



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons  
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### DISEÑO DE UN MODELO DE ESTIMACIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO EN EL ESTANQUE DE CRIANZA DE TILAPIAS DE LA PUCP USANDO LÓGICA DIFUSA

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

**Fernando Jaime Vilela López**

**ASESOR: José Amadeo Dávalos Pinto**

Lima, julio del 2009

## RESUMEN

El oxígeno disuelto en un estanque de crianza de peces, es una variable importante a medir, debido a que el oxígeno que los peces absorben mejorará su engorde y, con esto podemos obtener peces en mejores condiciones, tanto para su consumo como para su venta.

La variable del oxígeno disuelto se mide, usualmente mediante un sensor o un equipo de medición multivariables para acuicultura, los cuales tienen un costo alto en comparación con los equipos de medición de otras variables, además de contar con una lectura de la variable oscilante, es decir, da una lectura que en el tiempo varía, y no se logra estabilizar.

Por ello es necesario lograr otras formas para medir el oxígeno disuelto en el agua sin la necesidad de los elementos antes mencionados, lo cual se logra mediante una estimación de variables utilizando la lógica difusa.

El tema de tesis está desarrollado en cinco capítulos. En el primer capítulo se analiza la problemática con respecto a la crianza de tilapias en el Perú. En el segundo capítulo se muestra el estado de la tecnología para la crianza de tilapias y la teoría de la lógica difusa para la estimación del oxígeno disuelto. El tercer capítulo muestra el procedimiento utilizado en el diseño del modelo de estimación. El cuarto capítulo muestra las pruebas y simulaciones realizadas al diseño de estimación. En el quinto capítulo se muestra el costo del sistema.

Como conclusión principal se obtiene que el modelo de estimación diseñado alcanza un error de 6.4%, lo cual representa una buena opción para el objetivo planteado.

Quiero agradecer a mi familia por ser la motivación que me llevó a inclinarme inicialmente por esta carrera que, a la larga, ha sido la base de mis estudios para lograr la presente tesis y por todo el soporte que me dieron durante estos años; a los profesores Renzo Astorne, Andrés Flores y José Dávalos, por sus enseñanzas y por acompañar con sus consejos todo el trabajo realizado para culminar esta tesis; y a todas aquellas personas que con su insistente aliento me ayudaron para hacer de esta tesis una realidad.

## INDICE

<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b>	1
<b><u>CAPÍTULO 1: LA PROBLEMÁTICA DE LA CRIANZA DE TILAPIA</u></b>	
1.1 Contexto general de la acuicultura como medio económico	4
1.2 Problemática con respecto a los equipos a utilizar	6
1.3 Planta Piloto de la PUCP	8
1.3.1 Condiciones actuales y planes a futuro de implementarse	9
1.3.2 Factores externos influyentes en el desarrollo	9
1.4 Problemática de la producción	10
1.5 El oxígeno disuelto como factor determinante en la producción	11
<b><u>CAPÍTULO 2: EL ESTADO DEL ARTE EN LA CRIANZA DE TILAPIAS</u></b>	
2.1 Presentación del asunto de estudio	13
2.2 Piscicultura de la tilapia	13
2.2.1 Alimentación y condiciones adecuadas	14
2.2.2 Cultivo de tilapias	15
2.2.2.1 Etapas de crecimiento	15
2.2.2.2 Tipos de Cultivo	15
2.2.3 Medición del oxígeno disuelto	16
2.2.4 Sistemas de aireación	17
2.2.4.1 Métodos de aireación	17
2.2.4.2 Agentes influyentes en la aireación	19
2.2.5 Teoría de Lógica Difusa	20
2.3 Modelo Teórico	21
2.4 Indicadores Cuantitativos	23
<b><u>CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL ESTIMADOR DEL OXÍGENO DISUELTO PARA EL ESTANQUE DE CRIANZA DE TILAPIAS DE LA PUCP</u></b>	
3.1 Introducción	24
3.2 Metodología	24
3.2.1 Reconocimiento del estanque	25
3.2.2 Diagrama de Bloques	25
3.2.3 Descripción de los bloques	26
3.2.4 Objetivos	27
3.3 Adquisición de Datos	27
3.4 Análisis Estadístico de las variables	28
3.5 Modelo de lógica difusa para estimación del oxígeno	37
3.5.1 Funciones de Membresía	38
3.5.2 Elaboración de las Reglas	38
3.5.3 Razonamiento difuso	39
3.6 Diseño del Modelo Difuso	40
3.7 Conclusiones del capítulo	46

**CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS**

4.1	Introducción	48
4.2	Simulación de los resultados del modelo	48
4.3	Comparación del oxígeno disuelto Observado con el Estimado	52
4.4	Conclusiones del capítulo	55

**CAPÍTULO 5: COSTOS Y PRESUPUESTO** 57**CONCLUSIONES** 59**RECOMENDACIONES** 60**FUENTES** 61

## INTRODUCCIÓN

Según la Comisión de Promoción del Perú para la Exportación y el Turismo, la demanda del filete fresco se ha ido incrementando en los últimos años, especialmente por parte de los Estados Unidos, el cual representa un gran mercado a nivel internacional y accesible, teniendo en cuenta que las tilapias peces de aguas cálidas, fáciles de criar y resistentes ante diferentes calidades de agua en donde se encuentren. El Perú cuenta con regiones donde se podría explotar esta crianza, ya que el principal exportador de tilapias en filete fresco hacia Estados Unidos es Ecuador.

Sin embargo, la tecnología actual en nuestro país no permite un mayor énfasis en este tipo de cultivos debido a que su cuidado requiere de una fuerte suma de dinero para lograr el engorde óptimo para su exportación y es por esto que su consumo y venta se realiza para un mercado local, variando la demanda según los gustos de los pobladores locales. Si además de este costo se le aumenta la implementación de una planta automatizada, el presupuesto se eleva mucho.

A pesar del tema económico, existen cultivos de tilapias en nuestro país, los cuales son realizados en sitios de muy poco cuidado (sin sistemas automatizados), además de un modo artesanal y destinado a un mercado local en donde se encuentre cercano a la planta. Si bien existen índices de exportación irregular hacia Estados Unidos, éstos se realizaron bajo pedido por parte de empresas extranjeras.

El oxígeno disuelto es una variable crítica para la crianza de las tilapias, debido a su importancia en el engorde, ya que bajos niveles de éste ocasiona estrés en los peces, lo que en consecuencia significa la disminución de su apetito [5]. Siendo una variable importante, su medición debe de realizarse constantemente, porque existen horas en

las cuales los peces consumen más oxígeno disuelto que lo normal. Además de que según el estado de ánimo de los peces, éstos pueden consumir más o menos oxígeno, lo cual no se puede predecir, pero sí se puede actuar consecuentemente.

Si bien existen diferentes formas de lograr una lectura del oxígeno disuelto, donde destacan como las más utilizadas la de usar equipos de medición multivariables, su costo elevado es el principal impedimento para su obtención. Además que la lectura que éstos nos muestran es una medida de oxígeno disuelto oscilante, ya que mientras exista aireación y consumo de oxígeno, la transferencia química del oxígeno será variable en el agua.

El objetivo de esta tesis es el diseñar una estimación del oxígeno disuelto, basado en lógica difusa (para la planta piloto de acuicultura de la PUCP), con la finalidad de poder mantener en óptimas condiciones el cultivo de tilapias existente. Cabe recordar que la planta piloto existente en la PUCP se instaló con fines académicos y no económicos.

La metodología empleada considera una profunda investigación sobre la acuicultura y la importancia del oxígeno disuelto para las tilapias, como especie a investigar, así como un estudio y aprendizaje del funcionamiento de la planta piloto y crianza de las tilapias para un mejor entendimiento del caso. Este conjunto de actividades se ha complementado con una recolección de otras variables que intervienen en la calidad del agua y su completo análisis estadístico para su mejor estudio.

La investigación está desarrollada en cinco capítulos. En el primer capítulo se analiza la problemática con respecto a la crianza de tilapias en el Perú. El análisis se divide en tres partes: (i) análisis económico, (ii) análisis de la planta piloto, y (iii) análisis de la

crianza y sus equipos. Luego de ello se analiza a la variable del oxígeno disuelto en la producción de tilapias.

En el segundo capítulo se muestra el estado de la tecnología para la crianza de tilapias y la teoría de la lógica difusa para su estimación. Con ello, el modelo teórico queda definido.

El tercer capítulo muestra todo el procedimiento utilizado en el diseño del modelo de estimación. Dicha descripción está centrada en tres puntos: (i) el análisis estadístico de las variables influyentes en el oxígeno disuelto, (ii) desarrollo de la lógica difusa, estableciendo las reglas a utilizar, y (iii) cálculo de los coeficientes de las reglas difusas, las cuales darán como resultado una sumatoria que significa la estimación del oxígeno disuelto.

El cuarto capítulo muestra las pruebas y simulaciones realizadas al diseño de estimación, para ello se elabora una tabla de pruebas y se simulan todos los datos anteriormente observados de las variables influyentes, y mediante una tabla, comparar el oxígeno disuelto estimado con el oxígeno disuelto observado.

Como conclusión principal se obtiene que el modelo de estimación diseñado alcanza un error de 8.8% en una relación lineal, lo cual representa una buena opción para el objetivo planteado según el estudio realizado.

## CAPITULO 1

### LA PROBLEMÁTICA DE LA CRIANZA DE TILAPIA

#### **1.1 Contexto general de la acuicultura como medio económico**

En el plano nacional, la cosecha de tilapias ha aumentado con respecto a hace 10 años [1], obteniendo que en el año 1997 se cosechaba 49 TM., y que en el 2006 se llegó a los 494 TM. Pero eso no significa que se esté aumentando año tras año, ya que la cosecha anual es irregular, es decir existen años donde se cosecha menos (como el año 2000 que se logró cosechar 47 TM), como hay años donde se ha aprovechado al máximo (año 2004, año donde se llegó a cosechar el mayor número de tilapias en el Perú con un total de 1311 TM.). Pero si comparamos la cantidad de cosecha con la de Truchas a nivel nacional, tenemos que en el 2006 se cosechó más de 10 veces el total de Tilapias.

La tilapia es la segunda especie importante a nivel mundial en Acuicultura, y la tercera especie más importada en Estados Unidos, después del camarón marino y el salmón del Atlántico. Teniendo en cuenta que la demanda de filete fresco en países importantes va en aumento [2], como se puede observar en la Tabla N° 1-1, dicho mercado lo lidera Ecuador (10870 TM en el año 2006) debido a su calidad superior incluso a la de los países asiáticos. Estados Unidos es el principal importador de tilapias, con 360 000 TM de tilapia viva en el 2006, y que su importación de filete fresco es exclusivamente filete proveniente de Latinoamérica, a precios que son más del doble del nivel de filete de tilapia congelada (importada mayormente de Asia).

Origen	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
<b>Ecuador</b>	1806	3253	4924	6616	9397	10164	10600	10870
<b>Costa Rica</b>	2310	2684	3109	3206	3996	4090	3734	2677
<b>Honduras</b>	771	1038	1438	2874	2857	4042	6572	7250
<b>China</b>	38	59	191	844	857	-	-	-
<b>Taiwán</b>	155	82	76	247	281	90	-	-
<b>Brasil</b>	-	2	-	112	208	323	963	1018
<b>El Salvador</b>	-	-	-	78	189	258	307	228
<b>Panamá</b>	20	159	350	147	96	93	84	128
<b>Otros</b>	209	225	148	64	71	420	470	929
<b>Total</b>	<b>5310</b>	<b>7502</b>	<b>10236</b>	<b>14187</b>	<b>17952</b>	<b>19480</b>	<b>22729</b>	<b>23100</b>

*Tabla N° 1-1: Importación en Estados Unidos de tilapia fresca en filetes según país de origen en toneladas métricas. (Fuente: FAO Globefish 2006)*

El problema actual de los productores de tilapias es que la producción actual de tilapias en el Perú es destinada casi en su totalidad al consumo interno, debido a la preferencia existente en el consumidor y por su alto valor nutritivo, es por eso que la exportación es escasa comparando con otros países sudamericanos o centroamericanos, a excepción de pocos años (como en el año 2004), donde sí logramos exportar un número significativo de toneladas de tilapias en filete fresco a Estados Unidos.

Además se debe tener en cuenta que el costo total de implementar una planta de cultivo intensivo de tilapias requiere mucho dinero con respecto a una cosecha artesanal precaria (o tradicional), por eso es que en el Perú se cuenta actualmente con muchas plantas artesanales y muy pocas plantas con cultivo intensivo destinadas a las tilapias, ya que la mayoría cultiva truchas, a pesar de que las tilapias tienen mayor tolerancia y son de climas tropicales, abundante en la costa y selva del Perú.

En la Tabla N° 1-2 se puede observar claramente el crecimiento de las importaciones de tilapias a Estados Unidos año a año, lo cual genera oportunidades de trabajo para

los países que lideran el mercado hacia este país. El filete fresco es la principal presentación de tilapia en el mercado, debido a su alto costo de venta y a su escasez, teniendo en cuenta el clima y las condiciones necesarias para obtener una buena cosecha.

