



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Maestría en Instrumentación y Control Automático

IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DINÁMICO DE UN SISTEMA ACUÍCOLA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
 Maestro en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

Ing. Carlos Alberto Olvera Olvera

Dirigido por:

Dr. Gilberto Herrera Ruiz

SINODALES

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
 Presidente

M. en C. Fernando De la Isla Herrera
 Secretario

M. en C. Rodrigo Castañeda Miranda
 Vocal

M. en C. Roberto Augusto Gómez Loenzo
 Suplente

M. en C. José Agustín Bravo Curiel
 Suplente

M. en I. Gerardo René Serrano Gutiérrez
 Director de la Facultad

Dr. Sergio Quezada Aldana
 Director de Investigación y
 Posgrado

Centro Universitario
 Querétaro, Qro.
 Enero de 2005
 México

BIBLIOTECA CENTRAL, U.A.Q.

No. Adq. 1769988

No. Título _____

Clas. TS

620.00420285

052i

Resumen

En comparación con las aves y los mamíferos, los peces son una fuente más alta en proteínas, el rendimiento obtenido durante su procesamiento es mayor y presentan una mejor eficiencia alimentaria. En la mayoría de los países, la pesca de captura ha sido el único suministro de estos productos, sin embargo, en los últimos años ha presentado un menor crecimiento respecto al crecimiento y demanda de la población. Este bajo crecimiento está relacionado con la degradación, contaminación y sobreexplotación de los recursos pesqueros. Es por esto que hoy en día la acuicultura se presenta como un campo importante para la investigación científica y tecnológica. Uno de los objetivos más importantes de la acuicultura es obtener la mayor producción de peces por unidad de volumen de agua, sin embargo, al aumentar la densidad de cultivo se presentan problemas graves en el control de las variables fisicoquímicas, siendo las más importantes la temperatura y el oxígeno disuelto. En este trabajo se presenta el análisis y simulación de un modelo dinámico de un estanque piscícola en invernadero bajo en cultivo intensivo de tilapia, construido en la Universidad Autónoma de Querétaro. La simulación dinámica del modelo fue hecha en el software Matlab, utilizando la herramienta de identificación. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el modelo puede ser aplicado para el control del sistema, en donde diferentes estrategias pueden ser probadas, diseñadas e implementadas.

Agua
disuelta

(**Palabras clave:** Acuicultura, Temperatura, Oxígeno disuelto, Modelo Dinámico)

Abstract

In comparison with poultry and mammals, fishes are a higher source of proteins and their productivity is greater with respect to eatable by-products alimentary efficiency. In most countries, catch fishing has been the only source of this kind of products, but in recent years the available supplies have been growing at a slower rate than the demand by human population. This limited growth is related to degradation, pollution and excessive exploitation of fishing resources. This is the reason why aquaculture is an important subject of research and technological development. One of the main concerns for aquaculture is to produce the maximum possible number of fishes per volumetric unit of water, but by increasing the density of produced fishes serious variable control problems arise, mainly with regards to temperature and dissolved oxygen.

This work introduces a dynamical model involving temperature and dissolved oxygen for a greenhouse fish farm. These experiments were carried out in a reduced scale tilapia fish farm built at Querétaro State University. The results derived from this work show this model can be applied for the system control, where different strategies can be tested, designed and implemented.

(Keywords: Aquaculture, Temperature, Dissolved Oxygen, Dynamical Model)

A mis padres y hermanos por su paciencia y apoyo.

A mi esposa por su comprensión.

Y muy especialmente a mi hijo Carlos Eduardo

Agradecimientos

A los profesores de la facultad de ingeniería División de Posgrado por sus enseñanzas, en especial al Dr. Gilberto Herrera Ruiz por su confianza y apoyo para concluir mis estudios de posgrado.

A Rodrigo Castañeda Miranda y a Roberto Augusto Gómez Loenzo por su apoyo para la finalización de este trabajo.

A mis compañeros de maestría y a los alumnos de licenciatura que apoyan el proyecto, en especial a los Ornelas.

A CONACYT por el apoyo brindado para realizar mis estudios de posgrado.

Índice General

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PANORAMA MUNDIAL	2
1.2 PANORAMA EN MÉXICO	6
CAPÍTULO 2	
CALIDAD DEL AGUA.....	16
2.1 EL AGUA.....	18
2.1.1 <i>La molécula de agua</i>	19
2.1.2 <i>Electrolitos</i>	21
2.1.3 <i>Contaminación del agua</i>	21
2.2 FACTORES QUE AFECTAN EL CRECIMIENTO Y SOBRE VIVENCIA DE LAS TILAPIAS EN CULTIVO.....	25
2.2.1 <i>Temperatura</i>	25
2.2.2 <i>Salinidad</i>	26
2.2.3 <i>pH</i>	26
2.2.4 <i>El Oxígeno disuelto(OD)</i>	34
2.2.4.2 <i>Transferencia de gases</i>	37
2.2.4.3 <i>Difusión molecular de substancias disueltas</i>	37
2.2.5 <i>Amonio</i>	42
CAPÍTULO 3	
CONSTRUCCIÓN DEL ESTANQUE	45
3.1 CONSIDERACIONES FÍSICAS.....	45

3.1.1 <i>La selección del sitio</i>	45
3.1.2 <i>Calidad y disponibilidad de agua</i>	46
3.1.3 <i>Evaluación y corrección de la calidad del agua</i>	47
3.1.4 <i>Uso adecuado del agua disponible</i>	48
3.1.5 <i>Demanda hídrica</i>	51
3.1.6 <i>Suelos para la construcción de los estanques</i>	52
CAPÍTULO 4	
SIMULADOR DE SISTEMA ACUÍCOLA	63
4.1 CONSTRUCCIÓN DEL SIMULADOR.....	63
4.2 INSTALACIÓN HIDRÁULICA Y AIREACIÓN	66
4.3 INSTRUMENTACIÓN.....	67
CAPÍTULO 5	
5.1 MODELADO	72
5.2 IDENTIFICACIÓN	73
5.3 ALGORITMO DE IDENTIFICACIÓN	73
5.4 HERRAMIENTA DE IDENTIFICACIÓN DE MATLAB	74
CAPÍTULO 6	
EXPERIMENTACIÓN, RESULTADOS Y CONCLUSIONES	76
6.1 EXPERIMENTACIÓN.....	76
6.2 RESULTADOS	67
6.3 CONCLUSIONES.....	88
APÉNDICE	92

Índice de Figuras

<i>Figura 1 Producción mundial por captura</i>	2
<i>Figura 2 Producción mundial por acuicultura</i>	3
<i>Figura 3 Producción mundial por acuicultura en aguas marinas y aguas continentales</i>	4
<i>Figura 4 Suministro y utilización mundial de pescado (excluyendo a China)</i>	4
<i>Figura 5 Suministro y utilización de pescado en China</i>	5
<i>Figura 6 Producción pesquera por especie en México, 2000</i>	7
<i>Figura 7 Evolución de la producción pesquera nacional, 1986-2000</i>	7
<i>Figura 8 Producción pesquera por entidad federativa, 2000.</i>	8
<i>Figura 9 Evolución del consumo aparente de productos pesqueros per cápita en México, 1995 – 2000.</i>	9
<i>Figura 10 Consumo y movimientos transfronterizos de productos pesqueros, 1994 – 2000.</i>	10
<i>Figura 11 Producción acuícola según litoral en México, 1990 – 2000.</i>	11
<i>Figura 12 Producción de acuicultura por entidad federativa, 2001.</i>	12
<i>Figura 13 Producción acuícola según principales especies y litoral, 2000.</i>	13
<i>Figura 14 Aporte de la acuicultura a la producción nacional pesquera según principales especies, 2000.</i>	14
<i>Figura 15 Volúmenes e ingresos de los países líderes en exportación de tilapia</i>	15
<i>Figura 16 Molécula de agua.</i>	20
<i>Figura 17 Ciclo del pH en función de la variación diurna y nocturna</i>	33
<i>Figura 18 Efecto del pH en estanques piscícolas.</i>	37
<i>Figura 19 Variación diurna de la concentración de oxígeno disuelto en estanques con diferente densidad de plancton.</i>	35
<i>Figura 20 Intervalo y efectos de la concentración de oxígeno en estanques piscícolas.</i>	36
<i>Figura 21 Sensor de oxígeno disuelto.</i>	41
<i>Figura 22 Perfil vertical de los horizontes del suelo</i>	54
<i>Figura 23 Método de infiltración de agua en el suelo</i>	59
<i>Figura 24 Diagrama del simulador acuícola.</i>	64
<i>Figura 25 Esquema dimensional del simulador.</i>	64
<i>Figura 26 Simulador acuícola, vista exterior.</i>	65
<i>Figura 27 Simulador acuícola, vista interior.</i>	65
<i>Figura 28 Paneles solares utilizados para la calefacción del agua.</i>	66
<i>Figura 29 Diagrama de la instalación hidráulica y aireación del simulador acuícola.</i>	66
<i>Figura 30 Instalación hidráulica y soplador.</i>	67
<i>Figura 31 Bomba hidráulica utilizada.</i>	67
<i>Figura 32 Tipo de sensores utilizados (oxígeno disuelto)</i>	68
<i>Figura 33 Modulo de recepción para los transmisores.</i>	68
<i>Figura 34 Tarjeta de adquisición de datos utilizada.</i>	69

<i>Figura 35 Interfaz de potencia para los actuadores.</i>	70
<i>Figura 36 Interfaz de usuario del sistema acuícola.</i>	71
<i>Figura 37 Herramienta de Matlab para la identificación de los parámetros.</i>	75
<i>Figura 38 Balance energético de un animal en cultivo.</i>	77
<i>Figura 39 Enfermedades ocasionadas por mal manejo en</i>	79
<i>Figura 40 Enfermedades ocasionadas por mal manejo en la calidad</i>	79
<i>Figura 41 Simulador físico del sistema acuícola.</i>	80
<i>Figura 42 Entradas, salidas y perturbaciones del sistema.</i>	81
<i>Figura 43 Esquema del sistema con dos entradas (temperatura del aire exterior e interior al invernadero) y una salida (temperatura del agua).</i>	82
<i>Figura 44 Variables medidas del sistema.</i>	83
<i>Figura 45 Temperatura del agua vs Radiación solar.</i>	84
<i>Figura 46 Temperatura del agua Vs Temperatura del aire exterior.</i>	85
<i>Figura 47 Temperatura del agua Vs Temperatura del aire interior.</i>	86
<i>Figura 48 Simulaciones de la salida medida contra la salida del modelo generado.</i>	88

Índice de Tablas

<i>Tabla 1</i> Parámetros fisicoquímicos del agua para el cultivo de peces.....	47
<i>Tabla 2</i> Valores deseados de algunos parámetros fisicoquímicos del agua	48
<i>Tabla 3</i> Estimación de la renovación de agua en estanques para abastecimiento de oxígeno.	49
<i>Tabla 4</i> Vaciado de agua necesario para la reposición de las pérdidas de agua por evaporación e infiltración.	50
<i>Tabla 5</i> Necesidad de agua por ciclo de cultivo.....	52

Capítulo 1

Introducción

La pesca ha sido desde la prehistoria, una de las actividades más importantes de recolección de alimentos y materias primas. Las fuentes principales para su obtención son: los mares, ríos, lagos, entre otros. Estas fuentes son el hábitat natural de los animales, donde viven libremente y se reproducen de manera espontánea, al igual que son extraídos, en gran parte, por los humanos para su consumo.

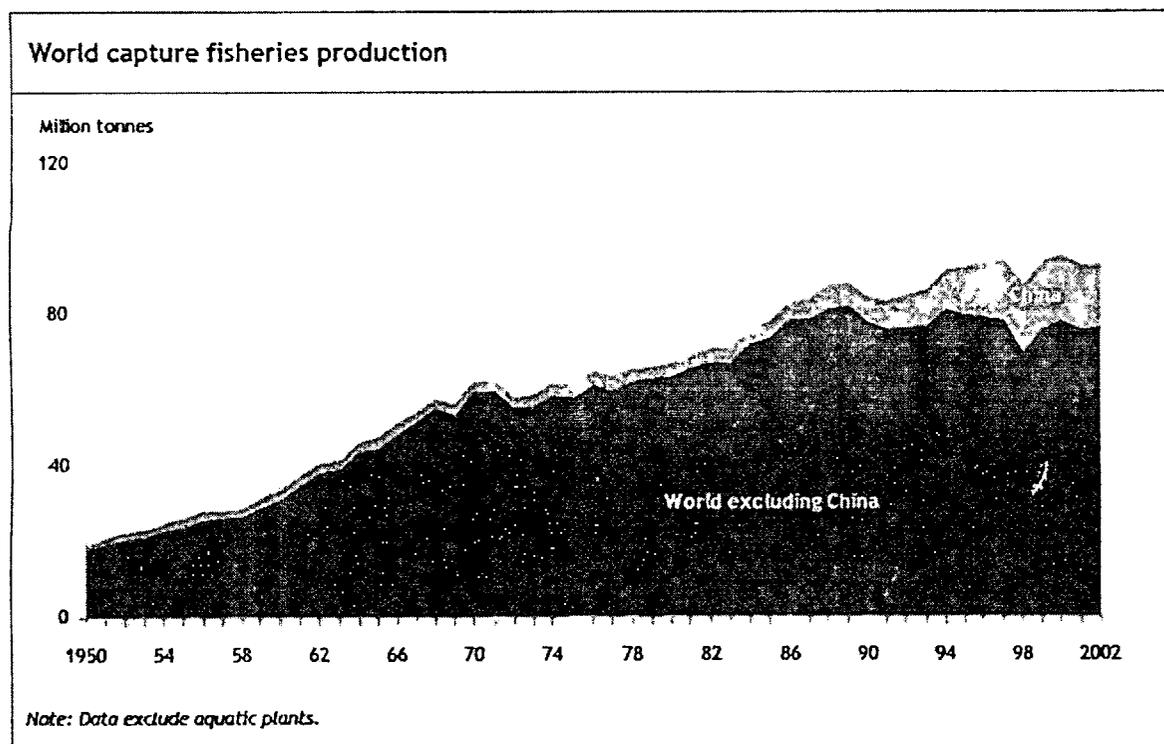
A través de los años el hombre logro mantener en lugares acondicionados estos animales para su cultivo. A esta actividad se le conoce como acuicultura. Formalmente la acuicultura se define como la explotación de organismos acuáticos, incluyendo peces, moluscos, crustáceos y plantas acuáticas. En la China antigua, durante la dinastía de Han Oriental (25 a 250 d. J. C.) fue documentada la producción combinada de arroz y peces. La cría de peces también era practicada por los antiguos romanos en la época imperial, la cual, más tarde se convertiría en parte del sistema de producción alimentario de los Monasterios Cristianos de Europa Central (Matthias, 2000).

Los principales objetivos de la acuicultura son: la producción de alimentos de alto valor nutritivo para el consumo humano; la contribución a la formación del ingreso y a la creación de empleo rurales; el mejoramiento de la captura y la pesca deportiva; el cultivo de especies ornamentales con propósitos estéticos; el control de malezas acuáticas o los riesgos de plagas y enfermedades, tanto para la agricultura como para los seres humanos; entre otros.

1.1 Panorama mundial

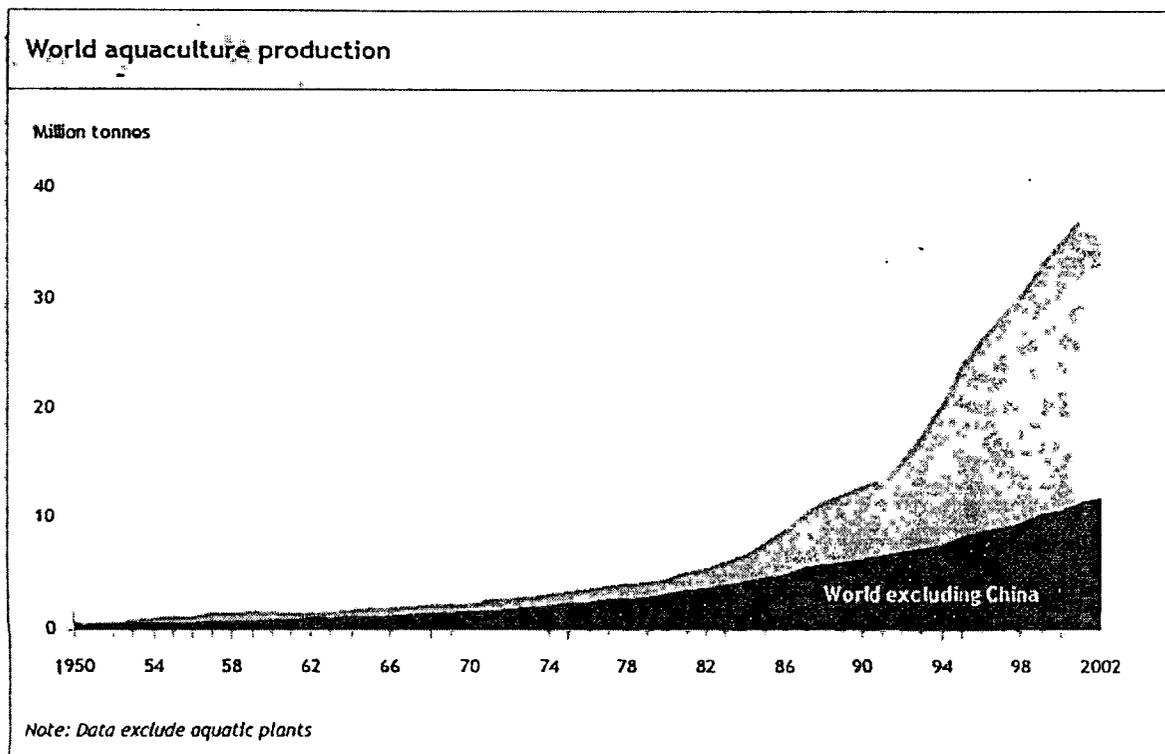
En 2002, la producción mundial de pescado fue de 133 millones de toneladas (vease figura 1), de las cuales 41.9 millones de toneladas provienen de la acuicultura (vease figura 2). La producción de captura que es de 93.2 millones de toneladas representa un ligero incremento del 0.4% comparado con la producción de 2001. Sin embargo, la producción de la acuicultura logro un incremento del 5.7% con respecto al 2001.

La producción por acuicultura reportada por China, siendo este país el mayor productor, representa un incremento del 6.6% en volumen y 8.3% en valor comparado con el año 2001. Su producción alcanza 27.8 millones de toneladas, siendo que el resto del mundo en conjunto producen 12 millones de toneladas, representando un 3.3% de incremento en volumen y un decremento del 5.9% en valor con respecto al año 2001.



Fuente: FAO, Fishery Information, Data and Statistics Unit November 2004.

Figura 1 Producción mundial por captura



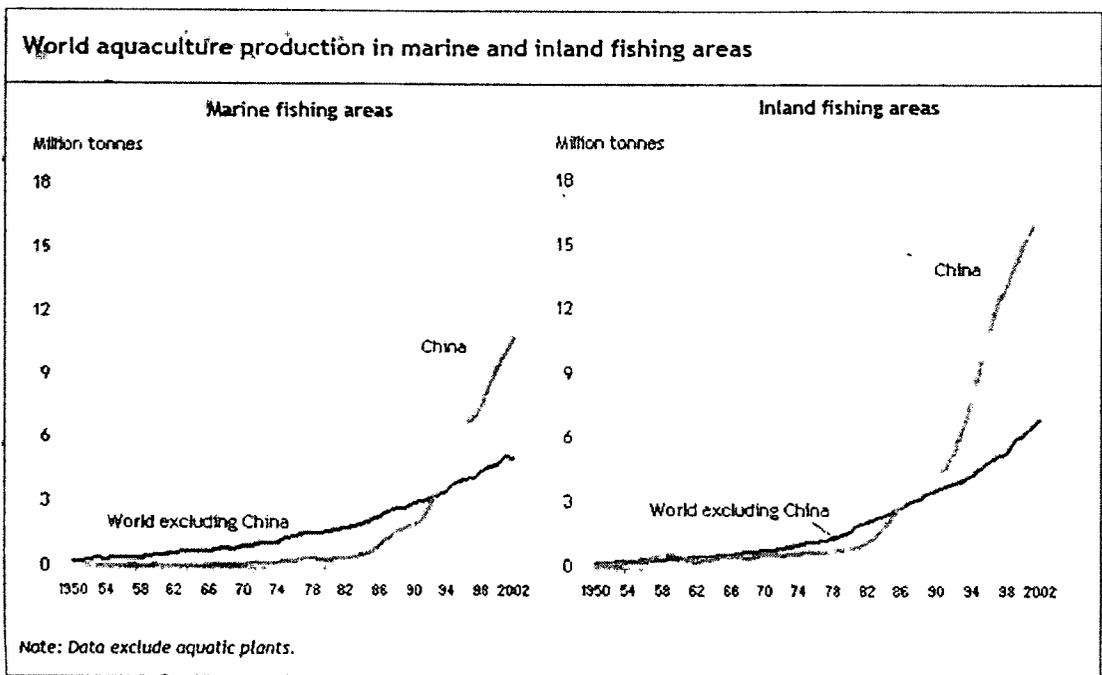
Fuente: FAO, Fishery Information, Data and Statistics Unit November 2004.

Figura 2 Producción mundial por acuicultura

En el 2002, las importaciones mundiales de productos pesqueros fueron US\$61400 millones, es decir, 3.4% por encima a las importaciones del 2001. El 82% de los productos pesqueros fueron concentrados en países desarrollados, particularmente en Japón, los Estados Unidos, y la Unión Europea. Japón fue el mayor importador con 22% del valor total de importaciones mundiales, luego los Estados Unidos con 16%.

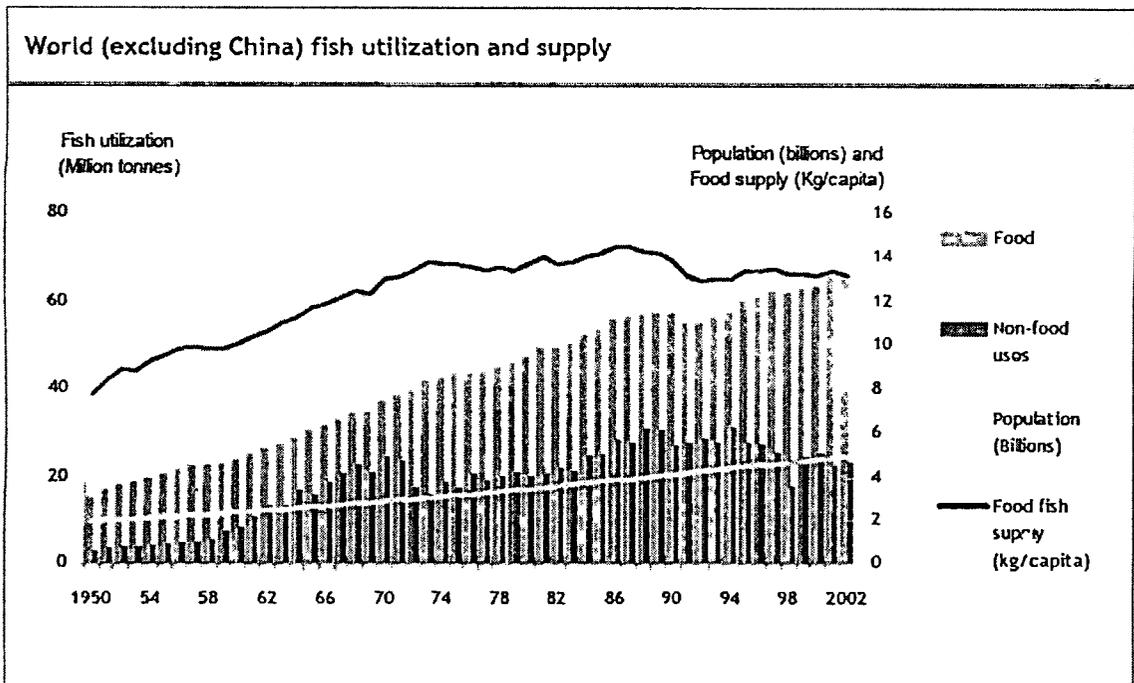
En cuanto a las exportaciones del 2002, China es el mayor exportador de productos pesqueros a nivel mundial. Lo que es importante remarcar es que desde 1999, China ha mantenido un crecimiento promedio anual del 24% en valor de exportación.

A continuación se muestran algunas graficas de la situación mundial de la acuicultura y la utilización de los productos piscícolas,



Fuente: FAO, Fishery Information, Data and Statistics Unit November 2004.

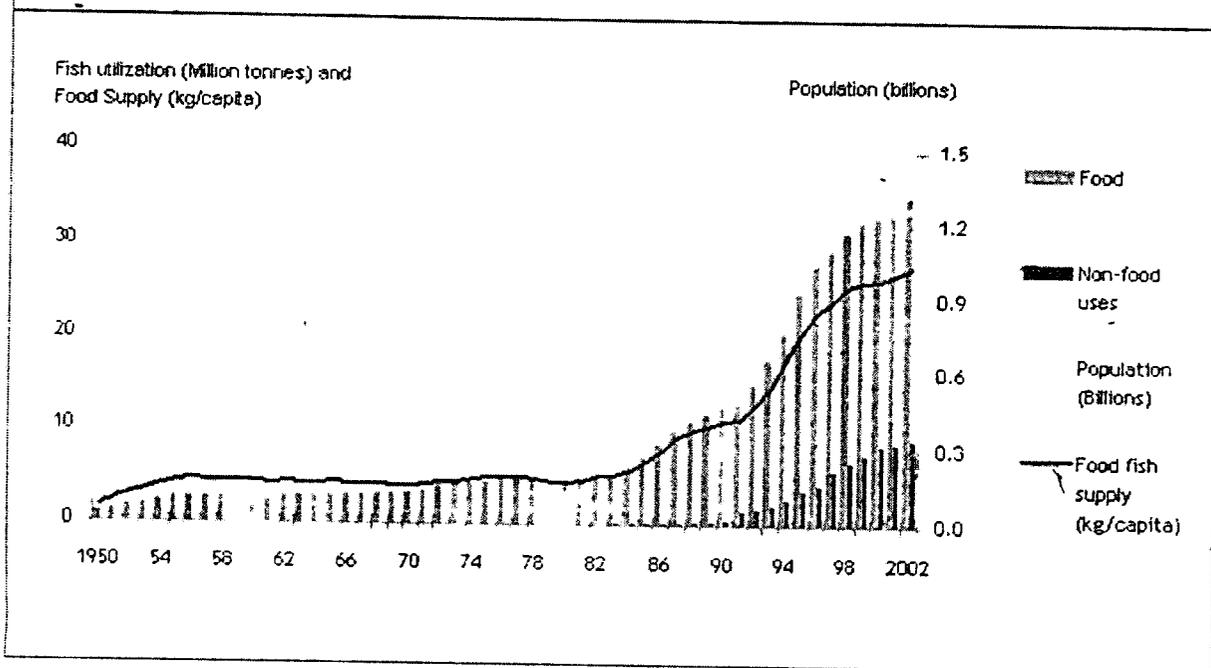
Figura 3 Producción mundial por acuicultura en aguas marinas y aguas continentales



Fuente: FAO, Fishery Information, Data and Statistics Unit November 2004.

Figura 4 Suministro y utilización mundial de pescado (excluyendo a China)

Fish utilization and supply in China



Fuente: FAO, Fishery Information, Data and Statistics Unit November 2004.

Figura 5 Suministro y utilización de pescado en China

1.2 Panorama en México

En México 268 727 personas dependen de manera directa de la producción pesquera para su subsistencia, población que ha crecido a una tasa del 1.23% anual entre 1992 y 2001, especialmente en el Pacífico (1.17% anual), mientras que en el Golfo el número de personas que se ocupa en este sector se ha mantenido esencialmente constante (0.6% de incremento anual) (Semarnat, 2002).

La mitad de la producción pesquera nacional descansa básicamente en tres pesquerías: la de los peces pelágicos menores (sardinias, anchovetas, etc.), que comprende la tercera parte de la pesca nacional; la de túnidos (fundamentalmente atunes, pero también incluye barriletes y bonitos) y la del camarón. La cuarta de las grandes pesquerías de altura, es conocida como «escama» porque aprovecha peces con esta característica (mojarras, huachinangos, meros, robalos, pargos, lisas, lenguados, cabrillas, jureles, etc.), aporta un enorme volumen al total nacional (vease figura 6).

El volumen total de la pesca mexicana se ha mantenido relativamente estable durante los últimos 15 años, oscilando entre 1.35 y 1.57 millones de toneladas anuales, sin una tendencia clara (vease figura 7).

El Pacífico se caracteriza por fuertes oscilaciones, asociadas en parte al fenómeno de El Niño, y por su mayor producción respecto de la costa atlántica y la pesca continental. En particular destacan las entidades que rodean al Mar de Cortés, como Sonora y Sinaloa, con una producción que supera las 200 mil toneladas al año (vease figura 8, tabla 1).

