador: Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Examinador: Ing. César Augusto Akú Castillo
Examinador: Ing. Mario Francisco Rousselin Sandoval

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de tesis titulado

“Caracterización de los efluentes de dos sistemas de producción de tilapia y el posible uso de plantas como agentes de biorremediación”

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios
Postgrado en Febrero 2008


LICDA. KATHYA ITURBIDE DORMON



Guatemala, 10 de Octubre, 2008.

M Sc Ing. Carlos Pérez
Director
Escuela de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Estimado M Sc Pérez:

Reciba un cordial saludo deseando éxitos en sus labores cotidianas.

Para su información y efectos consiguientes, informo a usted que he revisado y aprobado en el Informe Final de Tesis para el grado de Master en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente titulado **"CARACTERIZACION DE LOS EFLUENTES DE DOS SISTEMAS DE PRODUCCION DE TILAPIA Y EL POSIBLE USO DE PLANTAS COMO AGENTES DE BIORREMEDIACION"** realizado por la Licenciada en Acuicultura Kathy Iturbide Dormon el cual a mi criterio cumple con lo establecido en la elaboración de trabajos de tesis requeridos por la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Y para que así conste firmo la presente en papel membretado de la institución que represento,

Deferentemente,


M Sc Luis Francisco Franco
Asesor de Tesis

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
de Postgrado

Como Coordinador de la Maestría en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente, y revisor del trabajo de tesis titulado **CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES DE DOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA Y EL POSIBLE USO DE PLANTAS COMO AGENTES DE BIORREMEDIACIÓN** presentado por la Licenciada en Acuicultura **kathya Iturbide Dormon**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. César Augusto Akú
Escuela de Estudios de Postgrado
César Akú Castillo
INGENIERO INDUSTRIAL
COLEGIADO 4,073

Guatemala, Octubre de 2008.

/zC.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
de Postgrado

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del trabajo de tesis titulado **CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES DE DOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA Y EL POSIBLE USO DE PLANTAS COMO AGENTES DE BIORREMEDIACIÓN** presentado por la Licenciada en Acuicultura **kathya Iturbide Dormon** apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Carlos Humberto Pérez Rodríguez'.



Msc. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Director
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, Octubre de 2008.

/zc.



Como Revisor de la Maestría en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente del trabajo de tesis titulado **CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES DE DOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA Y EL POSIBLE USO DE PLANTAS COMO AGENTES DE BIORREMEDIACIÓN** presentado por la Licenciada en Acuicultura **kathya Iturbide Dormon**, apruebo el presente trabajo de tesis y recomiendo la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Carlos Humberto Pérez Rodríguez', written over a vertical line.



Msc. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Director
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, Octubre de 2008.

/zc.



Ref. D. Postgrado 034.2008

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al trabajo de tesis de la Maestría en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente titulado: **CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES DE DOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA Y EL POSIBLE USO DE PLANTAS COMO AGENTES DE BIORREMEDIACIÓN**, presentado por la Licenciada en Acuicultura **Kathya Iturbide Dormon** la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, which appears to be "Murphy Olympo Paiz Recinos".

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, Octubre de 2008

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IV
GLOSARIO.....	V
RESUMEN.....	VI
OBJETIVOS.....	VII
HIPÓTESIS.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	IX
1. Impacto ambiental de la acuicultura.....	1
1.1. Sistemas de producción en acuicultura y el ambiente.....	5
1.2. Sistemas de tratamiento de efluentes de la acuicultura.....	9
1.2.1. Sedimentación del efluente.....	9
1.2.2. Filtración por moluscos.....	10
1.2.3. Filtración por plantas acuáticas.....	11
1.2.4. Sistemas de varias fases.....	13
2. Acuaponia en sistemas de circulación cerrados.....	14
2.1. Principios de la acuaponia.....	15
2.2. Elementos claves y consideraciones en acuaponia.....	16
2.2.1. Selección de las plantas.....	16
2.2.2. Selección de las especies de peces.....	16
2.2.3. Características de la calidad de agua.....	17
2.2.4. Biofiltración y sólidos suspendidos.....	17
2.2.5. Proporción.....	17
2.3. Algunas experiencias de cultivos acuapónicos.....	18
METODOLOGÍA.....	20
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	23

CONCLUSIONES.....37
RECOMENDACIONES.....38
BIBLIOGRAFÍA..... 39
ANEXO.....44

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

TABLAS

I	Actividades de la acuicultura que producen impactos y principales factores que pueden verse impactados	2
II	Descripción de los sistemas productivos de tilapia evaluados	25
III	Nomina de familias y géneros representativos de hidrófitas	28

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
OD	Concentración de oxígeno disuelto
SST	Concentración de sólidos en suspensión
DBO ₅	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
BMP	Buenas practicas de manejo
Kg	kilogramo
mg L ⁻¹	Miligramo por litro
\$	Dólar americano
%	Porcentaje
Ha	Hectárea
pH	Concentración de iones de hidrógeno
t	Tonelada
NT	Nitrógeno total
PT	Fósforo total
NH ⁴	Amonio
NH ³	Amoniacó
NO ²	Nitrito
NO ³	Nitrato
g	gramo
m ⁻³	Metro cúbico

GLOSARIO

Acuacultura	La acuacultura es el desarrollo de especies acuáticas en medios naturales y artificiales manejados por el hombre con la finalidad de sustento o comercial.
Acuaponia	Nombre que se da a la integración de la acuicultura y la hidroponía.
Aerénquima	Facilita la aireación de órganos que se encuentran en ambientes acuáticos o suelos anegados.
Algas	Diversos organismos fotosintetizadores de organización sencilla que viven en el agua o en ambientes muy húmedos. Técnicamente, las algas son los organismos autótrofos que realizan la fotosíntesis oxigénica.
Alóctono	Se refiere a los individuos que se originan en un lugar distinto al que se encuentran en un momento determinado y que se han desplazado por causas naturales o antropológicas. Sinónimo de exótico.
Anóxico	En ausencia de oxígeno.
Biofiltración	Transformación de la materia orgánica presente en las aguas residuales es llevada a cabo por poblaciones bacterianas que se adhieren al soporte granulado y lo colonizan.
Biorremediación	Uso de diversos microorganismos para afrontar problemas de tratamiento y control de la contaminación química de distintos ecosistemas.
Cosmopolita	Universal. Que es común a todos o a la mayoría de lugares.

Dureza	Se denomina dureza del agua a la concentración de compuestos minerales, en particular sales de magnesio y calcio.
Efluente	La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua. Este es el agua producto dada por el sistema.
Endémico	Especie o taxón biológico que se halla exclusivamente en determinado bioma.
Epífita	Que vive sobre otra planta sin alimentarse a expensas de ésta, como los musgos y líquenes.
Estolón	Rama rastrera que nace de la base del tallo de algunas plantas y echa raíces que producen nuevas plantas.
Eutrofización	En ecología designa el enriquecimiento en nutrientes de un ecosistema. El uso más extendido se refiere específicamente al aporte más o menos masivo de nutrientes inorgánicos en un ecosistema acuático.
Factor de Conversión Alimenticia	Relación entre el alimento suministrado y la ganancia de peso de un individuo (incremento de biomasa).
Fitoplancton	Plancton constituido predominantemente por algas y otros organismos vegetales.
Foliar	De las hojas de las plantas o relativo a ellas.
Hidrófita	Planta que crece en suelos encharcados o muy húmedos o que requieren gran humedad.
Hidroponia	Cultivo de plantas en ausencia de tierra, con absorción de los nutrientes de soluciones acuosas que circulan en un soporte de arena o gravilla.
Palustre	Relativo a la laguna o al pantano.

Parénquima	Asociado a los tejidos de conducción sirve tanto para el almacenamiento de sustancias de reserva como para el transporte.
Perifiton	Comunidad de microorganismos acuáticos que se adhieren a plantas enraizadas, objetos sumergidos anexados o a sustratos sólidos sumergidos.
Plancton	Conjunto de seres microscópicos de origen animal (zooplancton) o vegetal (fitoplancton) presentes en aguas marinas y de lagos, que constituyen el alimento básico de diversos animales superiores.
Policultivo	Sistema basado en el cultivo simultáneo de diversas especies en una misma superficie.
Radicular	De la raíz o relativo a ella.
Sistema abierto	Sistema caracterizado por recibir un constante flujo de agua en la entrada cuya tasa de recambio puede ser el 50% o más del total de volumen por hora y en donde comúnmente el fitoplancton no juega un rol alimenticio ni ecológico importante.
Sistema semi abierto	Sistema productivo que posee un flujo de agua en bajos volúmenes constantes o bien recibe un porcentaje de recambio de agua diario según la disponibilidad de agua en el sistema integral y en donde es común que la productividad primaria juegue un papel alimenticio y ecológico importante.

RESUMEN

La piscicultura al igual que otras actividades de producción animal genera residuos sólidos y líquidos contenidos en las aguas de descarga de los sistemas productivos, también llamados “efluentes“, siendo éstos comúnmente retornados medio natural sin previo tratamiento. Este trabajo de investigación compara la composición físico química de los efluentes entre dos sistemas de producción de tilapia localizados en la Costa Sur del Guatemala. Los sistemas productivos evaluados fueron sistema abierto y sistema semi abierto, ambos con diferencias en la tasa de recambio, el caudal de entrada y el periodo de residencia de agua dentro del sistema. Igualmente se enfatiza el uso de flora acuática autóctona para el establecimiento de cultivos acuapónicos como una alternativa de biorremediación de dichos efluentes.

Los resultados indicaron que existe diferencia significativa en la composición fisicoquímica de los efluentes entre sistemas de producción, específicamente para las variables: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total (NT), Fósforo Total (PT), Color, Nitritos (NO_2), Amonio (NH_4) y Sólidos Sedimentables. Igualmente, aunque no estadísticamente comprobado, existe diferencia entre puntos de muestreo entre sistemas. A excepción del agua de entrada, el agua residente en el sistema y el agua de descarga son diferentes entre sistemas de producción. La alta tasa de recambio y el bajo periodo de residencia del agua dentro del sistema abierto hace que el grado de riesgo de contaminación ambiental por metabolitos en sus efluentes sea mínimo ó nulo, mientras que el agua en el sistemas semi

abiertos puede llegar a ser altamente contaminante al cultivo y al medio natural receptor de las aguas utilizadas, de no operarse correctamente los recambios de agua y la remoción de sedimentos y aumentando el tiempo de residencia del agua, especialmente por la descarga de material orgánico en suspensión, donde las concentraciones de nitrógeno, fósforo así como por la demanda biológica de oxígeno pueden alterar dramáticamente la dinámica del sistema.