Presentación	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Entero congelado	27293	27781	38730	40748	49045	57299	56524	60772
Filete congelado	4971	5186	7372	12253	23249	36160	55615	74381
Filete fresco	5310	7502	10236	14187	17951	19480	22729	23100
<b>Total</b>	<b>37575</b>	<b>40469</b>	<b>56337</b>	<b>67187</b>	<b>90246</b>	<b>112939</b>	<b>134868</b>	<b>258253</b>

*Tabla N° 1-2: Importación en Estados Unidos según presentación en toneladas métricas (Fuente: FAO Globefish 2006)*

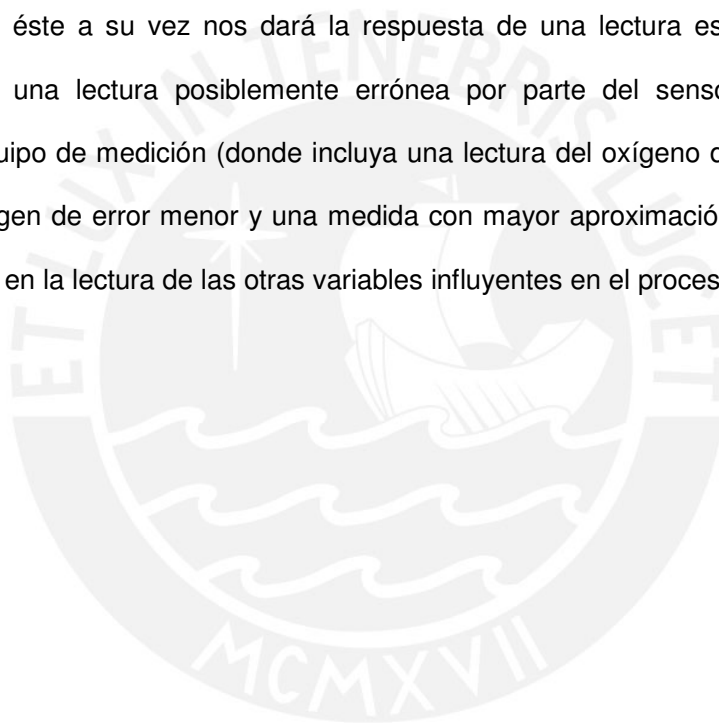
## 1.2 Problemática con respecto a los equipos a utilizar

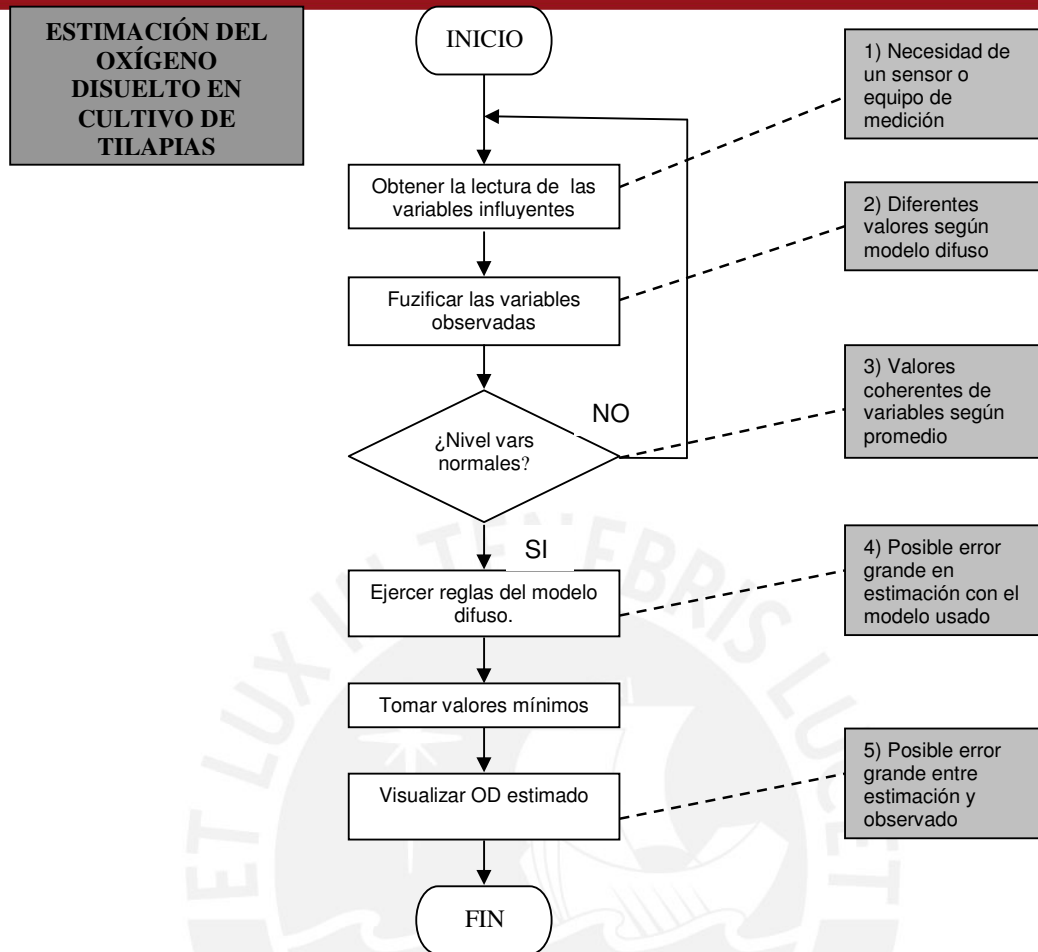
Un aspecto importante, en lo que a cultivos intensivos de tilapias se refiere, son los equipos utilizados en la automatización de la planta, debido a que su precio es muy elevado con respecto al costo de la construcción de la planta misma; su elección determina las condiciones de trabajo en las que nos encontremos.

En este tema de investigación se puede observar que el problema está en la medición del oxígeno disuelto, ya sea mediante un sensor único, o mediante un equipo de medición de varias variables. Este punto se puede observar claramente en la Figura N° 1-1, ya que para la lectura del oxígeno disuelto por parte de un sensor o un equipo de medición, se tiene en cuenta su precisión de lectura, la cual es una lectura oscilante porque en su consumo intervienen diversos organismos que alteran la lectura.

Una alternativa viable a este inconveniente de lectura se encuentra en una estimación del valor de lectura del oxígeno disuelto, pero para esto se necesita la lectura de otras variables que sean influyentes con el oxígeno como por ejemplo la temperatura del agua.

Los valores tomados por parte del equipo de medición (o sino varios sensores de medición de variables de calidad del agua) serán analizados mediante el modelo de estimación, y éste a su vez nos dará la respuesta de una lectura estimada. Así el problema de una lectura posiblemente errónea por parte del sensor de oxígeno disuelto o equipo de medición (donde incluya una lectura del oxígeno disuelto) pueda tener un margen de error menor y una medida con mayor aproximación a un modelo lineal basado en la lectura de las otras variables influyentes en el proceso.





FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Figura N° 1-1: Diagrama de flujo de las variables Internas

### 1.3 Planta Piloto de la PUCP

Se cuenta con una planta piloto en las afueras de la Sección de Electricidad y Electrónica, dentro de un invernadero de plástico, el cual eleva la temperatura ambiental interna del local donde se encuentran los dos estanques de tilapias.

### **1.3.1 Condiciones actuales y planes a futuro de implementarse**

Actualmente se cuenta con una oxigenación constante, eso quiere decir que se cuenta con un sistema de aireación utilizando difusores cerámicos, los cuales están oxigenando todo el día al agua de los estanques de tilapias. Si bien las tilapias no se mueren, el ambiente no es el adecuado para su mejor desarrollo y engorde que es el objetivo principal, además de que no se cuenta con un sensor de oxígeno disuelto o un equipo de medición de variables en la misma planta, ya que su costo de adquisición es mayor comparado con los demás sensores como temperatura o pH, cuyos equipos son más fáciles de adquirir por su menor costo.

### **1.3.2 Factores externos influyentes en el desarrollo**

Existen organismos que afectan las medidas de oxígeno disuelto cuando ésta es tomada por el sensor debido a que también consumen el oxígeno disuelto del agua junto a los peces. Éstos son las bacterias nitrificantes, las cuales se crean en el filtro biológico de la planta con la función de absorber el nitrito del agua; las algas, que existen por acción del sol sobre el agua en el estanque; y la temperatura del agua, la cual influye mucho debido a que a mayor temperatura disminuye el nivel de oxígeno disuelto en el agua, y las tilapias son peces tropicales que encuentran su armonía y mejor hábitat en aguas calientes.

Entre otros factores que disminuyen el nivel de oxígeno disuelto son: [25]

- Descomposición de la materia orgánica.
- Alimento no consumido.
- Heces.
- Animales muertos.
- Aumento de la tasa metabólica por el incremento en la temperatura (variación de la temperatura del día con respecto a la noche).

- Respiración del plancton (organismos microscópicos vegetales y animales que forman la cadena de productividad primaria y secundaria).
- Desgacificación: salida del oxígeno del agua hacia la atmósfera.
- Nubosidad: en días opacos las algas no producen suficiente oxígeno.
- Aumento de sólidos en suspensión: residuos de sedimentos en el agua, heces, etc.
- Densidad de siembra.

#### 1.4 **Problemática de la producción**

Para la producción de tilapias, existen muy pocos laboratorios de alevines (Hatcherys) totalmente equipados, y que el costo de la instalación de un laboratorio con producción adecuada es mayor a 30 mil dólares en países que son potencias en este tipo de cultivos [3].

A pesar de contar con un clima tropical en varias regiones de nuestro país, las empresas acuícolas no optan por cultivos de tilapias, restándoles importancia a pesar de que la tilapia es una especie en auge a nivel mundial, especial para climas tropicales como en ciertas zonas de nuestro territorio.

La producción nacional se centra especialmente en los departamentos de San Martín y de Piura [3]. Ambos poseen climas adecuados en los departamentos de la selva y costa norte del Perú. El mercado actual es Ecuador, pero ante un crecimiento mayor de cosechas de tilapias, podemos ser mercado para el principal importador a nivel mundial (Estados Unidos), logrando obtener mayores ganancias y la expansión de esta crianza en otros departamentos del territorio nacional.

### 1.5 El oxígeno disuelto como factor determinante en la producción

Para que la cosecha de tilapias sea un éxito, éstas dependen de varios factores, uno de los más importantes es el comportamiento del pez, donde su comportamiento está dado por los niveles de estrés que puede sufrir.

El consumo del oxígeno por parte de los peces varía por diversos aspectos, uno de los tantos importantes es la temperatura (ver Tabla N° 1-3). La concentración de oxígeno en un estanque varía con la temperatura [5].

Cuando hay cambios [4] mayor a 5° C., entonces la tasa metabólica del pez varía, y por consiguiente el consumo de oxígeno también varía. Además que a mayor movimiento de los peces, éstos consumen mayor oxígeno, siendo claro que cuando están en su hora de alimentación, este porcentaje de consumo de oxígeno de los peces aumenta.

<u>Temperature</u>		DO mg/L (ppm)	<u>Temperature</u>		DO mg/L (ppm)
°C	°F		°C	°F	
10	50.0	10.92	24	75.2	8.25
12	53.6	10.43	26	78.8	7.99
14	57.2	9.98	28	82.4	7.75
16	60.8	9.56	30	86.0	7.53
18	64.4	9.18	32	89.6	7.32
20	68.0	8.84	34	93.2	7.13
22	71.6	8.53	36	96.8	6.95

*Tabla N° 1-3: Nivel de saturación del oxígeno disuelto en agua fresca a presión atmosférica a nivel del mar (Fuente: Segovia 2007).*

Para la mejora del ambiente se puede controlar óptimamente alguno de las variables que empeoran el ambiente, ocasionando menos engorde. El oxígeno disuelto es parte

de las variables que se necesitan saber su lectura de una forma adecuada y correcta para un posterior control o indicación para la planta.



## CAPITULO 2

### EL ESTADO DEL ARTE EN LA CRIANZA DE TILAPIAS

#### **2.1 Presentación del asunto de estudio**

El presente tema de investigación abarca la estimación del oxígeno disuelto utilizando un modelo con lógica difusa, para aplicarlo en la planta piloto de la Sección de Electricidad y Electrónica (PUCP), con el objetivo de tener una correcta medida de esta variable tan importante para el cultivo de tilapias, sin necesidad de contar con el mismo sensor de oxígeno disuelto gracias a la lógica difusa basada en la experiencia, y por lo tanto, conocer los diferentes comportamientos de los peces a diferentes calidades de agua.

Mediante el modelo de estimación se logrará una mejor lectura del oxígeno disuelto sobre el hábitat de las tilapias, superando los obstáculos que el cultivo tradicional trae consigo, como el uso de medidores portátiles digitales, en los cuales su valor medido se encuentra dado por una lectura oscilante y además de que su precio de adquisición es muy elevado con respecto a medidores de otras variables, o como en algunos casos el uso de químicos (con valores aproximados de medida, los cuales pueden servir de guía mas no una lectura precisa).