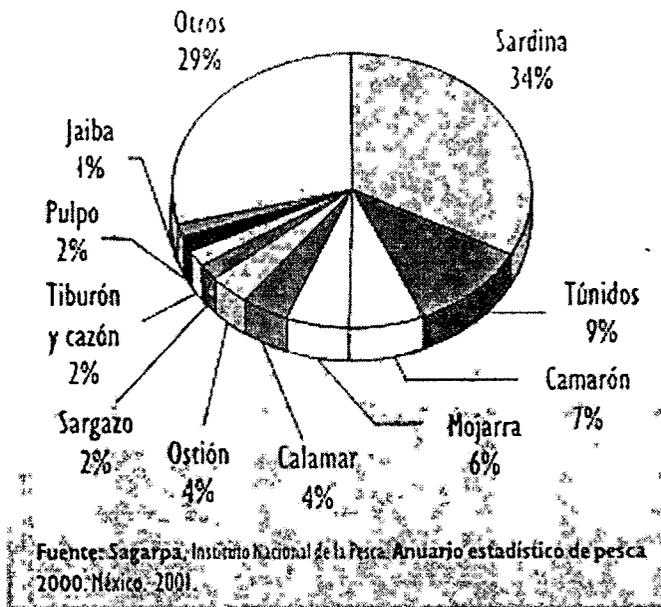


Figura 6 Producción pesquera por especie en México, 2000

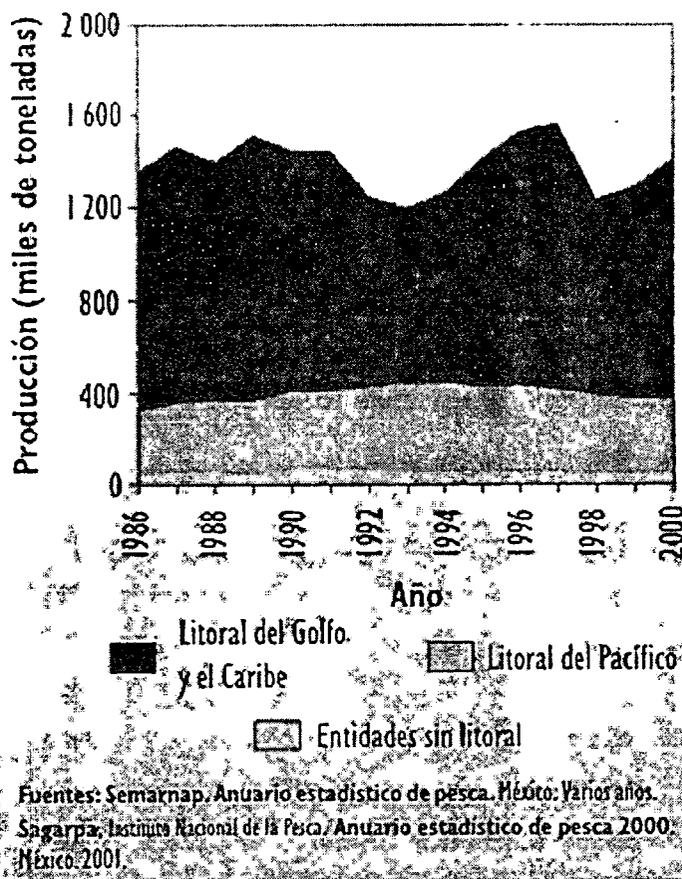


Figura 7 Evolución de la producción pesquera nacional, 1986-2000

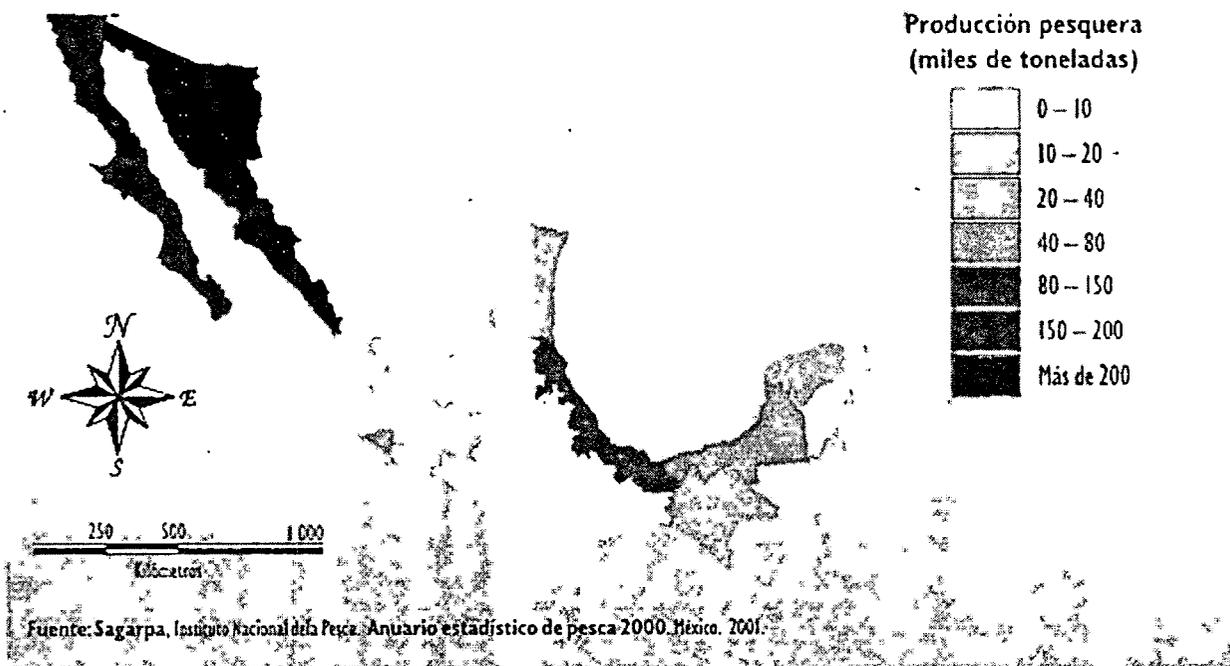


Figura 8 Producción pesquera por entidad federativa, 2000.

El consumo de pescado no tiende hacia el aumento y sigue cercanamente las oscilaciones de la producción (vease figura 9).

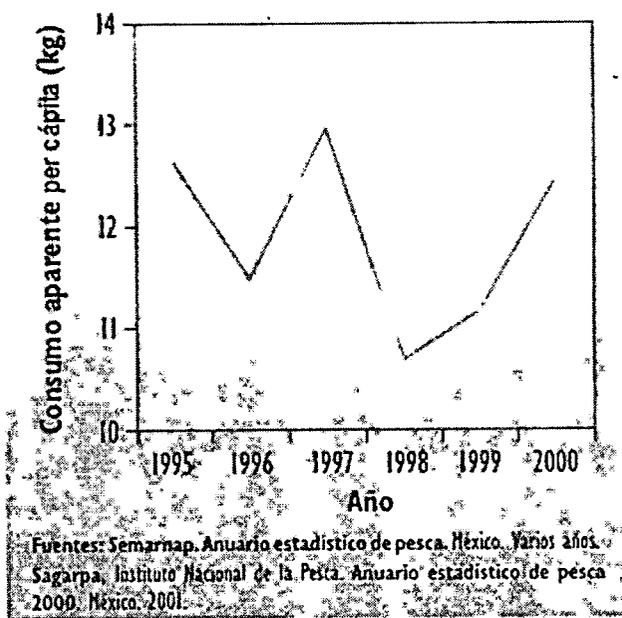


Figura 9 Evolución del consumo aparente de productos pesqueros per cápita en México, 1995 – 2000.

Durante los años de baja pesquería, como 1998, el consumo nacional no parece satisfacerse con productos importados. De hecho, en ese año hubo proporcionalmente más exportaciones y menos importaciones que en 2000. Desde 1996 se puede apreciar una tendencia: el consumo de importación crece anualmente mientras que las exportaciones pierden terreno (vease figura 10).

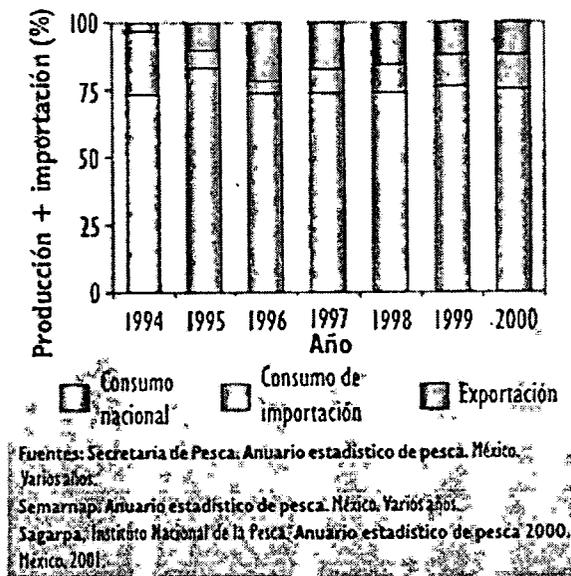


Figura 10 Consumo y movimientos transfronterizos de productos pesqueros, 1994 – 2000.

Ante el agotamiento paulatino de muchos recursos marinos, la promoción de fuentes alternativas de producción es una forma de reducir la presión sobre la vida silvestre, a la par que se garantiza el abasto. Si bien México aún está lejos de otros países en cuanto a su producción acuícola, se han dado avances importantes en este sentido a lo largo de las últimas décadas al grado de que actualmente constituye el 13% de la producción pesquera nacional. El volumen generado por la acuicultura ha oscilado entre 160 y 200 mil toneladas, sin que haya habido una tendencia sensible a lo largo del tiempo (vease figura 11),

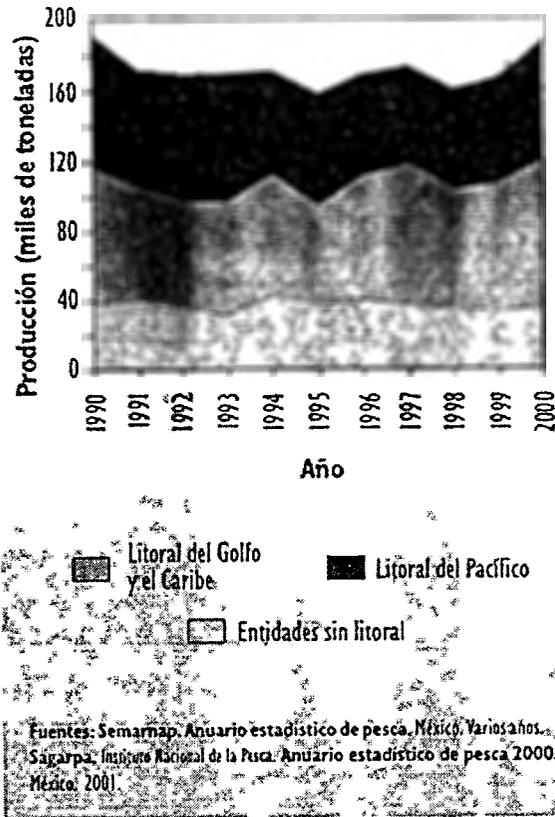


Figura 11 Producción acuícola según litoral en México, 1990 – 2000.

Los mayores productores son los estados de Veracruz y Tabasco (especializados en ostión), Sinaloa y Sonora (entidades productoras de camarón) y Michoacán (que cría carpa en primer término) (Figura 12). Esto refleja las diferencias regionales en la acuicultura. Si bien la mojarra es la especie que se produce en mayor cantidad, está en segundo lugar en ambos litorales y los estados del interior del país. En primer lugar en estas regiones se encuentra el camarón en el Pacífico, el ostión en el Golfo y el Caribe y la carpa en las entidades sin litoral (figura 13).

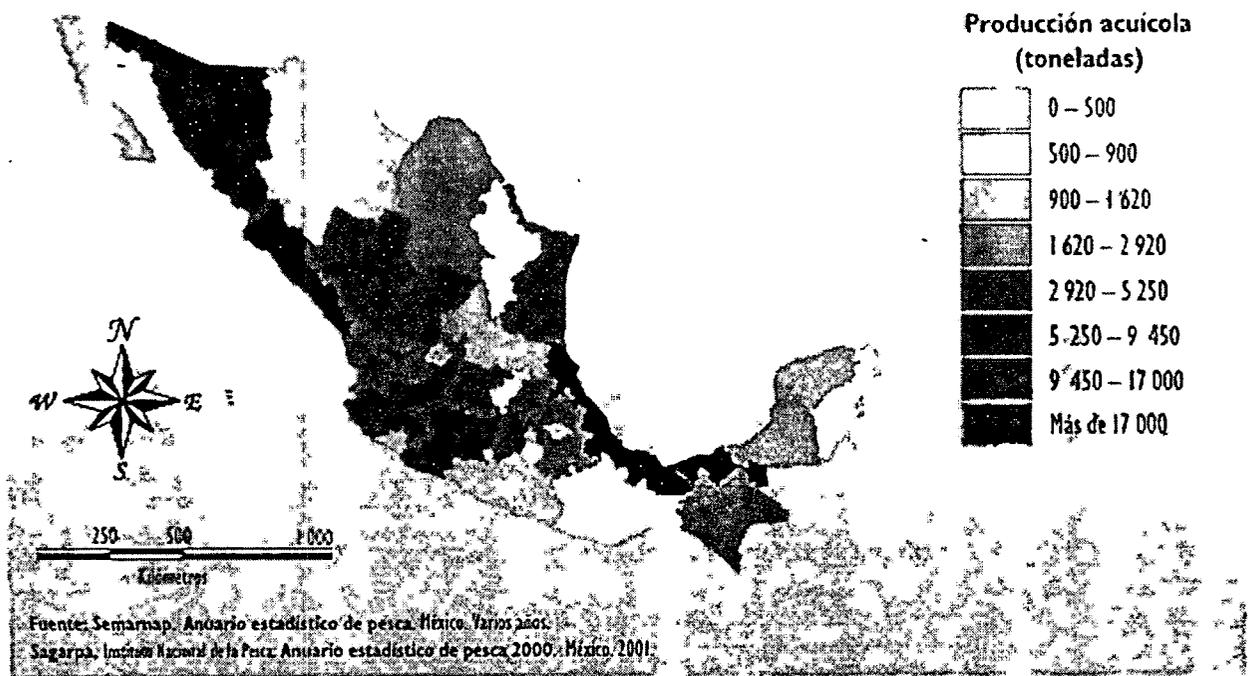
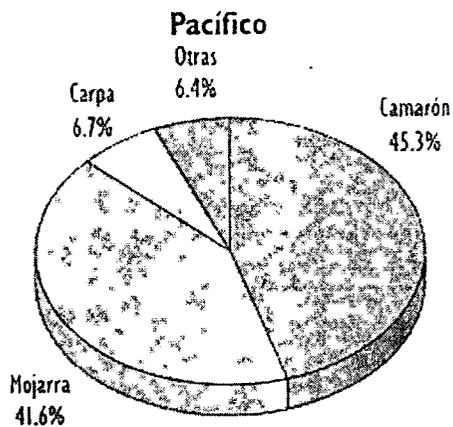
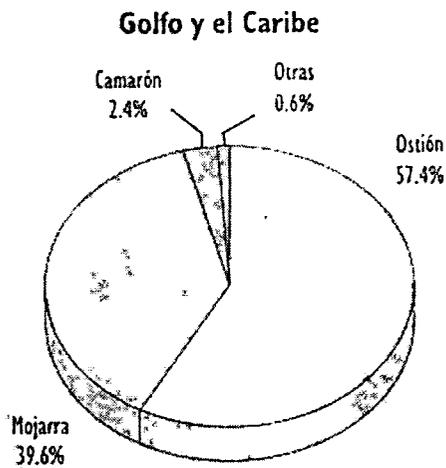
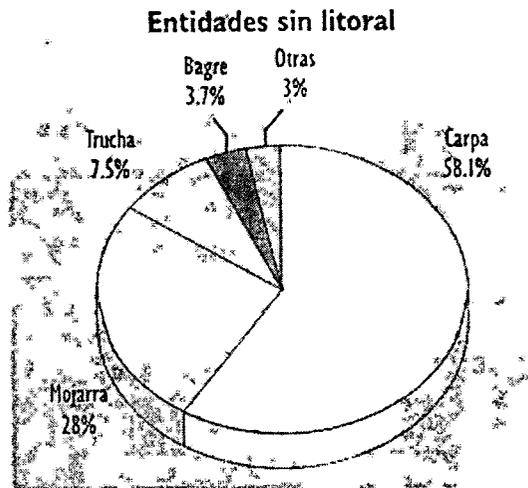


Figura 12 Producción de acuicultura por entidad federativa, 2001.



Fuentes: Semarnap. Anuario estadístico de pesca. México. Varios años. Sagarpa, Instituto Nacional de la Pesca. Anuario estadístico de pesca 2000, México. 2001.

Figura 13 Producción acuícola según principales especies y litoral, 2000.

Las especies que aportan más a la producción de la acuicultura nacional son todas las especies de agua dulce (tilapia, trucha, bagre), que representan el 70% del total y el 80% de la capacidad acuícola instalada (medida como volumen). De hecho, el cultivo de estas especies es el principal proveedor para consumo (vease figura 14).

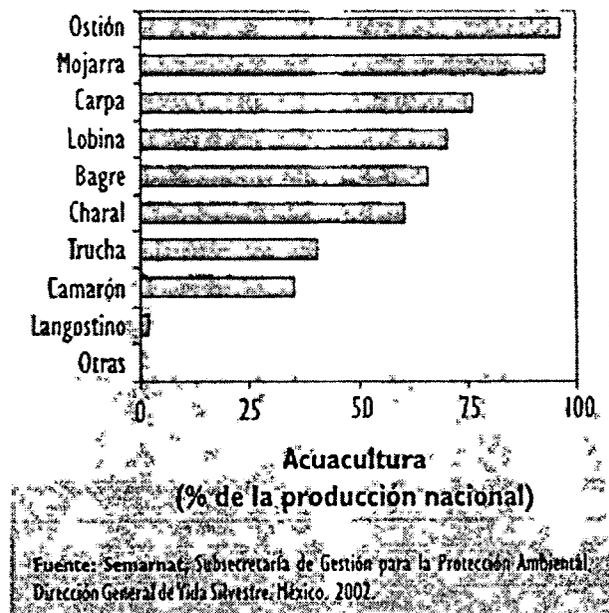
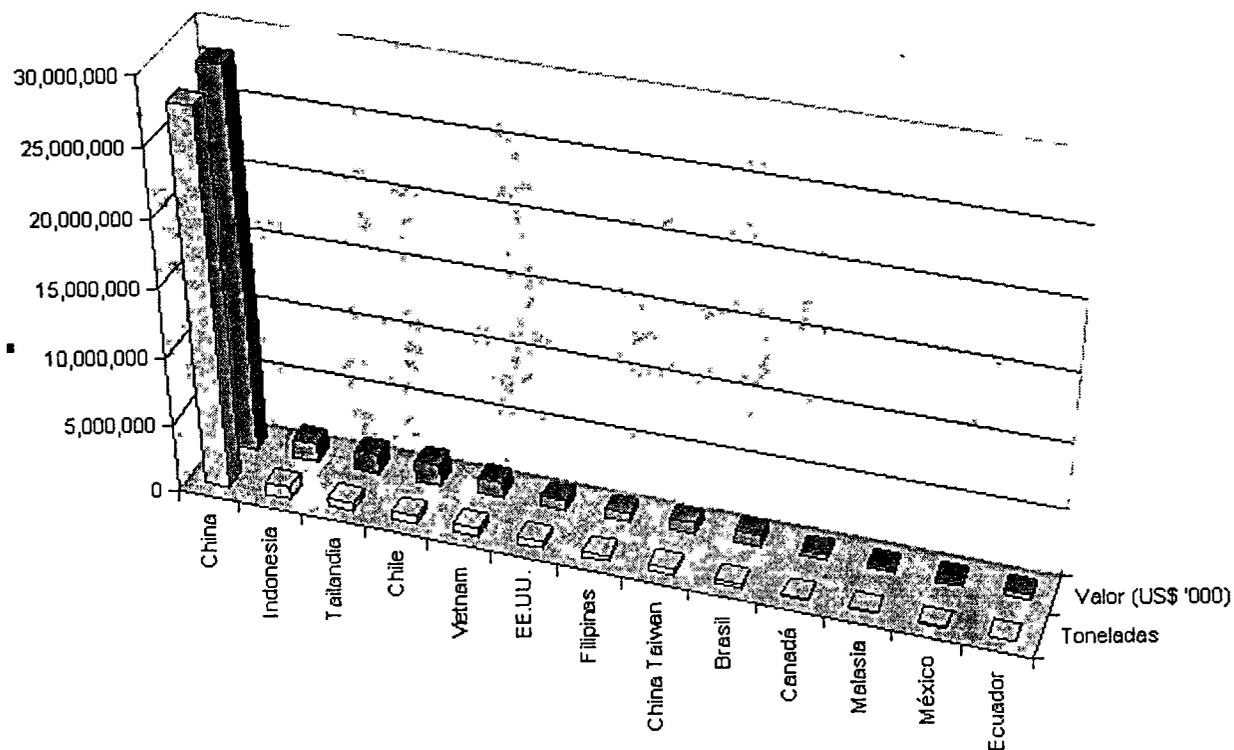


Figura 14 Aporte de la acuicultura a la producción nacional pesquera según principales especies, 2000.

La figura 15 muestra las estadísticas a nivel mundial de la producción de tilapia,



Fuente: Panorama Acuícola Magazine, Septiembre/Octubre del 2004, Vol. 9, No. 6, pagina 56

Figura 15 Volúmenes e ingresos de los países líderes en exportación de tilapia

Capítulo 2

Calidad del agua

En México disponemos de recursos hídricos importantes, que están representados por 3.3 millones de kilómetros cuadrados de mar patrimonial, 1.6 millones de hectáreas de lagunas costeras y 1.3 millones de hectáreas epicontinentales, en los cuales se realizan actividades como la pesca y el cultivo de organismos acuáticos de importancia económica (Arredondo, 1998).

Sin embargo el acelerado crecimiento de la población, la creciente industrialización y la presión pesquera sin control han propiciado que los recursos acuáticos, así como las especies animales y vegetales disminuyan su capacidad productiva; la extracción, transformación y refinación de petróleo han ocasionado daños irreversibles a los ecosistemas costeros; la industria textil y la de la caña de azúcar han afectado los ríos y la contaminación doméstica ha alterado el equilibrio de la mayor parte de los sistemas acuáticos. Por esta razón es importante realizar monitoreos constantes de la calidad del agua en los ecosistemas donde sea posible realizar la actividad acuícola con alta rentabilidad.

La calidad del agua en la acuicultura tiene un papel relevante debido a que algunos parámetros fisicoquímicos y contaminantes que pueden hacer fracasar un proyecto y comprometer la producción de una granja acuícola. El propósito principal del manejo de la calidad del agua de cualquier sistema de acuicultura es regular y mantener las condiciones óptimas para la sobrevivencia y crecimiento de los organismos en condiciones de cultivo.

El manejo de la calidad del agua es un aspecto fundamental en los sistemas de acuicultura, sobre todo en los sistemas de producción intensiva, donde se suministran entradas extras de energía, como es el caso de la fertilización y la aplicación de alimentos balanceados. Para agrupar los parámetros que indican la calidad de agua de un sistema, se consideran dos criterios (Arredondo, 1998), el primero considera a los componentes del agua y los separa en tres grupos de acuerdo a su importancia:

- Los iones que forman las sales solubles de los ácidos fuertes, los cuales provienen de la disolución de las evaporizas que están presentes en el fondo de la cubeta del cuerpo de agua, como es el caso del cloruro de sodio o del sulfato de magnesio.
- Los ácidos débiles en sus diferentes etapas de disociación, que funcionan como amortiguadores; estos constituyen parte de la reserva alcalina y están limitados por los productos de disolubilidad relativamente moderados, como el sílice, los carbonatos y los metales alcalino-térreos.
- Los componentes del tercer grupo tienen una dependencia directa con el potencial de óxido-reducción o bien están relacionados con la presencia de organismos; son consumidos por ellos o cambian con el pH que aumenta inevitablemente con su reserva alcalina. A este grupo pertenecen elementos como el fósforo, hierro, manganeso y otros.

El segundo, se basa en la utilización práctica de los parámetros de la calidad del agua en la acuicultura y considera que cada elemento o compuesto químico puede afectar la calidad del agua estableciendo relaciones energéticas entre variables y las separa en dos grupos,

- Conservativas: Son independientes de la actividad biológica y pueden ser afectadas por procesos de orden físico. En este grupo se incluyen la temperatura, salinidad, alcalinidad y dureza total entre otras.
- No conservativas: Son aquellas que se alteran por la actividad biológica, como la productividad primaria, oxígeno disuelto, fósforo y nitrógeno.

En los sistemas utilizados para la acuicultura, la producción o rendimiento expresado en términos de kilogramos por unidad de superficie o volumen. En estos se incrementan los problemas de la calidad del agua, por el uso de fertilizantes químicos u orgánicos, el alimento suplementario o la combinación de ambos, que inciden en la disponibilidad de nutrientes. Por lo que antes de manipular un cultivo es necesario evaluar las características de la calidad del agua, que pudieran afectar el manejo de las especies y los planes de trabajo del acuicultor. Dentro de estas características se encuentra la acidez de las aguas, que limita seriamente la productividad y la turbiedad debida a una elevada cantidad de arcillas en suspensión que disminuye la penetración de la luz y oculta el efecto de los fertilizantes. También es importante conocer la cantidad y composición del fertilizante, ya que una excesiva aplicación puede causar problemas con el contenido de oxígeno disuelto en el agua y una dosis

insuficiente puede dar como resultado que debido a los bajos niveles de turbiedad, una elevada penetración de luz propiciando el establecimiento y la ingestación de macrofitas acuáticas sumergidas, como *Potamogeton spp* y *Zanichellia palustris*, entre otras.

Los problemas de la calidad del agua se hacen más complejos cuando se aplica en forma constante alimento balanceado y la densidad de los organismos en cultivo es alta. Aunque los peces consumen una proporción elevada del alimento balanceado, un gran porcentaje del componente dietético es excretado al agua como desecho metabólico. Estos desechos incluyen anhídrido carbónico, amonio no ionizado, fósforo y otros elementos que estimulan el crecimiento del plancton.

El amonio no ionizado ($N-NH_3$) es tóxico para los peces y éste a su vez puede servir de sustrato para la producción de nitritos, que también son tóxicos en concentraciones elevadas. El anhídrido carbónico en concentraciones altas, interfiere en la utilización del oxígeno disuelto y en la medida que la proporción de alimento balanceado se aumenta, también lo hacen los metabolitos tóxicos.

Hay muchos problemas que se presentan con la calidad del agua en los sistemas de cultivo, pero los más frecuentes son.

- El crecimiento no controlado del fitoplancton por exceso de fertilización.
- Caídas bruscas en el contenido de oxígeno disuelto por el mal manejo de la calidad del agua en los estanques.
- Elevada concentración de metabolitos tóxicos debido a la aplicación de alimentos balanceados, florecimiento de microalgas o deterioro de la calidad del agua.

2.1 El Agua

El agua contiene iones hidrógeno en concentración de 1×10^{-7} moles por litro (1 mol de $H_2O = 18.0153$ gr), y iones hidróxido en la misma concentración. Estos iones se forman por la disociación del agua:



Cuando se adiciona una pequeña cantidad de ácido al agua pura, la concentración del ión hidrógeno aumenta y disminuye entonces la del ión hidróxido, pero no se anula.

El agua es un líquido transparente e incoloro en capas delgadas. En capas gruesas tiene un color verde azulado. Las propiedades físicas del agua se utilizan para definir muchas constantes y unidades físicas. El punto de congelación del agua (saturada de aire a 1 atm de presión) se elige como 0 °C, y el punto de ebullición a 1 atm se toma como 100 °C. Se eligió como unidad de masa en el sistema métrico decimal la de 1 cm³ de agua a 4 °C (temperatura de su máxima densidad), cuyo peso es aproximadamente 1 gr.

Cuando desciende la temperatura, la mayoría de las sustancias disminuyen de volumen, aumentando en consecuencia su densidad. El agua presenta la muy rara propiedad de tener una temperatura para la cual su densidad es máxima. Esta temperatura es 4 °C. Enfriándola por debajo de esta temperatura, el volumen de una masa de agua experimenta un aumento.

Un fenómeno relacionado con esto es el aumento de volumen que experimenta el agua al congelarse.

2.1.1 La molécula de agua

La fórmula del agua es H₂O. Los pesos relativos del hidrógeno y del oxígeno en esta sustancia son 2.016:16.000. Los dos átomos de hidrogeno están separados entre sí por 105°, adyacentes al átomo de oxígeno, de forma que la molécula es asimétrica, cargada positivamente de lado del hidrógeno y negativamente del lado del oxígeno. Por esta razón, se dice que el agua es bipolar. Esta hace que las moléculas se aglomeren, el hidrógeno de una molécula atrae al oxígeno de la molécula vecina. La unión de las moléculas como resultado de esta fuerza de atracción recibe el nombre de *puentes de hidrógeno*.

Una de las consecuencias de los puentes de hidrógeno es que las moléculas de H₂O no pueden abandonar la superficie de un cuerpo tan fácilmente como lo harían de no existir esta atracción intermolecular. La energía requerida para romper el enlace con el hidrógeno y liberar una molécula de H₂O para formar vapor es mucho mayor que la requerida por otros compuestos químicos comunes. A causa de esto, el vapor de agua tiene un alto contenido

energético y es un medio efectivo para transferir energía durante las operaciones de una industria, en la construcción y en los hogares.

La congelación del agua es bastante distinta a la de otros líquidos. Los puentes de hidrógeno producen un rearrreglo cristalino que hace que el hielo se expanda más allá de su volumen líquido original, de forma que su densidad es menor que la del líquido, y como consecuencia, el hielo flota.

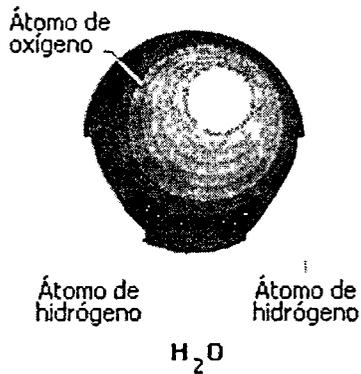


Figura 16 Molécula de agua.

2.1.2 Electrolitos.

El agua se denomina el disolvente universal. Cuando se disuelve a un mineral, se producen nuevos materiales a partir de los átomos liberados del mineral. Estas partículas fundamentales se llaman iones. La ruptura de un compuesto químico mediante su disolución en agua forma cationes, cargados positivamente y aniones, cargados negativamente. En general, un aumento en la temperatura del agua provoca un aumento en la solubilidad de la mayor parte de las sales. Algunas excepciones importantes son $CaCO_3$, $CaSO_4$, $MgCO_3$ y $Mg(OH)_2$, estas se vuelven menos solubles al aumentar la temperatura.

2.1.3 Contaminación del agua

2.1.3.1 Importancia del problema

Los ríos, lagos y mares recogen, desde tiempos inmemoriales, las basuras producidas por la actividad humana.

El ciclo natural del agua tiene una gran capacidad de **purificación**. Pero esta misma facilidad de regeneración del agua, y su aparente abundancia, hace que sea el vertedero habitual en el que arrojamos los residuos producidos por nuestras actividades. Pesticidas, desechos químicos, metales pesados, residuos radiactivos, etc., se encuentran, en cantidades mayores o menores, al analizar las aguas de los más remotos lugares del mundo. Muchas aguas están contaminadas hasta el punto de hacerlas peligrosas para la salud humana, y dañinas para la vida.

La degradación de las aguas como en la desembocadura del Nilo, hay niveles altos de contaminación desde hace siglos; pero ha sido en este siglo cuando se ha extendido este problema a ríos y mares de todo el mundo.

Primero fueron los ríos, las zonas portuarias de las grandes ciudades y las zonas industriales las que se convirtieron en sucias cloacas, cargadas de productos químicos, espumas y toda clase de contaminantes. Con la industrialización y el desarrollo económico este problema se ha ido trasladando a los países en vías de desarrollo, a la vez que en los países desarrollados se producían importantes mejoras.

2.1.3.2 Alteraciones físicas del agua

Color. El agua no contaminada suele tener ligeros colores rojizos, pardos, amarillentos o verdosos debido, principalmente, a los compuestos húmicos, férricos o los pigmentos verdes de las algas que contienen.

Las aguas contaminadas pueden tener muy diversos colores pero, en general, no se pueden establecer relaciones claras entre el color y el tipo de contaminación.

Olor y sabor. Compuestos químicos presentes en el agua como los fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materias orgánicas en descomposición o esencias liberadas por diferentes algas u hongos pueden dar olores y sabores muy fuertes al agua, aunque estén en muy

pequeñas concentraciones. Las sales o los minerales dan sabores salados o metálicos, en ocasiones sin ningún olor.

Temperatura. El aumento de temperatura disminuye la solubilidad de gases (oxígeno) y aumenta, en general, la de las sales. Aumenta la velocidad de las reacciones del metabolismo, acelerando la putrefacción.

Materiales en suspensión. Partículas como arcillas, limo y otras, aunque no lleguen a estar disueltas, son arrastradas por el agua de dos maneras: en suspensión estable (disoluciones coloidales); o en suspensión que sólo dura mientras el movimiento del agua las arrastra. Las suspendidas coloidalmente sólo precipitarán después de haber sufrido coagulación o floculación (reunión de varias partículas).

Radiactividad. Las aguas naturales tienen unos valores de radiactividad, debidos sobre todo a isótopos del K. Algunas actividades humanas pueden contaminar el agua con isótopos radiactivos.

Espumas. Los detergentes producen espumas y añaden fosfato al agua (eutrofización). Disminuyen mucho el poder autodepurador de los ríos al dificultar la actividad bacteriana. También interfieren en los procesos de floculación y sedimentación en las estaciones depuradoras.

Conductividad. El agua pura tiene una conductividad eléctrica muy baja. El agua natural tiene iones en disolución y su conductividad es mayor y proporcional a la cantidad y características de esos electrolitos. Por esto se usan los valores de conductividad como índice aproximado de concentración de solutos. Como la temperatura modifica la conductividad las medidas se deben hacer a 20°C.

2.1.3.3 Alteraciones químicas del agua

pH. Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO₂ disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos; por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales, por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo. La principal sustancia básica en el agua natural es el carbonato cálcico que puede reaccionar con el CO₂ formando un sistema tampón carbonato/bicarbonato.