Los efluentes de sistemas semi abiertos presentan gran oportunidad para el establecimiento de cultivos acuapónicos como una alternativa de tratamiento de bajo costo y gran efectividad en la reducción de nutrientes emitidos por la acuicultura. En Guatemala existe una gran diversidad de especies de plantas acuáticas autóctonas subutilizadas en el ámbito nacional que podrían ser ampliamente utilizadas en el tratamiento de efluentes de sistemas semi abiertos dedicados a la producción de tilapia bajo sistemas de integración de componentes. Para la selección de estas especies debe conocerse el sistema radicular, como captador de sedimentos en suspensión, la filotaxia de la hojas en el tallo como agentes fotosintéticos y los usos alternativos de las plantas como ornamentales, comestibles o bien solamente como agentes de biorremediación.

Dentro de los géneros principales de los distintos grupos de plantas se encuentran: Hidrófitas Emergentes o palustres: *Scirpus*, *Juncus*, *Typha*, *Paspalum*, *Panicum*, Hidrófitas Flotantes: *Pistia*, *Azolla*, *Limnobium*, *Lemna*, *Wolffia*, *Spirodella*, *Eicchornia* y *Salvinia*.

OBJETIVOS

GENERAL

Conocer é interpretar sobre la composición fisicoquímica de los efluentes de dos distintos sistemas de producción de tilapia localizados en la Costa Sur del país y el posible uso de plantas (algas o plantas superiores) endémicas como agentes de biorremediación.

ESPECÍFICOS

1. Caracterizar los efluentes de dos sistemas de producción comercial de Tilapia.
2. Analizar físico químicamente los efluentes para un futuro establecimiento de cultivos de plantas acuáticas como agentes biorremediadores.
3. Interrelacionar algunos parámetros de calidad de agua asociados con la calidad de los efluentes de cada sistema evaluado.
4. Priorizar nutrientes presentes en los efluentes como potenciales de uso en los sistemas acuapónicos en los sistemas de producción de tilapia evaluados.
5. Efectuar una revisión bibliográfica extensa sobre experiencias del uso de especies de plantas acuáticas en la biorremediación de efluentes de la acuicultura.
6. Identificar especies de flora acuática autóctona con potencial acuapónico a ser utilizadas en la biorremediación de efluentes de la producción comercial de tilapia.

HIPÓTESIS

Existe diferencia significativa en la composición fisicoquímica de los efluentes de un sistema de producción de tilapia semiabierto y un sistema de producción de tilapia abierto.

INTRODUCCIÓN

El uso del agua en diversas industrias es común, al igual que el escaso tratamiento brindado a dicho recurso previa su devolución al medio receptor. El inadecuado manejo de las cuencas hidrológicas contribuye a la degradación de fuentes de agua superficial y subterránea, al igual que la falta de ordenación territorial, la privatización y falta de regulación sobre el uso del agua.

La acuicultura siendo una actividad altamente dependiente del agua puede también contribuir a la degradación de dicho recurso; con el empleo de inadecuadas técnicas de cultivo, el inapropiado diseño de las instalaciones y la falta de aplicación de sistemas de tratamiento a las aguas residuales.

Es obvio que con el aumento de la producción piscícola, la actividad cambió, dejando de ser estrictamente aquella piscicultura familiar para convertirse en una industria generadora de mayor lucro e impactos ambientales.

La producción de peces, como cualquier otra producción de organismos vivos, trae consigo algunos impactos al medio ambiente que incluyen desde liberación de excretas, restos de alimento y medicamentos, hasta “contaminantes genéticos” como es el caso de trabajar con algunas especies exóticas. Comúnmente el suministro de alimento es el principal causante de deterioro de la calidad del agua. El aporte de nutrientes en los estanques no es del todo aprovechado y en el momento de la limpieza de fondos o la cosecha, agua con gran cantidad de materia orgánica es vertida a los ríos o cuerpos de agua naturales.

En sistemas de producción piscícola en estanques, solamente el 30% de los nutrientes suministrados son convertidos en producto, el resto es acumulado en los sedimentos o es liberado en el efluente que generalmente conduce hacia fuentes de agua superficial.

En unidades de producción acuícola con limitada renovación de agua, los nutrientes se concentran hasta alcanzar valores similares a soluciones hidropónicas. El nitrógeno y el fósforo como elementos comúnmente limitantes en sistemas acuáticos naturales suelen ser incorporados al medio y contribuyen a la eutrofización de cuerpos de agua a través de la descarga de aguas residuales que provienen de sistemas acuícolas. Sin embargo, en medios oligotróficos puede promoverse un impacto positivo, incrementando la productividad del mismo.

De acuerdo con Schmittou (1995), la degradación ambiental causada por los efluentes de la acuicultura, es hoy en día uno de los aspectos de mayor atención. Estudios en producciones de camarón indican que el efluente del día de cosecha final es el que más contribuye con el deterioro progresivo de la calidad de los cuerpos hídricos receptores. Piedrahita (2003) asevera que el efluente de la acuicultura puede contener una variedad de constituyentes que podrían causar impactos negativos al medio ambiente cuando son liberados. De acuerdo con Viadero y col., (2005) el incremento en la producción de efluentes con parámetros superiores a los máximos permitidos, está directamente relacionado con las mayores biomásas de cultivo. Sin embargo, mediante un adecuado tratamiento del efluente, puede incrementarse la producción cumpliendo con estándares de legislación ambiental.

En la actualidad la piscicultura de tilapia representa una de las actividades de producción animal de mayor crecimiento en Guatemala; este auge se ha proyectado hacia distintas regiones y aprovechando diversas fuentes de agua; ríos y nacimientos suelen ser utilizados por su abundancia y el bajo costo de su aprovechamiento (el costo del agua es nulo en el caso de estas fuentes de captación).

El uso de vegetación acuática (“hidrófitas”) en combinación con sistemas de producción acuícola, hoy llamada “acuaponia”, puede ser una alternativa de gran utilidad en la reducción de emisiones por la acuicultura, principalmente nutrientes y partículas sólidas en suspensión. Adicionalmente, puede representar una cosecha secundaria mediante la implementación de sistemas integrados, sobresaliendo el alto rendimiento de las hidrófitas en respuesta a la presencia de elevadas concentraciones de nutrientes generados por la descomposición microbiana generada en los efluentes de la acuicultura.

Otra razón sobre el uso de hidrófitas, podría ser la indisponibilidad de alimentos no convencionales y el aumento en los costos de alimentos balanceados para peces y crustáceos; existe una gran diversidad y abundancia de plantas acuáticas que habitan naturalmente en sistemas continentales, comúnmente subvaloradas y por tanto subaprovechadas, con interesantes cualidades nutricionales y sumamente fáciles de propagar.

Este estudio se realizó con la finalidad de caracterizar y comparar los efluentes de dos sistemas de producción comercial de tilapia, analizarlos físico químicamente e identificar especies de flora acuática endémica subvalorada en el ámbito local y con potencial acuapónico para ser utilizadas en el futuro en la biorremediación de efluentes de la piscicultura intensiva de tilapia.

El área de estudio incluyó a dos fincas productoras de tilapia localizadas en la zona Sur del país, ambas dedicadas al cultivo intensivo de tilapia y dependientes de fuentes de agua superficial suministrada al sistema por gravedad, con diferencias establecidas principalmente por el caudal de entrada, la tasa de recambio y el periodo de residencia del agua en las unidades de cultivo. La primer finca conocida como “*sistema semi abierto*”, trabaja con un flujo continuo pero limitado de agua y con un caudal de entrada equivalente a 1.3 litros por segundo que permite realizar un máximo de dos recambios diarios totales en su estanquería, mientras que el segundo sistema o “*sistema abierto*”, con un caudal de entrada equivalente a 19 litros por segundo, presenta una tasa de recambio superior por quince veces al primer sistema en mención.

Los resultados de tres muestreos realizados en cada sistema, dieron a conocer las características de los efluentes generados por la piscicultura intensiva de tilapia. El sistema *semi abierto* en contraste con el *sistema abierto* tiene la capacidad de emitir elevadas concentraciones de compuestos nitrogenados (principalmente amonio y nitritos) y partículas en suspensión al entorno natural, mientras que en el *sistema abierto*, la calidad de agua no presenta cambios significativos tras su empleo y paso a través del sistema productivo.

Algunas de las variables del sistema *semi abierto*; principalmente nitritos y amonio, alcanzan valores cercanos o superiores a los límites recomendados y pueden afectar el desarrollo del cultivo; principalmente sobre parámetros productivos como la tasa de crecimiento, el factor de conversión alimenticia y la sobrevivencia final.

Los resultados señalan la necesidad de incorporar la variable correspondiente al tiempo de residencia de agua en el sistema, dentro del

cálculo de la capacidad de carga, considerando el potencial de limpieza y dilución del agua para conservar un medio más saludable para el cultivo.

Es necesario considerar que tanto el diseño como la operatividad del sistema de drenaje conjuntamente con la acción centrífuga del agua al ingresar al sistema, influyen sobre la remoción de materia orgánica, en especial al tratarse de unidades circulares.

En lo que respecta a la identificación de especies de flora acuática endémica con potencial acuapónico, existe una amplia diversidad de especies abundantes en el trópico con la cualidad de aprovechar los nutrientes en disolución y prueba de ello es su abundancia en sistemas eutróficos. Algunas de los géneros que merecen ser mencionados pertenecen a la familia Lemnaceae (lenteja de agua *Lemna*, *Wolffia* y *Spirodella*), Pontederiaceae (Ninfa de agua *Eichhornia crassipes*), Cyperaceae (Tul *Typha* sp., *Scirpus* sp.). Algunas experiencias expresan el éxito de la integración de algunas de estas especies al cultivo de la tilapia como fuente alimenticia natural y para el tratamiento de los efluentes de actividades de producción animal como la acuicultura.

MARCO TEÓRICO

1. IMPACTO AMBIENTAL DE LA ACUICULTURA

La acuicultura, piscicultura o cultivo de peces artificialmente, consiste en el engorde rápido de los mismos, con alimentos artificiales y con una densidad normalmente alta de población. Como resultado de este incremento en la alimentación, aumenta la actividad metabólica de los peces, aumentando entonces los niveles de residuos orgánicos y componentes tóxicos. Algas, bacterias y otros microorganismos comienzan a crecer y como resultado el ecosistema natural no puede ser mantenido; de hecho, el balance natural se altera y los residuos orgánicos alcanzan niveles tóxicos (como el amoníaco y los nitritos); favoreciendo el desarrollo de algas microscópicas verde azules, no beneficiosas para el entorno acuático.

El impacto medioambiental de una piscifactoría depende en gran medida de la especie, el método de cultivo, la densidad del stock, el tipo de alimentación y las condiciones hidrográficas. En la Tabla I se pueden observar algunos de los impactos más importantes que puede producir.

Los desechos, tanto orgánicos como inorgánicos, de las piscifactorías pueden causar un enriquecimiento en nutrientes e incluso eutrofización en el caso de que las zonas destinadas al cultivo sean zonas semi confinadas. Cerca de un 85% del fósforo, un 80-88% del carbono y un 52-95% del nitrógeno introducido al medio acuático, proviene de residuos alimenticios y del metabolismo de los peces (excreción y respiración) en cultivo.