Entre las variables que se controlan [5] para mejorar la calidad del agua, y por consiguiente mejora del hábitat de los peces, están el pH, oxígeno disuelto, amoniacó, nitritos, alcalinidad, temperatura, entre otras.

#### **2.2 Piscicultura de la tilapia**

Las tilapias que tienen mayor aceptación en cultivo comercial [6], son la “tilapia del Nilo” (*Oreochromis niloticus*), “tilapia azul” (*Oreochromis aureus*) y la “tilapia roja” (*Oreochromis spp.*), siendo la especie más conocida la tilapia del Nilo.

### 2.2.1 Alimentación y condiciones adecuadas

La alimentación viene dada por proteínas, lípidos y carbohidratos como se muestra en la tabla N° 2-1.

ESTADIO	PROTEINAS (%)	LIPIDOS (%)	CARBOHIDRATOS (%)
Alevines	35 - 50	10	< 25
0.02 – 2.0g	25 - 40	10	25 - 30
2.0 – 35.0g	25 - 35	6 - 8	25 - 30
De 35g hasta la cosecha	30 - 32	6 - 8	25 - 30

*Tabla N° 2-1: Requerimientos nutricionales de la Tilapia (Fuente: Cabrera, et al 2001)*

Caso especial en la etapa de pre cría, en la cual es importante comenzar con una alimentación a base de alimento vivo.

Para tener condiciones óptimas de trabajo [7], se necesitará que la tilapia esté en un ambiente de 28°C de temperatura y de 5 a 6mg/L de oxígeno disuelto, pero el rango de temperaturas aceptables se encuentra entre 27 y 32°C, llegando a perder su apetito por debajo de los 20°C y causando la muerte [6] a temperaturas menores a 12°C y mayores de 42°C; el pH debe estar entre 7 y 8 para una mayor productividad dentro del estanque. Estos valores de las variables influyentes en la tilapia se puede observar en la tabla N° 2-2.

Parámetros de calidad de agua	Nivel de Concentración	Importancia
Oxígeno disuelto (mg/L)	>5.0	Esencial, baja concentración induce estrés, bajo crecimiento o muerte
Dióxido de carbono (mg/L)	<5.0	↑[ ] impacto en procesos de respiración y reduce pH a niveles que inhibe la nitrificación
Amonio total (mg-N/L)	<1.0	NH <sub>3</sub> tóxico, a ↑[ ] reduce crecimiento, induce estrés y muere
Nitrito (mg-N/L)	<1.0	Tóxico, induce estrés respiratorio y muerte
Nitrato (mg-N/L)	<200	Tóxico para algunos ornamentales y especies marinas
Demanda bioquímica de oxígeno (mg-N/L)	<15.0	Contribuye a 'biofouling' y promueve afloramientos de bacterias que pueden inducir estrés
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	<15.0	Contribuye a 'biofouling', causa daño en agallas en especies sensitivas
Turbidez (NTU)	<10	Estético, agua clara ayuda en manejo y prevención
pH	>7.0	Bajos pH pueden inhibir nitrificación en biofiltros
Alcalinidad (mg-CaCO <sub>3</sub> /L)	>80	Baja alcalinidad puede inhibir bacterias nitrificantes en biofiltros
Color (abs.@ 436 nm)	<0.3	Estético, causado por compuestos orgánicos inertes refractarios
Dureza (mg-CaCO <sub>3</sub> /L)	No aplicable	Puede ser importante para algunas especies, tiene un bajo impacto en el diseño

Tabla N° 2-2: Parámetros ideales para un correcto nivel de calidad del agua en estanque de tilapias (Fuente: Segovia 2007).

### 2.2.2 Cultivo de tilapias

Conformado por las etapas de crecimiento de las tilapias, como por su tipo de cultivo para el caso peruano.

#### 2.2.2.1 Etapas de crecimiento

**A. Alevín:** Desde el 1er Mes de nacimiento hasta el 2do mes. Conformada la etapa de Crecimiento.

**B. Juvenil:** Todo el 2do mes en el cual la tilapia está en constante crecimiento.

**C. Adulto:** El 3er mes deja de crecer.

**D. Engorda:** Etapa adulta a partir del 4to mes en el cual la tilapia solo aumenta su masa corporal hasta aproximadamente el 7mo mes para el cual ya se encuentra lista para su venta.

#### 2.2.2.2 Tipos de Cultivo

**A. Acuicultura extensiva:** La siembra o resiembra de especies hidrobiológicas en ambientes naturales o artificiales cuya alimentación se sustenta en la productividad natural.

**B. Acuicultura semi-intensiva:** Cultivo que utiliza alimentación suplementaria además de la alimentación natural. Existe cierto nivel de manejo

**C. Acuicultura intensiva:** Cultivo que utiliza avanzadas tecnologías y mayor nivel de manejo y control.

#### 2.2.3 Medición del oxígeno disuelto

**A. Sensor por polarización de celdas:** Utilizado para sistemas de control automatizados; el sensor tiene una gran precisión, dando una señal en milivoltios que puede ser adaptada para su completa interpretación y control. Tienen larga duración y pueden estar en contacto con el agua durante largo tiempo sin descalibrarse, por eso su excesivo costo económico.

**B. Sensor electrónico integrado:** Utiliza el mismo principio del sensor anterior, pero se encuentra ya integrado a un aparato que da una respuesta numérica. Tienen menor precisión y son más económicos, poseen puntas de medición, las cuales se corroen al permanecer mucho tiempo en el agua.

**C. Químicamente:** Por acción química se puede obtener un aproximado del valor de la concentración del oxígeno disuelto en el agua. El precio es muy bajo pero con un margen de error alto, la calidad de la mezcla química es determinante.

## 2.2.4 Sistemas de aireación

La existencia de una gran variedad de sistemas de aireación para cultivos acuícolas hace pensar en un interés en particular por explotar este campo, pero para la elección se debe de tener mucho cuidado y tener en cuenta diversos aspectos que influirán en el desarrollo de la cosecha.

### 2.2.4.1 Métodos de aireación

#### **A. Sistemas basados en el aprovechamiento de saltos naturales o forzados de**

**agua:** Se basa en provocar una ducha de agua en una atmósfera de oxígeno puro.

**B. Sistemas basados en difusores:** Son sencillos, bajo mantenimiento, flexibles, baratos de instalación, pero su rendimiento es pobre, difícilmente logra superar el 20%, por lo tanto su utilización regularmente es en las etapas de alevines o como sistemas de emergencia. Un dato importante a tomar es que a mayor profundidad del difusor, mayor retención de la burbuja de oxígeno en el agua, y por consiguiente aumenta el tiempo de contacto del agua con la burbuja, lo que resulta en una mayor absorción del oxígeno por parte del estanque de peces, aumentando la concentración de oxígeno disuelto.

En el mercado se puede encontrar de los siguientes tipos:

- *Difusores de tela de exudación:* Coste muy bajo debido a que uno mismo puede fabricarlos caseramente, pero su rendimiento es demasiado bajo y normalmente se utiliza como emergencia. Rendimiento menor al 5%.
- *Difusores sintetizados metálicos:* Regular rendimiento (del 15%), son tubos porosos que deben ser protegidos para no ser afectados por la corrosión.
- *Difusores cerámicos:* Pueden generar diferentes tipos de tamaño de burbuja, desde pequeñas de 100 a 500 micras hasta burbujas de 3mm.

- *Difusores de manguera porosa:* Genera una burbuja de un diámetro muy pequeño para lo cual el oxígeno necesita una presión de 1.5 a 2 bares como mínimo para su funcionamiento. Posee el mayor rendimiento dentro del grupo de los difusores, llegando a los 20 ó 25%.

Este método de aireación es ideal para una planta piloto de estudio debido a su bajo mantenimiento y bajo costo de adquisición, además que utilizando varios se puede mejorar el suministro de oxígeno para un cultivo intensivo. Para un mejor conocimiento de este método de aireación, observar la Figura N° 2-1.

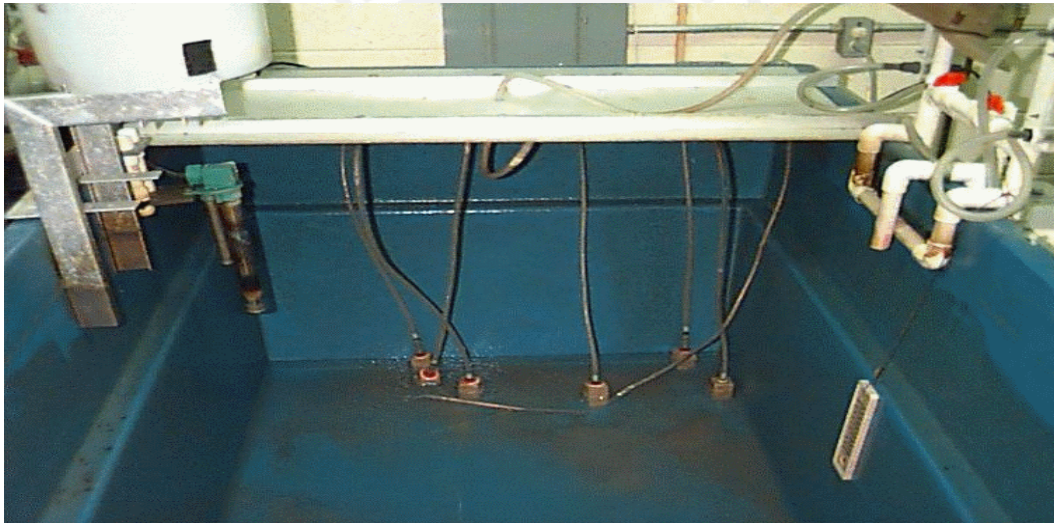


Figura N° 2-1: Sistema de aireación por difusión: Piedras difusoras (Fuente: Segovia 2007).

**C. Sistemas basados en inserción de difusores en tubería:** Se basa en insertar un tubo o un difusor en un estrechamiento practicado en una tubería por la que discurre el agua de alimentación de los tanques de cultivo.

**D. Sistemas basados en la agitación de la superficie del agua:** Formado por dispositivos que agitan la superficie del agua de tal manera que logran proporciones apreciables de transferencia de oxígeno.

**E. Sistemas basados en la inyección de burbujas en contracorriente con el agua:**

Permiten inyectar el oxígeno a través de un difusor, pero obtienen buenos niveles de aprovechamiento a base de poner en contracorriente agua y oxígeno. Para su instalación se tiene que excavar un pozo en el terreno para aumentar la presión de trabajo.

**F. Sistemas de sobresaturación por presión:** Provoca una ducha de agua en una atmósfera de oxígeno puro a presión. En sí es un cilindro presurizado, al cual se le suministra agua con una bomba.

**G. Sistemas basados en tubos de venturi:** Basado en el principio de Bernoulli, se inserta en una tubería un estrechamiento, entonces para mantener la igualdad, en el estrechamiento aumentará la velocidad y bajará la presión, ocasionando una succión del aire que se mezclará con el agua.

**2.2.4.2 Agentes influentes en aireación**

Entre los más importantes:

**A. Supersaturación:** Se presenta condiciones patológicas en los organismos cultivados (enfermedad de la burbuja).

**B. Calentamiento del agua:** Con el aumento de temperatura, la solubilidad del oxígeno disminuye.

**C. Entrada del aire:** Cuando el aire y el agua están en contacto a presiones más altas que la atmósfera, es posible una supersaturación.

**D. Fotosíntesis:** Esto se genera cuando la producción de oxígeno por algas y plantas acuáticas es muy alta.

**E. Procesos fisiológicos:** La sensibilidad de varias especies de peces a la supersaturación de gases está correlacionada con la presión parcial del oxígeno en el ojo.

**F. Acción bacteriana:** Puede incrementar o disminuir la solubilidad dependiendo de los gases producidos y consumidos.

**G. Hipoxia:** Bajos niveles de OD son los mayores limitantes en acuicultura intensiva.

### 2.2.5 Teoría de Lógica Difusa

La lógica difusa es un súper conjunto de la lógica Booleana convencional, presentada por primera vez por el Doctor Lotfi A. Zadeh de la Universidad de California en Berkeley en la década del 60, como una manera de modelar la incerteza natural del lenguaje humano aplicada a la teoría de conjuntos. Los campos de aplicación son múltiples y variados, pero la línea que interesa para propósitos de este trabajo se orienta al Control Automático.

El uso de técnicas de lógica difusa (LD) en control automático trata de imitar o emular el comportamiento consciente de un operador humano en el gobierno de procesos, sistemas o plantas alineales reales, los que difícilmente pueden ser modelados por los métodos fisicomatemáticos. La LD elude el modelo matemático de un proceso y va directo al nivel en que trabaja la planta, lo que permite una aproximación intuitiva a la solución de un problema mediante la formulación de reglas.