Las aguas contaminadas con vertidos mineros o industriales pueden tener pH muy ácido. El pH tiene una gran influencia en los procesos químicos que tienen lugar en el agua, actuación de los floculantes, tratamientos de depuración, etcétera.

Oxígeno disuelto (OD). Las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, septicización, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida.

Materia orgánica biodegradable: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). La DBO₅ es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Se mide a los cinco días. Su valor da idea de la calidad del agua desde el punto de vista de la materia orgánica presente y permite prever cuanto oxígeno será necesario para la depuración de esas aguas e ir comprobando cual está siendo la eficacia del tratamiento depurador en una planta.

Materiales oxidables: Demanda Química de Oxígeno (DQO). Es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (normalmente dicromato potásico en medio ácido). Se determina en tres horas y, en la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO. Sin embargo la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto y no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales.

Nitrógeno total. Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales. Su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización.

El nitrógeno se presenta en muy diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas. En los análisis habituales se suele determinar el NTK (nitrógeno total Kendahl) que incluye el nitrógeno orgánico y el amoniacal. El contenido en nitratos y nitritos se da por separado.

Fósforo total. El fósforo como el nitrógeno, es nutriente esencial para la vida. Su exceso en el agua provoca eutrofización.

El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La determinación se hace convirtiendo todos ellos en ortofosfatos que son los que se determinan por análisis químico.

Aniones

Cloruros indican salinidad; Nitratos indican contaminación agrícola

Nitritos indican actividad bacteriológica

Fosfatos indican detergentes y fertilizantes

Sulfuros indican acción bacteriológica anaerobia (aguas negras, etc.)

Cianuros indican contaminación de origen industrial

Fluoruros en algunos casos se añaden al agua para la prevención de las caries, aunque es una práctica muy discutida

Cationes

Sodio indica salinidad

Calcio y magnesio están relacionados con la dureza del agua

Amonio contaminación con fertilizantes y heces

Metales pesados de efectos muy nocivos se bioacumulan en la cadena trófica.

Compuestos orgánicos. Los aceites y grasas procedentes de restos de alimentos o de procesos industriales (automóviles, lubricantes, etc.) son difíciles de metabolizar por las bacterias y flotan formando películas en el agua que dañan a los seres vivos.

Los fenoles pueden estar en el agua como resultado de contaminación industrial y cuando reaccionan con el cloro que se añade como desinfectante forman clorofenoles que son un serio problema porque dan al agua muy mal olor y sabor.

2.1.3.4 Alteraciones biológicas del agua

Este tipo de alteraciones están principalmente ligados a la cuestión de las enfermedades en los organismos cultivados, y se manifiestan de las siguientes formas,

- Bacterias coniformes indican desechos fecales.
- Virus indican desechos fecales y restos orgánicos.
- Animales, plantas y microorganismos diversos indican eutrofización.

El agua es una de las sustancias químicas más importantes, y uno de los principales constituyentes de los organismos y del medio en que vivimos. Sus propiedades físicas son

notablemente diferentes de las de otras sustancias, de suerte que tales anomalías determinan de manera muy particular la naturaleza del mundo físico y biológico.

2.2 Factores que afectan el crecimiento y sobre vivencia de las tilapias en cultivo

Existe un intervalo adecuado de factores fisicoquímicos y biológicos que son necesarios para garantizar el éxito en el cultivo de tilapias. Dentro de los más importantes que pueden llegar a afectar el crecimiento y la sobrevivencia se incluyen, la disponibilidad de alimento y factores como la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, hidrogeniones (H^+), dióxido de carbono (CO_2), amonio tóxico (NH_3), ácido sulfhídrico (H_2S) y nitritos (NO_2).

2.2.1 Temperatura

Una característica importante de los peces relacionada directamente con la temperatura, es que son "poiquiloterms" o sea, que son un grupo de animales comúnmente conocidos como de "sangre fría"; a diferencia de las aves y los mamíferos que son "homeoterms" o de "sangre caliente". Esto significa que mientras estos últimos mantienen la temperatura corporal constante (como por ejemplo, el ser humano), los primeros no poseen tal capacidad; siendo su temperatura corporal la existente en el medio acuático que los rodea y en el que pasan toda su vida; o bien, con el que están relacionados en su reproducción y parte del ciclo de vida.

Todos los procesos biológicos que se cumplan, estarán por lo tanto, regidos fuertemente por el factor temperatura. Estos procesos biológicos (conocidos como procesos metabólicos porque atañen al metabolismo de los animales) y que son comandados principalmente por la temperatura ambiente, abarcan fundamentalmente dos en especial: la respiración, y la excreción.

Desde el punto de vista de la energía, los animales de sangre fría, poseen determinadas ventajas frente a aquellos de sangre caliente y estas son las que aprovecha la acuicultura, en términos económicos.

La temperatura tiene un efecto en los procesos químicos y biológicos en un estanque de cultivo, al grado que un aumento de 10 °C causa que las tasas de reacciones químicas y biológicas aumenten el doble o el triple. Por tanto, los peces consumirán dos a tres veces más oxígeno a 30 °C que a 20 °C. El incremento en la tasa de consumo de OD causado por el aumento de 10 °C en la temperatura se llama *Q10*. Además, la temperatura junto con la salinidad determinan la solubilidad del oxígeno en el agua e influye en la tasa de reproducción primaria y en las reacciones metabólicas del crecimiento de los peces. El rango óptimo de la tilapia se encuentra entre 24 y 29 °C (Morales, 1991).

2.2.1.1 Influencia de la temperatura en las tilapias

El incremento de la temperatura aumenta el metabolismo y, en consecuencia, los requerimientos energéticos que se satisfacen mediante el consumo de materia orgánica. También influye en la reproducción y la supervivencia de los estadios larvarios.

2.2.2 Salinidad

Las tilapias presentan una gran habilidad para adaptarse a las diferentes concentraciones de sal, sin embargo han observado que a concentraciones muy altas (30 a 40 ppm) algunas especies no pueden reproducirse, debido a la presión osmótica sobre los huevecillos. A concentraciones por debajo de 20 ppm la tilapia se reproduce sin problemas, disminuyendo su fertilidad conforme aumenta esta concentración. La salinidad influye en la distribución de los organismos, y a nivel guncional, en la reproducción, nutrición y crecimiento, con diferencias entre especies de tilapia.

2.2.3 pH

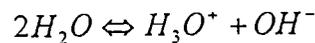
2.2.3.1 Ácidos y bases.

Cabe definir un ácido como una sustancia que contiene hidrógeno y que al disolverse en el agua libera iones de este elemento. Una base puede definirse como una sustancia que contiene el ión hidróxido o el grupo hidroxilo que se disocia en solución acuosa en forma de ión hidróxido. Las soluciones ácidas contienen un característico sabor agrio debido a los iones hidronio, H_3O^+ , y las soluciones básicas poseen sabor alcalino, causado por el ión hidróxido

OH^- . También se define un ácido como un donador de protones, y una base como un receptor de estas partículas.

2.2.3.2 Concentración del ión hidronio.

El agua pura consta de moléculas H_2O , iones hidrogeno y de iones hidróxido en sendas concentraciones de alrededor de 1×10^{-7} moles por litro, a 25°C . Estos iones se forman por *autoprotólisis* del agua, es decir, por reacción de moléculas que actúan como ácidos con otras que actúan como bases, reacción que se llama también ionización del agua:



Toda molécula que, como las del agua, puede perder un protón o bien incorporárselo se dice que es una molécula anfiprótica (del griego, *amphi*, *ambos*). Solamente las moléculas o los iones anfipróticos pueden sufrir la autoprotólisis.

2.2.3.3 Relación del pH con los organismos acuáticos

El grado de acidez o alcalinidad del medio, afecta profundamente a ciertos organismos, tanto vegetales como animales.

Cuanto más baja es la posición en la escala biológica, mayor es la incidencia del pH en los organismos. Por lo tanto la algas, los infusorios, bacterias y en general los organismos elementales, son extremadamente sensibles a las variaciones de este factor, mucho más que los organismos superiores o con mayor grado de desarrollo.

La mayoría de los peces de acuario requieren un pH que oscila entre 6.8 y 7.2. Valores por encima o debajo de esos valores son aceptados por muy pocas especies.

Para cada especie animal acuática existe un valor de pH óptimo para su desarrollo.

Al transferir un pez de un medio a otro que tenga más de 0.2 de pH de diferencia deberá ser previamente adaptado, agregando agua por goteo lento hasta equiparar los rangos de pH del medio del que proviene y el que será su futuro hábitat.

Aumento del pH. Una elevación del pH produce en ciertos peces alcalosis. Es decir una enfermedad abiótica que podría compararse con una intoxicación. No es lo mismo que se eleve el pH uno o dos puntos para un pez de aguas alcalinas que para un pez de aguas ácidas. Aunque en ambos casos sufrirían las consecuencias, el pez cuyo metabolismo esta adaptado a pH bajos sufrirá más que el adaptado a pH altos. Inversamente un descenso del pH por debajo de los valores normales, afectará en mayor medida a un pez de aguas alcalinas que a otro de aguas ácidas.

Cuando el pH aumenta, también se incrementa la frecuencia respiratoria de los peces afectados; las algas proliferarán en el acuario consumiendo nutrientes en desmedro de las plantas y las bacterias encontrarán un medio adecuado para multiplicarse. Estas últimas encontrarán en el estrés de los peces un medio para convertirse en patógenas y desatar una bacteriosis. En muchos casos la *Septicemia Hemorrágica Bacterial* (SHB) en algunas ocasiones está ligada a dos factores: el estrés de los peces y el pH inadecuado del agua.

Descenso del pH. Cuando el pH desciende más allá de lo tolerado por los peces, se produce en muchas especies otro tipo de enfermedad conocida como acidosis. Una de las razones más comunes para que el pH descienda es la presencia exagerada de ácidos orgánicos en el acuario, producto de una superpoblación y en algunos casos, por escasez de plantas o iluminación inadecuada o insuficiente.

La acidosis se manifiesta en forma de derrames sanguinolentos que pueden afectar el cuerpo y aletas de los peces, erizamiento de aletas, destrucción de la mucosa (y la consiguiente invasión de organismos patógenos), falta de equilibrio en la natación (debido a que la baja presión osmótica afecta la vejiga natatoria), temblores, muerte entre las plantas en posición normal y, en el mejor de los casos, estrés.

Las células germinales, los huevos fertilizados y las larvas y alevines de los peces son los más sensibles y toleran mucho menos las variaciones del pH que los peces desarrollados.

2.2.3.4 La incidencia del pH en el organismo

La peligrosidad del pH para un organismo no está determinada por el catión (H^+) sino por el anión que está unido a él. Si este radical anión es cloro, la reacción ácida será ácido clorhídrico; pero si es un nitrato (NO_3), a pesar de tener el mismo valor de pH que antes, los efectos biológicos serán completamente diferentes, puesto que se deberán al ácido nítrico.

Los detritus de los peces (materia fecal, orina), los animales muertos, las hojas y otras partes de las plantas muertas y los restos de comida, al entrar en putrefacción originan, entre otras sustancias, amoníaco (NH_3). El amoníaco es un gas con existencia propia, en tanto que el radical amonio sólo existe como parte de un compuesto, tal como el hidróxido de amonio (NH_4OH) o el cloruro de amonio (NH_4Cl). El amoníaco es venenoso, aún en bajas concentraciones, en tanto que el radical amonio solo lo es en altas concentraciones.

La siguiente tabla demuestra que el efecto venenoso del amoníaco es tanto mayor cuanto mayor es el pH del agua, o sea cuanto más alcalina se esta.

pH	Dosis letal 50 de amoníaco (mg/lit o ppm)
12.5 - 12	1.0
11	1.1
10	1.5
9	5.6
8	33.3
7.5	100.0

En las aguas naturales, la cantidad de amoníaco no supera la cantidad de 0.1 mg/l.

La tolerancia fisiológica de los peces al amoníaco depende de los siguientes factores:

- Tipo y tamaño del pez.
- Estado general de salud.
- Del exceso de anhídrido carbónico y déficit de oxígeno.
- Del equilibrio electroquímico.

Con 0.2 a 0.5 mg/l se produce un aumento de la frecuencia respiratoria. Con 1 mg/l se produce la muerte, pero en determinadas circunstancias, algunos peces resisten hasta 2 mg/l.

Cuanto menor sea el pH del agua (es decir cuanto más ácida sea), mayor será la concentración de radical amonio no venenoso. Por el contrario cuanto más alcalina es el agua (o sea cuanto más alto sea el pH), mayor será la liberación de amoníaco venenoso, a partir de las sales de amonio. La siguiente tabla es muy ilustrativa:

pH	% amoníaco	% ión amonio
6	0	100
7	1	99
8	4	96
9	25	75
10	78	22
11	96	4

El conocimiento de la cantidad del radical amonio es importante antes del cambio de agua y de cada manipulación química.

De la tabla anterior deducimos que con un pH igual a 7, se encuentra 1% de amoníaco tóxico, en tanto que el 99% restante (en forma de ión amonio) es inocuo. Con un pH menor de 6.6 se interrumpe la nitrificación, o sea que el amoníaco no puede ser transformado por las bacterias. Esto es un inconveniente, pues las bacterias transforman el amoníaco en nitratos, y estos no son tóxicos. Por encima de cierto límite, el nitrato se torna tóxico.

Las aguas de bajo pH (ácidas), contienen un alto porcentaje del ión amonio (30-40 mg/l no resulta nada raro). Por lo tanto, si se cambia el 50% del agua, habrá una aguda intoxicación por amoníaco si en el agua vieja había suficiente cantidad de iones amonio, que liberasen amoníaco por el aumento de pH.

Los síntomas de intoxicación son:

- Irritación del sistema nervioso.
- Espasmos.
- Saltos fuera del agua.

Más tarde, las partes distales de las aletas se tornan blancas o transparentes, perdiendo su color original. Las sales de amonio producen secreciones de la piel y destrucción branquial. Con bajas concentraciones de oxígeno, la toxicidad del amoníaco aumenta a medida que lo hace el contenido de oxígeno, pero esta condición se invierte cuando el contenido de oxígeno supera el 59% del valor de saturación del aire. El anhídrido carbónico reduce la toxicidad del amoníaco hasta concentraciones de 16-60 mg/l, pero a concentraciones mayores aumenta la toxicidad.

Debe tenerse muy en cuenta que el gas amoníaco es muy difícil de remover del acuario por simple aireación. Sin embargo, la aireación favorece el desarrollo de las bacterias Nitrosomonas, Nitrobacter y Nitrocistys, de las cuales la primera oxida el amoníaco, transformándolo en nitritos, en tanto que las restantes oxidan los nitritos, convirtiéndolos en nitratos, de carácter inocuo para los peces.

Si el análisis del agua señala un alto contenido de nitratos y uno bajo de amoníaco, significa que se está realizando correctamente el proceso de oxidación de los residuos orgánicos.

2.2.3.5 Mediciones de pH

La medición de pH se origina en el sistema de electrodo. Este sistema consiste en un sensor de pH, Media Célula de pH, cuyo voltaje varía proporcionalmente a la actividad de iones de hidrógeno de la solución, y un electrodo de referencia. Media Célula de Referencia, que proporciona un voltaje de referencia constante y estable.

El electrodo de pH consiste en una fina membrana de cristal soplado sensible al hidrógeno en el extremo de un tubo de cristal inerte. Este tubo está lleno de un electrolito, y la señal es transportada a través de un cable de Ag/AgCl. Esta es una Media Célula de pH. Un sistema similar, pero sin usar el cristal sensible al hidrógeno, se usa como referencia. Un pequeño filtro (diafragma) conecta este tubo al líquido al líquido externo. A este sistema se le llama Media Célula de Referencia.

El medidor mide la diferencia entre la Media Célula de pH y la Media Célula de Referencia en milivolts DC.

La media célula de pH. La fuerza electromotriz se basa en la siguiente ecuación:

$$E_{obs} = E_c + N_f \log(a_{H^+})$$

donde:

- E_{obs} es el potencial observado
- E_c es el potencial de referencia incluyendo otros potenciales fijos y estables
- N_f es el factor de curva de Nerts
- a_{H^+} es la actividad de iones hidrógeno

El factor de curva de Nerts es una característica de la membrana de cristal y es igual a:

$$N_f = \frac{2.3RT}{nF}$$

donde:

- R es la constante universal de los gases (8.31451 J/gmol*°K)
- T es la temperatura absoluta en °K (273.15 °K)
- F es la constante Faraday (96485.309 C/gmol)
- N es el valor de valencia (n = 1 en el caso del hidrógeno)

Esta variable se encuentra en una escala de 0 a 14, el número 7 es la neutralidad, valores inferiores corresponden a la acidez y superiores a lo básico o alcalinidad.

Potencial de hidrogeno (pH). En ambientes costeros la variación diurna puede señalar un ciclo en función de la respiración nocturna (pH ácido) y la fotosíntesis matutina (pH alcalino) como se muestra en la figura siguiente:

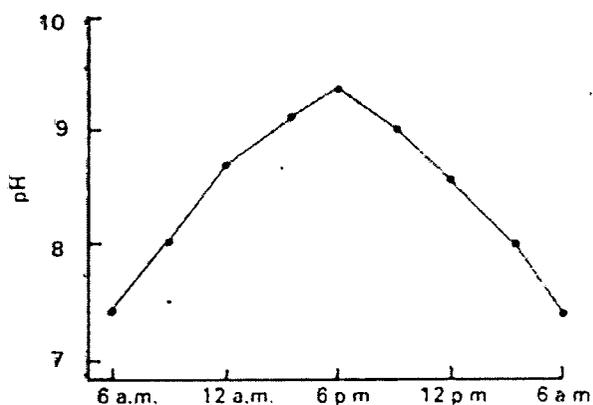
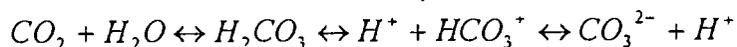


Figura 17 Ciclo del pH en función de la variación diurna y nocturna

Es factible utilizar un pH como una estimación de la producción primaria con base en la relación de cambio del CO_2 respirado y asimilado, tomando como base la reacción:



La mayoría de los organismos toleran cambios de pH dentro del intervalo de 6 a 9 que normalmente se presenta en ambientes acuáticos. Condiciones ácidas o alcalinas reducen la natación, debido tal vez a la acumulación de amoníaco y la imposibilidad del transporte de oxígeno. En aguas ácidas hay una inhibición en el intercambio Na/H en la superficie de las agallas con pérdida de sodio. Los cambios de pH influyen también en el balance de CO_2 en las agallas. Indirectamente el mayor riesgo de pH extremos es una alta toxicidad de algunos compuestos contaminantes como metales pesados, amonio no ionizado, ácido cianhídrico o sulfhídrico.

Los puntos extremos de pH, menos de 4 y más de 11, pueden causar la muerte en peces.

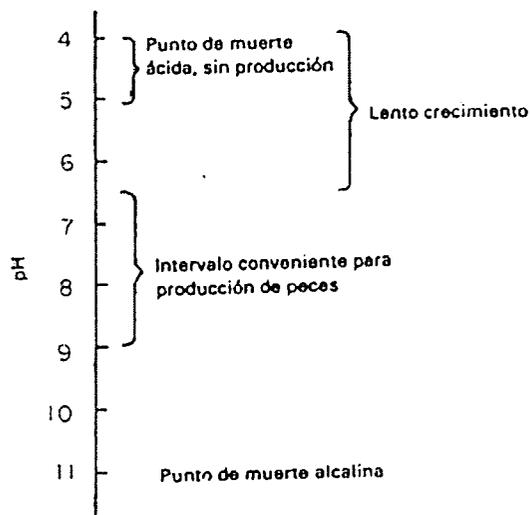


Figura 18 Efecto del pH en estanques piscícolas.

Otra repercusión importante de la variación del pH en estanques de peces, está asociada a los niveles tóxicos de amoníaco (NH_3), que en periodos cortos oscilan entre 0.6 a 2.0 mg/l y para efectos subletales entre 0.1 a 0.3 mg/l. Un incremento de una unidad de pH aumenta 10 veces el contenido de amonio no ionizado (amoníaco).

Las concentraciones de amoníaco pocas veces son lo suficientemente altas en los estanques para afectar el crecimiento de los peces, y que los mayores contenidos se presentan por lo común después de la muerte del fitoplancton, a un pH bajo debido a la alta concentración de CO_2 .

En algunas ocasiones los nitritos procedentes de la oxidación del amoníaco, se pueden acumular con una velocidad mayor que la conversión a nitratos.

El NO_2 en la sangre de los peces interfiere con la capacidad de transporte del oxígeno a las células. La toxicidad aumenta con la disminución del oxígeno disuelto y el pH.

2.2.4 El Oxígeno disuelto(OD)

El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno libre en el agua que no se encuentra combinado ni con el hidrógeno (formando agua) ni con los sólidos existentes en el agua. La cantidad de oxígeno disuelto es vital para la vida marina. Sin oxígeno esta vida muere.

En ambientes naturales la concentración del oxígeno está en constante cambio, dependiendo de factores fisicoquímicos como la temperatura y la salinidad, y de factores biológicos como la fotosíntesis y la respiración de los peces.

Como la disolución de este gas depende de la temperatura y la salinidad, la comparación de concentraciones espaciotemporalmente resultan inapropiadas. Para resolver esta situación, es necesario referir la disolución de este gas como porcentaje de saturación.

El ciclo diurno experimenta condiciones cercanas a la anaerobiosis en la madrugada o incluso nocturnos por la respiración del sistema acuático, sin que esto signifique algún peligro para la comunidad (Martínez, 1998). Sin embargo, las reglamentaciones de la calidad del agua proponen niveles mínimos de aceptabilidad de 2.5 ml/l que deben ser considerados especialmente para la acuicultura. La curva de concentración de oxígeno permite determinar la producción primaria neta, ya que el gas consumido en la respiración y el producido en la fotosíntesis, se equilibran en el sistema.

Si hablamos desde un punto de vista ecológico, el límite mínimo de este gas depende de la especie. La tasa de respiración u oxidaciones en el fondo del estanque dependerá de la cantidad de materia orgánica (MO) fitoplanctónica generada en la superficie del estanque. Las cargas exageradas de MO y nutrientes reducen la posibilidad de oxigenar el fondo del estanque por la estratificación. Cuando se dan florecimientos explosivos de fitoplancton, es difícil que la radiación solar penetre hasta el fondo del estanque, lo cual, genera una producción baja de oxígeno.

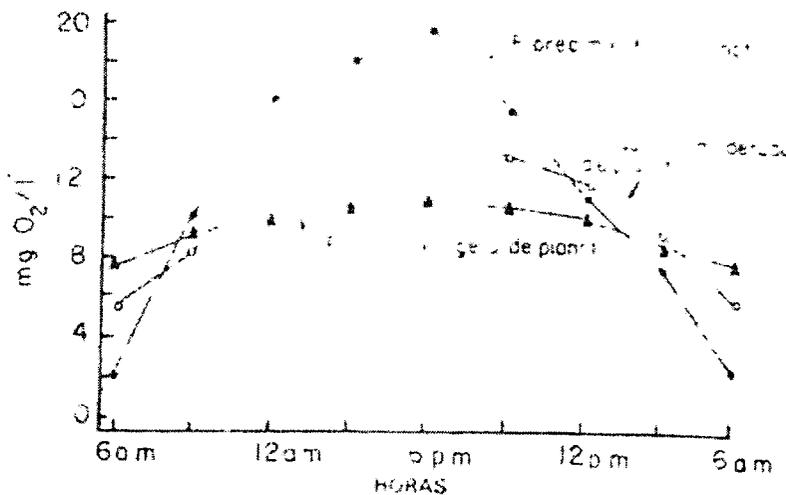


Figura 19 Variación diurna de la concentración de oxígeno disuelto en estanques con diferente densidad de plancton.

2.2.4.1 Influencia del Oxígeno disuelto en los organismos

Tanto la temperatura como el oxígeno son factores importantes en los organismos, el primero porque controla el metabolismo a través de la dinámica molecular y las tasas de reacción bioquímica, y el segundo porque las limita. Ambos factores rigen el movimiento y la distribución de peces en su hábitat.

Los organismos acuáticos requieren de un medio favorable que no debe contener menos del 70% de saturación de oxígeno disuelto. Los organismos requieren concentraciones adecuadas de oxígeno disuelto para su sobrevivencia y adecuado crecimiento; la concentración mínima del gas varía según la especie y el tiempo de exposición. Un organismo puede tolerar un contenido bajo por algunas horas sin efecto aparente de daño, pero puede morir si la exposición dura varios días. En la siguiente figura se muestran los niveles tolerados para peces,

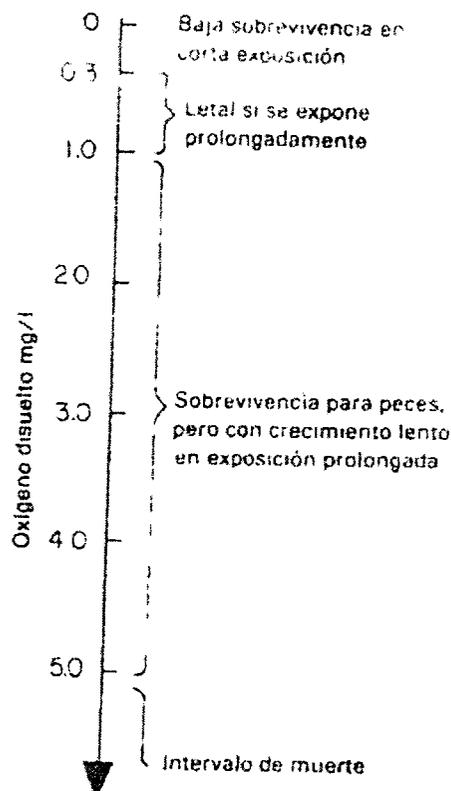


Figura 20 Intervalo y efectos de la concentración de oxígeno en estanques piscícolas.

Las bajas concentraciones de oxígeno pueden ser adversas para los organismos a través de efectos indirectos sin causar la muerte, como por ejemplo, haciéndolos más susceptibles a parásitos y enfermedades. Incluso las variaciones de bajo contenido de oxígeno pueden repercutir en la alimentación y crecimiento.

2.2.4.2 Transferencia de gases.

La transferencia de gases incluye aireación. Mediante la exposición del agua al aire o a otras atmósferas bajo presiones normales, incrementadas o disminuidas, es posible desprender o desabsorber los gases, o bien absorberlos o disolverlos. Algunos ejemplos son, la adición de oxígeno por aireación mediante aspersion o burbujeo para la desferrización y desmaganización y para la creación o mantenimiento de condiciones aeróbicas; la remoción de bióxido de carbono, ácido sulfhídrico y sustancias volátiles olorosas; entre otras.

2.2.4.3 Difusión molecular de sustancias disueltas.

La ley de difusión de Fick*, análoga a la ley de conducción del calor, establece que la velocidad de difusión $\partial W / \partial t$ a través de un área límite $dy dz$ es proporcional al gradiente de la concentración $\partial c / \partial x$ de la sustancia, desde un punto de concentración más alta a otro de concentración menor,

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -k_d \frac{\partial c}{\partial x} dy dz$$

donde:

- W peso de la sustancia disuelta.
- t tiempo,
- c la concentración,

* Una ley propuesta por Adolph Fick, (1829 1901), fisiólogo alemán.

- x la distancia en la dirección x ,
- $dydz$ área a través de la cual deben pasar las moléculas,
- kd coeficiente de difusión molecular,
- $\frac{\partial c}{\partial x}$ gradiente de la concentración de la sustancia.

La magnitud de k_d disminuye conforme aumenta el peso molecular y los cambios de temperatura. Para los gases k_d varía conforme a la raíz cuadrada de su densidad.

La solución a esta ecuación se encuentra por medio de una serie de Fourier,

$$c_t = c_s - 0.811(c_s - c_0)[\exp(-K_d) + \frac{1}{9} \exp(-9K_d) + \frac{1}{25} \exp(-25K_d) + \dots]$$

donde:

c_s concentración de la solución de la sustancia disuelta,

c_0 y c_t concentraciones en el tiempo cero y el tiempo t ,

c la concentración,

$$K_d = \pi^2 k_d t / 4x^2$$

kd el coeficiente de difusión molecular se expresa como gramos de soluto que se difunden a través de 1 cm^2 en 1 hr cuando el gradiente de concentración es de 1 g por cc pro cm lineal, $[l^2t^{-1}]$,

Kd es adimensional.

Para el oxígeno disuelto en agua, el coeficiente de difusión es:

$$k_d = 0.087 * 1.016^{T_i - 20}$$

2.2.4.4 Absorción y precipitación de los gases por el agua.

La absorción y precipitación de los gases por el agua, esta dada por la ley general de los gases:

$$pV = NRT$$

donde: -

- p es la presión absoluta del gas,
- V volumen,
- N número de moles,
- R constante universal de los gases, $R = 8.31451 \text{ J}/(\text{gmol}\cdot\text{K})$.

En particular, el agua en contacto con la atmósfera del aire y otros gases o mezclas de gases, las relaciones importantes se pueden resumir de la siguiente manera:

Solubilidad. La solubilidad de un gas depende:

- presión parcial en la atmósfera que se encuentra en contacto con el agua,
- temperatura del agua,
- concentración de las impurezas en el agua.

Velocidad de solución y precipitación. Esta se encuentra controlada por:

- grado de subsaturación o sobresaturación del agua,
- temperatura del agua,
- el área interfacial para contacto y exposición entre el gas y el agua, donde el movimiento de la atmósfera y del agua impiden la formación de películas estacionarias de gas y agua en la interfaz gas-agua.

Velocidad de dispersión del gas en el agua. Esta depende de:

- difusión molecular,
- difusión turbulenta por convección,
- difusión turbulenta por agitación.

2.2.4.5 Velocidad de absorción de gas

Si se da como postulado que la velocidad de absorción de gas es proporcional al grado de subsaturación (o déficit de saturación) del líquido absorbente, se puede escribir,

$$\frac{dc}{dt} = K_g (c_s - c_t)$$

donde:

- c_s concentración de saturación a una temperatura dada,
- c_t concentración en el tiempo t ,
- K_g factor de proporcionalidad para condiciones existentes de exposición, aumenta con la temperatura y el grado de mezcla del gas-líquido y el grado de difusión por turbulencias. Esta también es función de A/C , es decir, el área de interfaz por unidad de volumen líquido.

Por lo tanto $K_g = k_g$ es el coeficiente de transferencia de gas. El factor de control es la velocidad de transferencia a través de la interfaz gas-líquido.

La integración entre límites c_0 en $t = 0$ y c_t en $t = t$ nos da la ecuación:

$$c_t = c_0 + (c_s - c_0)(1 - e^{-K_g t})$$

En estos conceptos se encuentra implícito que el gas no reacciona con el agua. Este es el caso de los gases que existen en la atmósfera terrestre, oxígeno, nitrógeno, bióxido de carbono y los gases raros, aun cuando el bióxido de carbono reacciona hasta un valor aproximado del 1% para formar ácido carbónico (H_2CO_3).