Tabla I Actividades de la acuicultura que producen impactos y principales factores que pueden verse impactados. (○): impacto notable; (●): impacto moderado; (—): no hay relación.

Impactos	Actividades de la acuicultura									
	Especies	Alimento	Productos químicos	Pesticidas	Hormonas	Heces	Lugares	Especies alóctonas	Pozos	Productos <i>anti-fouling</i>
Enriquecimiento	—	●	—	—	—	●	—	—	—	—
Cadenas tróficas	●	●	○	○	—	●	—	○	—	○
Consumo de oxígeno	●	●	—	—	—	●	—	○	—	—
Biodiversidad	—	●	●	●	○	○	—	●	—	○
<i>Fouling</i>	—	—	—	—	—	—	●	—	—	●
Cambios bentos	—	○	●	○	—	○	—	○	—	○
Resistencia antibióticos	—	—	●	—	—	—	—	—	—	—
Salinización acuíferos	—	—	—	—	—	—	●	—	●	—
Acidificación suelos	—	○	—	—	—	●	●	—	—	—
Subsidencia de tierras	—	—	—	—	—	—	●	—	●	—
Afección vida salvaje	—	—	—	—	—	—	○	—	—	—
Salinización suelos	—	—	—	—	—	—	●	—	○	—
Cambios de sustrato	—	●	—	—	—	●	—	—	—	—
Especies no deseables	—	●	—	—	—	●	—	—	—	○
Eutrofia	—	●	—	—	—	●	—	—	—	—
Toxicidad de especies marinas	—	—	—	—	—	—	—	—	—	●

FUENTE: Bol.Ins. Esp. Oceanogr. 18(1-4), 2002:41-49

En sistemas de producción en jaulas se ha demostrado que en ciertas ocasiones se puede detectar un impacto significativo en un radio de un kilómetro alrededor de las jaulas de cultivo, siendo éste generalmente mayor en el fondo, donde se puede observar, entre otros efectos, incremento en la demanda de oxígeno, producción de sedimentos anóxicos y de gases tóxicos, cambios en las comunidades, disminución de la diversidad del bentos, alteraciones en la biodiversidad, desarrollo de especies resistentes a la contaminación que pueden resultar dañinas para las especies cultivadas y blooms de fitoplancton (Soto y Norambuena, 2004).

Dentro de los principales indicadores de impactos ambientales de la acuicultura, se encuentran:

- Cantidad de suelo usado
- Cantidad de energía usada

- Fracción animal complementaria
- Cantidad de químicos utilizados
- Cantidad de agua descargada
- Demanda bioquímica de oxígeno en efluentes
- Proteína de alimentación suplementaria usada
- Nitrógeno de amoníaco total en efluentes
- Cultivo de especies introducidas (no nativas)

Otro problema que se plantea en ciertas regiones es la introducción de especies alóctonas para su cultivo, lo que se traduce en un empobrecimiento de la biodiversidad del ecosistema natural debido a la competencia e hibridación y alteraciones en las cadenas tróficas.

El uso indiscriminado de fármacos (antibióticos para controlar o prevenir enfermedades de los peces y hormonas para el crecimiento) ha dado como resultado cambios cualitativos y cuantitativos en la flora microbiana, efectos tóxicos en los organismos salvajes, alteraciones en la biodiversidad, incidencia en las cadenas tróficas, desarrollo de defensas antibacterianas en patógenos de los peces y transferencia de resistencia antibacteriana a patógenos humanos.

Otro tipo de agentes químicos, como los pesticidas o los antiincrustantes, son también contaminantes para el medio acuático y pueden alterar gravemente el ecosistema al resultar tóxicos para la vida marina y la especie cultivada, lo cual, a través de su consumo, puede convertirse en un peligro para la salud humana. Además, hay que añadir a todo ello la carga orgánica debido a la limpieza periódica de las incrustaciones orgánicas de las jaulas.

El propio lugar donde se realice la actividad puede provocar alteraciones. Por ejemplo, en la ubicación en tierra se puede dar salinización de suelos o acuíferos, acidificación de suelos, cambios en la vida salvaje, etcétera.

Para que alguno de esos efectos u otros impactos no deseados pueda llegar a desarrollarse hace que sea preciso establecer una metodología que trate de minimizar dichos impactos para proteger el medio y garantizar la sostenibilidad de la actividad.

Por ejemplo, al alimentar a los salmones en cultivo, alrededor de un 75% de nitrógeno, fósforo y carbono ingresado al sistema por medio del alimento, se pierde como alimento no capturado, heces y otros productos de excreción. Solo un 25% se recupera al cosechar los peces (Folke y Kautky 1989, Buschmann y col., 1996). De estos elementos, el fósforo se acumula principalmente en los sedimentos que se encuentran bajo las jaulas, por lo que se utiliza como indicador de contaminación (Soto y Norambuena, 2004). Estos autores concluyeron que el depósito de materia orgánica en los sedimentos bajo las jaulas produce un efecto significativamente negativo sobre la biodiversidad.

Otro de los elementos liberados al medio es el nitrógeno, que a diferencia del fósforo, permanece en mayor proporción disuelto en la columna de agua. Se ha demostrado que el aumento de las concentraciones de amonio (compuesto nitrogenado producto de la excreción de los peces) en las proximidades de las jaulas se traduce en un mayor crecimiento de microalgas (Troell y col., 1997).

En consecuencia, los antecedentes indican que la incorporación de nutrientes al medio y la producción del fenómeno de eutrofización causan cambios en la diversidad; desequilibrio de las relaciones tróficas en el medio por pérdida del control que ejercen los organismos consumidores; incremento en la

intensidad y frecuencia de floraciones algales; y interrupciones de funciones ecosistémicas (Lotze y col., 1999).

De esta manera es necesario incorporar una visión ecosistémica donde se internalicen los impactos ambientales, estimulando un mayor control que minimice, por tanto, sus efectos. Ello debe incentivar la incorporación de tecnologías limpias, disminuyendo los costos productivos por concepto de la incorporación del “factor ambiental” a la ecuación de desarrollo. De esta forma es posible reducir incluso los costos ambientales al mejorar en forma real la tecnología y las estrategias productivas (Buschmann y col., 1996). Debemos comprender que solo si los aspectos ambientales se internalizan en el modelo de desarrollo económico y se contemplan en el diseño de producción, se podrá empezar a pensar que es posible alcanzar un desarrollo sostenible o algo que se acerque a este concepto.

El desafío de la acuicultura está en obtener los beneficios económicos y sociales sin degradación del ambiente, siendo necesarios estudios científicos que permitan demostrar, que ésta es una alternativa de producción con grandes posibilidades de serla en forma sostenible.

Un extenso estudio realizado sobre los diferentes sistemas de producción de carpas en el mundo mostró que hasta los sistemas considerados “limpios” como el extensivo, semiintensivo y los policultivos causan impacto (Kestemont 1995).

1.1. SISTEMAS DE PRODUCCION EN ACUICULTURA Y EL AMBIENTE

La tecnología de la piscicultura presenta diversos métodos y técnicas conocidas como “Sistemas de Producción”, con niveles diferentes de inversión, costo de producción y beneficios. Estos sistemas también pueden ser clasificados de acuerdo con su capacidad generadora de impacto. Iniciando con

los sistemas conocidos como ecológicos, hasta los superintensivos, con elevado potencial contaminante.

Para la producción de carpas en Europa, Kestemont (1995) presenta una evaluación de cada sistema y su poder degradador, concluyendo que cada sistema tiene condiciones ideales, pero que todos generan problemas ambientales, aunque, menores que otras actividades de producción animal (incluyendo otros peces como el salmón y la trucha) y agrícola.

Los sistemas de producción más simples, como el extensivo, semi-intensivo y el integrado con otras actividades agropecuarias, aunque son considerados como poco o nada contaminantes, generan problemas en el momento de la cosecha, lanzando lodos al medio ambiente con alta cantidad de excretas, alimento no consumido, nutrientes y hasta químicos usados en la producción.

También existen los impactos físicos al medio ambiente por la modificación de los cursos de agua y cambios en su temperatura. Otros problemas son de orden sanitario, donde la alta humedad atrae mosquitos y enfermedades a los humanos como la malaria, dengue y otras enfermedades. Otros impactos son de tipo genético, es el caso del cultivo de peces exóticos que generan "contaminación genética".

En la piscicultura integrada a otros sistemas de producción animal y vegetal, generalmente los efectos son positivos pues el sistema utiliza desechos que de otra forma irían directamente al medio ambiente. El medio acuático es capaz de procesar una determinada cantidad de materia orgánica sin deteriorarse; es también importante considerar el contenido de la materia orgánica del lodo despreciado en la cosecha. La presencia de metales pesados

se acumula en los organismos acuáticos y finalmente van a parar al organismo humano. También deben ser considerados los riesgos a la salud pública por la proliferación de bacterias del tipo coliformes fecales, Salmonella, entre otras, provenientes de los residuos y que son integrados al sistema de producción.

Uno de los mayores problemas de la producción acuícola es el aumento de materia orgánica producida por las excreciones de los peces y por el alimento no consumido u otros insumos adicionados en los estanques de cultivo.

El agua que sale del estanque (efluente) va hacia una fuente natural, generando variaciones como disminución en la concentración de oxígeno (OD), aumento en la concentración de sólidos en suspensión (SST), aumento en la demanda biológica de oxígeno (DBO), aumento en la demanda química de oxígeno (DQO), formas de nitrógeno y fósforo, crecimiento exagerado de algas, eutrofización, entre otras.

A pesar de existir interés en el tratamiento de los efluentes desde la década del 70, hubo un estancamiento en las investigaciones al respecto y solamente a partir del final de los 80 y comienzo de los 90 se reinician basados en el sentido común de aprovechar el residuo, más que descargarlo y diluirlo.

Dos métodos pueden ser utilizados para disminuir el impacto ambiental causado por los efluentes, en donde el primero de ellos es una disminución de la cantidad de efluentes. Boyd (1997) recomienda la aplicación de mejores prácticas de manejo como una vía para mejorar la calidad y reducir el volumen.

Las prácticas de manejo son el medio más efectivo para reducir la polución y otros impactos ambientales especialmente en la calidad del agua.

Son frecuentemente denominadas como Mejores Prácticas de Manejo ó Buenas Prácticas de Manejo (BPM).

Algunas BPM para prevenir la polución del agua son: No usar tasas de siembra ni de alimentación superiores a la capacidad de carga del efluente; usar prácticas de alimentación conservadoras evitando la sobreoferta; fertilizar solamente lo necesario para promover el fitoplancton; reducir el recambio de agua tanto como sea posible; cosechar sin drenar el estanque y pasar el efluente por un tanque de sedimentación antes de la descarga final.