Para el caso de una estimación mediante lógica difusa [26] se requieren los siguientes pasos:

- Selección de variables que intervienen en la variable a estimar. Para su elección se toma en cuenta diversos aspectos o preferencias, pero luego se pasan por un análisis estadístico para probar su influencia.
- Construcción de las funciones de membresía. Se calcula las funciones para cada uno de las variables, tomando como criterio desde 2 funciones por variable a más.
- Elaboración de las reglas difusas. Según el número de variables tomadas de la selección, y según el número de funciones de membresía por cada variable, se

realiza la elaboración de las reglas que tienen la forma de SI (variables observadas), ENTONCES (variable a estimar).

- Defusificación de la salida. Obtener el valor numérico de la variable a estimar en este caso, a partir de los conjuntos difusos según las variables observadas iniciales.

### 2.3 Modelo Teórico

El oxígeno disuelto es una variable importante en un cultivo de tilapias debido a que en niveles de oxígeno bajos ocasiona la variación del comportamiento, y que su estado de ánimo y/o apetito disminuyan, lo cual conlleva a que en etapas importantes como la etapa de engorde, la tilapia aumente muy poco o casi nada a su peso ideal.

Existen otros factores, además de los peces, que influyen en variar el valor del oxígeno como por ejemplo la temperatura, ya que a mayor temperatura disminuye la concentración de oxígeno, teniendo muy en cuenta que la tilapia es considerada un pez de agua dulce y caliente.

Otros factores influyente en el oxígeno son las posibles algas que se generan mediante la luz solar y es que se debe de tener mucho cuidado ya que pueden dejar el estanque sin oxígeno a determinadas horas de la noche que pueden ser determinantes para la vida de los peces; además, siguiendo el ciclo de vida del amoníaco, se crean de las bacterias nitrificantes para que consuman el nitrito del agua que es tóxico para los peces, pudiendo ocasionarles la muerte, estas bacterias además de consumir  $\text{CO}_2$ , requieren de oxígeno para su completo funcionamiento en el ciclo de vida del amoníaco. La posibilidad de que existan otras variables que afecten a la calidad del agua y, por consiguiente, tengan una influencia en la respuesta del oxígeno disuelto. Para eso se analizarán las variables para saber su interacción con el oxígeno disuelto para luego ser partes del modelo difuso de estimación.

Otro punto vital es el tema de recirculación del agua, el cual es vital para todo proceso de oxigenación y de uniformidad, debido a que en un estanque con recirculación de agua se cuenta con una bomba de agua, la cual hace que todo el estanque sea realimentado con la misma agua, para eso además debe de contar con una caída de agua para su oxigenación leve y para poder enfriar el agua en caso de que se cuente con unas temperaturas elevadas sobre el óptimo, además del movimiento de las aguas del estanque los cuales harán que los desechos de los peces se depositen en el centro del estanque y puedan ser absorbidos por el filtro. La uniformidad es importante para que todas nuestras especies puedan estar en un promedio de crecimiento y engorde, para que no existan diferentes tamaños de tilapia en un mismo estanque.

La estimación del oxígeno disuelto estará basado en una lógica difusa, la cual tendrá como propósito principal hacer que nuestra variable a estimar sea una estimación basada en la experiencia propia y experiencia de personas especializadas en acuicultura que nos pueden ayudar como son profesores y/o profesionales, y así a nuestra entrada principal del sensor del oxígeno tenga una respuesta adecuada, no oscilante y que su valor esté más adecuado según las otras variables que la influyen en su respuesta. Para un mejor entendimiento de lo explicado, ir a la Figura N° 2-2.

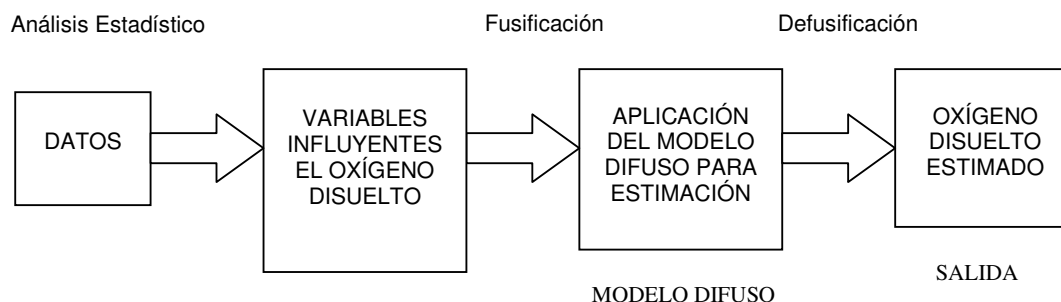


Figura N° 2-2: Representación gráfica del Modelo Teórico

## 2.4 Indicadores Cuantitativos

**A. Nivel de concentración:** Va a tener la unidad de miligramos de oxígeno disuelto en 1 litro de agua, calculado por la sonda o sensor de oxígeno. En algunas ocasiones se le nombra con ppm (partículas por millón).

**B. Temperatura:** Influye en cierto porcentaje ya que a niveles elevados se va a tener poca disponibilidad de oxígeno disuelto en agua fresca, con riesgo a que los niveles sean bajos.

**C. Alimentación:** Si la alimentación es escasa según la etapa de desarrollo en la que se encuentre la tilapia, entonces no se consumirá tanto oxígeno, pero el engorde va a ser menor y menos óptimo ya que las especies resultantes serán delgadas, aunque el oxígeno podría no ser consumido completamente como se espera.

**D. Recirculación:** Jugando un papel muy importante para la uniformidad de las especies, así como ayuda al enfriamiento y a la oxigenación del agua en pequeñas proporciones.

**E. Variables Iniciales:** A parte de la Temperatura como variable inicial a medir para analizar su influencia con el oxígeno disuelto, otras variables serán las de Conductividad, Salinidad y pH del agua. Estas variables serán las iniciales a analizar para luego posteriormente realizar el diseño del modelo de estimación, utilizando lógica difusa.

### CAPITULO 3

## DISEÑO DEL ESTIMADOR DEL OXÍGENO DISUELTO PARA EL ESTANQUE DE CRIANZA DE TILAPIAS DE LA PUCP

### **3.1 Introducción**

Para el desarrollo del capítulo se empezó desde el sólo conocimiento teórico de los cultivos de peces en acuicultura, especialmente el caso de la tilapia, llegando a trabajar en la planta de acuicultura de la PUCP y su manipulación al ejercerle determinados cambios en las variables de la calidad del agua, con el aprendizaje de las reacciones de la misma frente a las variaciones.

En la etapa del diseño se realiza un análisis estadístico para obtener datos para la elaboración de las funciones. Todo análisis estadístico conlleva a la realización de un gráfico para el mejor entendimiento, los cuales todos se encuentran en el anexo del presente trabajo de investigación.

Como consideración se tiene que el costo de implementación es elevado para ser puesto en marcha en una planta piloto, pero en caso de utilizarlo alguna compañía que lleve años de experiencia en el rubro de cultivo de peces, el presente trabajo generará mayores ingresos económicos a mediano y largo plazo.

### **3.2 Metodología:**

La metodología seguida para realizar la investigación sobre la estimación del oxígeno disuelto en los estanques de tilapias de la PUCP es la que sigue:

- Inicialmente se realizará un reconocimiento de las partes del estanque de recirculación de agua,
- Luego se realizará la toma de datos de las variables,

- En seguida se acondicionan los datos de manera que éstos sean los más apropiados,
- Se realiza una regresión con los datos para tener el grado de relación de las variables en el oxígeno disuelto,
- Después debe realizarse el análisis estadístico y la estimación del oxígeno disuelto,
- Finalmente se simulará la estimación respecto a los datos observados para evaluar el ajuste.

### 3.2.1 Reconocimiento del estanque

Los estanques utilizados son 2 de 500 litros cada uno, formando un sistema de recirculación del agua mediante tuberías de PVC conectados entre sí.

El sistema de recirculación se encuentra funcionando todo los días ininterrumpidamente (excepto en casos de emergencia o algún caso extremo), eso significa que la bomba de recirculación se encuentra encendida. Además se cuenta con una bomba de aireación que mediante tubos de plástico lleva el oxígeno hacia su salida mediante unos difusores cerámicos, los cuales están distribuidos dentro de los estanques.

Al hacer uso de un sistema de recirculación, logramos que los excrementos de los peces tiendan a ir hacia el centro superior de los estanques, es por eso que dentro de éstos se encuentra un tubo en posición vertical revestido en su parte superior con una malla de plástico para atrapar los excrementos y posibles excesos de alimento de los peces.

### 3.2.2 Diagrama de Bloques:

Para entender el proceso para diseñar una estimación del oxígeno disuelto mediante la lógica difusa, observar la figura N° 3-1.

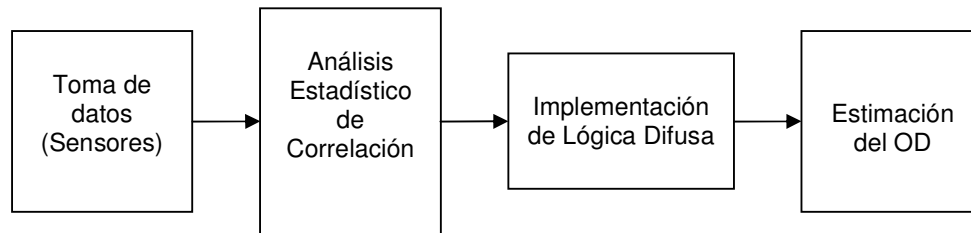


Figura N° 3-1: Diagrama de bloques del proceso de estimación.

### 3.2.3 Descripción de los bloques:

Cabe resaltar que el proceso a diseñar es el del algoritmo de estimación del oxígeno disuelto.

- **Toma de Datos (Sensores):** Este bloque está compuesto por varios sensores (como también puede ser una sonda que puede medir varios parámetros). Estas variables a medir están ubicadas dentro del estanque de tilapias, por lo que al hacer uso de los sensores tenemos datos numéricos de las variables para la determinación de un porcentaje de calidad del agua. Debido a la utilización de una lógica difusa, se necesita muchos datos medidos y registrados, ordenadamente para el estudio posterior.
- **Análisis Estadístico de Correlación:** Este bloque representa al análisis estadístico que se efectúa a los datos numéricos tomados de las variables que pueden afectar al oxígeno disuelto en el estanque de tilapias. Se manipula la data de tal manera de eliminar posibles errores en la medición y luego se procede a los cálculos matemáticos para encontrar las variables que modifican el comportamiento del oxígeno disuelto de manera directa o inversa. Para un estudio mejor se realizan diversos gráficos para el mejor entendimiento.

- **Implementación de Lógica Difusa:** Este bloque representa al proceso en sí donde se van a utilizar todos los datos (tomados anteriormente como base), para realizar una estimación del oxígeno disuelto, siguiendo reglas usadas en la lógica difusa mediante el uso de Funciones de Membresía para cada una de las entradas, las cuales son las variables medidas del estanque de tilapias. Las reglas de la lógica difusa cuentan con coeficientes, los cuales su valor exacto dependerá de cuánto error se tenga al hacer la diferencia entre el valor real y el valor estimado del oxígeno disuelto.
- **Estimación del OD:** En este bloque la resultante será el valor estimado del oxígeno disuelto y este valor dependerá exclusivamente de la entrada a este proceso, dada por las variables de calidad del agua que se medirán con los sensores adecuados. Luego de seguir las reglas de la lógica difusa, haciendo uso de una fórmula es que se logra obtener el valor estimado del oxígeno disuelto. Para probar su efectividad se podrá encontrar el error en la medición comparado con los valores reales tomados inicialmente.

### 3.2.4 **Objetivos**

Se presentará los objetivos generales como específicos de la investigación:

- Diseñar una estimación del oxígeno disuelto, basado en un modelo de lógica difusa para la planta piloto de acuicultura de la PUCP con la finalidad de poder mantener en óptimas condiciones el cultivo de tilapias existente.

### 3.3 **Adquisición de Datos**

El proceso de adquisición de datos se realizó en la planta piloto de la PUCP mediante la medición de las variables que influyen o que pueden tener relación alguna con el oxígeno disuelto.

En la adquisición de datos se pudo reunir las mediciones hechas en un período de 6 meses, tomando muestras 3 veces al día a las 9:00am, 12:00pm y a las 4:00pm aproximadamente en un estanque de tilapias, con un total de 1008 muestras para analizar en total.

Para la toma de datos se tuvo inconvenientes como el no contar con los equipos de medición inicialmente. A pesar de esto, se pudo empezar las mediciones antes para el caso de Temperatura y de pH (ambos sensores se lograron conseguir rápido debido a su bajo costo económico). Luego se puso medir las demás variables y se empezó con la adquisición de datos.

Cabe resaltar que a partir de este punto se tomará como punto inicial del proceso de medición, obviando los valores anteriores medidos de temperatura y ph para el análisis correspondiente.