2.2.4.6 Medición del Oxígeno disuelto

El sensor de oxígeno disuelto es una célula polarográfica consistente en un cátodo de aleación oro-plata-platino y ánodo de plata-cloruro de plata sumergidos en un electrolito de solución de potasa y cloruro potásico en agua. Una fina membrana de teflón permeable a los gases permite la difusión del oxígeno procedente de la muestra de agua. Las reacciones químicas que tienen lugar son:

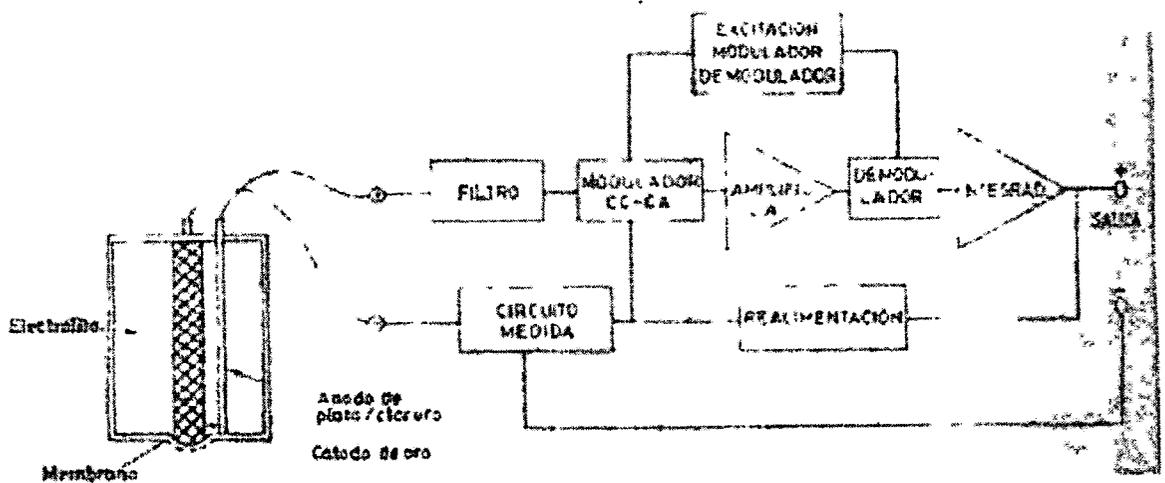
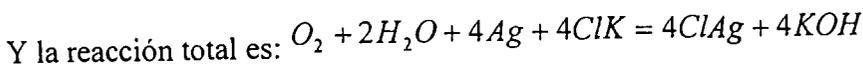
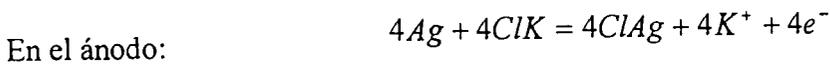
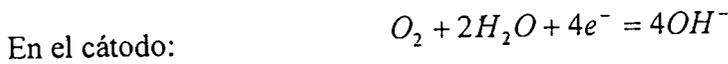


Figura 21 Sensor de oxígeno disuelto.

Como para cada molécula de oxígeno que se reduce entran cuatro electrones entran cuatro electrones en la célula y cuatro abandonan el ánodo, se obtiene una corriente eléctrica de cátodo a ánodo que es directamente proporcional a la cantidad de oxígeno que pasó a través de la membrana. La tensión óptima entre ánodo y cátodo que permite seleccionar el componente "oxígeno libre" en el agua es de 0.8 VDC.

La cantidad de oxígeno reducida en el cátodo, es decir, la cantidad de oxígeno que pasó, a través de la membrana depende de la presión ejercida por el oxígeno disuelto en el

agua sobre la membrana, que es la presión parcial del oxígeno. La cantidad de oxígeno disuelto se mide en mg/l (miligramos de oxígeno por litro de agua), en p.p.m. siendo:

$$p.p.m. = \frac{mg}{l} * \frac{1}{densidad_de_agua_en_g/cm^3}$$

o bien, en % de saturación (relación entre la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y la correspondiente a la saturación).

El oxígeno disuelto viene influido por la temperatura, de aquí que es necesario incorporar al circuito termocompensadores que se refieran automáticamente la medida a una temperatura estándar.

Es importante notar que la contaminación en el agua reduce el oxígeno disuelto, sin embargo, las algas producen oxígeno durante la fotosíntesis durante el día. Durante la noche se afecta la cantidad de oxígeno disuelto, además del dióxido de carbono y por consecuencia el pH.

2.2.5 Amonio

Uno de los problemas más grandes en sistemas acuícolas de producción intensiva, es la acumulación de compuestos inorgánicos de nitrógeno tóxico (NH_4^+ y NO_2^-) en el agua.

Parte de estos compuestos son excretados por los peces (amonio), pero la mayor fuente de producción de amonio es la que produce el alimento de los peces. Esto se debe a que el alimento es rico en proteínas.

En los estanques que son fuertemente aireados el amonio se oxida por algunas especies de bacterias, en nitritos y nitratos, lo que difiere del dióxido de carbono el cual es liberado por medio de difusión de aire o aireación forzada.

Una de las soluciones más comunes para resolver el exceso de nitrógeno es reemplazar frecuentemente el agua del estanque. Pero esta solución esta limitada por las siguientes razones:

- El agua es un recurso natural que debe ser cuidado.

- Existen regulaciones ambientales que prohíben tirar agua al ambiente con alto contenido proteínico.
- Se pueden transferir patógenos a fuentes de agua comunes.

Otra solución para combatir el amonio, es basado en la nitrificación de este. Esto se logra mediante el empleo de filtros biológicos. Un problema asociado con la biofiltración es el alto costo que esto involucra y la necesidad de tratar y digerir una gran masa de residuos de alimento. Cerca del 50% de el alimento agregado al estanque necesita ser digerido.

Una estrategia adicional para la remoción de amonio en el agua, es a través de su asimilación dentro de proteínas microbianas por la adición de materiales carbohidratos al sistema. Si se agregan carbohidratos puede eliminarse el problema de acumulación de nitrógeno inorgánico. Un aspecto importante de este proceso es la utilización potencial de proteínas microbianas como una fuente de alimento proteínico para peces. La utilización de proteínas microbianas depende de la habilidad del animal para cosecharlas bacterias y su habilidad para digerirlas y utilizar las proteínas microbianas.

El ajuste en la relación de C/N en la alimentación, como un medio de control del nitrógeno inorgánico en el agua del estanque.

El control de nitrógeno inorgánico en estanques está basado sobre el metabolismo y del proceso microbiano de la inmovilización del nitrógeno. Las bacterias y otros organismos usan carbohidratos (azúcar, almidón y glucosa) como alimento, para generar energía y crecimiento (se producen proteínas y nuevas células):



El porcentaje de carbón asimilado con respecto a el carbón del alimento metabolizado, es definido como *eficiencia de conversión microbiana (E)* y está en el rango de 40 – 60 %. El nitrógeno también es requerido debido a que la mayor parte del nuevo material celular es proteína. Así la utilización microbiana de carbohidratos (o algún otro alimento bajo en nitrógeno) es acompañado por la inmovilización del nitrógeno inorgánico.

La adición de carbohidratos es un medio potencial para reducir la concentración de nitrógeno inorgánico en sistemas de acuicultura intensiva. La cantidad de carbohidratos a ser adicionados (ΔCH) que se necesita para reducir el amonio puede fácilmente ser evaluado.

Capítulo 3

Construcción del estanque

3.1 Consideraciones físicas

3.1.1 La selección del sitio.

Topografía del área: Terrenos planos o con suave declive (no superior a 2%) posibilitan un mejor aprovechamiento del área y reducción en los costos de construcción de los estanques.

Tipo de suelo: Suelo arcilloso y de baja permeabilidad, permite la construcción de diques más estables, siendo, por lo tanto, los más favorables a la construcción de los estanques. Suelos arenosos, o con gran cantidad de guijarros, piedras, presentan en general alta infiltración, demandando un mayor uso del agua. Esos suelos son también poco estables y más susceptibles a la erosión.

Calidad y disponibilidad de agua: Las áreas elegidas deben disponer de fuentes de agua de buena calidad, sin contaminación por vertidos o pesticidas y en cantidad mínima para abastecer la demanda de la piscicultura. La cantidad de agua necesaria depende del área de los estanques, de la tasa de infiltración y evaporación, de la renovación del agua exigida en el manejo de la producción y del uso de estrategias de reaprovechamiento del agua, entre muchos otros factores.

Compatibilidad del clima: El clima debe ser compatible con las exigencias de las especies que serán producidas.

Restricciones ambientales: Deben observarse las restricciones en cuanto a la tala de árboles y a la preservación de las áreas para protección ambiental y de árboles de cabecera. También deben ser observadas las restricciones en el uso de los recursos hídricos (cuando existan), principalmente en cuanto al volumen de agua que pueda ser captado y al desagüe de la misma en el drenaje de los estanques en los cuerpos de agua naturales. Para esto es fundamental conocer las reglamentaciones federales, estatales y municipales en cuanto al uso de los recursos naturales y los procedimientos para la obtención de los certificados para habilitación del emprendimiento.

Infraestructura básica: Las condiciones de las rutas, la disponibilidad de energía, la proximidad de los aeropuertos y puertos, entre otras facilidades de infraestructura, son factores decisivos en la selección de los sitios.

Disponibilidad de mano de obra, insumos y servicios: Debe considerarse la facilidad para reclutamiento de mano de obra temporaria; la conveniencia en la adquisición de los insumos básicos (ración, alevines, correctivos y fertilizantes, entre otros) y la oferta de servicios de apoyo (terraplenes, manutención de vehículos y otros equipamientos, instalaciones y manutención de redes eléctricas, galpones y otras estructuras; transporte de carga; confección de embalajes, entre otros).

Acceso al mercado consumidor: La proximidad y el acceso a varios mercados son factores decisivos en la selección del sitio. Un adecuado posicionamiento logístico permite reducir el costo de transporte de los productos, diversificar los mercados y reducir los riesgos de comercialización y mejorar la competitividad del emprendimiento.

Programas de incentivos fiscales y crediticios: entre otros factores.

3.1.2 Calidad y disponibilidad de agua.

Principales características de las fuentes de agua, a evaluar durante la planificación de la implantación de un emprendimiento acuícola,

Variaciones del caudal a lo largo del año, principalmente en los períodos de ausencia o disminución de lluvias.

Variaciones en la temperatura del agua y su relación con la temperatura del aire a lo largo del año.

Presencia de vida (peces, crustáceos, plantas acuáticas y otros organismos).

Concentración de gases como el oxígeno y el gas carbónico.

El pH, la alcalinidad total y la dureza total, indicadores importantes de estabilidad química del agua y que determinan la necesidad de atenuarlos con algunas prácticas de manejo.

La salinidad y sus fluctuaciones estacionales, particularmente cuando el objetivo es el cultivo de especies marinas o estuariales, o el cultivo de especies de agua dulce en aguas de salinidad más elevada.

El riesgo de contaminación de la fuente de agua con productos químicos o aportes de origen agropecuario, urbano o industrial.

El riesgo de contaminación por patógenos y otros organismos indeseables provenientes del agua de drenaje de otros emprendimientos, “pesque y pague” o “cotos de pesca”, que desechan sus efluentes aguas arriba de donde se planifica realizar la captación de agua del proyecto.

Las condiciones de turbidez, principalmente durante los períodos lluviosos.

3.1.3 Evaluación y corrección de la calidad del agua.

Pueden realizarse diversos análisis directamente en el campo, con el uso de medidores de oxígeno, medidores de pH, refractómetros o salinómetros, entre otros equipos portátiles. En la tabla siguiente se resumen los valores adecuados de las principales variables de la calidad de agua para el cultivo de peces.

Valores deseados de algunos parámetros fisicoquímicos de agua para el cultivo de peces tropicales en viveros

Parámetro	Peces
Temperatura	26 a 30°C
PH	6.5 a 8.0
Oxígeno disuelto (O ₂)	mayor a 5mg/l
Gas carbónico (CO ₂)	menor a 10mg/l
Alcalinidad total CaCO ₃	mayor a 30mg/l
Dureza total CaCO ₃	mayor a 30mg/l
Amoniaco tóxico (NH ₃)	menor a 0.2mg/l
Nitrito (NO ₂)	menor a 0.3mg/l NO ₂
Gas sulfhídrico H ₂ S	menor a 0.002mg/l
Salinidad	Depende de la especie en general menor 12ppt para peces de agua dulce.

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos del agua para el cultivo de peces

Diversos parámetros de calidad de agua pueden ser corregidos antes y durante el cultivo, particularmente en el cultivo de peces en estanques con baja renovación de agua, así como también en los sistemas de recirculación, donde se realiza el re-aprovisionamiento del

agua. En la siguiente tabla se resumen las principales medidas de corrección sobre la calidad del agua empleada en esos sistemas.

Medidas correctivas en la calidad del agua en sistemas de recirculación o en cultivos de peces en estanques de baja renovación

Problemas con el agua de abastecimiento.	Medidas correctivas para cultivo de peces en estanques de baja renovación de agua o en sistemas de recirculación.
Aguas ácidas y aguas con baja alcalinidad y dureza total.	Encalado con uso de cal agrícola en dosis que pueden variar de 1 a 4 toneladas por hectárea.
Peces indeseables en agua de abastecimiento.	Control de entrada de agua en las redes de abastecimiento; Adopción de prácticas de control de erosión del suelo (terraplenado e implantación de cobertura vegetal en las áreas vecinas a los estanques, emprendimiento y en las entradas de la propiedad, de forma de impedir la entrada de agua de inundación a los reservorios y los canales que abastecen el emprendimiento; control de la erosión en los diques de los estanques; entre otras medidas), uso de estanques o de embalses para decantación previa de los sedimentos.
Aguas de pozos y canteras son pobres en oxígeno y ricas en gas carbónico	Deben recibir aireación antes de ser usadas en la incubación de los peces, en los tanques de depuración, en los tanques de almacenamiento de reproductores, en los embalajes y cajas de transporte, entre otras situaciones, no es necesario de aireación previa de esta agua, si ellas fueran usadas en el abastecimiento de los estanques con baja renovación de agua.

Tabla 2 Valores deseados de algunos parámetros fisicoquímicos del agua

3.1.4 Uso adecuado del agua disponible

El desperdicio y el mal uso del agua son comunes en la mayoría de las pisciculturas. Ese desperdicio se acentúa por la idea de que el cambio de agua es indispensable para la oxigenación de los estanques. Así, ya en el inicio de los ciclos (fases) de cultivo, es común registrar el uso de una renovación excesiva de agua en los estanques, lo que perjudica la eficiencia del encalado y de la fertilización, haciendo que el agua sea pobre de nutrientes. Eso impide la formación del plancton, manteniendo el agua transparente por mucho tiempo, favoreciendo la entrada de luz en la columna de agua, con el desarrollo de algas filamentosas y de plantas sumergidas en el fondo de los estanques.

Si el agua de abastecimiento fuese la única fuente de oxígeno en los estanques, serían necesarias altas tasas de renovación de agua para asegurar la sobrevivencia de los peces. Tal práctica generalmente es prohibitiva en la mayoría de los emprendimientos, aún en aquellas con pequeñas áreas de estanques, en virtud de la restricción de disponibilidad de agua (Tabla

3). Si el agua de abastecimiento fuera la única fuente de oxígeno, un estanque con 4.000 kg de peces/ha demandaría un vaciado continuo próximo a 50 lt/s/ha (o sea el 30% del volumen total/día) para reponer el oxígeno consumido por los peces y por la descomposición de la materia orgánica excretada con las heces. Si la biomasa fuera 6.000 kg/ha y fueran aplicadas 72 kg de ración/ha/día, ese consumo de oxígeno sólo podría ser abastecido con un vaciado de alrededor de 80 lt/s/ha (45% del volumen total/día). Con el aumento de la biomasa para 10.000 kg/ha y una tasa de alimentación de 120 kg/ha/día sería necesario una renovación diaria de 75%.

Calculo estimado de vaciado de agua necesario para abastecimiento del consumo de oxígeno de los peces y de los procesos de descomposición de la materia orgánica (MO) en las heces, sobre diferentes biomazas y tasas de alimentación (Rac. Max)

Biomasa (kg/ha)	Rac. Max (kg/ha/día)	Consumo de O ₂ (gramos/hora)			Vaciado (l/s/ha)	Vaciado (%/día)
		² MO heces	³ Peces	Peces - MO		
4.000	48	515	800	1.315	52	30%
6.000	72	773	1.200	1.973	78	45%
8.000	96	1.030	1.600	2.630	104	60%
10.000	120	1.288	2.000	3.288	130	75%
12.000	144	1.546	2.400	3.946	157	90%
14.000	168	1.803	2.800	4.603	183	105%

¹ Tasa de alimentación de 1,2%PV día en las fases finales del cultivo.

² Es necesario 1,4g de O₂ para cada gramo de materia orgánica (MO) a ser descompuesta, ración con 92% de materia seca (MS) y 80% de digestibilidad de MS.

³ Consumo medio de 200g de O₂/tonelada de peces/hora.

⁴ Considerando el agua de abastecimiento con oxígeno de 7mg/l (próximo a saturación)

Para expresar el vaciado en m²/h/ha, multiplique el valor en l/s/ha por 3,6, en este ejemplo.

Fue considerado que 1ha de estanque, tiene un volumen de 15.000m³.

Tabla 3 Estimación de la renovación de agua en estanques para abastecimiento de oxígeno.

En la práctica, cerca de 4.000 a 6.000kg de peces/ha se pueden mantener en estanques sin aireación, en los cuales apenas se repone el agua perdida por evaporación y por filtración. En estanques con baja infiltración (<1 mm/h) esa reposición no excede el 3% del volumen total por día, lo que equivale a un vaciado constante no superior a 4 litros/s/ha, mismo sobre tasa de evaporación de hasta 12 mm/día (Tabla 4).

Vaciado de agua necesario (l/s/ha) para la reposición de las pérdidas de agua por evaporación e infiltración

VIB mm/h	Evaporación media (mm/día)					
	2	4	6	8	10	12
0.5	1.6	1.9	2.1	2.3	2.5	2.8
1.0	3.0	3.2	3.5	3.7	3.9	4.2
2.0	5.8	6.0	6.3	6.5	6.7	6.9
4.0	11.3	11.6	11.8	12.0	12.3	12.5
8.0	22.5	22.7	22.9	23.1	23.4	23.6
12.0	33.6	33.8	34.0	34.3	34.5	34.7

VIB= Velocidad de infiltración básica que representa la velocidad de infiltración del agua en el suelo saturado.

Tabla 4 Vaciado de agua necesario para la reposición de las pérdidas de agua por evaporación e infiltración.

Así mismo en suelos con alta infiltración (hasta 5 mm/h) y bajo una alta tasa de evaporación, la reposición del agua ni siquiera pasa el 15% al día. Esto demuestra que el agua de abastecimiento está lejos de ser la principal fuente de oxígeno para la respiración de los peces y de los demás organismos de los viveros.

¿Entonces, de donde proviene el oxígeno necesario para eso?

Proviene de la fotosíntesis que efectúan las microalgas del fitoplancton, que llega a aumentar más del 80% de los demandado por los peces y otros organismos, inclusive el propio fitoplancton. El balance entre fotosíntesis y respiración es generalmente positivo, o sea, el fitoplancton produce más oxígeno que el consumido en los procesos respiratorios de los estanques. En los días nublados o lluviosos pueden producirse excepciones, ya que, en virtud de la baja luminosidad, la producción de oxígeno vía fotosíntesis puede ser superada por el consumo de oxígeno en la respiración. La respiración también puede exceder a la fotosíntesis en los estanques con una excesiva biomasa (cantidad de kilos de peces) o con una gran producción de fitoplancton. Por lo tanto, es equivocada la argumentación de que el agua de abastecimiento de los estanques es la que supera el oxígeno demandado por los peces. Esto solamente sería posible con altas renovaciones de agua. Así mismo, en sitios con recursos hídricos abundantes, la alta renovación de agua en los estanques puede ocasionar una alta inversión y costo de mantenimiento y operación de los sistemas hidráulicos (canales, tuberías, filtros y bombas), particularmente donde no es posible la captación y el abastecimiento de

agua por gravedad puede producirse un conflicto por la necesidad de captación de grandes volúmenes de agua para abastecer un solo emprendimiento acuícola, así como también respecto de la generación de un gran volumen de efluente, que puede llamar la atención de las instituciones medioambientalistas y de la comunidad en general.

3.1.5 Demanda hídrica

Entre otros varios factores, la cantidad de agua necesaria para abastecer una piscicultura, por ejemplo, varía con las pérdidas de agua por infiltración y evaporación, con el número de veces en que los estanques son drenados en el año; con la renovación del agua durante el cultivo; con las estrategias de reaprovechamiento del agua; y con la precipitación (lluvia) anual que incorpora agua directamente en los estanques.

Evaporación e infiltración. La tasa de infiltración del agua, dependerá de las características del suelo del estanque, de la eficiencia del trabajo de compactación previamente realizado, del uso de estrategias para amenguar la infiltración, del tiempo del uso de los estanques, entre otras variables.

Estanques construidos en suelos con alto tenor de arcilla pueden presentar filtraciones próximas a cero. La evaporación del agua en los estanques varía de acuerdo con los meses del año, siendo más acentuada con temperaturas elevadas, con baja humedad del aire y con acción continua de los vientos. Informaciones sobre la evaporación del agua pueden ser obtenidas en las estaciones meteorológicas que se mantienen en el país, institutos de investigación, universidades y otras instituciones. La recomendación más común es que estén disponibles entre 10 y 20 litros/segundo (36 a 72 m³/h) para cada hectárea (10.000m²) de estanque. La gran mayoría de las pisciculturas, vacían menos que 10 litros/s/ha, que son suficientes para la reposición de las pérdidas de agua por evaporación e infiltración, excepto en áreas con excesivas infiltraciones de agua, como puede ser observado en el Cuadro 6.

Si consideramos una hectárea de vivero con 15.000 m³ de agua almacenada, un vaciado de 7 litros/s/ha equivale a 4% de reposición del volumen total al día. El lector puede fácilmente estimar la tasa de renovación diaria (% al día) multiplicando los vaciados (en

l/s/ha) del cuadro 6 por el factor 0,6. Por ejemplo, para un recambio de agua 12 l/s/ha (evaporación de 8 mm/día y VIB de 4 mm/h), la renovación diaria es próxima al 7% (12 x 0,6).

Intensidad de renovación de agua. El uso más intenso de agua, se produce generalmente en la fase final de un ciclo de cultivo.

Comparación de necesidad de agua por ciclo de cultivo en estanques de 1 hectárea sobre diferentes intensidades de renovación de agua

Cambio/día los últimos 30 días No aplica para (*)	¹ Llenar y mantener (m ³ /ciclo)	² Renovar (m ³ /ciclo)	Uso total (m ³ /ciclo)	Uso de agua (m ³ /kg)	Uso relativo
(*)Apenas reposición (E + I)	36.600	-	3.600	6.10	100
(E + I) + 5%	36.600	22.500	59.100	7.39	121
(E + I) + 10%	36.600	45.000	81.600	8.16	134
(E + I) + 20%	36.600	90.000	128.600	8.44	138

¹E (evaporación) e I (infiltración) y considerando 1 hectárea con 15.000m³ de agua por evaporación media de 6 mm/día e infiltración de 0,5mm/hora los cálculos no considerando las precipitaciones (lluvias) directas sobre los viveros. Los ciclos son de 120 días.

² Renovación del agua en los últimos 30 días.

³ Uso de agua (m³/kg de peces) fue calculado para biomasa de 6.000, 8:000, 10.000 y 15.000 kg/ha, respectivamente, para los estanques con 0 a 20% de renovación diaria.

Tabla 5 Necesidad de agua por ciclo de cultivo.

El uso total del agua puede variar entre 36.000 a 126.000 m³/ha/ciclo, siendo usados entre 6 y 9 m³ de agua/kg de peces producidos.

La inversión en aireación y la implementación de medidas de conservación de agua (acumulación por lluvias, aprovechamiento de agua de drenaje para el abastecimiento de otros estanques, implementación del cultivo con cosechas parciales y siembras múltiples, entre otras posibilidades) posibilitan minimizar el uso del agua y el descarte de efluentes por tonelada de peces producidos.

3.1.6 Suelos para la construcción de los estanques.

Desde el punto de vista de la ingeniería la selección de los sitios para construcción de estanques debe basarse en la compatibilidad de los suelos que servirán como fundación y

como material para la construcción de los taludes y/o diques. Los suelos utilizados en la fundación de los estanques y taludes deben disponer de napa freática profunda para no comprometer y encarecer los trabajos de construcción; serán poco susceptibles a las rajaduras, erosión interna y percolación del agua; estables para que no se produzcan acomodaciones o expansiones del suelo que causen daños estructurales a la fundación.

Los sitios seleccionados deben ser detalladamente investigados, abriéndose trincheras o realizando “calicatas” (recolección de muestra de suelo a diversas profundidades con la ayuda de un taladro) a lo largo de toda el área, para poder conocer tanto las características del material, así como la predominancia y suficiencia de los mismos para la construcción de las fundaciones y de los taludes.

Las investigaciones del perfil del suelo deben extenderse por lo menos a 60 cm por debajo de la cota prevista para el fondo de los estanques.

3.1.6.1 Nociones básicas sobre suelos.

El suelo representa el conjunto de partículas sólidas (minerales y orgánicas) y de espacios o poros (ocupados por aire y por el agua). Las partículas sólidas que componen el suelo varían en cuanto a la composición mineral, tamaño, formato, homogeneidad de tamaño, entre otras características. Las propiedades importantes de un suelo para la ingeniería de la construcción de estanques, resultan de la combinación de las propiedades de sus partículas y de la proporción en que estas se encuentren en el material. El perfil vertical de un terreno es compuesto por diversos horizontes cada cual formado por un tipo peculiar de suelo.

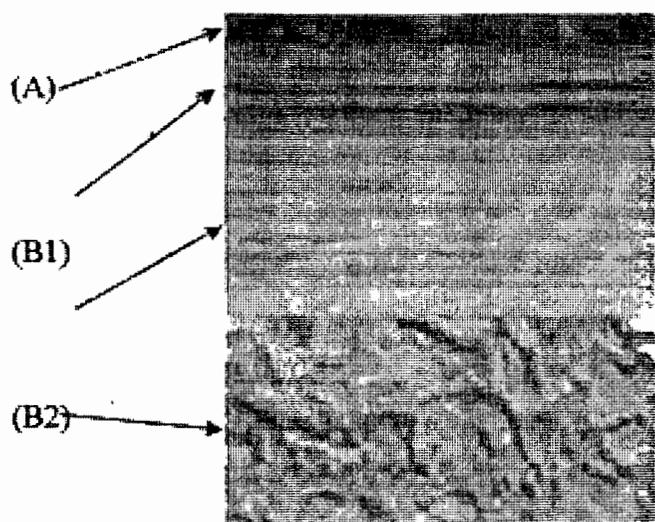


Figura 22 Perfil vertical de los horizontes del suelo

El horizonte superficial (horizonte A) encierra la cobertura vegetal (gramíneas, arbustos y árboles) y presentan la mayor concentración de material orgánico (raíces, hojas en descomposición, estiércol animal, entre otros). Parte de este horizonte generalmente es removido durante la limpieza del terreno antes del terraplenado, de tal forma que se evite que el suelo con material orgánico sea usado en la construcción de los taludes. Los horizontes intermedios (Horizonte B1 y B2) están en la posición de fondo de los estanques. De esos horizontes se extrac casi todo el material usado en la construcción de los taludes. Por lo tanto, los suelos de estos horizontes deben tener gradiente suave, textura fina, buena plasticidad y baja permeabilidad, garantizando una buena estabilidad y gran retención de agua en los estanques. El Horizonte profundo (Horizonte C) está formado por rocas en descomposición, que generalmente dan origen al suelo adyacente a este horizonte. El horizonte C en general presenta alta permeabilidad, pues el agua se cuea fácilmente por entre las fisuras y espacios entre las rocas. Por lo tanto, es recomendable que exista una buena distancia entre la cota del fondo de los estanques y la cota de inicio del Horizonte C (por lo menos 60 cm en caso de Horizontes B de baja permeabilidad), de tal forma que se reduzca el riesgo de una excesiva infiltración de agua en los estanques.

El reconocimiento de los horizontes del perfil de suelo es posible con la apertura de trincheras en diversos sitios de la áreas seleccionadas a priori para la construcción de los estanques. Una vez identificados los horizontes de un perfil, deben ser averiguadas las propiedades de los suelos de cada horizonte.

3.1.6.2 Suelos de importancia en la construcción de los viveros.

A continuación se presentan las principales propiedades de los suelos que ejercen gran influencia sobre los procesos constructivos, la estabilidad y la capacidad de contención del agua, la susceptibilidad de la erosión, entre otras características de los estanques (taludes) que están siendo implantados.

Textura y gradiente de partículas de los suelos. De acuerdo con su textura, los suelos son clasificados como finos o groseros. Un suelo es considerado de textura fina cuando más del 50% de sus partículas (en peso) pasan por el tamiz 200 (con malla de 0,074mm), Un suelo es considerado de textura grosera cuando más del 50% de sus partículas (en peso) son retenidas en el tamiz de 200. La fracción fina del suelo es compuesta por arcilla y silte, partículas de tamaño inferior a 0,074mm, prácticamente indistinguibles (no visibles) al ojo humano. La fracción grosera del suelo (partículas mayores de 0,074mm) está constituida por arena y pedregullo. Estos materiales pueden ser separados con el uso del tamiz 4 (abertura de 4,76mm). Por eso, cuando más del 50% de la fracción gruesa (material retenido en el tamiz 200) pasan por el tamiz 4, la fracción gruesa se denomina “arena”. Si más del 50% de las partículas gruesas quedaran retenidas en el tamiz 4, la fracción gruesa es llamada “pedregullo”. En la práctica, cuando visualmente es posible afirmar que predominan partículas de tamaño superior al de un grano de soja (o arveja) en la fracción gruesa del suelo, este es llamado de “pedregullo”.

La distribución del tamaño de partículas de un suelo puede ser bastante variable. Los suelos son “*gradiente suave*” son los que presentan una distribución más homogénea en el tamaño de sus partículas. Suelos de “*gradiente abrupto*” son aquellos en que predomina un determinado tamaño de partículas.

Determinando la composición y el gradiente de las partículas del suelo: La determinación de la textura y del engrillado de la distribución de las partículas, generalmente es realizada por laboratorios especializados en análisis de suelos. Una evaluación práctica de la textura de los componentes puede ser realizada en el campo. Reúna muestras del suelo de los diferentes

perfiles utilizando “taladros” o la apertura de trincheras. Después de identificadas, cada una de las muestras debe ser igualmente analizadas:

Coloque cerca de 300ml de suelo en un recipiente transparente con cerca de 1 litro de volumen (probeta graduada o garrafa “pet”);

“Agite” el material con una barra hasta eliminar el volumen de aire en el interior del suelo y registre el volumen del suelo del recipiente (es necesario usar una regla);

Añada 500ml de agua sobre el material y mezcle bien con una barra, de forma a desagregar las partículas del suelo;

Tape la boca del recipiente y repetidamente de vuelta el mismo de cabeza hacia abajo, mezclando aún más el material. Después de una buena mezcla deje el recipiente descansar por 25 segundos y anote el volumen del material que decanta. Si más del 50% del volumen inicial, decantó en 25 segundos, el suelo puede ser considerado de textura gruesa. Si decantó menos del 50%, el suelo puede ser considerado de textura fina.

El material deberá ser agitado nuevamente y vuelto a virar durante cerca de 2 minutos.

En seguida el material es dejado decantar por 24 horas. Después de este descanso, será posible observar diferentes capas de partículas dentro del recipiente. Las de mayor tamaño (más pesadas) quedarán en el fondo del recipiente. Las alturas de las capas deben ser anotadas y expresadas en porcentual de la altura total del suelo decantado en el recipiente.

El gradiente entre las partículas es evaluado de forma subjetiva, verificando en el recipiente que la transición de una capa para la otra sea suave (suelos de gradiente abrupto, donde generalmente hay un predominio de un determinado tamaño de partículas).

Los suelos más adecuados para la construcción de los diques deben presentar gradiente suave: Es una composición de alrededor de 60 a 80% de arcilla y el restante como silte, de forma a garantizar un suave gradiente entre partículas. Suelos con menos de 12% de finos (arcilla y silte) no son apropiados para la construcción de los estanques, a no ser que sean mezclados con otros suelos más finos.