Los estudios demuestran que reduciendo la cantidad de recambio de agua se reduce también la DBO, los sólidos en suspensión y los nutrientes del efluente, mejorando su calidad. Un estudio efectuado por Seok y col. (1995) demostró que el efluente producido en un año de cultivo era de la misma calidad que el producido en tres años, debido a la reasimilación de nutrientes, creando así la posibilidad de desocupar el estanque completamente cada tres años. Otra posibilidad para disminuir la cantidad de efluente es el mejoramiento de las dietas artificiales ofrecidas a los peces de cultivo, fabricándolas con fuentes de nitrógeno y fósforo de alta digestibilidad. Recientes investigaciones proponen la adición de aglutinantes en la dieta que no afectan la eficiencia alimenticia y que a cambio permiten la producción de heces más compactas facilitando el tratamiento de efluente.

El segundo método consiste en mejorar la calidad del efluente antes de ser vertido al medio. Las técnicas utilizadas van desde la sedimentación, remoción de sólidos hasta la filtración del efluente a través de mangles artificiales, plantas, algas, moluscos, éstos últimos métodos conocidos como biotransformación.

Según Troell y col. (2005) los métodos integrales de biotransformación, además de traer beneficios ecológicos y sociales, permiten producciones adicionales de carne sin otros costos de insumos.

Un dato importante para la toma de decisión es que la descarga de un estanque durante la cosecha, es principalmente contaminante al final del volumen del efluente (20 a 5%), cuando lleva las mayores cantidades de nutrientes y sólidos en suspensión y así pueden diseñarse prácticas de manejo que permitan tratar los efluentes en forma más económica.

1.2. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA ACUICULTURA

Recientemente Gautier y col. (2004), presentaron dos metodologías para reducir el efluente; la primera, concordando con Teichert-Coddington y col. (1996), es su sedimentación y la segunda es el aprovechamiento biológico a través de la producción de moluscos, algas, perifiton y humedales artificiales con plantas acuáticas emergentes.

1.2.1. Sedimentación del efluente

Los estanques de sedimentación deben retener el agua por un tiempo suficiente para la sedimentación de sólidos. El gran volumen y la gran cantidad de descarga de un estanque al momento de la cosecha tornan esta solución un tanto impracticable. La eficiencia puede ser incrementada si se descarga solamente la porción final del efluente dentro del estanque de sedimentación. Esto es porque los nutrientes y sólidos se concentran en la última porción, 5-20%, del volumen de descarga del estanque.

Nuevas técnicas fueron desarrolladas por Texas Natural Resource Conservation Comisión en 1997, para el manejo de efluentes de la acuicultura. Una de estas prácticas es que el 25% final del efluente del estanque sea dejado 48 horas en sedimentación antes de ser vertido al medio ambiente, siempre y cuando la cantidad de sólidos en suspensión no exceda 30 mg/l. El tiempo de residencia en un estanque de sedimentación afecta directamente el tamaño y número de estanques de sedimentación necesarios para tratar estos efluentes. Teichert-Coddington y col.,(1999) encontraron que la sedimentación es eficiente en la remoción de sólidos en suspensión (cenizas) y no lo es para nitrógeno, por esto, la sedimentación debe ser solamente una parte del tratamiento del efluente. Brinker y Rösch, (2005), estudiando el tamaño de las partículas, concluyeron que deben evitarse situaciones que fragmenten más los sólidos en suspensión, como la exagerada turbulencia de los aireadores.

1.2.2. Filtración por moluscos

Es conocido que los moluscos bivalvos son filtradores muy eficientes, capaces de disminuir en la columna de agua el fitoplancton. Los bivalvos no solamente disminuyen el plancton, sino que también reducen los niveles de nutrientes y la concentración de sólidos suspendidos en la columna de agua.

La mayoría de los trabajos existentes en este sentido son con moluscos de agua salada, como es el caso del sururú de mangle *Mytella guyanensis* y de la ostra nativa *Crassostrea rhizophorae* en la biorremediación de los impactos que los efluentes de la carcinicultura (cultivo de camarones) en el nororiente brasilero causan al ambiente.

Los moluscos son colocados en bandejas dentro del estanque de camarones, cerca de la salida de agua, en una proporción de 9000 semillas por

5 hectáreas de espejo de agua, logrando minimizar la carga de fosfatos, nitritos y nitratos de los efluentes liberados al medio, además de conseguir una producción adicional de moluscos.

Lin y col., (2005) integraron un cultivo intensivo de camarón con el musélido *Perna viridis* y concluyeron que de esta forma pueden producirse alimentos adicionales y mejorar la calidad del efluente de la granja.

Para moluscos de agua dulce existen algunas referencias en Europa y en los lagos de América del Norte (Reeders y col., 1989) con *Dreissenia polymorpha*, presentándola como una excelente filtradora capaz de incrementar la transparencia y disminuir la clorofila después de su introducción.

Un trabajo en la mitigación de la eutrofización en estanques de cultivo de salmón fue realizado en Chile con *Diplodon chilensis* convirtiendo tanques cerrados hiper-eutróficos en tanques oligotróficos. La capacidad filtradora del molusco descendió después de 60 días, necesitándose mayor investigación al respecto. (Soto y col., 1999)

1.2.3. Filtración por plantas acuáticas

De acuerdo con Brix y Schierup (1989) los ecosistemas dominados por macrófitas acuáticas son considerados como los más productivos en el mundo.

Las plantas acuáticas asimilan nutrientes y crean condiciones favorables para la descomposición microbiana de la materia orgánica, por esta razón son conocidas como autodepuradoras de ambientes acuáticos y son utilizadas en el tratamiento de aguas servidas.

Según lo expuesto por Brister (2001) en reuniones de trabajo sobre la producción acuícola orgánica, realizadas en los Estados Unidos (Programa Nacional de Acuicultura Orgánica de los Estados Unidos, USDA/NOP) en 2000, fueron identificados cuatro aspectos claves que permitirán manejar orgánicamente la acuicultura. Siendo estos la salud, la reproducción, la alimentación, y las estructuras físicas y condiciones de vida de las especies. Dentro de estos últimos aspectos, el grupo de trabajo concluyó que los sistemas integrados y acuapónicos (integración de acuicultura y sistemas hidropónicos) entran en el paradigma de producción orgánica a través de la conservación y el reciclaje de nutrientes.

Otro uso de las plantas acuáticas para el tratamiento del efluente es a través de los humedales artificiales. Lin y col. (2005), demostraron que estos sistemas pueden remover entre el 55 al 66% de los sólidos suspendidos, un 37 a 54% de DBO_5 , entre un 64 a 66% del amonio y 83 a 94% del nitrito del efluente producido por un cultivo de camarones.

Posadas reporta que humedales artificiales del 25% del tamaño del estanque y de dos días de retención de agua mejoran significativamente los parámetros de calidad de agua de producción de bagre de canal, reteniendo y asimilando nutrientes disponibles, siendo efectivos en la reducción de agentes contaminantes, incluso dejando el agua en mejores condiciones que la del afluente.

Troell y col., (2003) define la biofiltración de nutrientes por plantas acuáticas, principalmente por algas, como una acuicultura multitrófica integrada.

El uso de algas marinas como organismos extractores de nutrientes ha sido demostrado biológico, técnica y económicamente. En Chile, la integración

de salmón y algas permite reducir el impacto negativo del efluente, los costos de las algas son asumidas por el cultivo de salmón y se produce en un sistema ecológicamente amigable.

1.2.4. Sistemas de varias fases

Considerando la variedad de constituyentes del efluente (sólidos y gases disueltos), Piedrahita (2003) recomienda la aplicación de varias operaciones de tratamiento. Shpigel y col., (1993) propusieron el uso de sistemas trifásicos para mejorar el efluente de cultivo de peces marinos. Con el uso de tanques sedimentadores primero, después de bivalvos *Cassostrea gigas* y/o *Tapes semidecussatus* y finalmente algas marinas *Ulva lactuca* consiguieron una más eficiente utilización del nitrógeno del efluente, a través de la producción adicional de algas marinas y ostras, disminuyéndolo considerablemente.

Chow y col., (2001) demostraron la eficiencia de la alga marina *Gracilaria chilensis* como depuradora del efluente de peces, ostras y erizos de mar. Jones y col., (2001) reprodujeron el anterior sistema en laboratorio y evaluaron su eficiencia para el tratamiento del efluente de cultivo de camarones marinos, reportando significativas mejorías en los parámetros indicadores de calidad de agua en el efluente.

Experimentos con ostras, mostraron que una alta cantidad de sólidos en suspensión genera en ellas problemas patológicos, indicando que debe ser reducida previamente la concentración de sólidos en suspensión a través de la sedimentación.

2. ACUAPONÍA EN SISTEMAS DE CIRCULACIÓN CERRADOS

Acuaponia es el nombre que se da a la integración de la acuicultura y la hidroponía. Rakocy, Messer y col., (2003) indican que la acuaponia es el cultivo de peces y plantas en un sistema de recirculación cerrado. De acuerdo a Diver (2006) esta actividad esta ganando atención como un sistema bio-integrado de producción de alimentos, y que podría realizarse en los sistemas de circulación cerrados de acuicultura.

Messer indica que entre las ventajas de acuaponia se incluye: el prolongado re-uso del agua y la minimización de las descargas; además la integración de los sistemas de producción de peces y plantas permite un ahorro de costos (Adler y col., 2000) con lo que se mejora la rentabilidad de los sistemas de acuicultura.

Rakocy (1999) indica que los avances tecnológicos en los sistemas de recirculación en acuicultura, estimularon el interés en la acuaponia como un medio potencial para incrementar los ingresos mientras se utilizan algunos de los productos de desecho.

Adler y col. (2000) reportan que los tratamientos convencionales de las descargas de la acuicultura, representa un significativo coste adicional; de esta forma la acuaponia se convierte en una alternativa de tratamiento de las descargas de la acuicultura mas económica y rentable.

En acuaponia, los efluentes ricos en nutrientes de los tanques de los peces son usados para fertilizar la producción hidropónica (Diver, 2006). En este sistema, las raíces de las plantas y la rhizobacterias remueven los

nutrientes del agua; estos nutrientes (generados por las heces de los peces, algas y la descomposición de los alimentos) son contaminantes que si no se remueven podrían alcanzar niveles tóxicos para los peces, pero dentro de un sistema acuapónico, sirve como fertilizante líquido para el crecimiento hidropónico de las plantas. A su vez, las camas hidropónicas funcionan como un biofiltro, mejorando de esta forma la calidad del agua, que será recirculada nuevamente en los tanques de los peces.

De acuerdo a Rakocy y col., (2003) los efluentes de la acuicultura brindan la mayor parte de los nutrientes requeridos por las plantas, si es que se mantiene la tasa alimentación diaria y crecimiento de las plantas. En este sentido, se debe tener en cuenta la relación entre peces criados y plantas cultivadas.

2.1. Principios de la acuaponia

La acuaponia tiene algunos principios que la gobiernan y de acuerdo a Adler et al (2000) estos son:

- Los productos de desechos de un sistema biológico sirven como nutrientes para un segundo sistema biológico.

- La integración de peces y plantas resulta en un policultivo que incrementa la diversidad y la producción de múltiples productos.

- El agua es reutilizada a través de filtración biológica y la recirculación.

-La producción local de alimentos provee acceso a alimentos más saludables e incrementa la economía local.