### **3.4 Análisis Estadístico de las variables**

Después de capturar y anotar todas las variables durante un mes, se empezó con el análisis estadístico. Los datos obtenidos incluyen las variables de oxígeno disuelto (OD), pH, salinidad (sal), conductividad (cond) y temperatura (temp) del agua. Para medir el pH y temperatura se utilizó un pH TESTER 0-14 PHEP4 POCKET WATERPROOF de la marca Hanna, y para la medición de los demás parámetros se utilizó un YSI 556 MULTIPROBE SYSTEM.

Por teoría sabemos que la variable externa más influyente en el comportamiento del oxígeno disuelto es la temperatura, llegando incluso a haber una relación propia entre ambas variables (ver tabla N° 1-3), se decidió entonces hacer el estudio y análisis de las otras variables por contar con los sensores apropiados.

Haciendo uso de las herramientas de Microsoft Excel es que se ha podido analizar paso a paso las variables y los datos obtenidos de los sensores para poder formar posteriormente las Funciones de Membresía.

**A. Diagrama de dispersión:** Mediante esta herramienta se puede ver si hay correlación entre las variables, mostrando todos los puntos tomados en la etapa anterior de medición. Además, se puede notar si existe relación alguna entre las variables (relación directa, inversa, no lineal o simplemente no hay relación).

Al realizar todas las gráficas de dispersión entre todas las variables se percibió que existían puntos distantes por posiblemente ruido en la medición (cambio brusco de temperatura), lo cual en algunas gráficas se puede observar que hay cierta tendencia de los puntos de dispersión, pero existen pocos puntos que se encuentran muy alejados al promedio. Esto significa que si dejamos estos puntos van a variar el valor de la recta de regresión que posteriormente se va a evaluar, eso significaría que se tendría una recta con un error mayor al estimado. Es por eso que eliminaremos estos puntos como se pueden ver en la Figura N° 3-2, en donde se ven varios puntos de medición del oxígeno disuelto de valores críticos alejados del promedio, es decir, los valores que se eliminarán en este caso serían los más alejados como los que se encuentran por debajo de 4.2mg/L, y además de la temperatura que se encuentra por encima de los 28°C.

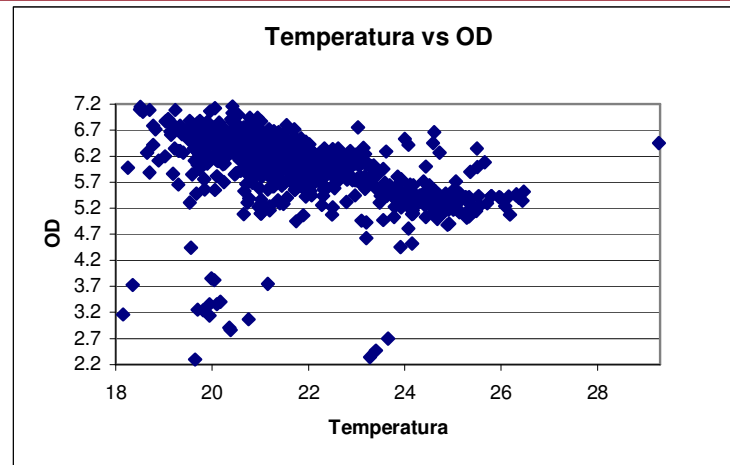


Figura N° 3-2: Temperatura vs. OD tomados del sistema.

Se debe resaltar el hecho de que se eliminará todas las muestras hechas ese día, ya que no sabemos la relación que pudo haber porque la intención es tener un buen controlador con un error de estimación mínimo. Después de analizar todas las figuras de relación entre 2 variables, y de haber eliminado a los valores que se encontraban muy alejados de las demás muestras, se llegaron a un total de 891 muestras para su análisis estadístico posterior (ver Figura N° 3-3). De estas 891 muestras, se tomará las últimas 350 muestras observadas para verificar el diseño y validarlo, mientras que las restantes 541 serán para el diseño del modelo.

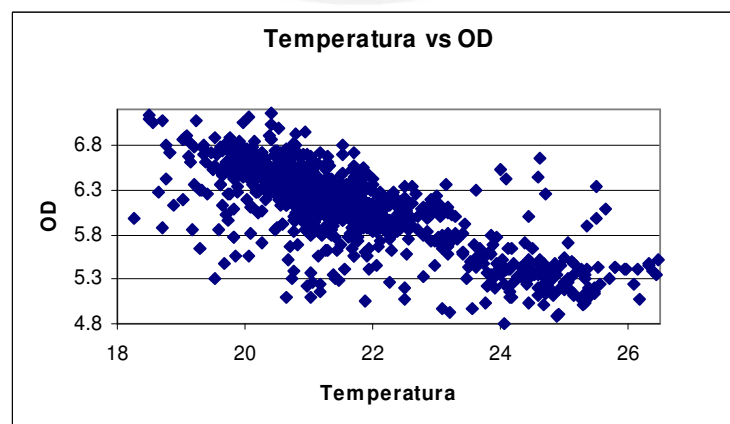


Figura N° 3-3: Temperatura vs. OD modificado.

Este tratamiento de los datos se hará para todas las variables, las cuales estarán graficadas en el ANEXO N° 2 de la tesis.

- B. Datos Estadístico:** Este cuadro está compuesto de valores para cada variable medida. Para esto se utilizó una herramienta de Microsoft Excel de análisis de datos. En este caso se tiene como respuesta los valores de media, error típico, mediana, moda, desviación estándar, varianza de la muestra, curtosis, coeficiente de asimetría, rango, mínimo, máximo, suma, cuenta, nivel de confianza, para cada una de las variables, como se puede observar en la Tabla N° 3-1.

<i><b>Variables Estadísticas</b></i>	<i><b>Valor</b></i>
Media	20.98
Error típico	0.069
Mediana	20.96
Moda	20.42
Desviación estándar	0.59
Varianza de la muestra	0.349
Curtosis	-0.498
Coeficiente de asimetría	-0.16
Rango	2.5
Mínimo	19.54
Máximo	22.04
Suma	1510.968
Cuenta	72
Mayor (1)	22.04
Menor(1)	19.54
Nivel de confianza (95,0%)	0.139

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

*Tabla N° 3-1: Datos estadísticos de la variable de Temperatura.*

- C. Coeficiente de correlación de Pearson:** Es un índice estadístico utilizado para saber la relación lineal existente entre variables comparadas. En este caso, según las gráficas obtenidas en la etapa de dispersión, se llegó a la conclusión de que existe una relación lineal. Entonces se calculó el coeficiente de Pearson a partir de la ecuación 3-1:

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \quad (3-1)$$

Siendo:

$\sigma_{XY}$  : la covarianza de (X,Y)

$\sigma_X$  y  $\sigma_Y$  : las desviaciones típicas de las distribuciones marginales.

Una fórmula útil para el cálculo del coeficiente está en la ecuación 3-2:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^{\infty} x_j y_j - n \bar{X} \bar{Y}}{\sqrt{(\sum_{j=1}^{\infty} x_j^2 - n \bar{X}^2)(\sum_{j=1}^{\infty} y_j^2 - n \bar{Y}^2)}} \quad (3-2)$$

Pero se puede utilizar las herramientas de Microsoft Excel para realizar estos cálculos y así ahorrar tiempo de cálculo, además de utilizar los valores que se calcularon en el paso anterior.

- D. Recta de regresión:** Mediante los coeficientes de Pearson hallados antes se puede graficar una recta tal que su significado sea el valor estimado de las variables, además para saber la tendencia y cuán influyente es una variable con respecto a la otra. Se realizó gráficas que representen la recta de regresión entre 2 variables (luego de su corrección hecha en la etapa de dispersión), teniendo un error menor al anterior para que su interpretación sea más óptima y adecuada.

Para graficar la recta, se tomó como base la ecuación 3-3 de toda recta:

$$Y = a + bX \quad (3-3)$$

Para los valores de a y b se tomó las siguientes expresiones:

$$a = \bar{Y} - b \bar{X} \quad (3-4)$$

$$b = r \frac{S_Y}{S_X} \quad (3-5)$$

Siendo:

r = coeficiente de correlación.

$S_Y$  = Desviación estándar de Y.

$S_X$  = Desviación estándar de X.

$\bar{Y}$  = Media aritmética de Y.

$\bar{X}$  = Media aritmética de X.

Después de calcular todos estos valores (con la ayuda de Microsoft Excel), se reemplazó 2 puntos de la curva con los valores mínimos y máximos de la ecuación de la curva para luego unir estos 2 puntos mediante una recta que formará la curva de regresión.



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Figura Nº 3-4: Recta de regresión para las variables de Conductividad y Salinidad.

**E. Estimación Lineal:** Mediante esta herramienta podemos calcular la matriz de valores estadísticos que describan la línea utilizando el método de los “mínimos cuadrados”. Utilizando esta estimación nos dará como respuesta una matriz de valores, mediante una función en Microsoft Excel, que se tiene que saber interpretarla para tomar los valores que son necesarios para el estudio estadístico.

	A	B	C	D	E	F
1	$m_n$	$m_{n-1}$	...	$m_2$	$m_1$	$b$
2	$se_n$	$se_{n-1}$	...	$se_2$	$se_1$	$se_b$
3	$r_2$	$se_y$				
4	F	df				
5	ssreg	ssresid				

Tabla Nº 3-2: Matriz de valores que devuelve la función Estimación Lineal (Microsoft Excel 2002).

Esta matriz se puede interpretar de la siguiente manera donde:

Estadística	Descripción
se1,se2,...,sen	Los valores de error estándar para los coeficientes $m_1, m_2, \dots, m_n$ .
Seb	El valor de error estándar para la constante b (seb = #N/A cuando constante es FALSO).
r2	El coeficiente de determinación. Compara los valores y estimados y reales, y los rangos con valor de 0 a 1. Si es 1, hay una correlación perfecta en la muestra, es decir, no hay diferencia entre el valor y estimado y el valor y real. En el otro extremo, si el coeficiente de determinación es 0, la ecuación de regresión no es útil para predecir un valor y. Para obtener información sobre el cálculo de r2, consulte la sección de "Comentarios" más adelante en este mismo tema.
sey	El error estándar para la estimación y.
F	La estadística F o valor F observado. Utilice la estadística F para determinar si la relación observada entre las variables dependientes e independientes se produce por azar.
df	Grados de libertad. Utilice los grados de libertad para encontrar valores F críticos en una tabla estadística. Compare los valores que encuentre en la tabla con la estadística F devuelta por ESTIMACION.LINEAL para determinar un nivel de confianza para el modelo.
ssreg	La suma de regresión de los cuadrados.
ssresid	La suma residual de los cuadrados.

Tabla N° 3-3: Descripción de los valores de la Tabla N° 3-2 (Microsoft Excel 2002).

Y donde además:

$m_n$  = Coeficientes de las variables tomadas en cuenta en la evaluación estadística.

b = Constante independiente.

Para este caso se llega a la tabla N° 3-4 elaborada por el programa descrito anteriormente:

	pH	Salinidad	Conductividad	Temperatura	OD
<b>Coefficiente de correlación</b>	1.22	0.104	-0.11	-0.11	0.625
<b>Error estándar para coeficientes</b>	0.09	0.012	0.01	0.011	0.78

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

*Tabla N° 3-4: Datos estadísticos para las 541 muestras seleccionadas.*

Además se utiliza la Tabla N° 3-5 para hallar las probabilidades que se muestra en la tabla N° 3-6.

<b>Coefficiente de determinación</b>	0.72
<b>Error estándar para estimación</b>	0.25
<b>Valor F observado</b>	554.8
<b>Suma de regresión de cuadrados</b>	138.03
<b>Suma residual de cuadrados</b>	55.11
<b>Grados de Libertad</b>	886

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

*Tabla N° 3-5: Variables estadísticas necesarias para solución de t-value.*

Con todos estos valores se llega a efectuar la función estadística de Estimación Lineal del oxígeno disuelto con respecto a las otras variables medidas, tomando como base los parámetros de la Tabla N° 3-3 para seguir con el análisis estadístico y los pasos siguientes.

- F. Tabla de regresión múltiple:** Después de haber analizado todas las variables, se procede a construir una tabla que nos indique si todas las variables influyen en el comportamiento del oxígeno disuelto.

Para eso se toma el modelo de regresión múltiple de la ecuación 3-6:

$$y = b + m_1T + m_2Cond + m_3Sal + m_4pH \quad (3-6)$$

Habiendo hallado cada uno de los valores de m y el valor de b, se empieza con la realización de la tabla de regresión (Tabla N° 3-6).

	Value	Std.error	t-value	P>( t )
O2	0.625	0.78	0.8	0.2
T °C	-0.108	0.01	-9.5	5.6E-21
Conduct.	-0.11	0.01	-11.8	4.6E-30
salinidad	0.1	0.01	8.5	5.7E-17
pH	1.22	0.1	13.5	2.3E-38

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 3-6: Tabla de regresión múltiple para las variables obtenidas.

La tabla muestra que todas las variables medidas que interfieren son significantes para estimar el valor del oxígeno disuelto. Esto se puede observar en los valores de probabilidad (columna 5 de la Tabla N° 3-3), el cual debe de encontrarse por debajo de 0.05 en teoría.