3.1.6.3 Plasticidad del suelo

La plasticidad de un suelo indica la facilidad con que el mismo es capaz de ser modelado. Un suelo puede ser llamado plástico (moldeable) o no plástico. La presencia de arcilla en el suelo es importante para que éste sea plástico y posibilite un adecuado trabajo de moldeado y compactación de los taludes de los estanques. Suelos en los que predominan los guijarros y arena, que contienen poca arcilla, son en general inadecuados para la construcción de estanques, pues además de presentar altas infiltraciones, no permiten la construcción de taludes y/o diques estables; produciendo grandes riesgos de erosión y de colapso de los mismos.

Los suelos plásticos presentan mayor resistencia a la erosión, la precolación de agua y a las rajaduras por acomodación del material. También presentan mayor cohesión entre partículas, confiriendo gran estabilidad a los taludes, siempre que se haya realizado un adecuado trabajo de compactación. La plasticidad de un suelo (índice de plasticidad) solamente puede ser evaluada en laboratorios especializados. En tanto, existen distintos métodos prácticos que permiten tener una idea de cuán plástico es un suelo.

Prueba – Resistencia al aplastamiento: Se toma un bloque de 2 x 2 cm y se lo achata o aplasta, moldeándolo con los dedos. Bloques muy duros indican la presencia de gran cantidad de arcilla en el suelo, siendo este muy plástico y bastante cohesivo, características deseables para la construcción de los estanques. Bloques que se quiebran con una leve presión, presentan en general poca arcilla y mucho silte, y son típicos de suelos de poca plasticidad y cohesión, inadecuados para la construcción de los viveros.

Prueba 2 – Moldeado y resistencia: Otra forma de evaluar la plasticidad de un suelo es preparando una muestra tamizada (Tamiz 40 es el tamiz padrón de malla de 0,42mm). Para pasar la muestra por el tamiz debe humedecérsela de tal forma que se obtenga una masa que no sea pegajosa para las manos. Luego se hace rodar la masa de suelo entre las manos hasta obtener un fideo tipo “macarrón” de 3 a 4 mm de diámetro. Deshaga el “macarrón” y rehaga nuevamente hasta que se comience a partir en trozos de aproximadamente 2 cm. Este es el indicativo del límite plástico del suelo. Observe las rajaduras en la superficie del “fideo macarrón”. Rajaduras que se presentan en sentido de circunferencia, indican que predomina

arcilla de fracción fina en el suelo, o sea que éste es de alta plasticidad. Si las rajaduras son longitudinales, predomina silte en la fracción fina y el suelo es considerado de plasticidad mediana. En seguida se re-moldea la masa en un “macarrón” más grueso (de alrededor de 13 mm de diámetro) y pulse el macarrón por las extremidades, con la intención de partirlo. La fuerza necesaria para partir el material puede ser poca (material poco plástico), media (material plástico) o grande (material muy plástico). Naturalmente que este método es bastante subjetivo, pero permite verificar bien las diferencias entre las muestras de suelo que se evalúan.

Densidad, unidad óptima y compactación del suelo. La densidad del suelo es influenciada por el volumen de los espacios (poros) presentes en el material. Suelos con baja densidad, son en general gruesos y predominan los guijarros y arena. La densidad del suelo puede ser alterada por la compactación proporcionada por el rodado de las ruedas de los tractores, camiones y motos o “scrapers”, por los cilindros compactadores y, con menor eficiencia, por otra maquinaria.

Además del equipamiento utilizado, el grado de compactación alcanzado dependerá de la presión impuesta sobre el suelo, del espesor de la camada a ser compactada y de la unidad del suelo en el momento de la compactación. Según el punto de vista de la construcción de los estanques, la unidad óptima de un suelo es aquella que posibilita arribar a la máxima densidad (máxima compactación) sobre un determinado esfuerzo de compactación.

Porosidad y permeabilidad del suelo. La porosidad de un suelo expresa la relación porcentual entre el volumen de espacios (poros) y el volumen total del suelo. La permeabilidad de un suelo depende del tamaño y de la forma de los espacios (poros) y de la densidad y grado de compactación del suelo. Cuanto mayor sea la porosidad de un suelo, mayor será su permeabilidad. La permeabilidad es alta en suelos con partículas groseras (arena y cascajo) y en suelos de baja densidad. El proceso de compactación disminuye la porosidad y aumenta la densidad del suelo, reduciendo su permeabilidad.

3.1.6.4 Infiltración de agua.

Los técnicos y piscicultores deben estar atentos a la velocidad de infiltración del agua. A través de métodos simples y rápidos, puede ser evaluado y cuantificado el grado de infiltración, evitando la frustración de construir los estanques en lugares inadecuados, así como también, el excesivo gasto de tiempo y dinero en la construcción y en el uso de medidas posteriores para remediar la infiltración, que no siempre solucionan completamente el problema.

Pruebas rápidas de infiltración pueden ser realizadas, cavando trincheras en el suelo. El fondo de las trincheras debe tener la misma cota del fondo de los estanques. La trinchera debe ser llenada con agua para saturar el suelo de las paredes laterales y del fondo. Con el auxilio de una regla, a intervalos regulares (de 5 en 5, de 10 en 10, de 20 en 20, de 30 en 30 de 60 en 60 minutos, o el tiempo que sea necesario), deben registrarse las alteraciones en el nivel de agua.

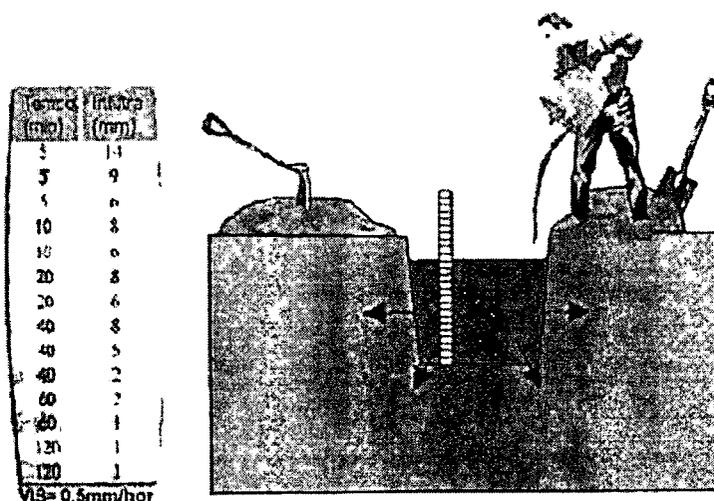


Figura 23 Método de infiltración de agua en el suelo

La trinchera debe mantenerse siempre llena, adicionándose agua periódicamente a lo largo del prueba de infiltración. La velocidad de infiltración básica (VIB) se obtiene en el momento en que las lecturas de infiltración se estabilizan. Por ejemplo, si después de intervalos de 120 minutos, la infiltración se estabilizó en 1 mm, la VIB será 1 mm en dos

horas, o 0,5mm/h. La infiltración del agua también puede ser cuantificada utilizando el método de los anillos concéntricos. Dos anillos de hierro con altura de alrededor de 25 cm (uno con 40cm y el otro con 20cm de diámetro) son clavados en el suelo en la posición que corresponderá a la cota del fondo de los estanques.

Generalmente es necesario abrir una trinchera en el terreno. Los anillos se clavan en el suelo a una profundidad de alrededor de 8 a 10cm, fijándose que el anillo menor esté bien posicionado en el centro del anillo mayor. El espacio entre el anillo mayor y el menor es previamente llenado con agua, para inducir la formación de un frente mojado en el suelo.

Seguidamente se introduce agua dentro del anillo menor. Se coloca una regla en el interior del mismo y la infiltración (en milímetros) debe anotarse a intervalos de tiempo igualmente espaciados. Cuando la infiltración se estabiliza, es posible calcular la velocidad de infiltración básica (VIB) de agua en el suelo.

Las pruebas de infiltración usando trincheras, con o sin el uso de anillos concéntricos, también posibilitan evaluar la eficacia de estrategias para reducir la infiltración de agua en el suelo. El efecto de compactación del suelo del fondo del estanque, la incorporación de materiales arcillosos (suelos arcillosos obtenidos en áreas próximas o la bentonita), del uso de dispersantes como la soda cáustica y el cloruro de sodio, de la aplicación de fertilizantes orgánicos (de pollo y otros estiércoles de animales; viñedos; afrechillos vegetales), entre otras categorías. Las estrategias para reducir la infiltración de agua en el fondo de los estanques se comentan con mayor detalle en los siguientes artículos.

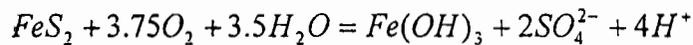
3.1.6.5 Suelos críticos.

Existe diversos tipos de suelos que son inadecuados para la construcción de estanques, sea porque presentan rocas, por su alta permeabilidad y o por la baja estabilidad que proporcionan a los taludes y/o diques. Por lo tanto, este artículo dedica especial atención a dos tipos de estos suelos: los suelos ácido sulfatados y los suelos orgánicos (turberas).

Suelos ácido –sulfatados. Diversas zonas de manglares o, asimismo terrenos donde se acumule material orgánico bajo condiciones de inundación o encharcamiento, pueden presentar suelos ácidosulfatados. Estos suelos tienen origen en los depósitos aluvionales de las áreas de

inundación. En estas áreas se desarrolla una densa vegetación y floresta de manglares o pantanos que favorecen el acumulo de material orgánico (raíces, hojas, frutos, ramas) en áreas frecuentemente inundadas. La descomposición de este material orgánico no sólo produce condiciones de anaerobiosis (ausencia de oxígeno), sino también produce gran cantidad de bacterias reductoras de azufre. Estas bacterias producen sulfatos, que se acumulan en el suelo en forma de H₂S (gas sulfúrico) o de disulfato de hierro (FeS₂), que posteriormente forma el mineral hierro-pirita.

El hecho de que el suelo esté encharcado no significa problema, en tanto que estas áreas se encuentren limpias y drenadas para proceder a la construcción de estanques, pero estando el suelo expuesto al aire, se produce la formación de ácido sulfúrico, lo que hará que el pH del suelo baje drásticamente. Por lo tanto, después del drenaje este sedimento se tornará en un suelo ácido-sulfatado.



La identificación de un suelo ácido sulfatado: puede ser detectado a través del olor característico a huevo podrido (gas sulfúrico – H₂S) y por la lectura de un valor de pH por debajo de 4, en una muestra de suelo seco (100g de suelo seco en 100ml de agua destilada, realizando la lectura por medio de un peachímetro).

El tope de los taludes o coronamientos de los diques construidos con ese tipo de suelo estará continuamente expuesto al aire, produciéndose la formación de ácido sulfúrico. Con la lluvia sobre los diques, el ácido sulfúrico es llevado hacia dentro de los estanques. Algunas medidas correctivas que pueden tomarse son por medio de encalado y mantenimiento de los taludes protegidos a su vez con pasto o gramilla resistente a suelos ácidos. Los estanques construidos en suelos ácido-sulfatados, necesitan de dosis muy elevadas de cal para la neutralización de su acidez y por lo tanto, deben atravesar varios llenados y desagotes antes de alcanzar un pH de agua más adecuado para la siembra de peces, camarones y langostas. Evitar la exposición de estos suelos al aire (o sea, dejando poco tiempo los estanques sin agua) es una medida más eficaz que estar todo el tiempo corrigiendo la acidez con la aplicación de cal.

3.1.6.6 Suelos orgánicos

Los suelos orgánicos son aquellos que poseen más de un 20% de carbono orgánico en la materia seca o aquellos que presenten más de la mitad de los primeros 80cm formados por suelo orgánico.

Estos suelos son de fácil reconocimiento debido a la coloración oscura típica, su fuerte olor a moho y la presencia y predominio de un material orgánico fibroso en el horizonte superficial. Los suelos orgánicos presentan poca estabilidad y resistencia al desplazamiento y no permiten una buena compactación, no siendo, por lo tanto, adecuados para la construcción de estanques. Las turberas están constituidas por suelos orgánicos que pueden presentar horizonte superficial orgánico con más de un metro de profundidad. Construir estanques con suelos de estas características es muy costoso y técnicamente casi imposible, a no ser que sea realizado con un empréstito de suelos más adecuados, provenientes de otras áreas. También existe una necesidad de remover la camada orgánica antes del inicio de los trabajos de terraplenado.

Capítulo 4

Simulador de sistema acuícola

4.1 Construcción del simulador

Para poder hacer investigación en alguna área, es necesario contar con los medios adecuados, multímetro, osciloscopio, computadora, sensores, tarjeta de adquisición, entre otras cosas, pero lo más importante es el *sistema* o planta donde se desarrollará la investigación y los conocimientos generales y específicos del sistema. Sin embargo, existen sistemas que aún no han sido explorados o que su conocimiento está en desarrollo y la información aún no está disponible.

Cuando se tienen conocimientos poco fundamentados, es necesario recurrir a la experimentación para validarlos, pero la mayoría de los casos hay dificultad para poder experimentar con el sistema, debido a que no siempre está a la mano o disponible para experimentación, ya que esta puede dañar al sistema permanentemente, tal es el caso de una máquina herramienta.

La construcción de un simulador *físico* siempre es conveniente, debido a que, no siempre se tienen conocimientos completos de áreas ajenas a la nuestra, en este caso la piscicultura. Hay que tener en cuenta que un simulador aún está lejos de lo que sería un sistema piscícola.

Para este proyecto se construyó un simulador físico de un sistema piscícola en la Universidad Autónoma de Querétaro, con las siguientes características, espejo de agua, profundidad máxima, profundidad mínima, lo que da un volumen aproximado de 2 m^3 . Para evitar la permeabilidad del agua, se ha colocado plástico calibre 2000 en el fondo. Una característica importante es, que ha sido cubierto con invernadero, polietileno con factor de transmisibilidad de 0.9, calibre 2000 color transparente. Esto permite mantener la temperatura del agua 5.2°C por encima de la temperatura del aire externo (Zhu, 1998).

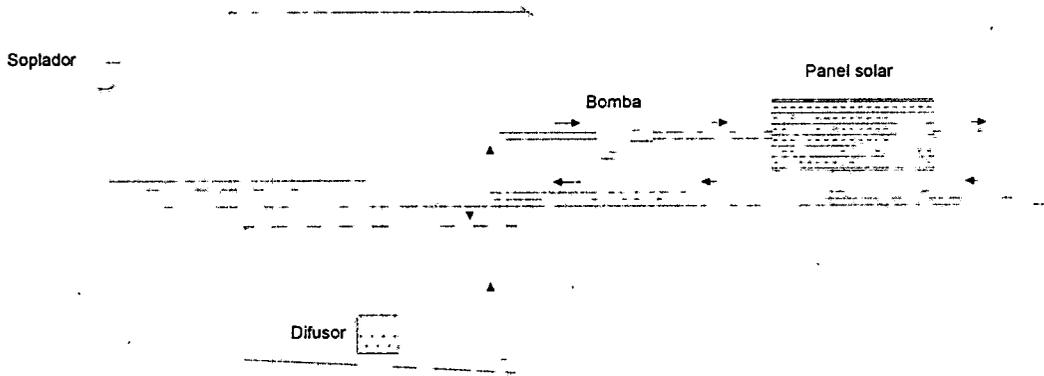


Figura 24 Diagrama del simulador acuicola.

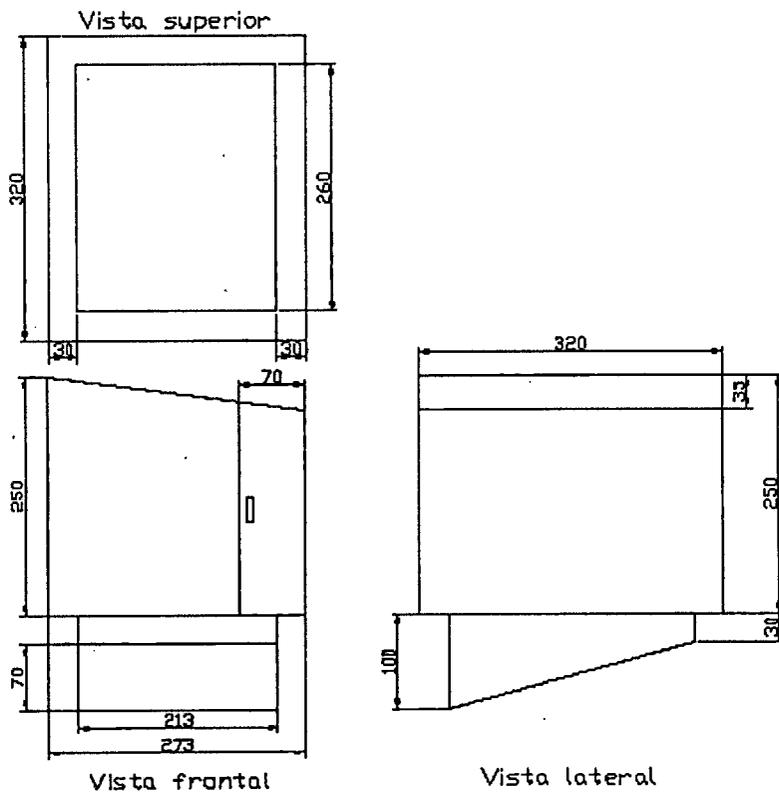


Figura 25 Esquema dimensional del simulador.

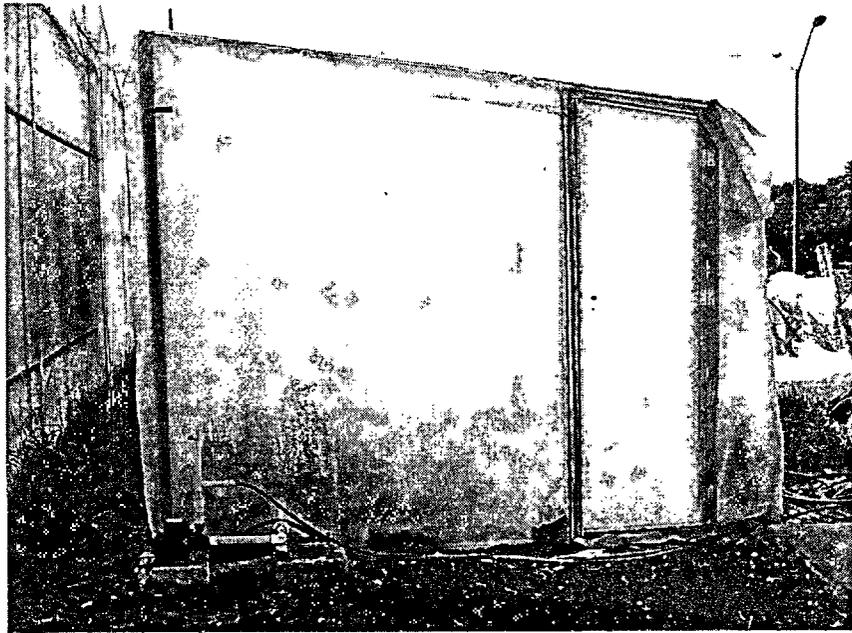


Figura 26 Simulador acuícola, vista exterior.



Figura 27 Simulador acuícola, vista interior.

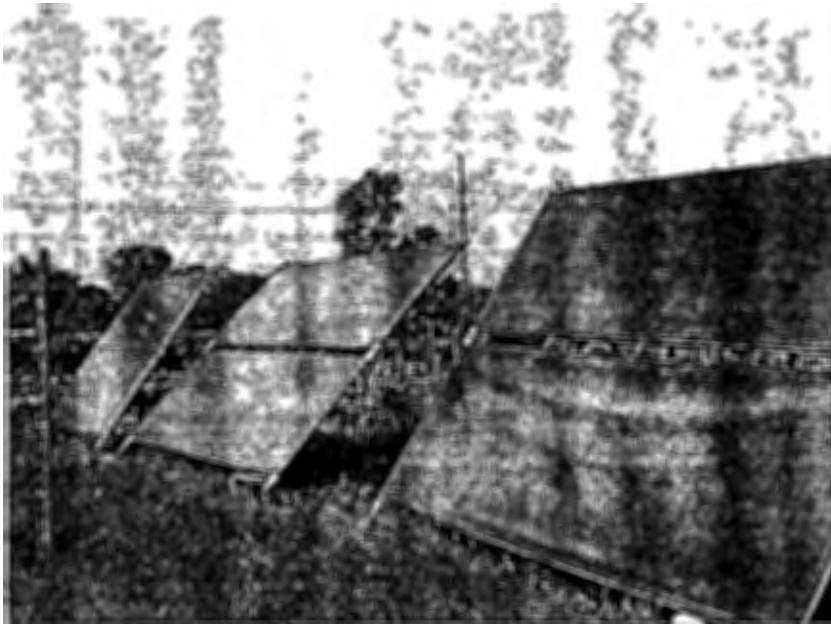


Figura 28 Paneles solares utilizados para la calefacción del agua.

4.2 Instalación hidráulica y aireación

La instalación hidráulica del sistema esta constituida como se muestra en la siguiente figura,

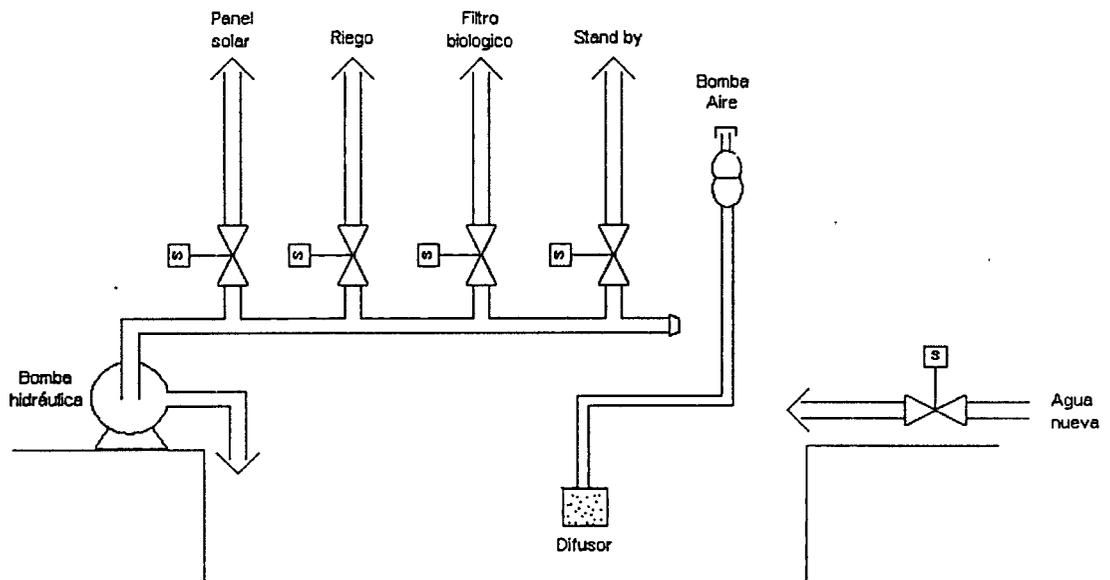


Figura 29 Diagrama de la instalación hidráulica y aireación del simulador acuícola.

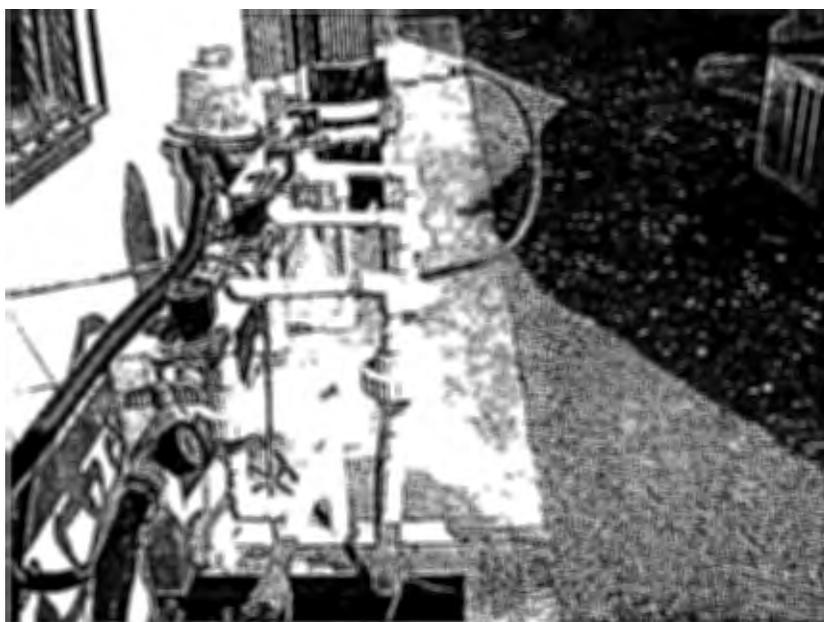


Figura 30 Instalación hidráulica y soplador.

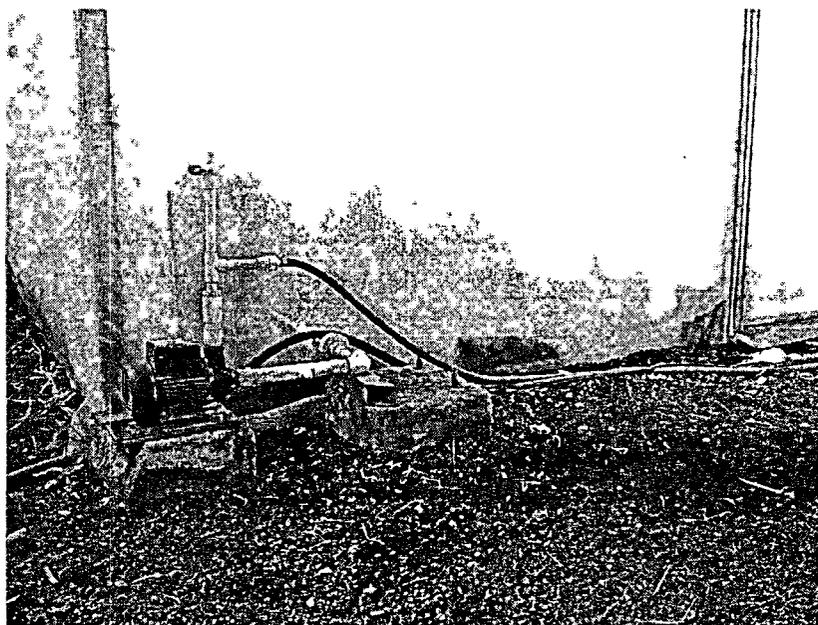


Figura 31 Bomba hidráulica utilizada.

4.3 Instrumentación

La medición de cada variable se hará en línea con sensores electrónicos con transmisor incluido los cuales enviarán la señal medida (estandar 4 a 20 mA) hasta un modulo

de recepción el cual convierte la señal de 4 a 20 mA a una señal de 0 a 5 volts, los cuales son tomados por la computadora por medio de una tarjeta de adquisición de datos que será construida por nosotros.

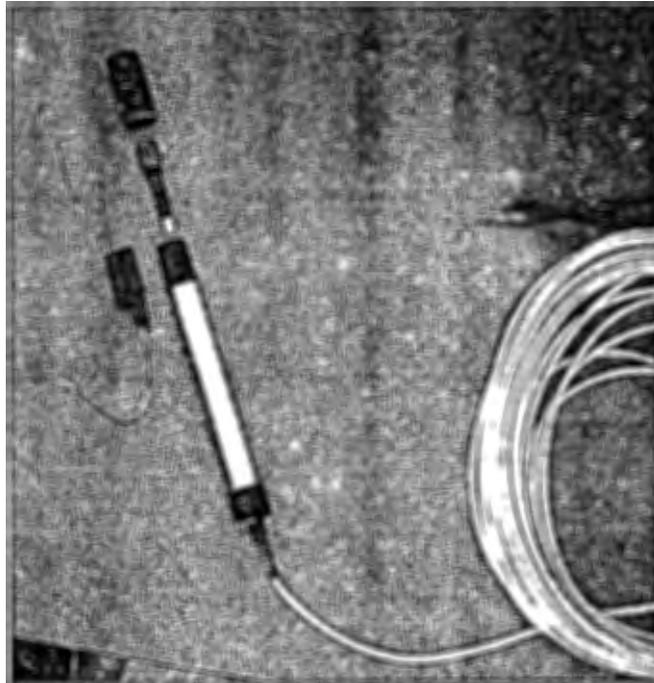


Figura 32 Tipo de sensores utilizados (oxígeno disuelto)

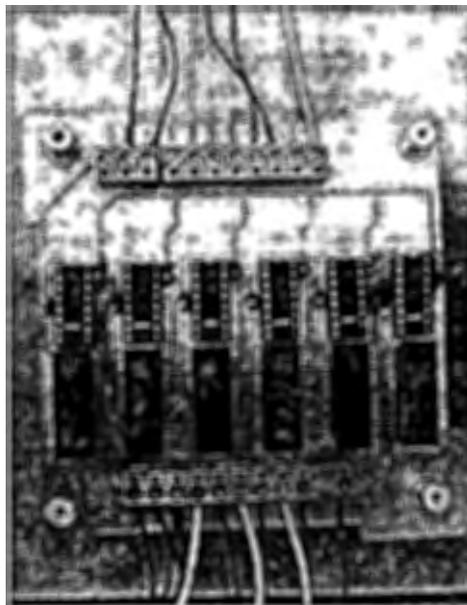


Figura 33 Modulo de recepción para los transmisores.

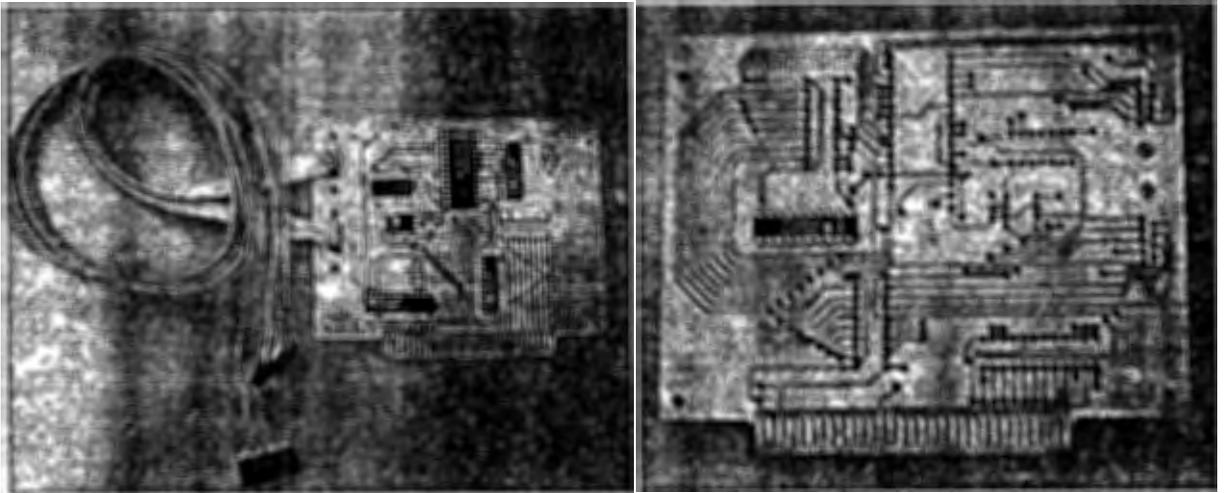


Figura 34 Tarjeta de adquisición de datos utilizada.