2.2. Elementos claves y consideraciones en acuaponia

2.2.1. Selección de las plantas

La selección de las plantas adaptadas al cultivo hidropónico en invernaderos acuapónicos, esta relacionada a la densidad de la población de los peces en los tanques y la subsiguiente concentración de nutrientes de los efluentes de la acuicultura.

Lechuga, hierbas, verduras (espinaca, cebollino, albahaca y berro), tomates, pepinos, pimiento (Diver 2006) y flores (Messer 2003), son algunas de las especies que se pueden emplear en los sistemas acuapónicos.

2.2.2. Selección de las especies de peces

Varias especies de aguas calidas y frías están adaptadas a los sistemas de recirculación de la acuicultura; entre ellas se incluyen a la tilapia (*Oreochromis* spp), trucha (*Oncorhynchus mykiss*), perca europea (*Perca fluviatilis*) y Artic char, una variedad de trucha proveniente del Canadá (*Salvelinus alpinus*). De todas estas especies la que se ha adaptado mejor es la tilapia, esta especie es tolerante a condiciones fluctuantes del agua, como el pH, temperatura, oxígeno y sólidos disueltos.

2.2.3. Características de la calidad de agua

Los peces criados en sistemas de recirculación requieren de agua con buenas condiciones. Los parámetros de calidad críticos incluyen el oxígeno disuelto, dióxido de carbono, amonio, nitrato, nitritos, pH, cloro, y otras características. De estas características van a depender de las especies de peces y plantas que se cultivan.

2.2.4. Biofiltración y sólidos suspendidos

Los efluentes de la acuicultura contienen nutrientes, sólidos disueltos y subproductos. Algunos sistemas de acuaponía son diseñados con filtros intermedios para colectar los sólidos suspendidos, y facilitar la conversión de amonio y otros productos de desechos a formas más adecuadas para las plantas.

2.2.5. Proporción

La proporción se refiere a la relación entre el volumen del agua en el tanque de los peces y el volumen del medio hidropónico. Inicialmente, los sistemas acuapónicos se basaban en una tasa de 1:1, pero actualmente es 1:2 la tasa más usada. La variación en la proporción depende del tipo de sistema hidropónico (grava versus balsa), especie de pez, densidad de cultivo del pez, tasa de alimentación, especies de plantas, etc.

2.3. Algunas experiencias de cultivos acuapónicos

Trucha arco iris – lechuga y albahaca dulce

Adler y col., (2000) describió la relación económica entre un sistema de recirculación para la producción de 22 680 kg por ciclo de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) y una unidad de tratamiento hidropónico, para el cultivo de lechuga (*Latua sativa*) y albahaca dulce (*Ocimum basilicum*). Esta unidad hidropónica era capaz de reducir las concentración de los niveles de fósforo en los efluentes de la granja piscícola a menos de 0.1 mg L⁻¹.

Se determino que la integración de los sistemas de producción de peces y plantas, genera ahorros económicos, frente a los sistemas individualizados. Asimismo, el análisis de inversión demostró la rentabilidad del sistema combinado para un periodo de vida útil de 20 años. La tasa interna de retorno (TIR), para una inversión de \$244,720 fue de 12.5%.

Tilapia – albahaca

Rakocy y col., (2003) realizaron un experimento en un sistema acuapónico de escala comercial (0.05 ha) ubicado en el trópico. La producción proyectada anual de tilapia fue de 4.37 t; mientras que la producción de albahaca fue de 2.0, 1.8 y 0.6 kg m⁻² usando los sistemas de producción en lotes, escalonadas y en campo, respectivamente. La producción anual proyectada del sistema fue de 5.0 t de albahaca con la producción escalonada. Los síntomas de la deficiencia de nutrientes solo aparecieron en el cultivo de albahaca en lotes. Asimismo, Rakocy y col., (2004) reportaron que en pruebas con tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), (77 peces m⁻³) y roja (*Oreochromis spp*), (154 peces

m⁻³) y con cosechas cada 6 semanas, las producciones promedio de las últimas 20 cosechas fueron de 61.5 kg m⁻³ para tilapia del Nilo y 70.7 kg m⁻³ para tilapia roja. El peso promedio fue de 813.8 g para tilapia del Nilo y 512.5 g para tilapia roja. La producción anual estimada fue de 4.16 t para tilapia del Nilo y 4.78 t para tilapia roja.

METODOLOGÍA

Se trabajo en dos fincas de producción de Tilapia con distinto caudal de entrada y capacidad de recambio de agua, denominados para fines de este estudio como: *sistema abierto* y *sistema semiabierto*. Ambos sistemas tienen en común la naturaleza de la fuente de abastecimiento de agua a la estanquería, basado en la colecta de agua de nacimiento y su distribución al sistema por gravedad. Los efluentes generados por ambos sistemas, son descargados directamente a fuentes de agua naturales sin tratamiento previo.

Las fincas se localizan en la Costa del Pacífico, específicamente en el Departamento de Escuintla, a más o menos 60 kilómetros de la ciudad capital y se dedican al cultivo intensivo de tilapia *Oreochromis* spp.

Las principales fuentes de variación entre sistemas son:

1. Tiempo de residencia o uso del agua en los sistemas de producción sobre la calidad del agua.
2. Relación calidad de agua al ingreso versus egreso de los sistemas productivos de Tilapia.
3. Relación sistema productivo y producción de material orgánico e inorgánico disuelto y en suspensión.
4. Caracterización de los efluentes para la evaluación del potencial de macrófitas acuáticas en su biorremediación.

Recursos utilizados en la investigación:

- Fuente de agua, utilizada en las diferentes fincas
- Agua retenida en las unidades de producción

- Agua de los efluentes

Variables dependientes

- Tiempo de retención del agua dentro de los sistemas productivos
- Densidad de carga empleada en ambos sistemas
- Productividad de macrófitas subutilizadas en el medio y que pueden representarse como malezas acuáticas pero que a su vez exponen una elevada capacidad de filtración de nutrientes en las aguas naturales.

Variables independientes

- Concentración de sólidos en suspensión (SST)
- pH
- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Nitrógeno Total (NT)
- Fósforo Total (PT)
- Dureza
- Sólidos Sedimentables
- Amonio (NH_4)
- Nitritos (NO_2)
- Nitratos (NO_3)

Metodología Estadística:

Se evaluaron estanques circulares en cada una de las fincas dedicadas al engorde de tilapia de forma intensiva, revestidos de cemento y de la misma

dimensión, se efectuaron muestreos cada 20 días durante los meses de mayo a julio del 2008, sumando un total de tres muestreos.

Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis de Aguas y Sólidos de AMSA⁴ (Anexo 1).

Se colectaron muestras de agua por triplicado y los resultados fueron analizados mediante estadística descriptiva é inferencial en lo relacionado a correlaciones entre sistemas de producción y entre sitios de colecta (agua de entrada , agua retenida dentro del estanque y agua del efluente).

La gran distinción entre las variables calidad de agua evaluadas dentro y entre sistemas, definió el tipo de análisis estadístico utilizado, que en este caso se trató de la Prueba de Levene (Anexo 3), ya que la misma no asume que la población se distribuye normalmente, a diferencia de análisis estadísticos como la T de Student y Prueba F de ANOVA; modelos que si asumen que la población se distribuye normalmente.

En la prueba de T de Student para comparación de medias independientes se asume una distribución normal, por lo que distribuye la varianza sobre la media; cuando los datos son insuficientes ($n < 30$) y se dificulta detectar las diferencias. La prueba de Levene asume que la varianzas entre cada uno de los parámetros son iguales, detectando diferencias significativas en las variables.

⁴ AMSA: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una de las principales distinciones de los sistemas de producción en piscicultura y de interés dentro del estudio, lo conforma el caudal de agua y la tasa de recambio de agua en cada sistema (Tabla II), variables que al interrelacionarse postula el concepto de “*período de residencia de agua*” dentro del sistema.

Para el entendimiento del concepto de sistema de producción se denomina Sistema de Producción Abierto, al sistema que recibe un constante flujo de agua en la entrada cuya tasa de recambio puede ser el 50% o más del total de volumen por hora. Por el contrario el Sistema de Producción Semiabierto, es aquel que puede recibir agua en entrada en bajos volúmenes constantes o bien recibe un porcentaje de recambio de agua diario según la disponibilidad de agua en el sistema integral. En este caso, la finca 1 trabaja como sistema “*semi abierto*” por presentar un caudal limitado de agua equivalente a 1.3 litros/segundo; mientras que la finca 2 en “*sistema abierto*”, posee un caudal de entrada de 19 l/seg. Dicho caudal, genera una tasa de recambio de agua en cada sistema, la Finca 1 con una capacidad de recambio del 140% diario, mientras que la Finca 2, hasta un 100% por hora, 15 veces más que el sistema semiabierto.

El bajo flujo de agua que ingresa a los estanques de tipo *semi abierto*; permite el establecimiento de comunidades algales que juegan un importante papel en la dinámica de los sistemas, especialmente en la mineralización de la materia orgánica generada por el sistema. En el sistema *abierto*, el flujo de agua constante, no permite el establecimiento y desarrollo de comunidades fitoplanctónicas y conserva una baja acumulación de materia orgánica en los

fondos debido a la fuerza centrífuga generada por las corrientes hacia el centro del estanque, punto de descarga de las aguas residuales.

El mayor tiempo de residencia del agua en el estanque entre diferentes sistemas requiere de diseños y prácticas de manejo diferentes. En el sistema *semi abierto* (Finca 1), el drenaje de fondos ha de ser accionado manualmente una o varias veces al día según carga biológica (peces en cultivo) para retirar los sedimentos acumulados, en contraste en el sistema abierto (Finca 2), el diseño de las instalaciones y la fuerza centrífuga que ejerce el agua, permiten una remoción continua de los sedimentos, conservando los parámetros de calidad del agua más estables y favorables para el cultivo.

En el presente estudio, al analizar los resultados estadísticamente, al inicio a través de la prueba de Comparación Independiente de Medias con una prueba de T Student no demostró diferencias estadísticas entre sistemas de producción, probablemente debido a la alta variación en las lecturas para las diferentes variables evaluadas y el bajo número de muestras tomadas. Aunque notoria la diferencia en indicadores de calidad del agua entre puntos de muestreo en cada sistema, el estadístico igualmente no fue lo sensible para detectar diferencias estadísticas. Sin embargo, a excepción del agua de entrada cuya calidad fue similar entre sistemas de producción, el agua residente en el sistema y agua de salida varió entre sistemas de producción, alterándose dramáticamente los parámetros de calidad de agua en el sistema semi-abierto. Inversamente relacionados, el concepto de residencia del agua en el sistema y caudal de agua en los sistemas fundamentan actividades del productor acuícola y el impacto al medio ambiente. Luego de analizar las dispersiones entre datos obtenidos al comparar sistemas de producción evaluados y puntos de muestreo entre cada sistema de producción, utilizando el estadístico de Levene, con capacidad de determinar igualdad entre varianzas de las diferentes variables,

se pudo detectar diferencias estadísticas entre sistemas de producción. En atención a los sistemas de producción (Anexo 2) para las variables de interés, en este caso, la Finca A en sistema *semi-abierto* y Finca 2 en sistema *abierto*, mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) para las variables: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5), Nitrógeno Total (NT), Fósforo Total (PT) y Color, y altamente significativo ($P < 0.05$) para las variables: Nitritos (NO_2), Amonio (NH_4) y Sólidos Sedimentables.