### 3.5 Modelo de lógica difusa para estimación del oxígeno

Básicamente un modelo de lógica difusa consta de 3 partes: funciones de membresía, elaboración de las reglas, y razonamiento difuso. En cada parte se explicará cómo se elaboró y se prosiguió con lo indicado por cada una de éstas.

### 3.5.1 Funciones de Membresía

En esta etapa se realiza el proceso de fuzificación de cada una de las variables. Para esto se toma las funciones de membresía básicas y fáciles de medir, las cuales son “bajo” y “alto” nivel.

**3.5.2 Elaboración de las Reglas:** Según el modelo de regresión múltiple, tenemos 4 variables de entrada medidas, las cuales van a determinar el valor estimado necesario de oxígeno disuelto, y además cada variable puede tener el valor de alto o bajo, entonces se tendrá un total de 16 reglas difusas.

Para la elaboración de estas reglas, se toma en cuenta ambos valores de alto y bajo para cada variable, y para la salida (la cual es representada por la ecuación del modelo de regresión múltiple, con el valor de Y como el valor estimado de oxígeno disuelto), se toma en cuenta coeficientes que multiplican a las variables medidas, ya que al utilizar el aireador se inserta oxígeno en el agua, lo que varía también los valores de dichas variables en un nivel estimado que se desea manipular, minimizando el error.

Las reglas van desde cuando todas las variables de entrada dan un valor de bajo (L) hasta cuando todas dan un valor de alto (H).

$$\text{IF } Temp \text{ is L \& } Cond \text{ is L \& } Sal \text{ is L \& } pH \text{ is L, THEN } y_1 = b_{1,0} + b_{1,1}Temp + b_{1,2}Cond + b_{1,3}Sal + b_{1,4}pH;$$

### 3.5.3 Razonamiento difuso:

Está dado por el proceso de desfuzificación en el modelado de lógica difusa. Con las reglas formuladas en el punto anterior y con las muestras tomadas en el proceso de adquisición de datos, el modelo de lógica difusa es deducido siguiendo 3 pasos esenciales:

#### **Paso 1:**

Encontrar el nivel de disparo (o valor mínimo), el cual es obtenido utilizando el valor mínimo de las funciones de membresía según cada regla formulada y según se haya operado las funciones de membresía en el proceso de fuzificación, siguiendo la ecuación siguiente:

$$w_{i,t} = \min[FMF(Temp_t, A_i), FMF(Cond_t, A_i), FMF(Sal_t, A_i), FMF(pH_t, A_i)]$$

Donde el valor de "i" está dado por el número de regla utilizada, "t" es el número de muestra tomado y FMF denota las funciones de membresía realizado en un proceso anterior.

#### **Paso 2:**

Para cada regla "i" se modela un valor de salida de la lógica difusa calculado y definido por las reglas, llegando a la ecuación 3-7:

$$\hat{y}_{i,t} = b_{i,0} + b_{i,1}Temp + b_{i,2}Cond + b_{i,3}Sal + b_{i,4}pH \quad (3-7)$$

Donde sabemos que la salida está condicionada por los valores de todas las variables involucradas en el proceso; la salida está dada por el valor estimado de oxígeno disuelto.

**Paso 3:**

La salida final de la lógica difusa se puede definir como el proceso de desfuzificación de la siguiente ecuación:

$$\hat{y}_t = \frac{\sum_{i=1}^{16} w_{i,t} \hat{y}_{i,t}}{\sum_{i=1}^{16} w_{i,t}} \quad (3-8)$$

Los valores de las constantes que multiplican a las variables adquiridas mediante la medición inicial, son estimados utilizando la minimización de la suma de los cuadrados de los errores. Utilizando la fórmula:

$$SSE(b_{i,j} (i = 1, \dots, 16); j = 0, \dots, 4) = \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2 \quad (3-9)$$

Donde  $y_t$  es el valor observado del oxígeno disuelto tomado mediante el sensor en etapas iniciales, y el valor de  $\hat{y}_t$  está dado por la lógica difusa modelada.

**3.6 Diseño del Modelo Difuso:**

Para el diseño se siguieron los siguientes pasos, los cuales constan en la determinación de las constantes que multiplican a las variables, las cuales son el objetivo primordial de este tema de investigación:

**Paso 1:** Teniendo una tabla con todas las muestras (541 en total de muestras observadas), se empieza con elegir un punto de inicio para empezar con la transformación de las muestras en funciones de membresía. Para esto se toma como base la de tomar los máximos y mínimos de cada variable como 1 y 0 respectivamente (para su transformación a funciones de membresía).

T °C	Conduct.	salinidad	pH	OD	
26.47	56.92	37.77	8.1	7.15	Máximo
21.69	48.79	34.45	7.83	6.09	Media aritmética
18.25	41.16	30.61	7.4	4.81	Mínimo
1.64	3.26	1.77	0.1	0.47	Desviación Estándar

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

*Tabla N° 3-7: Valores máximos, mínimos, promedios y desviación de las variables que intervienen en el modelo difuso.*

Usando los valores de la Tabla N° 3-7 se realiza una transformación basado en la interpolación, ya que se saben los extremos y solo falta saber el valor de la muestra. Luego de su transformación, los valores quedan en el rango deseado entre 0 y 1 para su siguiente análisis, como por ejemplo se puede ver en la tabla N° 3-8.

T °C	Conduct.	salinidad	pH	OD
0.3735	0.6155	0.7933	0.0000	0.4274
0.3820	0.6307	0.8073	0.1429	0.4786
0.3674	0.4702	0.5433	0.5714	0.5043
0.3735	0.5508	0.6788	0.2857	0.5598
0.3954	0.5635	0.6760	0.4286	0.5385
0.4465	0.6580	0.7905	0.2857	0.3205
0.2433	0.4975	0.7081	0.2857	0.7350
0.2920	0.5254	0.7123	0.4286	0.6880
0.3686	0.6307	0.8212	0.2857	0.3462
0.1569	0.4759	0.7556	0.4286	0.7479
0.1825	0.4873	0.8897	0.5714	0.6154
0.2701	0.5926	0.8534	0.2857	0.4444
0.3017	0.5305	0.7109	0.5714	0.7137
0.3333	0.5977	0.7989	0.5714	0.6966
0.3686	0.6009	0.7765	0.7143	0.5983

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 3-8: Muestras transformadas a Funciones de Membresía

**Paso 2:** Teniendo las muestras en funciones de membresía, se empieza con ordenarlas según las reglas difusas anteriormente elaboradas con todas las muestras observadas. Para saber si un valor es bajo (L) o alto (H), se toma como punto intermedio la muestra con función de membresía de 0.5 (si es que existiera en algún caso de las variables, sino se supone).

Luego de terminar con este paso, se llega a una observación en especial, ya que en ciertas reglas no se logra con el número mínimo para una elaboración deseada (inclusive hay casos donde no existen muestras que cumplan con la regla). Lo primero que se intuye sería eliminar una de las variables que intervienen, para realizar este criterio se empieza con observar a la variable que sea menos influyente con el oxígeno disuelto (menor coeficiente de correlación). En consecuencia de que ahora se tiene 3 variables que influyen, las reglas disminuyen de 16 a 9 para ser posteriormente analizadas y resueltas.

En la tabla N° 3-4 se puede observar que el pH es la variable con menor influencia, pero si eliminamos esta variable no habría cambio alguno en las reglas (es decir, seguirían existiendo reglas sin muestras que las cumplan), entonces haciendo un pequeño análisis se observa que existe una alta relación proporcional entre las variables de Conductividad y Salinidad como se puede ver en la figura N° 3-4. Es decir, es difícil que mientras una se encuentre a nivel alto, la otra se encuentre en bajo.

Es por eso que la decisión de eliminar una de éstas es inminente, así que se decide eliminar la de menor coeficiente de correlación con respecto al oxígeno disuelto, es decir, se elimina Salinidad para el análisis posterior. Entonces se empieza con transformar las funciones mayores a 0.5 como H (alto), y las menores a 0.5 como L (bajo). El valor de 0.5 exactamente puede ser tomado como alto o bajo, según convenga, como ha sido tomado en la tabla N° 3-9.

Muestra	Temperatura	Conductividad	pH
1	L	H	L
2	L	H	L
3	L	L	H
4	L	H	L
5	L	H	L
6	L	H	L
7	L	L	L
8	L	H	L
9	L	H	L
10	L	L	L
11	L	L	H
12	L	H	L
13	L	H	H
14	L	H	H
15	L	H	H

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 3-9: Transformación de las Funciones de Membresía a términos H o L.

Luego, teniendo ahora las muestras como valores de L o H, se traslada para saber a qué regla pertenecen, entonces primero se busca saber a cuál regla pertenecen, para luego trasladarlos hacia la regla las cuales ya han sido elaboradas anteriormente (ver tabla N° 3-10).

REGLAS								
8	7	6	5	4	3	2	1	Muestra
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	1
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	2
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	3
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	4
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	5
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	6
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	7
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	8
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	9
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	10
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	11
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	12
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	FALSO	13
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	FALSO	14
FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	1	FALSO	FALSO	FALSO	15

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 3-10: Regla a la que pertenece las 15 primeras muestras observadas.

En donde el valor de FALSO significa que no pertenece a dicha regla (regla desde la 1 hasta la 8), y cuando tiene el valor de "1" significa que la muestra pertenece a dicha regla. En este caso se puede observar 15 muestras, las demás se encuentran analizadas en el ANEXO.

T °C	Conduct.	pH	OD
L	L	L	
0.243309	0.49746193	0.28571429	0.73504274
0.15693431	0.47588832	0.42857143	0.74786325
0.33211679	0.4784264	0.42857143	0.71367521
0.4270073	0.46890863	0.42857143	0.41025641
0.26399027	0.28045685	0.42857143	0.94871795
0.33698297	0.48096447	0.42857143	0.23504274
0.31386861	0.42322335	0.42857143	0.64957265
0.29927007	0.37246193	0.42857143	0.67948718
0.42457421	0.39911168	0.42857143	0.53846154
0.31873479	0.34454315	0.42857143	0.58119658
0.30656934	0.49936548	0.42857143	0.24786325
0.31386861	0.47461929	0.42857143	0.5982906

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

*Tabla N° 3-11: Muestras ordenadas para la regla 1 (solo para 15 muestras en este caso)*

Este tratamiento de los datos se hará para todas las variables, las cuales estarán graficadas en el ANEXO de la tesis.

**Paso 3:** Luego de ordenadas las muestras en sus respectivas reglas, se prosigue con realizar una estimación lineal por cada regla. Se puede analizar los coeficientes de cada regla mediante la función de Estimación Lineal que el programa Microsoft Excel 2003 proporciona. Eso se realiza con las 9 reglas, llegando a la creación de la Tabla N° 3-12.

Regla	b	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>
1	0.8398	-0.1935	-0.7165	0.1925
2	0.8431	-0.5092	-0.2794	0.1310
3	0.4421	0.1458	-0.1836	0.2195
4	1.1148	-1.1541	-0.3563	0.2015
5	3.2284	-1.9891	-3.2237	-0.2563
6	0.6341	-0.1866	-0.6477	0.1540
7	0.7936	0.3304	-1.0050	-0.2286
8	0.9527	-0.9450	-0.0514	0.1728

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 3-12: Coeficientes de la estimación lineal según las reglas del modelo difuso.

Tras encontrar los valores de las constantes de las reglas difusas, se puede empezar con las pruebas para determinar el error existente, tanto con respecto a una aproximación lineal como el error existente en comparación con las muestras de oxígeno disuelto anteriormente observadas.

### 3.7 Conclusiones del capítulo:

Al encontrar los valores de los coeficientes de las reglas del modelo difuso, se puede decir que ya es hora de empezar con las pruebas para determinar los errores anteriormente mencionados; las pruebas se encuentran en el capítulo 4 de esta investigación.

Inicialmente se puede observar un número diferente en la probabilidad T que existe para el coeficiente del OD, lo que indica que es un valor no influyente, pero luego de eliminar a la variable de salinidad se llega a una tabla estadística N° 3-13 en donde todas las variables a analizar si tienen un valor correcto. Este pequeño detalle no fue tomado inicialmente en cuenta ya que no se sabría a cual variable eliminar (recordando que es el OD el que tiene el valor incorrecto y no alguna variable como para descartarla), pero luego del análisis posterior se decidió por eliminar a la variable ya eliminada, la cual luego del análisis nos dio un valor correcto para el diseño.

	Value	Std.error	t-value	P>( t )	Significance
O <sub>2</sub>	3.63	0.72	5.015	3.2E-07	Y
T °C	-0.17	0.01	-19.02	3.23E-68	Y
Conduct.	-0.04	0.004	-8.94	1.11E-18	Y
pH	1.03	0.091	11.35	2.94E-28	Y

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 3-13: Tabla estadística con la eliminación de la Salinidad.