Para la monitorización de la variables se utilizaran los siguientes sensores: temperatura y oxígeno disuelto. Estos serán colocados a una altura aproximada de 60cm con referencia al fondo del estanque. Al interior del invernadero se instalará un sensor de temperatura ubicados a una altura de 1.6m. Prestándose especial atención en la posición de los sensores, ya que es de gran importancia para medidas de condiciones climáticas. Para el desarrollo sistema de monitorización será necesario la instrumentación, ajuste y calibración de los sensores para adecuar la señal proveniente de los sensores a la PC. Para el desarrollo de la instrumentación se utilizaran dispositivos electrónicos (Dispositivos lineales, amplificadores de instrumentación, etc) adecuados a los sensores. Para el ajuste y calibración de los sensores se utilizaran instrumentos patrón con los que se cuenta en la U.A.Q. Las señales de los distintos tipos de sensores será sujetas a un filtrado, tanto analógico (filtro pasa-bajas) como digital (filtro mediana - promediador). Además, los datos obtenidos de esto sensores que serán almacenados en la PC y posteriormente utilizados para la identificación del sistema piscícola. La manipulación de los actuadores del sistema de control piscícola se utiliza el puerto paralelo y la siguiente interfaz,



Figura 35 Interfaz de potencia para los actuadores.

El software de control automático y monitoreo de las variable físico-químicas será desarrollado en el lenguaje de programación C. El programa grabará los datos fisicoquímicos dentro de una base de datos cada cinco minutos. Éste programa permitirá interactuar con la tarjeta de control de actuadores y de adquisición de datos. En la siguiente figura se muestra la interfaz desarrollada hasta el momento,

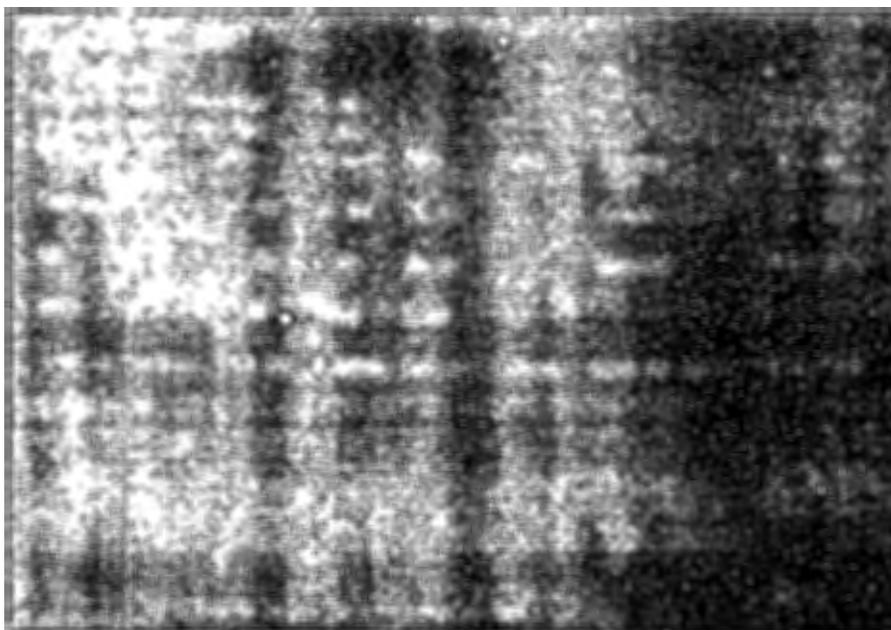


Figura 36 Interfaz de usuario del sistema aucúcola.

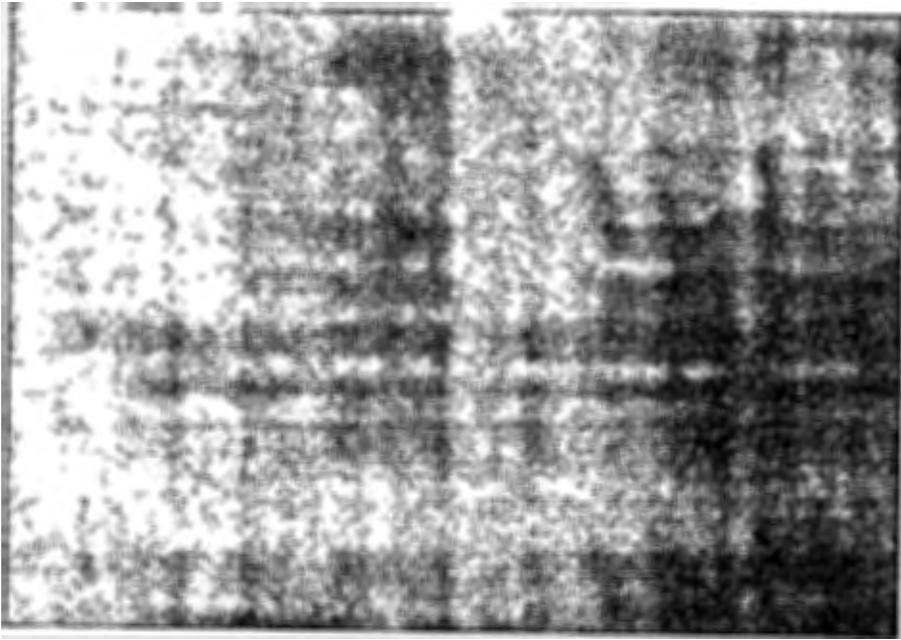


Figura 36 Interfaz de usuario del sistema aucúcola.

Capítulo 5

Modelado

En aplicaciones de ingeniería de control es una práctica común desarrollar modelos que describan el sistema a ser controlado. La generación de un modelo matemático requiere la síntesis del conocimiento existente sobre un proceso o sistema. Este modelo permite ajustar los parámetros del sistema de control (sintonizar) sin necesidad de realizar físicamente el controlador, permitiéndonos realizar las pruebas que sean necesarias, así como las modificaciones pertinentes por medio de simulación. Para diseñar un controlador climático eficiente se requiere tener un conocimiento a priori de los modelos climáticos relacionados con las influencias externas de las condiciones del clima exterior (radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento, etc.) y con el equipamiento utilizado en el estanque acuícola (sistema de calefacción, sistema de aireación, etc.). Durante los últimos años, una gran cantidad de conocimiento científico ha sido acumulado y expresado en modelos matemáticos en lo que respecta a los sistemas acuícolas.

En general existen tres tipos de modelos matemáticos: modelos empíricos, mecanísticos y telenómicos. Los modelos empíricos son descripciones directas de datos y proporcionan relaciones observables entre las variables de un sistema sin ninguna explicación de los mecanismos subyacentes. Son un poderoso medio para describir y resumir datos. Ejemplos de este tipo de modelos son los modelos de regresión simple o múltiple. Otro ejemplo lo constituyen las redes neuronales. Los modelos telenómicos son aplicables a comportamientos dirigidos por objetivos y se formulan en términos de metas. Los modelos mecanísticos son modelos determinísticos y explicativos de un sistema. Normalmente, un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias es definido para describir el comportamiento de las variables de estado del sistema, las variables que representan las propiedades o atributos del sistema considerado. Los modelos mecanísticos son más apropiados para expresar hipótesis matemáticamente y proporcionar así una descripción cuantitativa y explicación de los procesos más importantes que ocurren en un sistema. El desarrollo de un modelo matemático mecanístico requiere de suficiente comprensión de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en un sistema y su uso demanda una validación apropiada.

Identificación

Para implementar alguna técnica de control al sistema piscícola es necesario contar con un modelo del sistema. En estos sistemas como se menciono anteriormente las variables principales del agua que afectan de manera directa el crecimiento del pez son: temperatura y oxigeno disuelto. Dada la naturaleza multivariable de estos sistemas la obtención de un modelo mecanicista, llega a ser un proceso bastante complicado y no es fácilmente aplicable para control. Es por esto que para el diseño de control de este sistema multivariable se plantea la obtención de un modelo de caja negra a través de identificar la planta mediante el método de mínimos cuadrados (MMC) utilizando un modelo ARX. El sistema estará compuesto de μ entradas (calefacción y aireación) y ν salidas (temperatura del agua y oxigeno disuelto) teniendo como perturbación la temperatura del medio ambiente, la radiación solar, la velocidad del viento, la talla del pez, la densidad de siembra, entre otras.

Algoritmo de Identificación

El modelo ARX multivariable correspondiente puede definirse como,

$$y(k) = \sum_{j=1}^n A_j y(k-j) + \sum_{j=0}^n B_j u(k-j) + e(k)$$

donde:

- $y(k)$ vector de las salidas de dimensión ν
- $u(k)$ vector de las entradas de dimensión μ
- A_j, B_j matrices $\nu \times \nu$ y $\nu \times \mu$ de los coeficientes de regresión
- $e(k)$ vector del ruido de dimensión ν

Un modelo compacto equivalente puede escribirse como sigue:

$$y(k) = P^T z(k) + e(k)$$

donde:

$y(k)$ es un vector de dimensión ν de las salidas, y

$$z^T(k) = [u^T(k)y^T(k)u^T(k-1)\dots y^T(k-n)u^T(k-n)]$$

es un vector de dimensión:

$$\rho = [\mu + (\mu + \nu)n]$$

P^T es la matriz de dimensión $\nu \times \rho$ con la estructura siguiente:

$$P^T = [B_0 A_1 B_1 \dots A_n B_n]$$

El modelo generalizado para t mediciones puede escribirse de la forma siguiente:

$$Y^T(t) = P^T Z^T(t) + E^T(t)$$

con las definiciones siguientes:

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y^T(1) \\ y^T(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ y^T(t) \end{bmatrix} \quad Z(t) = \begin{bmatrix} z^T(1) \\ z^T(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ z^T(t) \end{bmatrix} \quad E(t) = \begin{bmatrix} e^T(1) \\ e^T(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ e^T(t) \end{bmatrix}$$

$Y(t)$ y $E(t)$ son ahora las matrices de dimensión $t \times \nu$ y $Z(t)$ es una matriz $t \times \rho$.

Herramienta de identificación de Matlab.

La herramienta de identificación no sirve para construir de manera precisa modelos simplificados de sistemas complejos desde series de datos ruidosos. Esta proporciona herramientas para crear modelos matemáticos de sistemas dinámicos basados en la observación de los datos de entrada y salida al sistema. Una característica de esta herramienta es que contiene una interfaz gráfica para ayudar al usuario a la organización de datos y

modelos. Las técnicas de identificación proporcionadas con esta herramienta son usadas en un amplio rango de aplicaciones en el diseño de sistemas de control y procesamiento de señales.

Para la determinación de los parámetros, se utiliza la herramienta de identificación de Matlab, la cual se muestra a continuación,

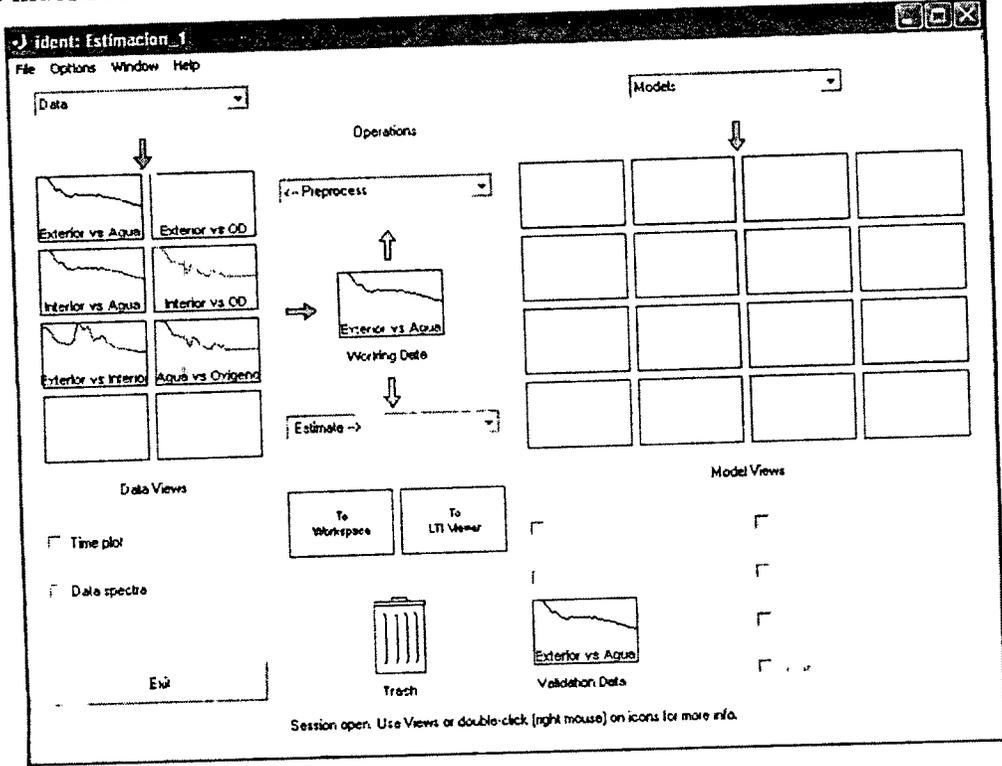


Figura 37 Herramienta de Matlab para la identificación de los parámetros.

Con esta herramienta se generarán varias respuestas del sistema con diferente orden de los polinomios y diferentes estructuras.

Capítulo 6

Experimentación, Resultados y Conclusiones

6.1 Experimentación

Uno de los objetivos principales de la acuicultura intensiva es lograr una mayor producción de peces por metro cúbico de agua. Es importante, notar que, la mayor parte de las granjas acuícolas de nuestro país están actualmente trabajando con densidades de 50 peces por metro cúbico de agua. Cuando se trabaja con este tipo de densidades, es necesario suministrar el 100% del alimento que será consumido por los peces. En esta parte es importante señalar que este representa el mayor costo del proceso.

Durante el crecimiento, la energía adquirida por los peces se reparte en,

- Materiales eliminados (heces, orina y otras excreciones)
- Energía en biomasa
- Procesos metabólicos

Esto se puede apreciar mejor si se observa en la siguiente figura,

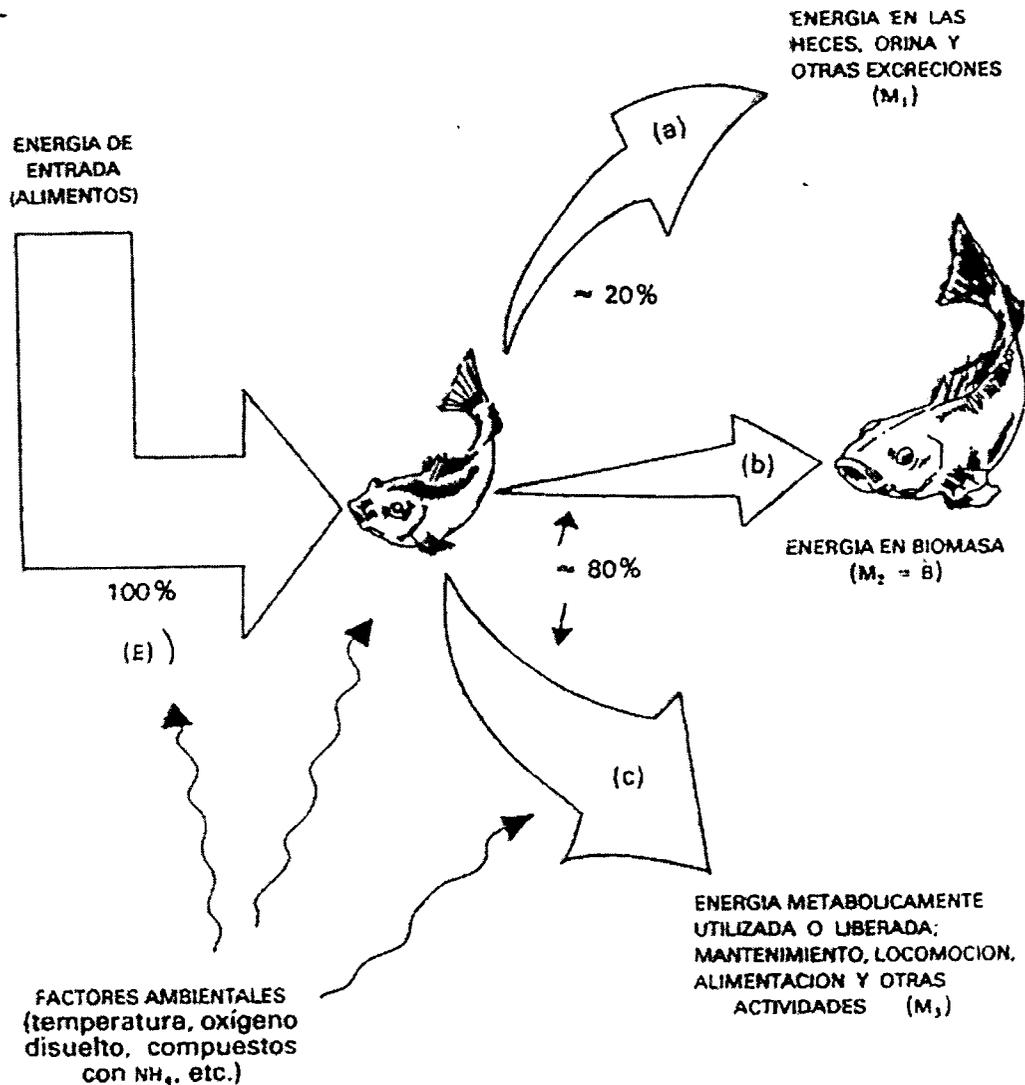


Figura 38 Balance energético de un animal en cultivo.

Como se puede observar en la Figura 38, las variables más importantes en este tipo de densidad, son la temperatura y el oxígeno disuelto. Variables como el pH, el amoníaco, turbidez, conductividad, entre otras, son poco críticas y corregidas con un flujo continuo de agua.

La temperatura, a pesar de ser una de las variables más importantes, por tener relación directa con los procesos químicos y biológicos, no es tan crítica comparada con el oxígeno

disuelto, debido al impacto inmediato que tiene en los peces. Por ejemplo, las tilapias, al ser sometidas a una temperatura de 20 °C reducen en forma definitiva su crecimiento, al los 18 °C dejan de alimentarse. Es más, pueden tolerar temperaturas de hasta 14°C por varios días, pero al dejar de alimentarse terminan por morir (Morales, 2003). La importancia de esta variable radica, más que nada, en la eficiencia alimenticia de los peces, y un rango de 26 a 30 °C es bueno para su buen crecimiento.

El oxígeno disuelto sin embargo, es una variable crítica debido a las densidades manejadas en la acuicultura intensiva. Es importante mantener del 60% al 95% de saturación (Morales, 2003). Niveles por debajo de 4mg/l afectan el crecimiento y además, provocan estrés. El nivel de saturación a 30°C y 5000 mg/l de cloruros, nos da 7.3 mg/l. Niveles inferiores de cloruros y temperaturas más bajas aumentan el nivel de saturación (Sawyer, 2001).

La determinación del oxígeno disuelto en el agua en relación con su valor de saturación y de la cantidad y velocidad de la utilización del oxígeno (DBO), proporciona un medio rápido y útil para identificar el estado de contaminación del agua e indirectamente, también, la cantidad de materia orgánica sujeta a descomposición contenida en ésta en un tiempo determinado.

Es importante notar, que tanto la temperatura como el oxígeno disuelto, cuando están fuera de rango producen estrés. Esto generalmente provoca que los peces dejen de alimentarse, pero, principalmente se provocan algunos tipos de enfermedades, por ejemplo, las enfermedades bacterianas, como el síndrome de la Septicemia Hemorrágica Bacteriana (SHB), las bacterias que lo producen son una componente normal de la bacterioflora de las tilapias y de su ambiente acuático, estas al ser sometidas a condiciones de estrés ocasionan enfermedad y puede producir pérdidas del 5% hasta el 100%.



Figura 39 Enfermedades ocasionadas por mal manejo en la calidad del agua (Estreptococosis).

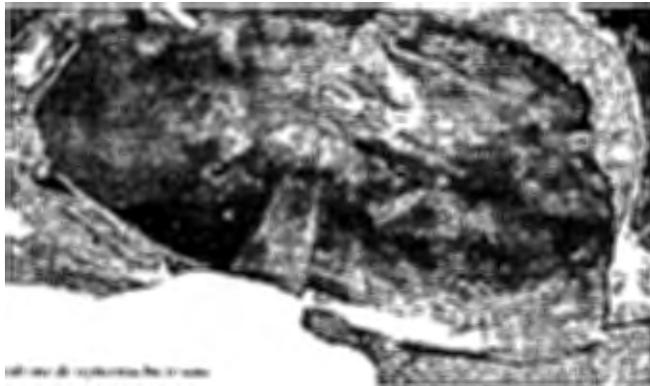


Figura 40 Enfermedades ocasionadas por mal manejo en la calidad del agua (Síndrome de septicemia bacteriana).

Para resolver esta problemática es necesario tener un control preciso de estas variables. El objetivo de este trabajo es determinar el modelo dinámico del sistema, por el momento de temperatura, para poder más adelante, implementar alguna técnica de control. Para el experimento se construyó un sistema acuícola, el cual se muestra en la Figura 41.

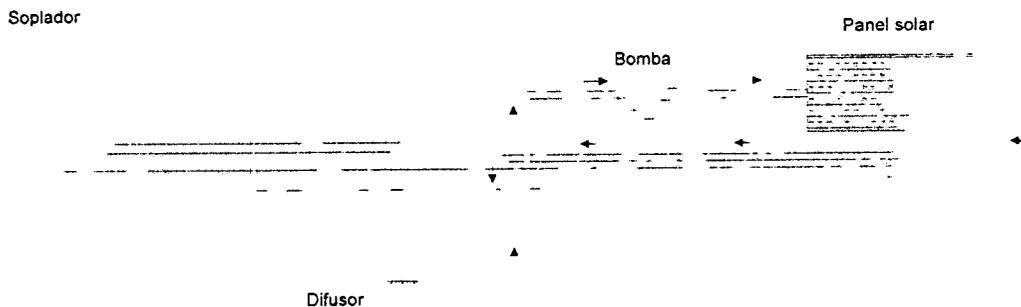


Figura 41 Simulador físico del sistema acuícola.

El simulador tiene un volumen aproximado de dos metros cúbicos de agua, en el cual se ha colocado plástico en el fondo para evitar la filtración. Además, ha sido cubierto con una estructura cerrada (invernadero) con plástico, con un factor de transmisibilidad de 0.9, para evitar las pérdidas de calor. Para elevar la temperatura del agua cuando se requiera, se han utilizado 3 paneles solares, por los cuales se hace recircular el agua del estanque por medio de una bomba hidráulica. Para mantener el oxígeno disuelto, se ha instalado un soplador, para inyectar aire y lograr la transferencia del oxígeno con burbujas. La eficiencia con este método de oxigenación se encuentra entre 5 y 15%. Debido a que un litro de aire libre contiene alrededor de 273mg de oxígeno, se puede absorber del tanque 14 a 41 mg. de oxígeno por cada litro de aire difundido el interior del estanque (Fair, 1971). La densidad de cultivo es de 125 peces/m³ (etapa juvenil del pez).

Un diagrama de bloques de lo que es el sistema se muestra en la Figura 42,

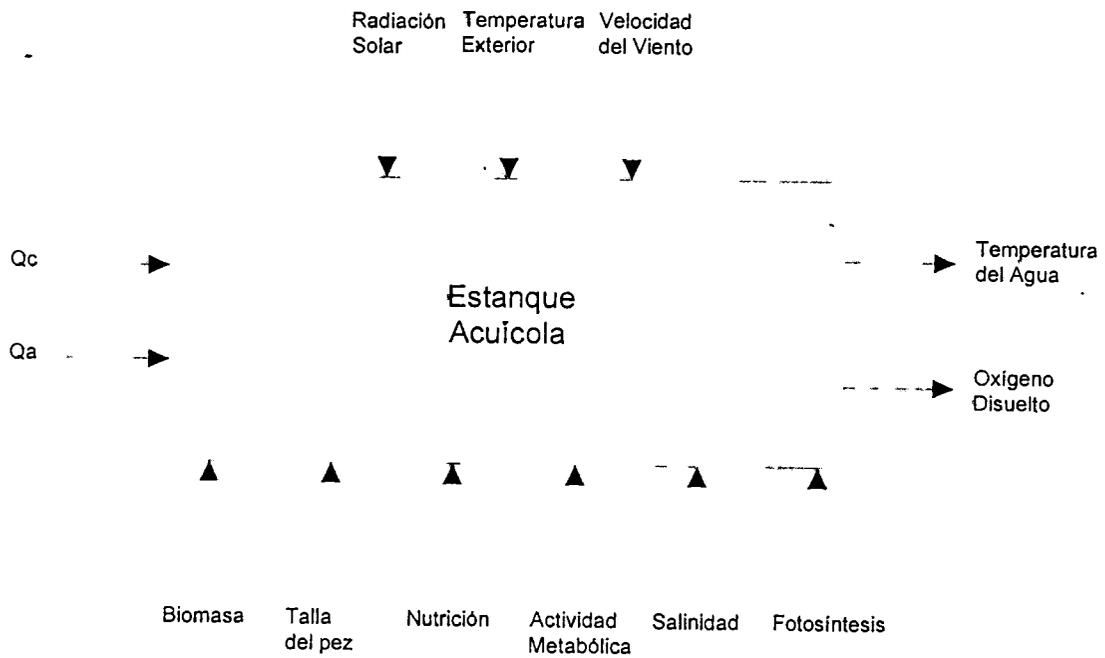


Figura 42 Entradas, salidas y perturbaciones del sistema.

Donde,

Q_c es el flujo de agua caliente que llega al estanque.

Q_a es el flujo de aire que se suministra al estanque para la oxigenación.

Para inferir el modelo del sistema, consideramos como entradas la temperatura del aire exterior, la temperatura del aire interior del invernadero y la radiación solar y como salida la temperatura del agua, como se muestra en la siguiente figura,

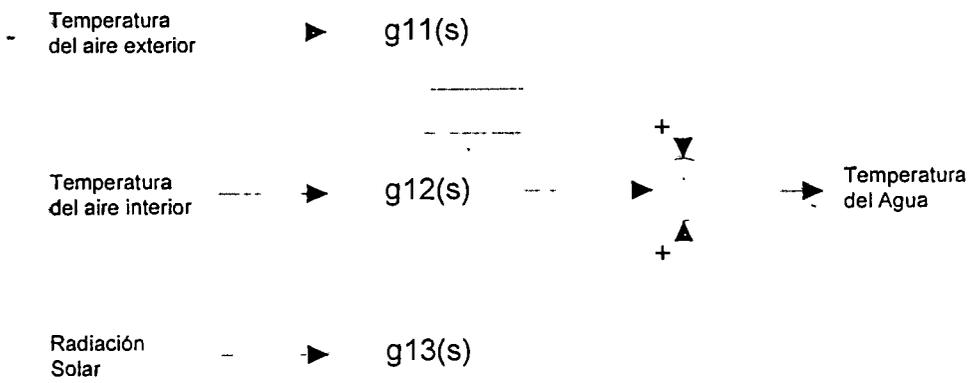


Figura 43 Esquema del sistema con dos entradas (temperatura del aire exterior e interior al invernadero) y una salida (temperatura del agua).

Para apreciar el comportamiento de las entradas con la salida se grafican a continuación las siguientes curvas,

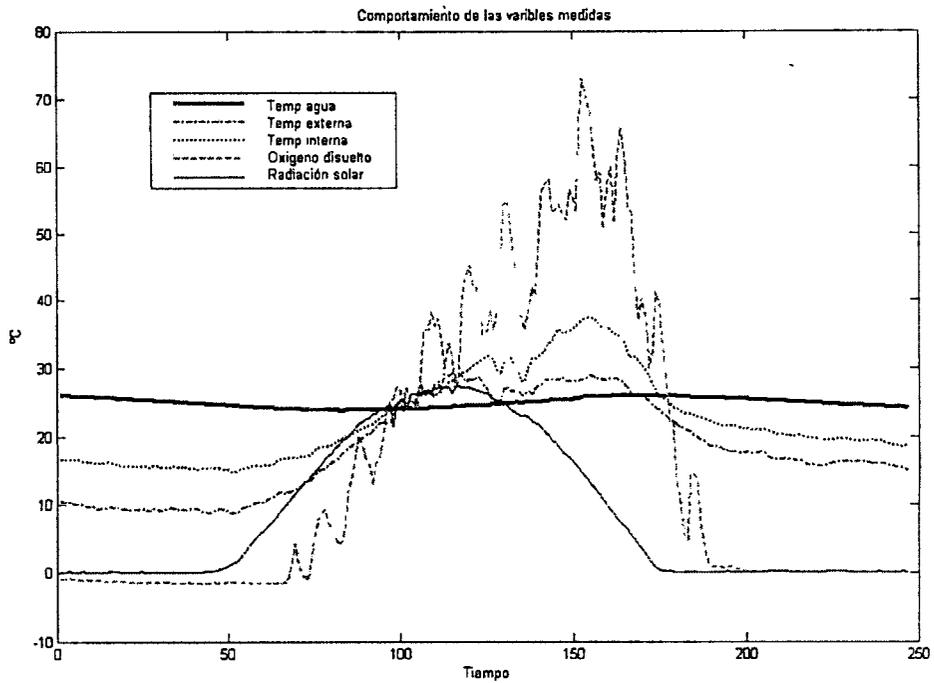


Figura 44 Variables medidas del sistema.

El efecto de la radiación sobre la temperatura del agua se muestra en la siguiente figura,

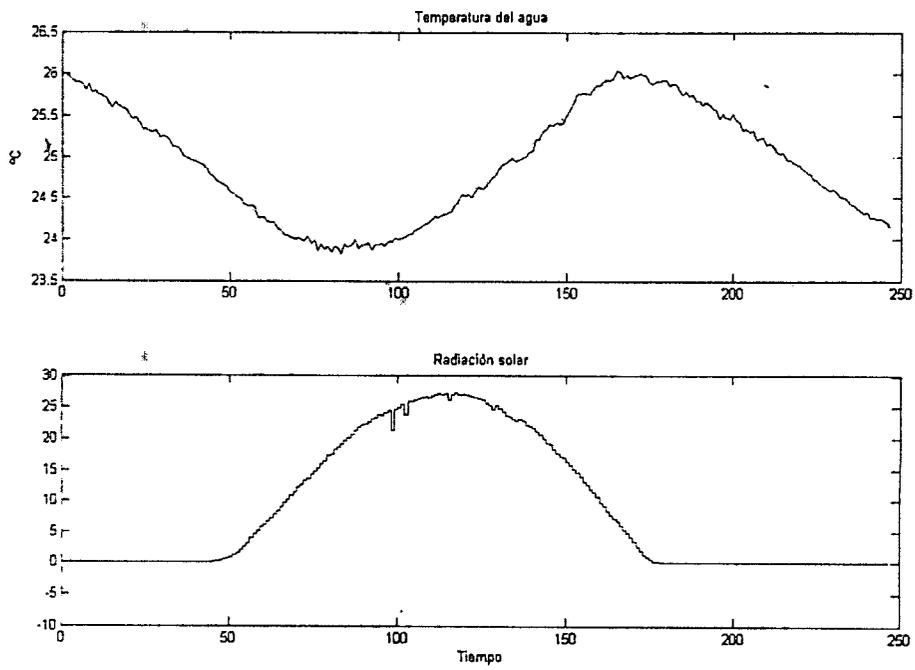


Figura 45 Temperatura del agua vs Radiación solar.