En la Tabla II, se presentan las principales variables de interés que distinguen a cada sistema dentro del estudio.

Tabla II. Descripción de los Sistemas Productivos de Tilapia Evaluados

	Sistema Semi Abierto	Sistema Abierto
Espejo de agua (m^{-3})	1,707	3,500
Caudal de entrada(litros/seg)	1.3	19
Temperatura promedio del agua de entrada ($^{\circ}C$)	29	23
Oxígeno disuelto en entrada de agua ($mg L^{-1}$)	3.5	7.0
Recambio diario (Veces por día)	1.4	21
Carga Empleada (Biomasa $kg m^{-3}$)	15	35

De acuerdo a lo expresado por Viadero y col., (2005) el incremento en la producción de efluentes con parámetros superiores a los máximos permisibles, está directamente relacionado con las mayores biomasa de cultivo. Sin embargo, los resultados de este estudio, sugieren que el tiempo de residencia de agua en el sistema también tiene gran influencia, considerando que las

descargas con mayor cantidad de nutrientes pueden provenir del sistema *semi abierto* donde los cultivos quedan a expensas del hombre en el accionar de las descargas de sólidos y de los recambios de agua.

Estas variables se deben asociar con el tiempo de residencia del agua en el sistema (variable determinada por el caudal de entrada), indicando que a mayor tiempo de residencia, existirá una mayor acumulación de metabolitos, alcanzando condiciones que inclusive pueden afectar la salud de los peces y el desarrollo del cultivo.

El amonio y nitritos, comúnmente son el resultado de la excreción de metabolitos por los peces, descomposición de la materia orgánica, fertilización y de la calidad de alimento balanceado utilizado en la producción; valores por encima de los límites recomendados, señalan la superación de la capacidad de carga del sistema y/o la necesidad de incorporar medidas de control como: recambios de agua o aireación, como lo expresa el sistema *semi abierto*. En un sistema equilibrado, dichos niveles permanecen dentro de los valores recomendados y no tienden a expresar grandes variaciones durante el día, tal como lo muestran los resultados del sistema *abierto*.

En general, los sistemas piscícolas comerciales tienden a descargar en cuerpos de agua natural los efluentes tipificados en los párrafos anteriores. Sin embargo, estos metabolitos intermedios y finales tal es el caso de los fosfatos, nitratos y derivados del carbono; presentes en los efluentes del sistema *semi abierto*, podrían desempeñar un rol fundamental en la producción de plantas acuáticas comúnmente asociadas en acción mutualista sinérgica con las bacterias nitrificantes importantes en la destoxificación y mineralización de la materia orgánica en el agua.

De las Hidrófitas

Existe una gran variedad de macrófitas acuáticas en los sistemas continentales del país. Varias de estas especies son cosmopolitas y habitan en distintos sistemas acuáticos.

En la mayoría de los casos, son subvaloradas e interfieren con algunas actividades humanas como la pesca, la navegación y la recreación.

Se suele desconocer la importancia ecológica de las macrófitas acuáticas y la posibilidad de utilizarlas en su estado natural o como materia prima en la elaboración de diversos productos.

Dentro de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, se encuentra el nitrógeno. El amoníaco (NH_3) es el producto principal de los residuos o desechos excretados por los organismos en cultivo; al igual que el amonio (NH_4) y el nitrito (NO_2), considerados tóxicos para los peces, pero que constituyen formas que las plantas pueden utilizar. De hecho, las plantas acuáticas prefieren el amonio sobre los nitratos ya que la absorción de los últimos parece requerir más esfuerzo en plantas acuáticas, que la del amonio.

Algunas de las especies que presentan esta cualidad son: Cola de zorro *Ceratophyllum demersum*, Jacinto de agua *Eichhornia crassipes*, Egeria *Elodea densa*, Lenteja de agua *Lemna minor*. Sin embargo, la mayoría de macrófitas acuáticas son altamente eficientes en la remoción de diversos compuestos, considerados tóxicos en ambientes acuáticos tal es el caso de la *Eichhornia crassipes* y *Scirpus* sp. utilizadas comúnmente en la remoción de sólidos conteniendo metales pesados.

Algunos autores sugieren el uso de especies que ocupan un hábitat distinto para incrementar la eficiencia de filtración, por ejemplo la combinación de especies emergentes, flotantes y sumergidas, así como el uso de especies que ofrecen grandes superficies de absorción a nivel foliar y radicular; cabe mencionar a especies del genero *Eichornia*, *Typha*, *Juncus*, *Pistia* y *Azolla* (Tabla III) .

Dentro de las especies de hidrófitas que habitan en distintos sistemas hídricos tropicales de la región y que sobresalen por presentar gran potencial de aprovechamiento en la biorremediación de efluentes, se menciona a las principales familias y los géneros representativos en la Tabla III.

Tabla III. Nómima de familias y géneros representativos de hidrófitas

FAMILIA	NOMBRE COMUN	GENERO	ESPECIE
EMERGENTES O PALUSTRES			
Ciperaceae	Tul, junco	<i>Scirpus</i>	<i>californicus</i>
Juncaceae	Junco	<i>Juncus</i>	sp
Typhaceae	Typha, junco, tul	<i>Typha</i>	<i>latifolia</i>
Gramíneae	Pasto	<i>Paspalum, Panicum</i>	sp
FLOTANTES O DE FLOTACION LIBRE			
Araceae	Lechuga de agua, lechuguilla, repollo de agua, repollito de agua	<i>Pistia</i>	<i>stratiotes</i>
Azolaceae	Helecho de agua	<i>Azolla</i>	sp
Hidrocharitaceae	Planta esponjosa americana	<i>Limnobium</i>	<i>laevigatum</i>
Lemnaceae	Lenteja de agua	<i>Lemna, Wolffia, Spirodella</i>	sp
Pontederiaceae	Jacinto de agua, camalote	<i>Eichhornia</i>	<i>crassipes</i>
Salvinaceae	Acordeón de agua	<i>Salvinia</i>	sp

EMERGENTES O PALUSTRES

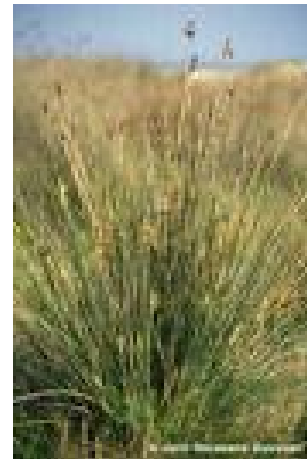
Ciperáceas

Es una familia típica de los suelos palustres. Sus especies son herbáceas, anuales o perennes. Presentan tallos, hojas y raíces bien diferenciados y rizomas ocasionalmente muy gruesos. Los tallos aéreos son generalmente macizos de forma triangular y con nudos solo cerca de la base. Las hojas son lineares con nervaduras paralelas, una central muy marcada que señala su plegamiento longitudinal. Vainas cerradas. Las flores, en espigas solitarias o agrupadas, suelen estar protegidas por falsas hojas, bráctea o glumas. Los géneros como *Cyperus* y *Scirpus* son suelen habitar en distintos cuerpos de agua de la región.



Juncáceas

Son plantas de tipo herbáceo, anuales o perennes, con tallos macizos con parénquima estrellado, erguidos de más de 1 m de altura finalizando en la espiga. Hojas largas lineares, canaliculadas o cilíndricas, sin pilosidad y con vainas abiertas. Son numerosas las especies que habitan en suelos inundables, varias pertenecientes al género *Juncus*.



Tifáceas

Esta familia tiene un solo género de distribución cosmopolita: *Typha*, con varias especies tales como *T. latifolia*, *T. dominguensis*, ambas pueden encontrarse en ambientes acuáticos de la región tropical. Son palustres, comunes en áreas circundantes de cuerpos de agua o zonas inundables. Pueden alcanzar entre 1 y 4 m de altura; son perennes, rizomatosas y con los tallos aéreos rectos y cilíndricos, desprovistos de nudos. Las hojas son enteras muy largas ocasionalmente mas altas que las flores, de 1 a 2 cm de ancho y consistencia coriácea. Las flores están dispuestas en espigas cilíndricas compactas, de color rojizo a pardo, semejando cepillos. Las flores femeninas están agrupadas en la porción inferior y las masculinas en la superior; según la especie estos grupos pueden estar o no separados entre si por un segmento del caquis desnudo. Las flores se emplean frecuentemente en ornamentación.



Gramíneas

Numerosas especies de esta familia (la misma a la que pertenecen el trigo, el maíz y otros cereales) son acuáticas, anuales o perennes, generalmente con tallos herbáceos, con nudos o entrenudos muy marcados llamados cañas. Las hojas están formadas por una vaina abierta o cerrada y una lamina linear o lanceolada, la mayor parte de las veces unida por medio de una lígula (en ocasiones reducida a una hilera de pelos).



Géneros como *Paspalum* y *Panicum* son frecuentes en cuerpos de agua y en muchas ocasiones sirve de alimento para el ganado que pasta en las riberas.

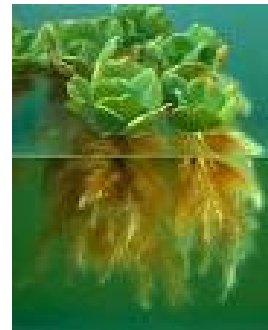
FLOTANTES O DE FLOTACION LIBRE

Aráceas

Muchas especies de esta familia son cultivadas como ornamentales, sin embargo, entre las plantas acuáticas encontramos solo un genero: *Pistia*, con la especie *P. stratiotes*. Esta es muy común en diversos sistemas lacustres del país, formando una especie de alfombra que cubre en ocasiones, totalmente la superficie de los mismos.



Son de tipo herbáceo, con hojas sésiles de forma espatulada de aproximadamente 5 cm de longitud por 3 cm de latitud con una especie de plegamiento longitudinal, de consistencia esponjosa y las superficies de ambas caras están cubiertas de pelos silícicos. Emiten estolones de cuyos extremos nacen las nuevas plantitas formando extensas colonias. Entre las hojas puede observarse pequeñas flores de color verde blanquecino.



Azoláceas

Son pequeñas plantas, flotantes libres, con aspectos de musgos, con rizomas frágiles cubiertos por pequeñas hojitas colocadas como escamas de

aproximadamente 2 cm de diámetro y con numerosas raíces. Las hojas están ubicadas en dos hileras, una superior flotante (donde se realiza la fotosíntesis) y otra inferior sumergida, casi transparente, con cavidades en la cara inferior habitadas por comúnmente por algas verde azules.