**CAPITULO 4****PRUEBAS Y RESULTADOS****4.1 Introducción**

Para el desarrollo del capítulo se empezó teniendo el modelo de estimación del oxígeno disuelto utilizando lógica difusa, para luego realizar las pruebas con las 350 muestras separadas en el capítulo 3.

**4.2 Simulación de los resultados del modelo:**

Al tener el modelo listo para realizar las pruebas, se empezó con la simulación utilizando los 350 datos de las variables separadas como entrada para obtener el valor del oxígeno disuelto estimado. Las pruebas se realizaron usando el entorno de Microsoft Excel 2002, mediante tablas realizadas para que automáticamente muestren resultados según los valores usados, como se puede observar en la Tabla N° 4-1 para un valor de muestra medida aleatoriamente.

	T °C	Conduct.	pH	OD		
<b>Muestra</b>	0.446472	0.657995	0.2857143	0.320512821		
Regla	T °C	Conduct.	pH	Nivel Mínimo	OD parcial estimado	Producto
1	0.5535	0.3420	0.7143	0.3420	0.33692665	0.115230625
2	0.5535	0.3420	0.2857	0.2857	0.469632503	0.134180715
3	0.5535	0.6580	0.7143	0.5535	0.449120419	0.248600718
4	0.5535	0.6580	0.2857	0.2857	0.422581304	0.120737516
5	0.4465	0.3420	0.7143	0.3420	0.145553282	0.049779961
6	0.4465	0.3420	0.2857	0.2857	0.168614211	0.048175489
7	0.4465	0.6580	0.7143	0.4465	0.214958692	0.095973041
8	0.4465	0.6580	0.2857	0.2857	0.546162742	0.156046498
<b>Sumatoria</b>				2.8269	2.753549804	0.968724563

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 4-1: Oxígeno Disuelto estimado.

En la tabla N° 4-1 se puede ver para la muestra ya codificada en valores de la función de membresía. La muestra tomada fue para los valores de Temperatura = 21.92 °C, Conductividad = 51.53mS/cm, pH = 7.6 unidades, dando como resultado 5.56mg/ de oxígeno disuelto en el agua, como se observa en la Tabla N° 4-2.

Muestra	OD real	OD estimado
En Función de Membresía	0.32	0.34
En Valor de lectura	5.56	5.62

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 4-2: Valores de OD resultantes de la Tabla N° 4-1.

Para efectos de la simulación se siguió los siguientes pasos:

- **Elaboración de la tabla de pruebas:** Es la etapa inicial para empezar las simulaciones con los datos. La tabla fue creada en el programa Microsoft Excel 2002 debido a que su entorno es fácil de entender y de utilizar, además de contar con numerosas herramientas adicionales que ayudan a un mejor análisis de los datos. Para un mejor entendimiento, la tabla cuenta con las siguientes parámetros:
  - Título de identificación de gran tamaño.
  - Los valores de la muestra ubicados según la variable a la que pertenecen, incluyendo la muestra tomada del oxígeno disuelto para una comparación posterior. Se tiene en cuenta que los valores ya pasaron por la etapa de cambio de nomenclatura, ya que ahora no representan el valor de la muestra observada, sino un valor dentro de las funciones de membresía.
  - Las 8 reglas de la lógica difusa, aplicadas al modelo ordenadas según el diseño.

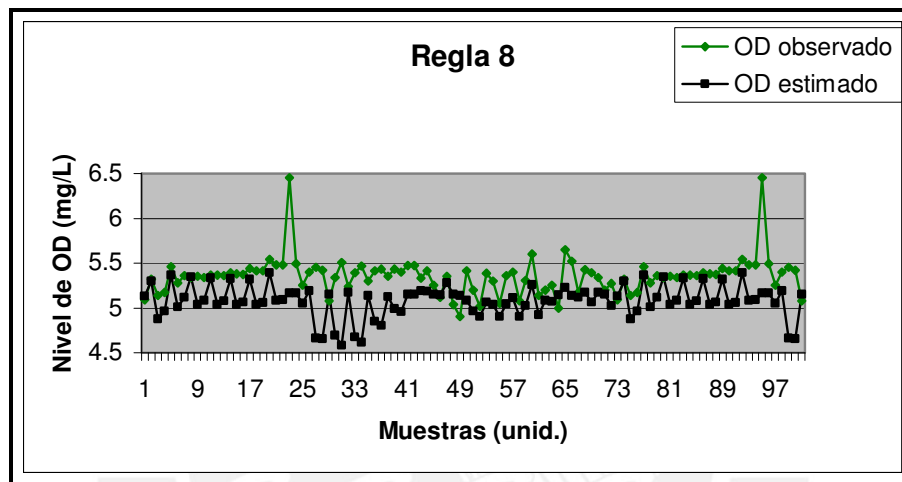
- Nivel Mínimo, los cuales constan del valor mínimo de las variables transformadas a funciones de membresía. Toma el mínimo valor por cada regla del modelo de lógica difusa. Son datos necesarios para la obtención del valor del oxígeno disuelto estimado, ya que el modelo se basa en la toma de valores mínimos para este caso.
- Valor del oxígeno disuelto parcial estimado, los cuales son obtenidos según los valores de las variables en función de membresía, así como los valores de los coeficientes de cada regla hallados en el proceso del diseño del modelo.
- El producto entre el nivel mínimo y el oxígeno disuelto parcial bajo el nombre de Producto.
- La sumatoria de los niveles mínimos, del oxígeno disuelto parcial estimado, y del producto.
- Valor del oxígeno disuelto observado y del estimado, tanto en función de membresía como en valor observado.

Se utilizó las herramientas del programa utilizado para automatizar la tabla para ahorrar tiempo en cálculos numéricos.

- **Simulación final para pruebas:** Luego de haber llenado la tabla, se empieza con las pruebas ingresando datos de la muestra para luego observar los valores de oxígeno disuelto estimados y compararlo con los observados. Para poder realizarlo, se hizo la simulación de todas las muestras utilizando la tabla de pruebas y guardando los valores de oxígeno disuelto observado y estimado para finalmente compararlos en un gráfico.

El método utilizado para las pruebas fue manual, tomando las muestras una por una y utilizándolas en la tabla de prueba, para luego guardar los datos de oxígeno disuelto observado y estimado para su posterior análisis. Además se

agrupó a los datos de la simulación en grupos según la regla a la que pertenecían. Debido a que en ciertas reglas el número de muestras sobrepasan los 100 valores, se decidió como máximo una toma de 100 muestras para su mejor apreciación, recalcando que es solamente para apreciación (como se puede observar en la Figura N° 4-1), ya que la simulación se realizó para todas las muestras observadas inicialmente.



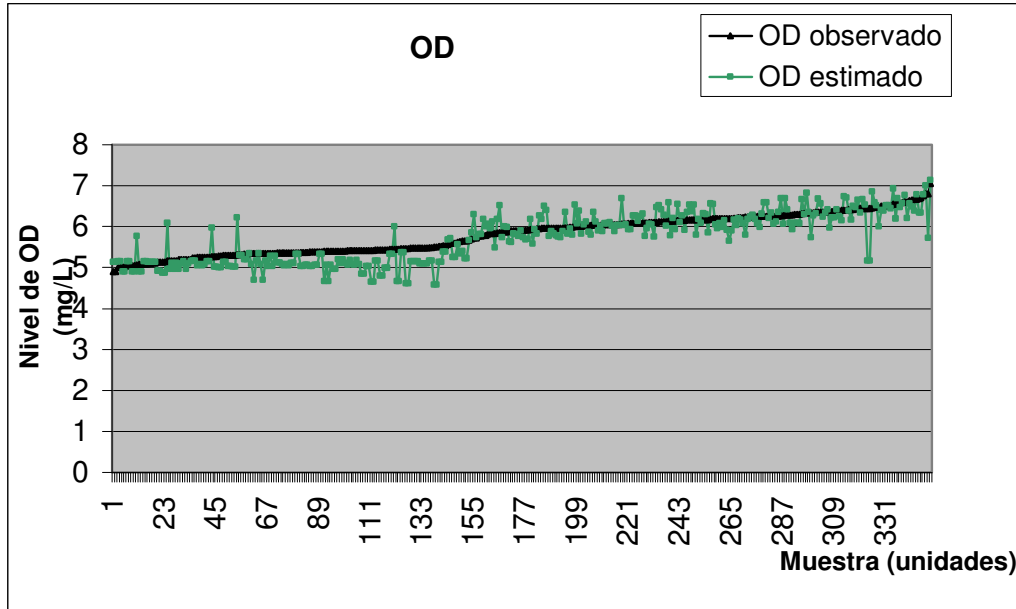
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Figura N° 4-1: Visualización entre OD observado y OD estimado para la regla 8.

Este tratamiento de los datos se hará para todas las variables, las cuales se muestran en el ANEXO N° 3.

**4.3 Comparación del oxígeno disuelto Observado con el Estimado:**

Para un mejor entendimiento y análisis se graficó al oxígeno disuelto observado y al oxígeno disuelto estimado.



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Figura N° 4-2: Muestra de OD observado y estimado.

En la figura N° 4-2 se puede observar los valores de oxígeno disuelto para ambos casos: observado y estimado. Se puede observar que siguen una cierta tendencia similar y que el error en algunos casos es mínimo, pero en otros casos el error puede llegar a valores críticos, los cuales perjudican la calidad del modelo utilizado.

	pH	Conductividad	Temperatura	OD
<b>Coefficiente de Correlación</b>	-0.079	0.813	-0.083	-0.187
<b>Error estándar para coeficientes</b>	0.022	0.0589	0.003	0.007

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 4-3: Estimación lineal de las variables.

Luego con los valores de oxígeno disuelto estimado se realiza una estimación lineal con los datos de las variables observadas inicialmente que participan en este proceso como se observa en la tabla N° 4-3 y N° 4-4.

<b>Coefficiente de Determinación</b>	0.979
<b>Error estándar para estimación</b>	0.088
<b>Valor F observado</b>	4008.29
<b>Grados de libertad</b>	345
<b>Suma de cuadrados de regresión</b>	125.687
<b>Suma de cuadrados del residual</b>	2.705

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 4-4: Estimación lineal del oxígeno disuelto (continuación).

Luego teniendo los valores estadísticos lineales del modelo difuso, se realiza una comparación entre el modelo difuso y el lineal como está indicado en la tabla N° 4-5.

<u>MODELO</u>	<u>COEFICIENTE R<sup>2</sup></u>	<u>ERROR TÍPICO</u>
Lineal	0.69	0.259
Difuso	0.98	0.088

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Tabla N° 4-5: Comparación entre el modelo lineal y Difuso

El coeficiente R<sup>2</sup> el cual indica el coeficiente de relación de Pearson, lo cual significa que mientras más elevado se encuentre éste, mayor linealidad tendrá el modelo. Esto quiere decir que será más confiable a mayor valor del coeficiente, ya que su distribución será más lineal y por ende existirá menor error; el cual se ve reflejado ya que el modelo difuso tiene un error típico por debajo del modelo lineal.

Para determinar una mejor estimación con respecto al error encontrado, se procede a estimar el error de una medida indirecta (en este caso sería el error del OD).

- **Cálculo del error:** Se utiliza la siguiente ecuación como base para encontrar el error deseado:

$$\Delta F = \left[ \frac{\partial F}{\partial x} \right] \Delta x + \left[ \frac{\partial F}{\partial y} \right] \Delta y + \left[ \frac{\partial F}{\partial z} \right] \Delta z \quad (4-1)$$

De ésta ecuación, se sabe que el primer término es el que debemos de encontrar y las demás variables se encuentran representadas por x, y, z, todas éstas dependientes de una F, representada por el OD. La ecuación se puede resumir en un producto entre el valor promedio de cada variable medida, multiplicado con su respectivo error relativo de medición.

	Valor Promedio	Error Absoluto	Error Relativo
<b>Temperatura</b>	21.69	0.3%	1.38%
<b>pH</b>	7.83	0.1%	1.28%
<b>Conductividad</b>	48.79	0.5%	0.5%
<b>OD</b>	---	---	2%

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

*Tabla N° 4-6: Valores para calcular el error por medición indirecta.*

El valor del OD es fijo debido a que es el valor que se muestra en la hoja de datos del fabricante, y se tomará para luego observar la diferencia entre el error del equipo y el error mediante medidas indirectas, como se puede observar en la Tabla N° 4-6.

Aplicando la ecuación, obtenemos que el Error Absoluto del OD es 0.643, pero lo que interesa es el Error Relativo, entonces transformamos dicho valor mediante la ecuación:

$$\text{ERROR RELATIVO} = \frac{\text{ERROR ABSOLUTO}}{\text{MAGNITUD MEDIDA}} \quad (4-2)$$

Aplicando la ecuación nos da como error relativo del OD 10.56%, un valor mayor al error que el equipo presenta (2%).

#### 4.4 Conclusiones del capítulo:

Al observar la tabla N° 4-5, se concluye que el modelo difuso tiene confiabilidad, su modelo se aproxima mucho a un modelo completamente lineal. Tiene un coeficiente de correlación muy cercano a la unidad y además cuenta con un porcentaje de error de 8.8% que es menor al hallado mediante estimación por medición indirecta (10.56%).