El efecto de la temperatura del aire exterior sobre la temperatura del agua se muestra a continuación,

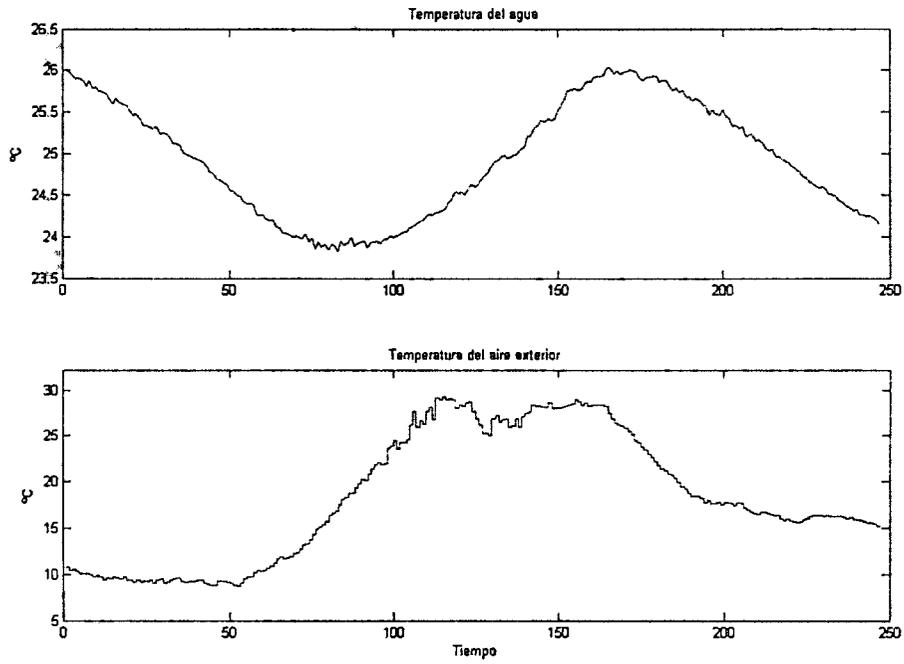


Figura 46 Temperatura del agua Vs Temperatura del aire exterior.

El efecto de la temperatura del aire interior sobre la temperatura del agua se muestra en la siguiente figura,

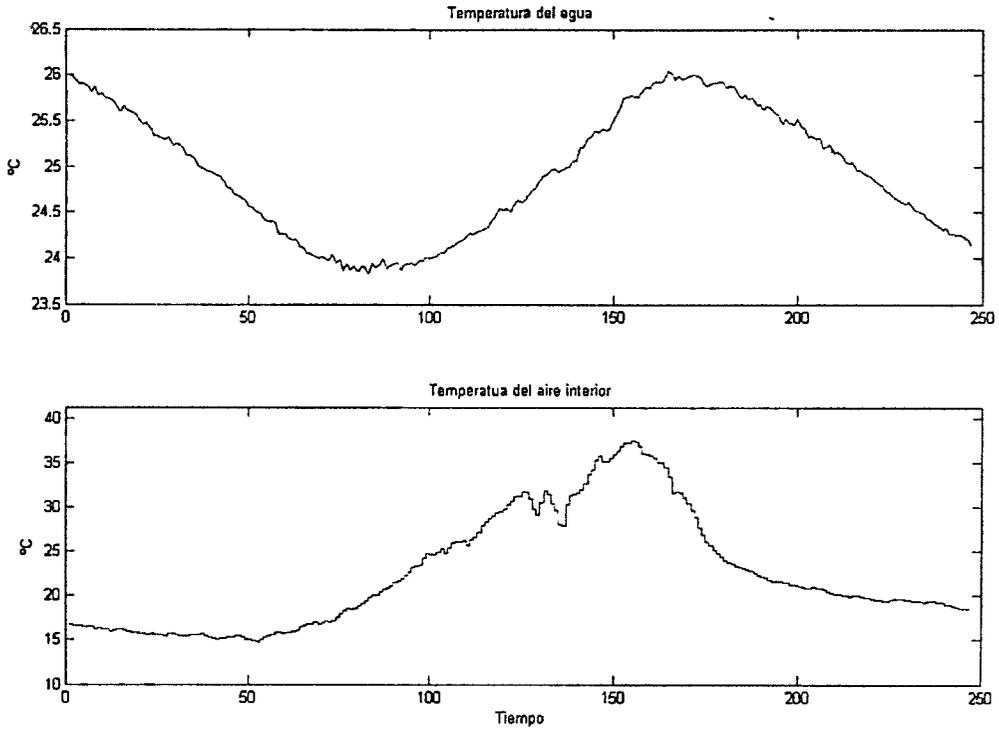
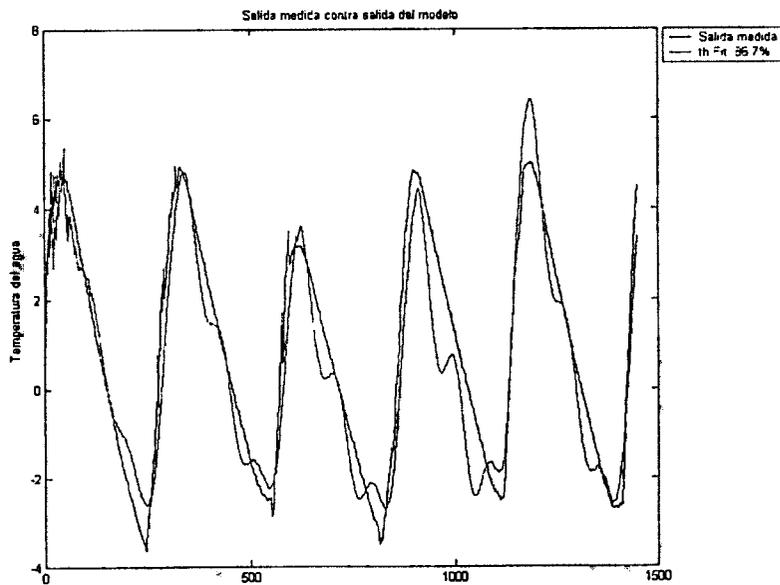
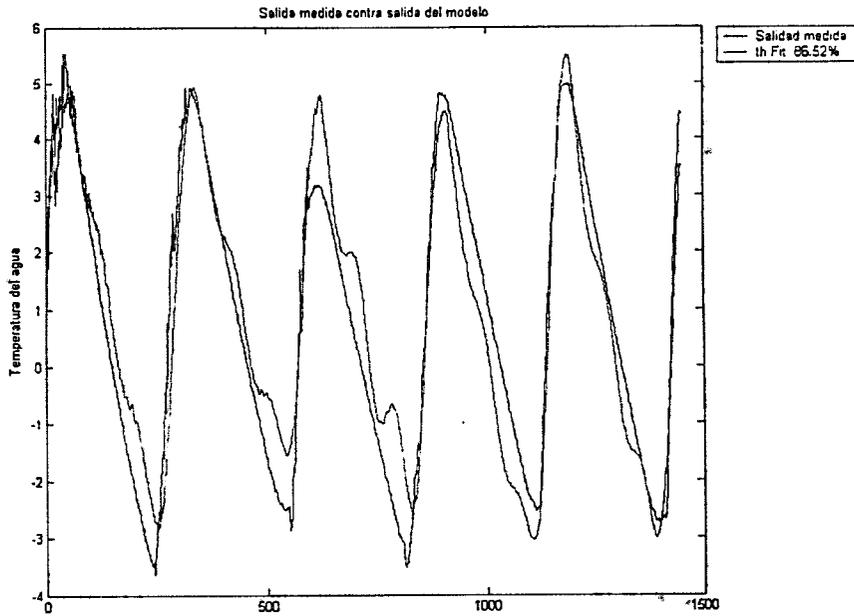


Figura 47 Temperatura del agua Vs Temperatura del aire interior.

Como se puede observar en la Figura 46, puede considerarse el efecto de la temperatura exterior constante en una parte de la gráfica. En la misma zona pero de la Figura 47, se puede apreciar que la temperatura del aire interior presenta variaciones considerables, con esto, podemos determinar con este segmento de datos, el modelo del sistema afectado solo con la temperatura del aire interior.

6.2 Resultados

En las siguientes gráficas se muestran diferentes simulaciones de la comparación de la salida media contra la salida del modelo generado de varios días,



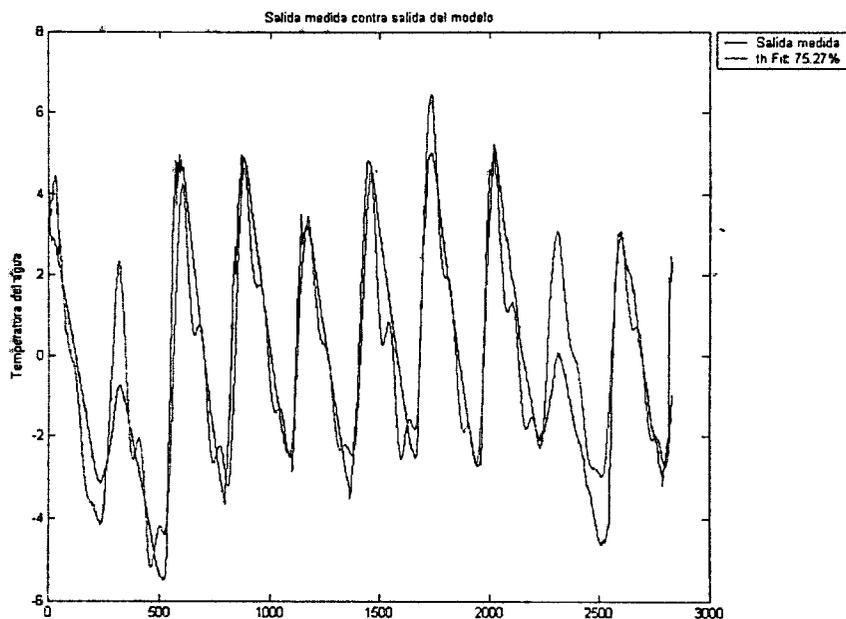


Figura 48 Simulaciones de la salida medida contra la salida del modelo generado.

Los polinomios generados con la estructura ARX son los siguientes,

$$A(q) = 1 - 0.9034q^{-1} - 0.07921q^{-2}$$

$$B(q) = 0.02123q^{-1} - 0.01235q^{-2}$$

La función de transferencia queda como,

$$G(s) = \frac{0.0212s - 0.0124}{s^2 - 0.9034s - 0.0792}$$

6.3 Conclusiones

Los datos obtenidos de las simulaciones indican que el sistema de caja negra se aproxima lo necesario a las mediciones tomadas del sistema real, por lo tanto, se puede considerar como el modelo matemático que determina el comportamiento dinámico de la temperatura del agua para efectos de control. Una de las ventajas inmediatas es, que gracias a las simulaciones obtenidas puede tenerse un conocimiento más amplio del verdadero comportamiento del sistema, lo que genera un conocimiento más acelerado de este tipo de plantas. Se debe considerar que en estos experimentos solo son el inicio de esta investigación,

es necesario hacer los experimentos con densidades mayores para poder evaluar correctamente el sistema, y considerar las variables faltantes, como son el Oxígeno disuelto, el pH, el amonio, la turbidez y la conductividad principalmente. Hay que tomar en cuenta que el desarrollo tecnológico debe ir a la par de la investigación, para poder proporcionar a la gente productora un producto terminado de calidad y de tecnología nacional. Con esto se pretende, que el sector acuícola sea un sector industrial importante para nuestro país.

En Apéndice se muestran fotografías de los avances de la granja acuícola que se esta construyendo en el Rancho de la Universidad Autónoma de Querétaro para posteriores investigaciones.

Referencias

- Aguado Behar Alberto (2000). Temas de identificación y control adaptable. PALCIEN.
- Arredondo Figueroa José Luis (1998). Calidad del agua en acuicultura, conceptos y aplicaciones. AGT, Editor S.A. de C.V.
- Boyd Claude E. (1998). Pond water aeration systems. Elsevier, aquacultural engineering 18(9-40).
- Culberson Steven D., Piedrahita Raul H. (1996). Aquaculture pond ecosystem model: temperature and dissolved oxygen prediction, mechanism and application. Elsevier, Aquacultural Engineering 23(61-93).
- Fair Gordon Maskew, Geyler John Charles y Okun Daniel Alexander (1971). Ingeniería Sanitaria de aguas residuales. Volumen 2 –Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México D.F.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, www.fao.org
- Kemmer Frank N, McCallion Jhon (1990), Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. McGraw-Hill.
- Martínez Córdova Luis R. (1998). Ecología de los sistemas acuícolas. A.G.T. Editor, S.A.
- Matthias Halwart, Martínez-Espinosa Manuel, Schückler Angelika, Schmidt Uli (2000). Los pequeños estanques FAO Departamento de pesca (2000).
- Morales Díaz Armando (1991). La tilapia en México, biología, cultivo y pesquerías. A.G.T. Editor, S.A. de C.V.
- Morales Díaz Armando (2003). Biología, cultivo y comercialización de la tilapia. A.G.T. Editor, S.A. de C.V.
- Romero Rojas Jairo Alberto (1999). Potabilización del agua. Alfaomega, Tercera Edición.
- SAGPyA, Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (2004). Construcción de estanques y de estructuras hidráulicas para el cultivo de peces. Republica de Argentina.
- Sawyer Clair N., McCarty Perry L., Parkin Gene F. (2001). Química para ingeniería ambiental. McGraw-Hill cuarta edición.
- Semarnat, Informe de la situación del medio ambiente en México (2002) – Aprovechamiento de la vida silvestre – Recursos pesqueros.

Sofia, *FAO*, El estado mundial de la pesca y la acuicultura, 2002

Zhu, J. Deltour, s. Wang (1998). Modeling the thermal characteristics of greenhouse pond systems. Elsevier, aquacultural engineering.

Apéndice

Descripción de Programas

```
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<dos.h>

//Definiciones para utilización de hardware
#define start 8

#define chTemperatura      1
#define chOD               2
#define chpH               3
#define chConductividad   4
#define chNivelBajo       5
#define chNivelAlto       6

#define portwrite         0x301
#define portpower         0x302
#define portread          0x303
#define portEOC           0x304

#define ADC 1

//Funciones utilizadas en ensamblador
extern far int vertecla();
extern far long reloj();
extern far long fecha();
extern far clrscro();

//Funciones utilizadas
void capturar(void);
void Tarea_Temperatura(void);
void Tarea_OD(void);
void Tarea_pH(void);
void Tarea_Conductividad(void);
void Tarea_Nivel(void);
void Tarea_Alimentacion(void);
void date(void);
void time(void);
void inicializarbasedatos(void);
void guardar(void);
```

```

void subtítulosvariables(void);
void actualizarsalidas(void);
void On_Off_Control(void);
void Fuzzy_control(void);
void recambiar_agua(void);

//Definición de variables globales
//variables para datos de sensores
float sTemperatura,sOD,spH,sConductividad,sNivelBajo,sNivelAlto;
//variables para los intervalos de medición de las variables
float
    rTemperatura1      = 29,          rTemperatura2      = 30,
    rOD1                = 10,          rOD2                = 35,
    rpH1                = 6.5,          rpH2                = 8.5,
    rConductividad1     = 260,          rConductividad2    = 500,
    rNivel1             = 5,            rNivel2             = 30;
//variables para las coordenadas en pantalla
int xTemperatura      = 3,            yTemperatura       = 8,
    xOD                = 3,            yOD                = 10,
    xpH                = 3,            ypH                = 12,
    xConductividad     = 3,            yConductividad     = 14,
    xNivel             = 3,            yNivel             = 16,

    xhora              = 68,          yhora              = 24,
    xfecha              = 67,          yfecha              = 1,
    xraton              = 1,          yraton              = 24,
    bandera;
//variables para rangos intermedios de actuadores
int  subidaOD = 1,
    subidaTemperatura = 1,
    subidapH = 1,
    subidaConductividad = 1,
    subidaNivel = 1;

//variables para establecer las salidas de hardware
char
    salidas = 0,
    EntradaAgua = MeterAguaOff,
    SalidaAgua = 0,
    Filtro = FiltroOff,
    EntradaOD = 0,
    Calentador = CalentadorOff,Nivel = 0;
int power = 0;
//variable para indicar salida
int salirsino = 0;

//variables reloj

```

```

int horas,minutos,segundos,centseg;
//contadores para muestreo de variables
long contadorTemperatura = 0;

int fw=0,a,b,dato,dato1,dato2,resultado1,resultado2,c=0;
char numerodato;
unsigned long timer = 0, //contador en segundos hasta 86400 (1 día)
numeromuestra = 1;
struct time t; //tomo tiempo inicial

int tiempoinicio = 1;
int timerminutos = 0,
    .empezaradquisicion = 0, //para comenzar la adquisición en segundos = 0
    temperaturamedido = 0, //para que solo realice la medición una vez
    ODmedido = 0,
    pHmedido = 0,
    Conductividadmedido = 0,
    Nivelmedido = 0,
    guardadohecho = 0, //usada para que solo guarde una vez
    refrescado = 0, //refrescar pantalla una vez cada cierto tiempo
    controlautomatico = 1, //variable para indicar modo de control
    control_hecho = 0,
    subir_nivel = 1;

```

```
FILE *fp;
```

```
//-----
```

```
void main()
```

```
{
    _setcursortype(_NOCURSOR);
    outportb(portpower,0x00);
    outportb(portwrite,0x00);
    clrscr();
    inicializarbasedatos();
    gettime(&t);
    tiempoinicio = (int)(t.ti_sec);
    subtítulosvariables();

```

```
ciclo:
```

```

    capturar();
    date();
    time();
    if(empezaradquisicion){
        //base de medición: 1 seg

        if(!((timer%59))&&(refrescado==0)){
            clrscr(yTemperatura-1,xTemperatura+24-
1,yTemperatura+8,xTemperatura+24-1+6);
            refrescado = 1;

```

```

    }
    if( ((timer%2)==1) && (temperaturamedido == 0)){
        Tarea_Temperatura();
        temperaturamedido = 1; //agregar en timer
    }
    if( (!(timer%1)) && (Nivelmedido == 0)){
        Tarea_Nivel();
        Nivelmedido = 1; //agregar en timer
    }
    if( (!(timer%1)) && (!ODmedido)){
        Tarea_OD();
        ODmedido = 1; //agregar en timer
    }

    if( ((timer%2)==1) && (!pHmedido)){
        Tarea_pH();
        pHmedido = 1;
    }
    if( (!(timer%1)) && (!Conductividadmedido)){
        Tarea_Conductividad();
        Conductividadmedido = 1;
    }
    if( (!(timer%2)) && (!control_hecho)){
        On_Off_Control();
        control_hecho = 1;
    }
    if( (!(timer%59)) && (guardadohecho == 0)){
        guardar();
        guardadohecho = 1;
    }
}

```

```
goto ciclo;
```

```
}
```

```
//Funciones utilizadas-----
```

```
void capturar(void)
```

```
{
```

```
    unsigned int temp;
```

```
    temp = vertecla();
```

```
    dato = temp;
```

```
    temp = temp>>8;
```

```
    if(temp == 255){
```

```
        dato = dato<<8;
```

```
        dato = dato>>8;
```

```
//letrero salir
```

```
    if(dato == 27){ //tecla escape
```

```

        gotoxy(10,24);
        textcolor(colorrojo);
        cprintf("Estas seguro de salir? [ SI(s) / NO(n)] ");
        salirsino = 1;
    }
//salir
    if(((dato == 's')||(dato == 'S'))&&(salirsino == 1)){
        outportb(portpower,0x00);
        outportb(portwrite,0x00);
        exit();
    }
//no salir
    if(((dato == 'n')||(dato == 'N'))&&(salirsino == 1)){
        salirsino = 0;
        clrscro(22,9,23,52);
    }
//tecla enter
    if(dato == 13){        //tecla enter
    }
//bandera que indica control manual
    if(((dato == 'm')||(dato == 'M'))&&(controlautomatico)){
        controlautomatico = 0;
        EntradaAgua = MeterAguaOff; //evita que al pasar a manual meta agua
        clrscro(2,51,22,79);
    }
//bandera que indica control automatico
    if((dato == 'a')||(dato == 'A')){
        controlautomatico = 1;
        salidas = 0x00;
        actualizarsalidas();
        subtítulosvariables(); //restablecer títulos variables
        clrscro(17,2,22,40);
    }
//control manual OD
    if(((dato == 'd')||(dato == 'D'))&&(!controlautomatico)){
        if(EntradaOD == DifusorOn){
            EntradaOD = DifusorOff;
        }
        else{
            EntradaOD = DifusorOn;
        }
        actualizarsalidas();
    }
//if
//control manual Sacar Agua
    if(((dato == 's')||(dato == 'S'))&&(!controlautomatico)){
        if(SalidaAgua == SacarAguaOn){

```

```

        SalidaAgua = SacarAguaOff;
    }
    else{
        SalidaAgua = SacarAguaOn;
    }
}
//control manual Agregar Agua
if(((dato == 'e')||(dato == 'E'))&&(!controlautomatico)){
    if(EntradaAgua == MeterAguaOn){
        EntradaAgua = MeterAguaOff;
    }
    else{
        EntradaAgua = MeterAguaOn;
    }
}
//control manual Calentador
if(((dato == 'c')||(dato == 'C'))&&(!controlautomatico)){
    if(Calentador == CalentadorOn){
        Calentador = CalentadorOff;
    }
    else{
        Calentador = CalentadorOn;
    }
}
//control manual Filtrado
if(((dato == 'f')||(dato == 'F'))&&(!controlautomatico)){
    if(Filtro == FiltroOn){
        Filtro = FiltroOff;
    }
    else{
        Filtro = FiltroOn;
    }
}

//impresion en pantalla de actuadores en modo manual
if(!controlautomatico){
//difusor
    gotoxy(xTemperatura,yTemperatura+10);
    textcolor(color);
    cprintf("(d) Difusor");
    if(EntradaOD == DifusorOff){
        gotoxy(xTemperatura + 20,yTemperatura+10);
        textcolor(colorverde);
        cprintf("Apagado ");
    }
}
}

```

```

if(EntradaOD == DifusorOn){
    gotoxy(xTemperatura + 20,yTemperatura+10);
    textcolor(colorrojo);
    cprintf("Encendido");
} //if

//Sacar Agua

gotoxy(xTemperatura,yTemperatura+11);
textcolor(color);
cprintf("(s) Sacar Agua");
if(SalidaAgua == SacarAguaOff){
    gotoxy(xTemperatura + 20,yTemperatura+11);
    textcolor(colorverde);
    cprintf("Apagado ");
} //if
if(SalidaAgua == SacarAguaOn){
    gotoxy(xTemperatura + 20,yTemperatura+11);
    textcolor(colorrojo);
    cprintf("Encendido");
} //if

//Meter Agua

gotoxy(xTemperatura,yTemperatura+12);
textcolor(color);
cprintf("(e) Entrar Agua");
if(EntradaAgua == MeterAguaOff){
    gotoxy(xTemperatura + 20,yTemperatura+12);
    textcolor(colorverde);
    cprintf("Apagado ");
} //if
if(EntradaAgua == MeterAguaOn){
    gotoxy(xTemperatura + 20,yTemperatura+12);
    textcolor(colorrojo);
    cprintf("Encendido");
} //if

//Calentador

gotoxy(xTemperatura,yTemperatura+13);
textcolor(color);
cprintf("(c) calentador");
if(Calentador == CalentadorOff){
    gotoxy(xTemperatura + 20,yTemperatura+13);
    textcolor(colorverde);
    cprintf("Apagado ");
} //if
if(Calentador == CalentadorOn){
    gotoxy(xTemperatura + 20,yTemperatura+13);
    textcolor(colorrojo);
    cprintf("Encendido");
} //if

```

```

//Filtrado
        gotoxy(xTemperatura,yTemperatura+14);
        textcolor(color);
        cprintf("(f) Filtrado");
        if(Filtro == FiltroOff){
            gotoxy(xTemperatura + 20,yTemperatura+14);
            textcolor(colorverde);
            cprintf("Apagado ");
        }//if
        if(Filtro == FiltroOn){
            gotoxy(xTemperatura + 20,yTemperatura+14);
            textcolor(colorrojo);
            cprintf("Encendido");
        }//if
    }//if
    actualizarsalidas();
} //capturar

//-----
void Tarea_Temperatura(void)
{
    float muestras[51],acumulado = 0;
    int nmuestras = 0,i=0,temp;

//selección de canal
    outportb(portwrite, chTemperatura);

//muestreo
    while((nmuestras < 51)){
        outportb(portwrite,chTemperatura+start); //iniciar conversión
        outportb(portwrite,chTemperatura); //
        while(inportb(portEOC)==1){} //espera tiempo
        conversión
        while(inportb(portEOC)==0){}
        //delay(10);
        muestras[nmuestras] = inportb(portread); //muestreo
        nmuestras++;
    }

//filtro MEDIA
    for(i = 0; i < nmuestras;i++){
        acumulado = acumulado + muestras[i];
    }
}

```

```

    sTemperatura = acumulado/51;
    sTemperatura = (sTemperatura*100/239)-50;
/*
//filtro Mediana
//ordenamiento ascendente de datos
while( i < (nmuestras-1)){
    if(muestras[i] > muestras[i+1]){
        temp = muestras[i];
        muestras[i] = muestras[i+1];
        muestras[i+1] = temp;
        i=0;
    }
    else i++;
}
sTemperatura = muestras[26];
sTemperatura = (sTemperatura*100/239)-50;
}
//-----
void time(void)
{
    long horareal;
    int desplazamiento = 0;

    horareal = reloj();

    horas = ((int)horareal)>>8;
    if(horas < 10){
        desplazamiento = 1;
        gotoxy(xhora,yhora);
        cprintf("0");
    }
    textcolor(color);
    gotoxy(xhora+desplazamiento,yhora);
    cprintf("%i",horas);
    desplazamiento = 0;

    gotoxy(xhora+2,yhora);
    cprintf(":");

    minutos = ((int)horareal)&0x00FF;
    if(minutos < 10){
        desplazamiento = 1;
        gotoxy(xhora+3,yhora);
        cprintf("0");
    }
    gotoxy(xhora+3+desplazamiento,yhora);
    cprintf("%i",minutos);
}

```

```

//-----
void On_Off_Control(void){

//control Temperatura
//comparaci3n con rango inferior
    if((sTemperatura < rTemperatura1)){
        colorTemperatura=coloramarrillo;
        if(controlautomatico){
            if((sOD > rOD1)&&(spH >= rpH1)&&(spH <=
rpH2)&&(sConductividad >= rConductividad1)&&(sConductividad <=
rConductividad2)&&(horas >= 11)&&(horas <= 18)){
                Calentador = CalentadorOn;
                subidaTemperatura =1;
            }
        }
    }

    if(sTemperatura > rTemperatura2){
        colorTemperatura=colorrojo;
        if(controlautomatico){
            Calentador = CalentadorOff;
            subidaTemperatura = 0;
        }
    }

    if((sTemperatura >= rTemperatura1) && (sTemperatura <= rTemperatura2)&&(spH
>= rpH1)&&(spH <= rpH2)&&(sConductividad >= rConductividad1)&&(sConductividad <=
rConductividad2)&&(horas >= 11)&&(horas <= 18)){
        colorTemperatura=colorverde;
        if(subidaTemperatura){
            if(controlautomatico){
                Calentador = CalentadorOn;
            }
        }
        if(!subidaTemperatura){
            if(controlautomatico){
                Calentador = CalentadorOff;
            }
        }
    }

    if(Calentador == CalentadorOn){
        gotoxy(xTemperatura + 65,yTemperatura);
        textcolor(colorrojo);
        cprintf("Encendido");
    }
    else{
        gotoxy(xTemperatura + 65,yTemperatura);
    }
}

```

```

        textcolor(colorverde);
        cprintf("Apagado ");
    }

```

```
//impresión en pantalla
```

```

    gotoxy(xTemperatura,yTemperatura);
    textcolor(color);
    cprintf("Temperatura");

```

```

    gotoxy(xTemperatura + 24,yTemperatura);
    textcolor(colorTemperatura);
    cprintf("%2.2f",sTemperatura);

```

```

    gotoxy(xTemperatura + 16,yTemperatura);
    textcolor(color);
    cprintf("%2.2f",rTemperatura1);

```

```

    gotoxy(xTemperatura + 32,yTemperatura);
    textcolor(color);
    cprintf("%2.2f",rTemperatura2);

```

```

    if(controlautomatico){
        gotoxy(xTemperatura + 49,yTemperatura);
        textcolor(color);
        cprintf("Calentador");
    }

```

```
//control OD
```

```
//si es menor al rango inferior
```

```

    if(sOD < rOD1){
        colorOD = coloramarillo;
        if(controlautomatico){
            EntradaOD = DifusorOn;
            subidaOD = 1;
        }
    }

```

```
//si es mayor al rango superior
```

```

    if(sOD > rOD2){
        colorOD = colorrojo;
        if(controlautomatico){
            EntradaOD = DifusorOff;
            subidaOD = 0;
        }
    }

```

```
//si esta en el rango deseado
```

```

    if((sOD >= rOD1) && (sOD <= rOD2)){
        colorOD = colorverde;
    }

```

```

        if(subidaOD){
            if(controlautomatico){
                EntradaOD = DifusorOn;
            }
        }
        if(!subidaOD){
            if(controlautomatico){
                EntradaOD = DifusorOff;
            }
        }
    }
    gotoxy(xOD + 65,yOD);
    if(EntradaOD == DifusorOn){
        textcolor(colorrojo);
        cprintf("Encendido");
    }
    else{
        textcolor(colorverde);
        cprintf("Apagado ");
    }
}
//Impresi3n en pantalla

if(controlautomatico){
    gotoxy(xOD + 49,yOD);
    textcolor(color);
    cprintf("Difusor");
}
gotoxy(xOD,yOD);
textcolor(color);
cprintf("OD");
gotoxy(xOD + 24,yOD);
textcolor(colorOD);
cprintf("%2.2f",sOD);
gotoxy(xOD + 16,yOD);
textcolor(color);
cprintf("%2.2f",rOD1);
gotoxy(xOD + 32,yOD);
textcolor(color);
cprintf("%2.2f",rOD2);
//control pH
//si es menor al rango inferior
if(((spH < rpH1)|| (spH > rpH2))){
    recambiar_agua();
    gotoxy(xpH + 65,ypH);
    textcolor(colorrojo);
    cprintf("Encendido");
    //subidapH = 1;
}

```

```

    }
    colorpH = coloramarillo;
//si es mayor al rango superior
/*    if(spH > rpH2){
        if(controlautomatico){
            if(Nivel == 1){
                SalidaAgua = SacarAguaOn;
                EntradaAgua = MeterAguaOff;
            }
            else{
                SalidaAgua = SacarAguaOff;
                EntradaAgua = MeterAguaOn;
            }
            gotoxy(xpH + 65,ypH);
            textcolor(colorrojo);
            cprintf("Encendido");
            //subidapH = 0;
        }
        colorpH = colorrojo;
    } */
//si esta en el rango deseado
if((spH >= rpH1) && (spH <= rpH2)){
    if(controlautomatico){
        gotoxy(xpH + 65,ypH);
        textcolor(colorverde);
        cprintf("Apagado ");
        colorpH = colorverde;
    }
}
//actualización de seales de salida

if(controlautomatico){
    gotoxy(xpH + 49,ypH);
    textcolor(color);
    cprintf("Cambiar Agua");
}
//Impresión en pantalla
gotoxy(xpH,ypH);
textcolor(color);
cprintf("pH");

gotoxy(xpH + 24,ypH);
textcolor(colorpH);
cprintf("%2.2f",spH);

gotoxy(xpH + 16,ypH);
textcolor(color);

```

```
cprintf("%2.2f",rpH1);
```

```
gotoxy(xpH + 32,ypH);
```

```
textcolor(color);
```

```
cprintf("%2.2f",rpH2);
```

```
//Programa en ensambrador utilizado
```

```
.model small,C
```

```
.code
```

```
public ocultar
```

```
ocultar proc far
```

```
mov al,02h
```

```
int 33h
```

```
ret
```

```
ocultar endp
```

```
public fecha
```

```
fecha proc far
```

```
mov ah,2ah
```

```
int 21h
```

```
mov bx,cx
```

```
mov cl,12
```

```
shl ax,cl
```

```
or ax,bx
```

```
ret
```

```
fecha endp
```

```
public diasem
```

```
diasem proc far
```

```
mov ah,2ah
```

```
int 21h
```

```
mov dh,al
```

```
ret
```

```
diasem endp
```

```
;int 16 interrupcion de teclado
```

```
public vertecla
```

```
vertecla proc far
```

```
mov ah,01h ;Revisa el buffer del teclado
```

```
int 16h ; ah codigo del scan
```

```
; al codigo ascii de la tecla
```

```
; si al = 0 una telca de funcion especial fue tecleada
```

```
; zf = 0 si hubo teclaso
```

```
jz fint ; salta si hubo teclaso
```

```

mov ah,00 ;Leer caracter del teclado
int 16h
mov dx,65535 ;si dx es FFFF hay tecla
fint: ret

vertecla endp