Esta familia tiene un solo género, *Azolla* con dos especies comunes en lagunas, zanjas y charcas temporales, extendiéndose sobre la superficie del agua como un manto verde oscuro o pardo.



Hidrocaritáceas

Son de tipo herbáceo, acuáticas sumergidas o flotantes. El género *Limnobium* se encuentra representado en la zona por la especie *L. laevigatum*, son plantas flotantes, con hojas que nacen en forma de roseta, ocasionalmente con pecíolos muy largos, lamina de forma redonda u oval con nervaduras primarias curvas. Las distintas plantas están unidas entre si por estolones. Se las puede identificar fácilmente porque las hojas tienen en la cara inferior abundante tejido aerenquimático lo que le da aspecto esponjoso de color blanquecino generalmente en contacto con el agua.

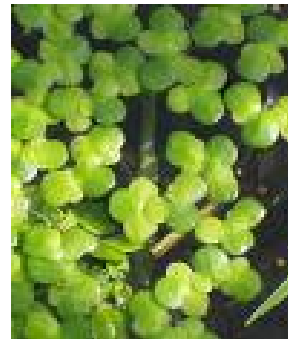


Tienen dos tipos de flores; las masculinas nacen el mismo nudo que las femeninas pero luego de ser fecundada, con lo cual se asegura una polinización cruzada.

Con frecuencia se las encuentra entre jacintos de agua *E. crassipes* y en ocasiones, cubriendo superficies de aguas quietas.

Lemnáceas

Son pequeñas plantitas acuáticas flotantes libres con un cuerpo no diferenciado en tallos y hojas llamado “fronde” y pueden o no tener raíces. El aspecto general es de pequeñas hojitas sueltas, de resto de vegetales por lo cual se las llama vulgarmente “lentejas de agua”. Se reproducen por multiplicación vegetativa y son consideradas como las fanerógamas más pequeñas que se conocen. *Spirodella*, *Lemna* y *Wolffia* son algunos de los géneros representativos de ecosistema acuático tropicales y templados.



Pontederiaceas

Familia al cual pertenece el muy conocido “jacinto de agua” o *Eichhornia crassipes*, especie de flotación libre con hojas naciendo agrupadas en forma de roseta y con un abundante sistema radicular a modo de “cabellera”. Los ejemplares adultos emiten estolones de los cuales, a su vez, nacen nuevas plantas “reproducción vegetativa” permaneciendo unidas por tiempo indefinido.



Se trata de una especie considerada comúnmente como maleza acuática, por su capacidad de reproducirse rápidamente y de cubrir grandes superficies de agua en corto tiempo.

Las plantas jóvenes que crecen con suficiente espacio, tienen hojas de superficie y de borde liso, de forma oval o reniforme y pecíolo notablemente globoso con abundante tejido aerenquimático. Las plantas más viejas y sobre todo cuando no disponen de mucho espacio, modifican su aspecto exterior: los pecíolos son más largos y delgados y sus hojas cordadas. La espiga floral es muy vistosa, de aproximadamente 30 cm de altura con numerosas flores de color celeste a lila y con una mancha amarilla en el pétalo mayor. Las raíces son numerosas y de longitudes diversas en sus extremos conservan la caliptra o cofia a pesar de ser una planta netamente acuática.



Salvineáceas

Familia constituida por plantas pequeñas, flotantes, con rizomas horizontales ramificados y sin raíces verdaderas. Presenta un interesante dimorfismo foliar ya que sus hojas nacen agrupadas en verticilos de tres. Dos de ellas son enteras, reniformes, emergentes, con notables papilas o pelos glandulares en la cara superior y están enfrentadas hasta casi unirse (en lugares o momentos de mucho sol) o extendidas en un solo plano (cuando acontece lo contrario).



La tercera hoja, muy modificada y totalmente sumergida, esta dividida en segmentos, semejantes a raíces, con numerosos pelos absorbentes.



Sobre uno de estos segmentos suelen estar los órganos reproductores llamados esporocarpos.

El genero *Salvinia* representante de esta familia en regiones templadas y tropicales, posee varias especies muy comunes en dicha zona.

Las macrófitas ofrecen superficies para epífitas y bacterias nitrificantes que realizan la descomposición de la materia orgánica. La mezcla de macrófitas emergentes y sumergidas otorga el mayor beneficio para la eliminación de nitrógeno en humedales.

El uso de macrófitas emergentes para el tratamiento de efluentes es conocido como sistema de humedales artificiales o naturales y es ampliamente utilizado en algunos países.

CONCLUSIONES

1. Existe diferencia estadística en la homogeneidad de varianza en la composición fisicoquímica de los efluentes de un sistema de producción de tilapia *semiabierto* y un sistema *abierto*, específicamente para las variables: DBO₅, Nitrógeno Total (NT), Fósforo Total (PT) y Color, Nitritos (NO₂), Amonio (NH₄) y Sólidos Sedimentables, siendo el sistema abierto menos contaminante por tener un tiempo de residencia del agua menor.
2. El grado de riesgo de contaminación ambiental por metabolitos en efluentes de sistemas *abierto* es nulo por la alta tasa de recambio y el bajo periodo de residencia del agua dentro de las unidades de producción de estos sistemas.
3. Los recambios de agua y la remoción de sedimentos son elementos de clave de manejo en sistemas *semi abiertos*, ya que llegan a ser altamente contaminantes de no operarse correctamente, especialmente por la descarga de material orgánico en suspensión, las concentraciones de nitrógeno y fósforo, así como por la demanda biológica de oxígeno que estos sistemas emiten y liberan al medio receptor.
4. El sistema *semi abierto* asociado al tiempo de retención de agua genera una alta tasa de productos metabólicos tóxicos a los peces y al medio receptor, sin embargo, pueden considerarse importantes insumos en cultivos de plantas acuáticas como agentes captadores sugiriendo ser agentes biorremediadores.

5. El manejo de fondos, tasa de recambio de agua y periodo de retención del agua dentro de las unidades de cultivo, son variables que han de ser consideradas al calcular la capacidad de carga en sistemas de producción intensiva de tilapia .

6. Existe gran diversidad de especies de plantas acuáticas autóctonas subutilizadas en el ámbito nacional que pueden ser ampliamente utilizadas en el tratamiento de efluentes de sistemas *semi abiertos* dedicados a la producción de tilapia bajo sistemas de integración de componentes.

RECOMENDACIONES

1. Desarrollar cultivos piloto con distintas especies de plantas acuáticas para evaluar su capacidad de biorremediación, seleccionando las especies que presenten mayor capacidad de filtración, adaptación y propagación.
2. Incorporar al análisis de los efluentes la concentración de nutrientes conformados dentro de los sedimentos que quedan acumulados en el fondo de los sistemas *semi abiertos* y que son liberados al ambiente hasta el momento de la cosecha conjuntamente con la fase líquida.
3. Evaluar la viabilidad técnica, económica y biológica de la biorremediación de efluentes con plantas acuáticas.
4. Efectuar estudios de calidad de agua en las fuentes receptoras para conocer el impacto que puede ocasionar la descarga de efluentes de sistemas de unidades productoras de tilapia de tipo *semi abierto*.
5. Desarrollar un programa de caracterización de efluentes en un número significativo de unidades de producción de tilapia de tipo *semi abierto* en el ámbito nacional, para establecer estándares de calidad de efluentes para el control y monitoreo de los mismos por parte de las entidades correspondientes.

BIBLIOGRAFIA

Adler, P., et al. 2000. Economic Analysis of an Aquaponic System for the Integrated Production of Rainbow Trout and Plants. International Journal of Recirculating Aquaculture Vol.1

Boyd, C. et al. 1997. Dynamics of pond aquaculture. USA. CRC Press LLC. 437 p.

Borja, A. 2001. Los impactos ambientales de la acuicultura y la sostenibilidad de esta actividad. España. Fundación AZTI. Bol. Inst. Esp. Oceanogr. 18 (1-4). 2002: 41-49.

Brinker A, Koppe W, Rösch R. Optimised effluent treatment by stabilised trout faeces. Aquaculture 2005; 249: 125-144. 34.

Brister D. Organic aquaculture: moving toward national standards. World Aquaculture 2001; 32: 51-53.

Brix H, Schierup H. The use of the aquatic macrophytes in water-pollution control. Ambio 1989; 18: 100-107. 51.

Buschmann, A., Fortt, A. 1996. Efectos ambientales de la acuicultura intensiva y alternativas para un desarrollo sustentable. Fundación Oceánica, Santiago, Chile. Revista ambiente y desarrollo de CIPMA.

Chow F, Macchiavello J, Santa Cruz S, Fonck E, Olivares J. Utilization of *Gracilaria chilensis* (Rhodophyta: Gracilariaceae) as a biofilter in the depuration of effluents from tank cultures of fish, oysters and sea urchins. *J World Aquacult Soc* 2001; 32: 215-220.

Dame R, Dankers N, Prins T, Jongsma H, Smaal A. The influence of mussel beds on nutrients in the Western Wadden Sea and Eastern Scheldt Estuaries *Estuaries* 1991; 14: 130-138.

Diver, S. 2006. *Aquaponics; Integration of Hydroponics with Aquaculture* . ATTRA, National Sustainable Agriculture Information Service. 28 p.

Folke, C. y N. Kautsky (1989) The role of ecosystems for sustainable development of aquaculture. *Ambio* 18: 234-243.

Iturbide, K. Febrero 2006. Diagnostico del cultivo comercial de la tilapia en Guatemala. Guatemala. AGEXPORT/USAID, Proyecto de Consultoría. 96 p.

Jones A, Dennison W, Preston N. Integrated treatment of shrimp effluent by sedimentation, oyster filtration and macroalgal absorption: a laboratory scale study. *Aquaculture* 2001; 193: 155-178. *Aquaculture* 2003; 217: 207-221.

Kestemont P. Different systems of carp production and their impacts on the environment. *Aquaculture* 1995; 129: 347-372.

Lin Y, Jing S, Lee D, Chang Y, Chen V, Shih K. Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate. *Environmental Pollution* 2005; 134: 411-421.

Lotze, H.K., W. Schramm y B. Worm (1999) Control of macroalgal blooms at early developmental stage: *Pilayella* and *Enteromorpha* sp. *Oecologia* 119: 46-54.

Malcolm C.M. Beveridge, y col., 1996. *Aquaculture and water resource management*. Blackwell Science Ltd. 219 p.

Messer, M. 2003 . *Hydroponics Integration with Aquaculture* . 23 p.

Pardo, S., Suárez, H. y Soriano, H. 2006. Tratamiento de efluentes: una vía para la acuicultura responsable. Colombia. *Rev. MVZ Córdoba* 11 Supl (1), 20-29, 2006.

Piedrahita R. Reducing the potencial environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture* 2003; 226: 35-44.

Rakocy, J. 1999. The status of aquaponics, part 1 . *Aquaculture Magazine* 25 (4): 83-88. Scragg, A. 1999. *Biotecnología medioambiental*. España. Acribia. 307 p.