Se debe de tener en cuenta el error de medición del sensor de oxígeno, debido a que este valor oscila constantemente, pudiendo estar en niveles bajos mientras que su lectura empieza a subir para luego bajar. Para ciertas especies de peces, este tiempo de oscilación podría no ser crítico, pero existen especies que deben de contar con una oxigenación abundante o adecuada durante su tiempo de vida.

Se comprobó que la lógica difusa es confiable para modelar una variable de una planta, en este caso oxígeno disuelto. Cabe resaltar que según el número de reglas se podría aumentar esta efectividad, pero para poder aumentar las reglas se tendría que aumentar las Funciones de Membresía, con lo cual las reglas aumentarían exponencialmente; teniendo un cálculo más complejo.

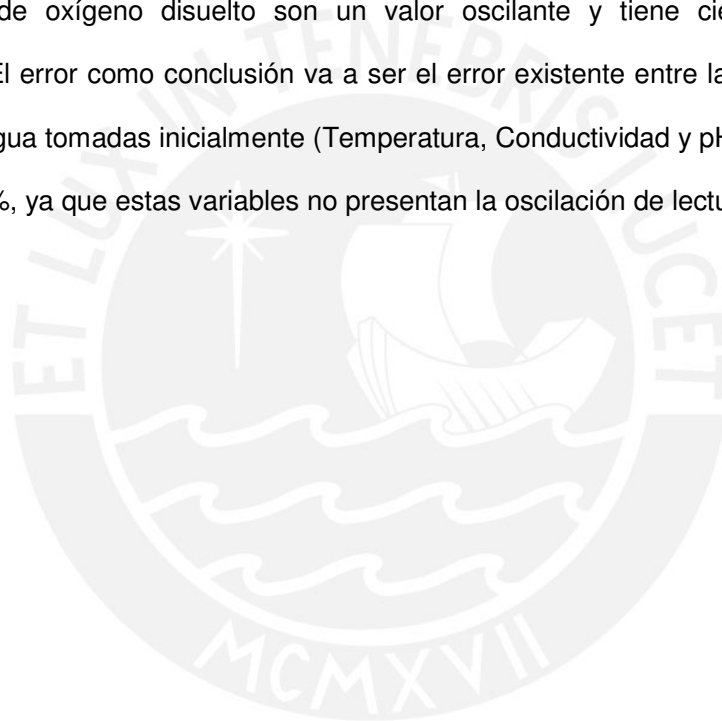
<b>Error OD estimado vs. OD observado</b>
---

<b>0.298</b>
--------------

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

*Figura N° 4-3: Error entre OD estimado y el observado para todas las muestras*

Además se puede observar en la Figura N° 4-3 que existe un error entre el oxígeno disuelto observado inicialmente y el oxígeno disuelto estimado el cual también se puede observar en la figura N° 4-2. Este error no es muy confiable ya que las medidas observadas de oxígeno disuelto son un valor oscilante y tiene cierto grado de inexactitud. El error como conclusión va a ser el error existente entre las variables de calidad del agua tomadas inicialmente (Temperatura, Conductividad y pH), es decir, un error del 8.8%, ya que estas variables no presentan la oscilación de lectura.



**CAPITULO 5****COSTOS Y PRESUPUESTO**

La realización de un análisis de costos, en nuestra época, es de vital importancia debido a que uno de los problemas existentes en las industrias es el costo de los equipos utilizados para sus plantas. Además que los mercados fijan los precios, los cuales no se basan en el precio de los insumos ni en el costo total de los equipos utilizados, sino en la oferta y demanda existente.

Este proyecto desarrollado durante un año considera los siguientes gastos indicados en la Tabla N° 5-1.

<b><u>Equipos</u></b>	<b><u>Costo total</u></b>
Equipo de medición	\$650.00
Computadora personal	\$1000.00
Mano de obra (*)	\$700.00
<b>TOTAL: \$2350.00</b>	

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

*Tabla N° 5-1: Costo total de implementación.*

(\*) La mano de obra consta de la implementación del modelo difuso, así como los gastos de uso de laboratorio.

Debido al precio y confiabilidad de sus productos, se decide por la utilización del HI 991301. Al incluir la mano de obra se está incluyendo el diseño del estimador para otros estanques de crianza de tilapias, o para otras condiciones climáticas, ya que los datos analizados inicialmente para el diseño fueron en base a datos tomados para la planta piloto de la PUCP. Si se usa sensores en vez de un equipo de medición,

aumentaría el precio total aproximadamente en \$150, pudiéndose llegar a la misma estimación como se muestra en la tabla N° 5-2.

pHep 5	\$120.00
EC Field Scout	\$600.00
Medidor Temperatura	\$80.00
<b>TOTAL: \$800.00</b>	

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

*Tabla N° 5-2: Costo total de sensores para medición de variables.*

Si se desea tener un costo más adecuado para pequeños estanques y para valores más aproximados, pero teniendo en cuenta la economía a utilizar, se puede utilizar el modelo HI 98130, ya que su costo total es de \$200.00 aproximadamente.

Para el caso de un medidor de oxígeno disuelto, se puede optar por el modelo HI 9147 por el costo total de \$600.00 aproximadamente. Es especializado para ser utilizado en acuicultura, pero si se desea un monitoreo continuo, entonces su tiempo de vida se acorta, pero es indispensable para realizar medidas iniciales para ser luego tomadas por el estimador para realizar su tarea.

## CONCLUSIONES

1. La estimación lineal es sencilla, pero genera un porcentaje alto de error. Una estimación logarítmica no es posible realizarse, debido a que su relación con el oxígeno disuelto es de forma lineal como se puede observar en las tablas y en los cuadros adjuntos en el anexo, además de una lectura errónea en los cuadros estadísticos realizados.
2. La estimación de variables, utilizando una lógica difusa, disminuye el porcentaje de error encontrado en la estimación lineal, esto se debe a que dividimos las muestras anteriormente leídas en varias reglas, a las cuales se les aplica una estimación lineal por regla.
3. Es posible disminuir el error estimado si se aumenta el número de reglas. El error existente entre el oxígeno disuelto estimado y el observado muestra que el valor medido es oscilante.
4. Los parámetros de las reglas difusas están ajustados por el método de mínimos cuadrados, los que nos da el menor error. Por lo tanto, los datos iniciales observados significan la mejor aproximación al modelo.
5. Finalmente, es posible utilizar la estimación para conocer la cantidad de oxígeno disuelto con una buena exactitud y, por ende, ser usado en la instrumentación de la planta piloto de acuicultura de la PUCP.

## RECOMENDACIONES

1. Para disminuir el error, el modelo de estimación debe de contar con un número mayor de reglas, es decir, aumentar el número de Funciones de Membresía por cada variable. Con esto se tendrá un modelo de estimación, teniendo en cuenta que se necesitarán posiblemente mayores medidas a tomar en la Planta de crianza de Tilapias.
2. El tratamiento estadístico utilizado puede ser realizado en otro programa de análisis de matrices que se domine, siempre y cuando se etiqueten todas las tablas y variables a utilizar para tener un orden, ya que todas las tablas, cuadros y variables encontradas tienen un significado, teniendo cierta importancia para el análisis estadístico.
3. Para tener un mejor porcentaje de error de medición en la estimación, es preferible la utilización de equipos de medición con menor porcentaje de error.

**FUENTES:**

- [1] Ministerio de la Producción  
2007 PRODUCE [en línea]  
<<http://www.produce.gob.pe/>> [consultado el 08/2007]
- [2] Comisión de Promoción del Perú para la Exportación y el Turismo  
2007 PROMPERU [en línea]  
<<http://www.promperu.gob.pe/>> [consultado el 08/2007]
- [3] Ministerio de Comercio Exterior y Turismo  
2007 MINCETUR [en línea]  
<[http://www.mincetur.gob.pe/index\\_f.asp?cont=674471](http://www.mincetur.gob.pe/index_f.asp?cont=674471)> [consultado el 08/2007]
- [4] Borja, Francisco; González, Octavio; Quintero de Vallejo, Victoria  
2003 Diseño Modelo de estanques climatizados para el cultivo de tilapia roja, localizados en la zona fría del valle del Cauca, Colombia.
- [5] Segovia, Manuel  
2007 Curso de Fundamentos de Sistemas de Recirculación
- [6] Ministerio de la Producción, Vice Ministerio de Pesquería  
2004 Cultivo de Tilapia  
PRODUCE
- [7] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de Argentina  
2007 Tilapia: Su cultivo y Sistemas de Producción [en línea].  
<<http://www.sagpya.mecon.gov.ar/>> [consultado el 08/2007]
- [8] Pérez Sánchez, Eunice.  
2006 3er Taller de Sistemas de Recirculación en Acuicultura [en línea].  
<[http://www.cetra.org.mx/htm/documents/Calidaddeagua-EunicePS\\_000.pdf](http://www.cetra.org.mx/htm/documents/Calidaddeagua-EunicePS_000.pdf)>

- [09/2007]
- [9] Colt, John  
2006 Water quality requirements for reuse systems.  
Aquacultural Engineering, Volumen 34, Páginas 143-156.
- [10] J. M. Rodríguez-Higueras, J. M. Fernández-Vaillant, F. Malet, D. García-Pérez  
Sistemas de Aireación y Oxigenación en Acuicultura [en línea].  
<[http://www.observatorioacuicultura.org/documentos/Monografico/Acuicultura/A\\_0\\_01.pdf](http://www.observatorioacuicultura.org/documentos/Monografico/Acuicultura/A_0_01.pdf)> [09/2007]
- [11] Richard Helmer, Ivanildo Español  
1999 Control de la Contaminación del Agua
- [12] Sera GmbH [en línea]  
2007 Productos Químicos para Acuicultura  
<<http://www4.sera.de/site/main.php?language=es>> [consultado el 10/2007]
- [13] M. B. Timmons, J. M. Ebeling, F. W. Wheaton, S. T. Summerfelt, B. J. Vinci  
2002 Recirculating Aquaculture Systems 2<sup>nd</sup> Edition.  
Referenciado: 14/09/07
- [14] Paúl M. Baltazar  
2007 La Tilapia en el Perú: acuicultura, mercado y perspectivas  
Revista Peruana de Biología, UNMSM
- [15] Revista Gestión Técnica  
2002 ¿Qué es la Acuicultura?  
Fuente SAGYP.
- [16] Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de la Acuicultura  
2001 Acuicultura: más que una industria de exportación [en línea].  
<<ftp://ftp.produce.gob.pe/produce/dna/acuicultura.pdf>> [consultado el 10/2007]
- [17] Secretaría de la Reforma Agraria de México

- 2007 Cultivo de Tilapias en estanques rústicos [en línea].  
<[http://www.sra.gob.mx/programas/fondo\\_tierras/manuales/Cultivo\\_tilapia\\_estanques\\_rusticos.pdf](http://www.sra.gob.mx/programas/fondo_tierras/manuales/Cultivo_tilapia_estanques_rusticos.pdf)> [consultado el 10/2007]
- [18] American Water Works Association  
1971 Water Quality and Treatment
- [19] Phillip G. Lee  
2000 Process Control and artificial intelligence software for aquaculture  
Aquacultural Engineering, Volumen 23
- [20] Díaz R. Horacio, Borjas M. Raúl, Sagardía O. Ángel.  
2006 Diseño y ensayo de un controlador difuso para un motor de inducción trifásico.  
Revista Facultad de Ingeniería - Universidad de Tarapacá - Chile
- [21] Hernández S. Juan, Cuadra A. Cristian.  
2006 Estrategias Comparativas de Control Difuso y control de Arreglo inverso Nyquist en sistemas multivariables alineales.  
Revista Facultad de Ingeniería - Universidad de Tarapacá – Chile
- [22] Ekster Alex, Wang Ji.  
2005 Reliable DO Control Available  
Water Environment & Technology, Volumen 17
- [23] Cabrera, T., Jay, D. y Alceste, C. (2001)  
Actualización del Cultivo de Tilapia en el mundo. VI Congreso Ecuatoriano de Acuicultura y V Congreso Latinoamericano de Acuicultura.
- [24] Flores Delgado, José Julio.  
2005 Probabilidades
- [25] Nicovita – Alicorp  
2007 Manual de crianza de Tilapias
- [26] Juan David Gutierrez, Wolfgang Riss, Rodolfo Ospina  
2004 Lógica Difusa como herramienta para la bioindicación de la calidad

del agua con macroinvertebrados acuáticos en la sabana de Bogotá –  
Colombia.

Revista Caldasia Cap. 26.

- [27] Selçuk Soyupak, Ding-Geng (Din) Chen  
2004 Fuzzy logic model to estimate seasonal pseudo steady state chlorophyll-a  
concentrations in reservoirs.  
Environmental Modeling and Assessment.
- [28] John A. Hargreaves, Craig S. Tucker  
2002 Measuring Dissolved Oxygen Concentration in Aquaculture.  
Southern Regional Aquaculture Center.