```

```

public res
res proc far
mov al,00h ;restaura al ratón
int 33h
ret
res endp

```

```

public reloj
reloj proc far

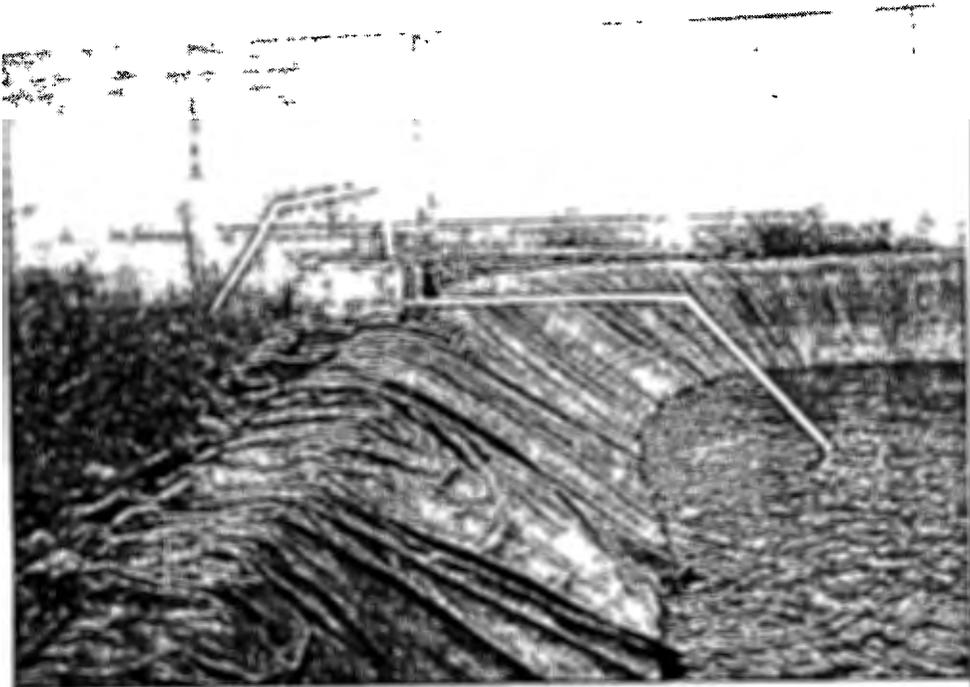
mov ah,2Ch
int 21h ;int 21 para reloj
mov ax,cx ;muevo a AX para dato long
ret

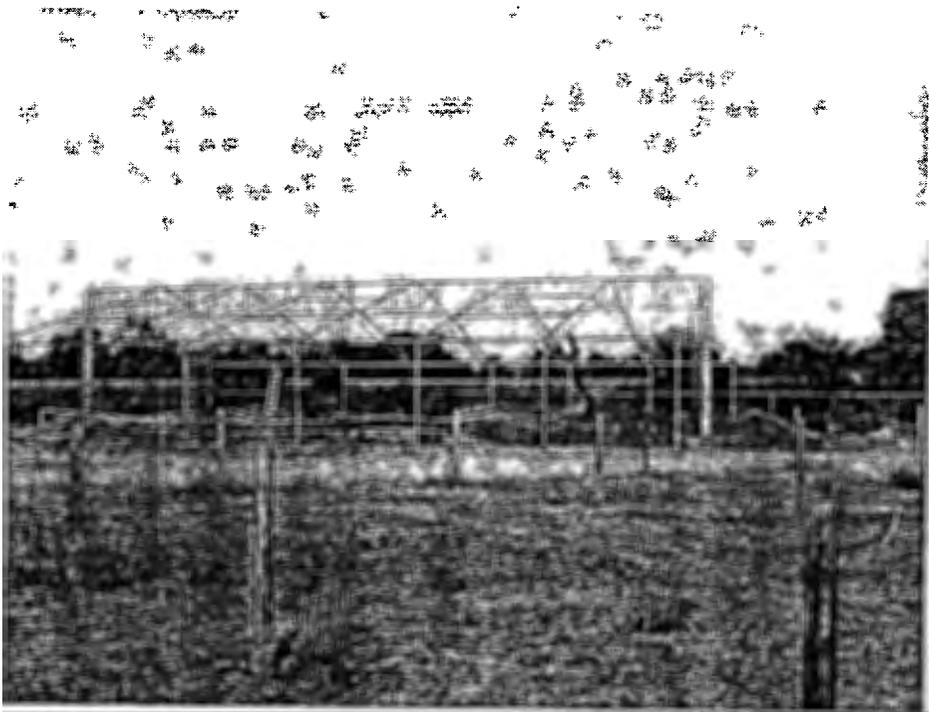
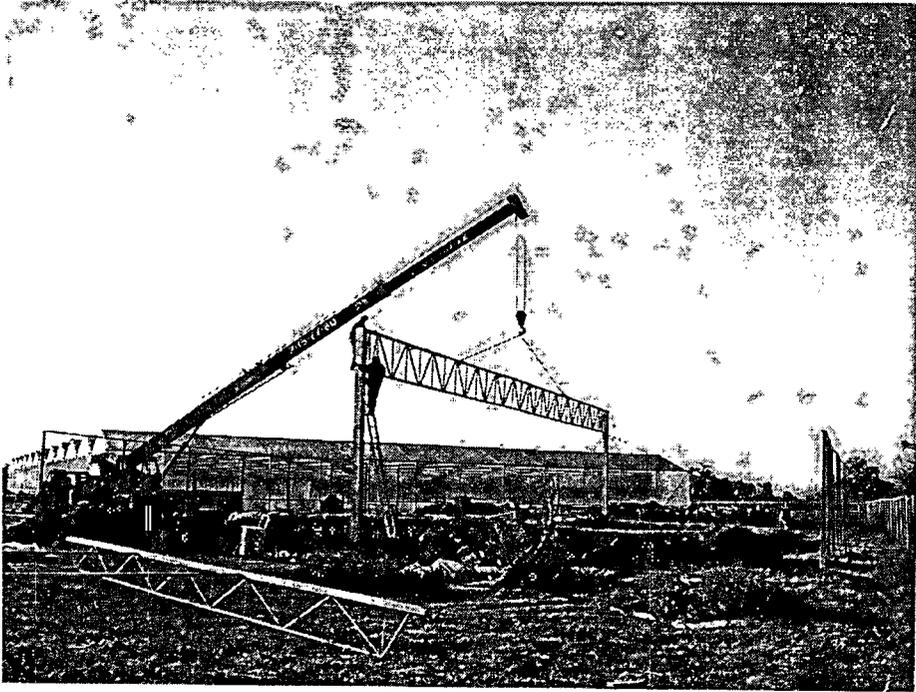
reloj endp

```

**Avances de la construcción granja acuícola
Universidad Autónoma de Querétaro.**









INSTITUTO
NACIONAL
DE LA PESCA



México D.F., a 20 septiembre de 2004

CARLOS A OLVERA:

A través del presente le informamos que su trabajo denominado: "**Identificación del modelo dinámico de un estanque piscícola bajo invernadero.**", fue **ACEPTADO** para ser expuesto en forma **ORAL** en el XI Congreso ALA-2004. Solicitamos envíe las correcciones lo antes posible.

En anexo enviamos los comentarios de los evaluadores, por lo que solicitamos realice las modificaciones sugerida por estos, y que nos reenvíe su trabajo corregido para ser integrado a las Memorias (resúmenes de trabajos) que se entregarán en el XI Congreso ALA. La fecha límite para recibir su trabajo corregido es el día 4 de Octubre.

Asimismo solicitamos que cuando nos envíe de nueva cuenta su resumen, también anexe la copia de su **ficha de PREINSCRIPCIÓN**, ver:

<http://inp.semarnat.gob.mx/PaginaEvento/VERSION1/ExpOral.htm> ó

<http://www.panoramaacuicola.com/eventos/alatabasco/registro.htm>, así como su **formato de gatos**, lo anterior en caso de no haberlo hecho con anterioridad.

Sugerimos vuelva a entrar a nuestra pagina de Internet:

(<http://inp.semarnat.gob.mx/PaginaEvento/VERSION1/ExpOral.htm>)

y revise el icono: **PRESENTACIÓN ORAL**, y sus incisos: **1)** Presentación Oral de Trabajos; **2)** Importante: Trabajos en presentación oral; **3)** Formatos de datos y **4)** sugerencias para los trabajos (ver la parte final de este inciso: Importante; Diapositivas y Acetatos), pues se da la información del formato en el que se le solicitará su ponencia, a la hora de realizar su presentación.

Sin mas por el momento quedamos a la espera de su resumen corregido y le felicitamos por ser uno de los expositores del XI Congreso ALA-2004.

ATENTAMENTE.
COMITÉ ACADÉMICO

MODELO DINÁMICO DE LA TEMPERATURA DE UN ESTANQUE PISCÍCOLA BAJO INVERNADERO

Carlos Alberto Olvera Olvera

Rodrigo Castañeda Miranda

Gilberto Herrera Ruiz

Universidad Autónoma de Querétaro

Cerro de las Campanas S/N, Querétaro, Qro. C.P. 76010

Fax. (442) 192 12 64, ext. 218, olveraca@uaq.mx

Palabras clave: *identificación, temperatura, piscicultura*

En este trabajo se presenta el modelo dinámico de la temperatura en un estanque piscícola bajo invernadero de producción intensiva de tilapia, la identificación se realizó utilizando la estructura del modelo ARX (auto-regresive and exogenous variable) aplicando el método general de mínimos cuadrados para la obtención de las expresiones óptimas de los parámetros, así como la matriz de covarianza de la estimación. El modelo emplea datos de radiación global, temperatura del aire exterior e interior del invernadero, humedad relativa dentro del invernadero y el oxígeno disuelto en el agua. Además de las entradas de control tales como: el agua entrante, calefacción y refrigeración. Todas ellas son adquiridas por medio de una tarjeta de adquisición de datos. Los datos obtenidos son procesados y posteriormente se identifican sus parámetros usando técnicas fuera de línea, así como también técnicas en línea. La simulación de varios experimentos mostró que el modelo propuesto de segundo orden logra una estimación de los parámetros muy cercana a los datos medidos de la temperatura del agua en el estanque. En este sentido los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el modelo puede ser aplicado para el control de tiempo real donde diferentes estrategias pueden ser diseñadas e implementadas.

Introducción

En aplicaciones de ingeniería de control es una práctica común desarrollar modelos que describan el sistema a ser controlado. La generación de un modelo matemático requiere la síntesis del conocimiento existente sobre un proceso o sistema. Este modelo permite ajustar los parámetros del sistema de control

(sintonizar) sin necesidad de realizar físicamente el controlador, permitiéndonos realizar las pruebas que sean necesarias, así como las modificaciones pertinentes por medio de simulación. Para diseñar un controlador climático eficiente se requiere tener un conocimiento a priori de los modelos climáticos relacionados con las influencias externas de las condiciones del clima exterior (radiación solar, temperatura

del aire, velocidad del viento, etc.) y con el equipamiento utilizado en el estanque acuícola (sistema de calefacción, sistema de aireación, etc.). Durante los últimos años, una gran cantidad de conocimiento científico ha sido acumulado y expresado en modelos matemáticos en lo que respecta a los sistemas acuícolas.

En general existen tres tipos de modelos matemáticos: modelos empíricos, mecanísticos y telenómicos. Los modelos empíricos son descripciones directas de datos y proporcionan relaciones observables entre las variables de un sistema sin ninguna explicación de los mecanismos subyacentes. Son un poderoso medio para describir y resumir datos. Ejemplos de este tipo de modelos son los modelos de regresión simple o múltiple. Otro ejemplo lo constituyen las redes neuronales. Los modelos telenómicos son aplicables a comportamientos dirigidos por objetivos y se formulan en términos de metas. Los modelos mecanísticos son modelos determinísticos y explicativos de un sistema. Normalmente, un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias es definido para describir el comportamiento de las variables de estado del sistema, las variables que representan las propiedades o atributos del sistema considerado. Los modelos mecanísticos son más apropiados para expresar hipótesis matemáticamente y proporcionar así una descripción cuantitativa y explicación de los procesos más importantes que ocurren en un sistema. El desarrollo de un modelo matemático mecanístico requiere de suficiente comprensión de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en un sistema y su uso demanda una validación apropiada.

Identificación

Para implementar alguna técnica de control al sistema piscícola es necesario

contar con un modelo del sistema. En estos sistemas como se mencionó anteriormente las variables principales del agua que afectan de manera directa el crecimiento del pez son: temperatura y oxígeno disuelto. Dada la naturaleza multivariable de estos sistemas la obtención de un modelo mecanístico, llega a ser un proceso bastante complicado y no es fácilmente aplicable para control. Es por esto que para el diseño de control de este sistema multivariable se plantea la obtención de un modelo de caja negra a través de identificar la planta mediante el método de mínimos cuadrados (MMC) utilizando un modelo ARX. El sistema estará compuesto de μ entradas (calefacción y aireación) y ν salidas (temperatura del agua y oxígeno disuelto) teniendo como perturbación la temperatura del medio ambiente, la radiación solar, la velocidad del viento, la talla del pez, la densidad de siembra, entre otras.

Algoritmo de Identificación

El modelo ARX multivariable correspondiente puede definirse como,

$$y(k) = \sum_{j=1}^n A_j y(k-j) + \sum_{j=0}^n B_j u(k-j) + e(k)$$

donde:

$y(k)$ vector de las salidas de dimensión ν

$u(k)$ vector de las entradas de dimensión μ

A_j, B_j matrices $\nu \times \nu$ y $\nu \times \mu$ de los coeficientes de regresión

$e(k)$ vector del ruido de dimensión ν

Un modelo compacto equivalente puede escribirse como sigue:

$$y(k) = P^T z(k) + \epsilon(k)$$

donde:

$y(k)$ es un vector de dimensión ν de las salidas, y

$z^T(k) = [u^T(k)y^T(k)u^T(k-1)...y^T(k-n)u^T(k-n)]$ Durante el crecimiento, la energía adquirida por los peces se reparte en,

es un vector de dimensión:

$$\rho = [\mu + (\mu + \nu)n]$$

P^T es la matriz de dimensión $\nu \times \rho$ con la estructura siguiente:

$$P^T = [B_0 A_1 B_1 \dots A_n B_n]$$

El modelo generalizado para t mediciones puede escribirse de la forma siguiente:

$$Y^T(t) = P^T Z^T(t) + E^T(t)$$

con las definiciones siguientes:

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y^T(1) \\ y^T(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y^T(t) \end{bmatrix} \quad Z(t) = \begin{bmatrix} z^T(1) \\ z^T(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ z^T(t) \end{bmatrix} \quad E(t) = \begin{bmatrix} e^T(1) \\ e^T(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e^T(t) \end{bmatrix}$$

$Y(t)$ y $E(t)$ son ahora las matrices de dimensión $tx\nu$ y $Z(t)$ es una matriz $tx\rho$.

Experimentación

Uno de los objetivos principales de la acuicultura intensiva es lograr una mayor producción de peces por metro cúbico de agua. Es importante, notar que, la mayor parte de las granjas acuícolas de nuestro país están actualmente trabajando con densidades de 50 peces por metro cúbico de agua. Cuando se trabaja con este tipo de densidades, es necesario suministrar el 100% del alimento que será consumido por los peces. En esta parte es importante señalar que este representa el mayor costo del proceso.

- Materiales eliminados (heces, orina y otras excreciones)
- Energía en biomasa
- Procesos metabólicos

La temperatura, a pesar de ser una de las variables más importantes, por tener relación directa con los procesos químicos y biológicos, no es tan crítica comparada con el oxígeno disuelto, debido al impacto inmediato que tiene en los peces. Por ejemplo, las tilapias, al ser sometidas a una temperatura de 20 °C reducen en forma definitiva su crecimiento, al los 18 °C dejan de alimentarse. Es más, pueden tolerar temperaturas de hasta 14°C por varios días, pero al dejar de alimentarse terminan por morir (Morales, 2003). La importancia de esta variable radica, más que nada, en la eficiencia alimenticia de los peces, y un rango de 26 a 30 °C es bueno para su buen crecimiento.

El oxígeno disuelto sin embargo, es una variable crítica debido a las densidades manejadas en la acuicultura intensiva. Es importante mantener del 60% al 95% de saturación (Morales, 2003). Niveles por debajo de 4mg/l afectan el crecimiento y además, provocan estrés. El nivel de saturación a 30°C y 5000 mg/l de cloruros, nos da 7.3 mg/l. Niveles inferiores de cloruros y temperaturas más bajas aumentan el nivel de saturación (Sawyer, 2001).

La determinación del oxígeno disuelto en el agua en relación con su valor de saturación y de la cantidad y velocidad de la utilización del oxígeno (DBO), proporciona un medio rápido y útil para identificar el estado de contaminación del agua e indirectamente, también, la cantidad de materia orgánica sujeta a

descomposición contenida en ésta en un tiempo determinado.

Es importante notar, que tanto la temperatura como el oxígeno disuelto, cuando están fuera de rango producen estrés. Esto generalmente provoca que los peces dejen de alimentarse, pero, principalmente se provocan algunos tipos de enfermedades, por ejemplo, las enfermedades bacterianas, como el síndrome de la Septicemia Hemorrágica Bacteriana (SHB), las bacterias que lo producen son una componente normal de la bacterioflora de las tilapias y de su ambiente acuático, estas al ser sometidas a condiciones de estrés ocasionan enfermedad y puede producir pérdidas del 5% hasta el 100%.

Para resolver esta problemática es necesario tener un control preciso de estas variables. El objetivo de este trabajo es determinar el modelo dinámico del sistema, por el momento de temperatura, para poder más adelante, implementar alguna técnica de control.

Para el experimento se construyó un sistema acuícola, el cual se muestra en la Figura 1.



Figura 1 Simulador físico del sistema acuícola.

El simulador tiene un volumen aproximado de dos metros cúbicos de agua, en el cual se ha colocado plástico en el fondo para evitar la filtración. Además, ha sido cubierto con una estructura cerrada

(invernadero) con plástico, con un factor de transmisividad de 0.9, para evitar las pérdidas de calor. Para elevar la temperatura del agua cuando se requiera, se han utilizado 3 paneles solares, por los cuales se hace recircular el agua del estanque por medio de una bomba hidráulica. Para mantener el oxígeno disuelto, se ha instalado un soplador, para inyectar aire y lograr la transferencia del oxígeno con burbujas. La eficiencia con este método de oxigenación se encuentra entre 5 y 15%. Debido a que un litro de aire libre contiene alrededor de 273mg de oxígeno, se puede absorber del tanque 14 a 41 mg. de oxígeno por cada litro de aire difundido el interior del estanque (Fair, 1971). La densidad de cultivo es de 125 peces/m³ (etapa juvenil del pez).

Un diagrama de bloques de lo que es el sistema se muestra en la Figura 2,

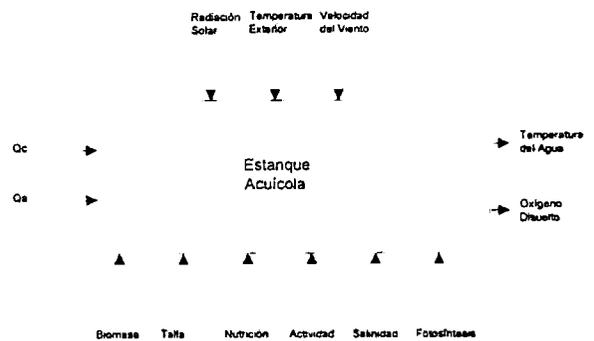


Figura 2 Entradas, salidas y perturbaciones del sistema.

Donde,

Q_c es el flujo de agua caliente que llega al estanque.

Q_a es el flujo de aire que se suministra al estanque para la oxigenación.

Para inferir el modelo del sistema, consideramos como entradas la temperatura del aire exterior, la temperatura del aire interior del invernadero y la radiación solar y como salida la temperatura del agua, como se muestra en la siguiente figura,

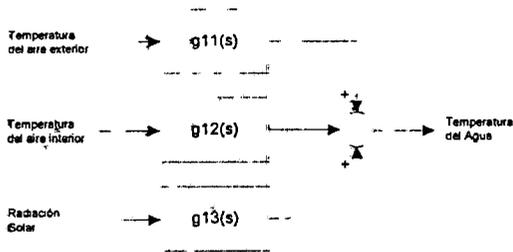


Figura 3 Esquema del sistema con dos entradas (temperatura del aire exterior e interior al invernadero) y una salida (temperatura del agua).

Para apreciar el comportamiento de las entradas con la salida se grafican a continuación las siguientes curvas,

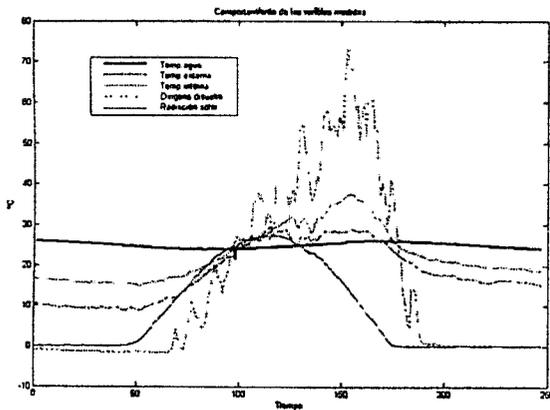


Figura 4 Variables medidas del sistema.

El efecto de la radiación sobre la temperatura del agua se muestra en la siguiente figura,

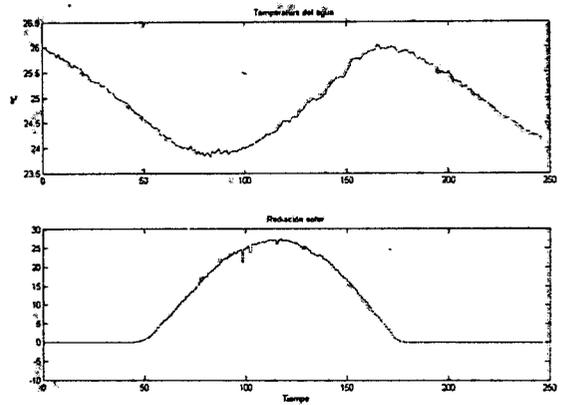


Figura 5 Temperatura del agua vs Radiación solar.

El efecto de la temperatura del aire exterior sobre la temperatura del agua se muestra a continuación,

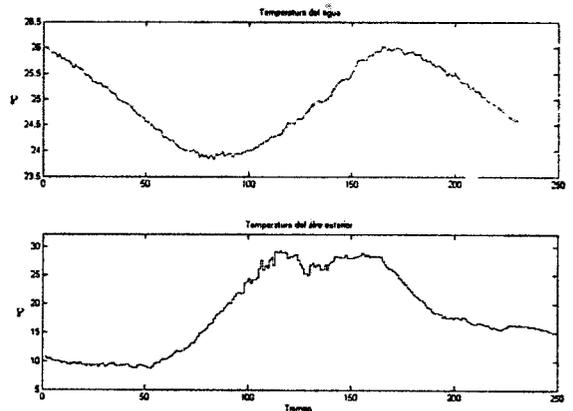


Figura 6 Temperatura del agua Vs Temperatura del aire exterior.

El efecto de la temperatura del aire interior sobre la temperatura del agua se muestra en la siguiente figura,

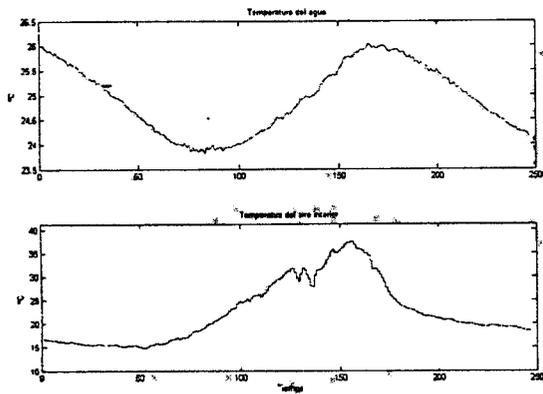


Figura 7 Temperatura del agua Vs Temperatura del aire interior.

Como se puede observar en la Figura 6, puede considerarse el efecto de la temperatura exterior constante en una parte de la gráfica. En la misma zona pero de la Figura 7, se puede apreciar que la temperatura del aire interior presenta variaciones considerables, con esto, podemos determinar con este segmento de datos, el modelo del sistema afectado solo con la temperatura del aire interior.

Resultados

En las siguientes gráficas se muestran diferentes simulaciones de la comparación de la salida media contra la salida del modelo generado de varios días,

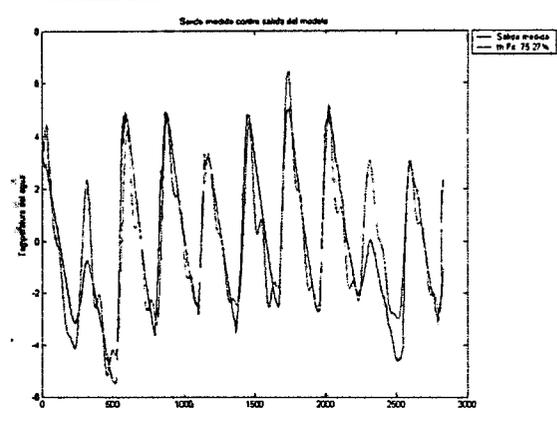
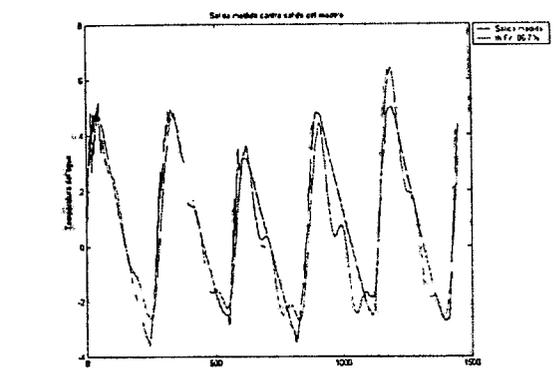
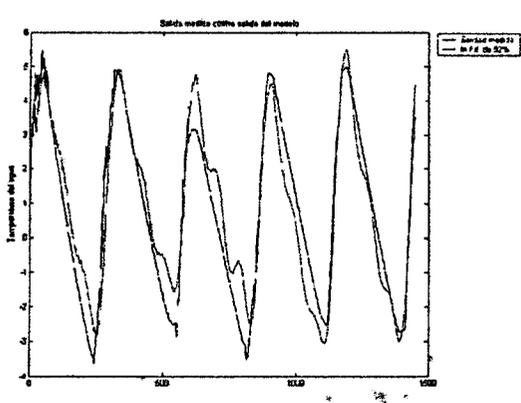


Figura 8 Simulaciones de la salida medida contra la salida del modelo generado.

Los polinomios generados con la estructura ARX son los siguientes,

$$A(q) = 1 - 0.9034q^{-1} - 0.07921q^{-2}$$

$$B(q) = 0.02123q^{-1} - 0.01235q^{-2}$$

La función de transferencia queda como,

$$G(s) = \frac{0.0212s - 0.0124}{s^2 - 0.9034s - 0.0792}$$

Conclusiones

Los datos obtenidos de las simulaciones indican que el sistema de caja negra se aproxima lo necesario a las mediciones tomadas del sistema real, por lo tanto, se puede considerar como el modelo matemático que determina el comportamiento dinámico de la temperatura del agua para efectos de

control. Una de las ventajas inmediatas es, que gracias a las simulaciones obtenidas puede tenerse un conocimiento más amplio del verdadero comportamiento del sistema, lo que genera un conocimiento más acelerado de este tipo de plantas. Se debe considerar que en estos experimentos solo son el inicio de esta investigación, es necesario hacer los experimentos con densidades mayores para poder evaluar correctamente el sistema, y considerar las variables faltantes, como son el Oxígeno disuelto, el pH, el amonio, la turbidez y la conductividad principalmente. Hay que tomar en cuenta que el desarrollo tecnológico debe ir a la par de la investigación, para poder proporcionar a la gente productora un producto terminado de calidad y de tecnología nacional. Con esto se pretende, que el sector acuícola sea un sector industrial importante para nuestro país.

En Apéndice se muestran fotografías de los avances de la granja acuícola que se está construyendo en el Rancho de la Universidad Autónoma de Querétaro para posteriores investigaciones.

Referencias

Aguado Behar Alberto (2000). Temas de identificación y control adaptable. PALCIEN.

Arredondo Figueroa José Luis (1998). Calidad del agua en acuicultura, conceptos y aplicaciones. AGT, Editor S.A. de C.V.

Boyd Claude E. (1998). Pond water aeration systems. Elsevier, aquacultural engineering 18(9-40).

Culberson Steven D., Piedrahita Raul H. (1996). Aquaculture pond ecosystem model: temperature and dissolved oxygen prediction, mechanism and application. Elsevier, Aquacultural Engineering 23(61-93).

Fair Gordon Maskew, Geyler John Charles y Okun Daniel Alexander (1971). Ingeniería Sanitaria de aguas residuales. Volumen 2 –Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México D.F.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, www.fao.org

Kemmer Frank N, McCallion Jhon (1990), Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. McGraw-Hill.

Martínez Córdova Luis R. (1998). Ecología de los sistemas acuícolas. A.G.T. Editor, S.A.

Matthias Halwart, Martínez-Espinosa Manuel, Schückler Angelika, Schmidt Uli (2000). Los pequeños estanques FAO Departamento de pesca (2000).

Morales Díaz Armando (1991). La tilapia en México, biología, cultivo y pesquerías. A.G.T. Editor, S.A. de C.V.

Morales Díaz Armando (2003). Biología, cultivo y comercialización de la tilapia. A.G.T. Editor, S.A. de C.V.

Romero Rojas Jairo Alberto (1999). Potabilización del agua. Alfaomega, Tercera Edición.

SAGPyA, Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (2004). Construcción de estanques y de estructuras hidráulicas para el cultivo de peces. Republica de Argentina.

Sawyer Clair N., McCarty Perry L., Parkin Gene F. (2001). Química para ingeniería ambiental. McGraw-Hill cuarta edición.

Semarnat, Informe de la situación del medio ambiente en México (2002) – Aprovechamiento de la vida silvestre – Recursos pesqueros.

Sofia, FAO, El estado mundial de la pesca y la acuicultura, 2002

Zhu, J. Deltour, s. Wang (1998). Modeling the thermal characteristics of greenhouse pond systems. Elsevier, aquacultural engineering.

XI CONGRESO LATINOAMERICANO DE ACUICULTURA (ALA) MÉXICO 2004

TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE LA PRODUCCIÓN ACUÍCOLA

Otorga el presente reconocimiento a:

Ing. Carlos Alberto Olvera Olvera

Por su participación al Congreso Latinoamericano
de Acuicultura México 2004 como:
Ponente



Dr. Carlos Rangel
Presidente del Congreso y Director General
de Investigación en Acuicultura del
Instituto Nacional de la Pesca, México.



Dra. Fabiola Lango
Coordinadora Académica y
Sub-Directora de Investigación
y Post-grado del ITMAR, México



Dr. Alfonso Silva
Vice-Presidente de (ALA) y
Director Magister de Acuicultura
de la Universidad Católica de Norte, Chile

NAVE III, PARQUE TABASCO DEL 23-26 DE NOVIEMBRE DEL 2004, VILLAHERMOSA, TABASCO

8to SIMPOSIO
DE ACUICULTURA
Mar en el GOLFO
de MÉXICO