Rakocy J, RC Shultz, DS Bailey, ES Thoman. 2003. Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system . *ISHS Acta Horticulturae* 648: South Pacific Soilless Culture Conference SPSCC.

Rakocy J, Donald S. Bailey, R. Charlie Shultz and Eric S. Thoman. 2004. Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. 15 p.

Reeders H, Bij de Vaate A, Slim FJ. The filtration rate of *Dreissena polymorpha* (Bivalvia) in three dutch lakes with reference to biological water quality management. *Freshwater Biol* 1989; 22: 133-141.

Schmittou H. Situation outlook and prospects of the world's aquaculture feed supply. In: Simpósio Internacional Sobre Nutrição de Peixes e Crustáceos, Campos de Jordão, Sao Paulo. Anais... Colégio Brasileiro de Nutrição Animal (CBNA) 1995; 9-32.

Seok K, Leonard S, Boyd C, Schwartz M. 1995. Water quality in annually drained and in drained channel catfish ponds over a threeyear period. *Progr Fish Culturist* 1995; 57: 52-58.

Shpigel M, Neori A, Popper D, Gordin H. A proposed model for "environmentally clean" land-based culture of fish, bivalves and seaweeds. *Aquaculture* 1993; 117: 115-128.

Soto D, Mena G. Filter feeding by the freshwater mussel, *Diplodon chilensis*, as a biocontrol of salmon farming eutrophication. *Aquaculture* 1999; 171: 65-81.

Soto, D. y F, Norambuena. 2004. Evaluation of salmon farming effects on marine systems in the inner seas of southern Chile: a large-scale mensurative experiment. *Journal of Applied Ichthyology* 20:439-501.

Soto D, Mena G. Filter feeding by the freshwater mussel, *Diplodon chilensis*, as a biocontrol of salmon farming eutrophication. *Aquaculture* 1999; 171: 65-81.

Teichert-Coddington D, Rouse D, Potts A, Boyd C. Treatment of harvest discharge from intensive shrimp ponds by settling. *Aquacultural Engineering* 1999; 19: 147-161.

Troell, M., C. Halling, A. Nilsson, A.H. Buschmann, N. Kautsky y L. Kautsky (1997) Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* (Gracilariales, Rhodophyta) and salmon cages for reduced environmental impact and increased economic output. *Aquaculture* 156: 45-61.

Troell M, Halling C, Neori A. Chopin T, Buschmann AH, Kautsky N, et al. Integrated mariculture: asking the right questions. *Aquaculture* 2003; 226: 69-90 and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern maricultura. *Aquaculture* 2003; 231: 361-391.

ANEXOS

ANEXO 1. RESULTADOS DE ANALISIS DE MUESTRAS DE AGUA

Resultados de Analisis Fisicoquimico
terizar y Cuantificar los Afluentes de Sistemas Acuicolas, especificamente aquellos dedicados a la Piscicultura de Especies Tropicales como la Tilapia

Fecha	Nombre	Numero	DOO mg/L	DBO ₅ mg/L	N _T mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	P _T mg/L	Color UPH-Co	Turbiedad NTU	Dureza mg/L CaCO ₃	Sol. Susp mg/L	Sol. Sed mg/L	pH
20/04/2008	1 Entrada	A08-506	35	17	3.00	0.01	2.8	0.19	0.01	1.0	3	100	604	0	6.65
	1 Estanque	A08-507	61	34	6.53	0.38	2.5	0.12	0.44	11.1	15	100	364	0	7.75
	1 Salida	A08-508	78	39	6.68	0.38	2.9	3.60	1.11	23.4	36	100	304	0.1	7.40
	2 Entrada	A08-509	10	4	1.86	0.01	1.8	0.05	0.19	1.3	3	117	434	0	7.80
	2 Estanque	A08-510	11	4	2.70	0.02	2.3	0.38	0.38	1.4	5	127	260	0	7.45
	2 Salida	A08-511	10	5	2.33	0.02	1.8	0.51	0.40	3.4	6	151	188	0.1	7.30
Fuente: División de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos -AMSA-															

Fecha	Nombre	Numero	DOO mg/L	DBO ₅ mg/L	N _T mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	P _T mg/L	Color UPH-Co	Turbiedad NTU	Dureza mg/L CaCO ₃	Sol. Susp mg/L	Sol. Sed mg/L	pH
26/04/2008	1 Entrada	A08-532	<10	<6	2.52	0.02	2.5	<0.05	0.03	<0.2	3	120	510	0	6.78
	1 Estanque	A08-533	31	10.7	6.9	0.66	3.6	1.76	0.82	11.1	12	106	468	0	7.53
	1 Salida	A08-534	1487	892.2	82	0.56	3.4	2.40	2.79	80.1	126	118	1290	110	8.32
	2 Entrada	A08-535	30	11.0	1.82	0.02	1.8	<0.05	3.19	<0.2	3	182	334	0	6.90
	2 Estanque	A08-536	17	8	2.24	0.02	2.1	0.12	3.25	0.40	4	168	382	0	7.12
	2 Salida	A08-537	<10	<6	2.24	0.02	2.1	0.12	3.27	1.0	4	153	448	0	7.12
Fuente: División de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos -AMSA-															

Fecha	Nombre	Numero	DOO mg/L	DBO ₅ mg/L	N _T mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	P _T mg/L	Color UPH-Co	Turbiedad NTU	Dureza mg/L CaCO ₃	Sol. Susp mg/L	Sol. Sed mg/L	pH
30/06/2008	1 Entrada	A08-523	4	<6	1.68	0.02	<0.05	0.01	<0.2	4	91	256.8	0	0	7.71
	1 Estanque	A08-524	27	2	4.68	0.17	0.57	0.04	6.3	10	100	218	0	0	7.54
	1 Salida	A08-525	34	6	1.68	0.16	0.59	0.05	7.7	13	85	186	0.4	0	7.54
	2 Entrada	A08-526	<10	<6	0.96	0.01	<0.05	0.04	2.9	6	121	502	0	0	6.85
	2 Estanque	A08-527	<10	<6	1.12	0.02	0.25	0.07	2.9	7	130	328	0.1	0	7.65
	2 Salida	A08-528	4	4	2.24	0.02	0.35	0.09	2.8	7	125	172	0.3	0	7.41
Fuente: División de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos -AMSA-															



**ANEXO 2. ESTADISTICA GRUPAL
COMPARACION ENTRE MEDIAS**

Finca		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
DQO	Sistema semiabierto	9	195,22	484,901	161,634
	Sistema abierto	8	12,75	7,797	2,756
DBO5	Sistema semiabierto	9	112,77	292,574	97,525
	Sistema abierto	9	6,11	2,421	,807
NT	Sistema semiabierto	9	12,85	26,019	8,673
	Sistema abierto	9	1,90	,669	,223
NO2	Sistema semiabierto	9	,297	,2850	,0950
	Sistema abierto	9	,018	,0044	,0015
NO3	Sistema semiabierto	6	2,950	,4593	,1875
	Sistema abierto	6	1,983	,2137	,0872
NH4	Sistema semiabierto	9	1,0378	1,26759	,42253
	Sistema abierto	9	,2756	,21284	,07095
PT	Sistema semiabierto	9	,599	,9131	,3044
	Sistema abierto	9	,207	,1262	,0421
COLOR	Sistema semiabierto	9	12,57	15,775	5,258
	Sistema abierto	9	1,78	1,174	,391
TURBIEDAD	Sistema semiabierto	9	35,33	45,205	15,068
	Sistema abierto	9	5,22	1,856	,619
DUREZA	Sistema semiabierto	9	147,33	134,232	44,744
	Sistema abierto	9	141,67	23,060	7,687
SÓLIDOS	Sistema semiabierto	9	398,76	367,845	122,615
SUSPENDIDOS	Sistema abierto	9	393,67	235,321	78,440
SÓLIDOS	Sistema semiabierto	9	13,0167	36,43400	12,14467
SEDIMENTABLES	Sistema abierto	9	,0556	,10138	,03379
pH	Sistema semiabierto	9	7,3800	,36325	,12108
	Sistema abierto	9	7,3111	,35589	,11863

ANEXO 3. RESULTADOS ESTADISTICOS, PRUEBA DE LEVENE

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	T	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference Lower	
DQO	Equal variances assumed	4,423	,053	1,060	15	,306	182,472	172,092	-184,333	549,277
	Equal variances not assumed			1,129	8,005	,292	182,472	161,657	-190,273	555,217
DBO5	Equal variances assumed	5,092	,038	1,094	16	,290	106,656	97,528	-100,094	313,405
	Equal variances not assumed			1,094	8,001	,306	106,656	97,528	-118,239	331,550
NT	Equal variances assumed	4,834	,043	1,262	16	,225	10,951	8,676	-7,441	29,343
	Equal variances not assumed			1,262	8,011	,242	10,951	8,676	-9,051	30,953
NO2	Equal variances assumed	18,277	,001	2,935	16	,010	,2789	,0950	,0774	,4803
	Equal variances not assumed			2,935	8,004	,019	,2789	,0950	,0598	,4980
NO3	Equal variances assumed	3,667	,085	4,674	10	,001	,9667	,2068	,5058	1,4275
	Equal variances not assumed			4,674	7,067	,002	,9667	,2068	,4785	1,4548
NH4	Equal variances assumed	15,830	,001	1,779	16	,094	,76222	,42845	-,14604	1,67049
	Equal variances not assumed			1,779	8,451	,111	,76222	,42845	-,21668	1,74112

PT	Equal variances assumed	7,462	,015	1,277	16	,220	,3922	,3072	-,2591	1,0435
	Equal variances not assumed			1,277	8,306	,236	,3922	,3072	-,3118	1,0962
COLOR	Equal variances assumed	7,152	,017	2,046	16	,058	10,789	5,273	-,389	21,967
	Equal variances not assumed			2,046	8,089	,075	10,789	5,273	-1,347	22,925
TURBIEDAD	Equal variances assumed	13,702	,002	1,997	16	,063	30,111	15,081	-1,859	62,082
	Equal variances not assumed			1,997	8,027	,081	30,111	15,081	-4,646	64,868
DUREZA	Equal variances assumed	2,896	,108	,125	16	,902	5,667	45,399	-90,576	101,909
	Equal variances not assumed			,125	8,472	,904	5,667	45,399	-98,019	109,352
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	Equal variances assumed	,548	,470	,035	16	,973	5,089	145,559	-303,482	313,659
	Equal variances not assumed			,035	13,609	,973	5,089	145,559	-307,948	318,126

SÓLIDOS SEDIMENTABLES	Equal variances assumed	5,158	,037	1,067	16	,302	12,96111	12,14471	- 12,78453	38,706 75
	Equal variances not assumed			1,067	8,000	,317	12,96111	12,14471	- 15,04457	40,966 79
pH	Equal variances assumed	,000	,990	,406	16	,690	,06889	,16951	-,29046	,42824
	Equal variances not assumed			,406	15,993	,690	,06889	,16951	-,29047	,42825