



**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO  
DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y  
DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO  
POR COSECHA PLUVIAL**

Tesis que para obtener el grado de  
*DOCTOR EN CIENCIAS DEL AGUA* presenta:

**IVAN GALLEGO ALARCÓN**

Directores de Tesis:

**Dr. Cheikh Fall**  
**Dr. Carlos Díaz Delgado**



Universidad Autónoma del Estado de México  
UAEM



Ciudad Universitaria, Toluca; México, a 14 de octubre de 2010.

**M. en C. A. Iván Gallego Alarcón**  
**Presente.**

A continuación transcribo el tema y capitulado aprobado por esta Institución para el desarrollo de su tesis dirigida por el Dr. Cheikh Fall y el Dr. Carlos Díaz Delgado del Doctorado en Ciencias del Agua, siendo de la siguiente manera:

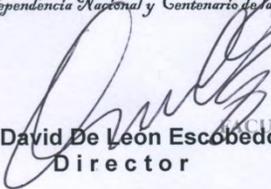
**“EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL”**

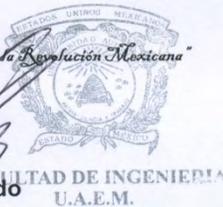
	Resumen
	Abstract
Capítulo 1	Introducción
Capítulo 2	Antecedentes
Capítulo 3	Planteamiento de la investigación
Capítulo 4	Materiales y métodos
Capítulo 5	Resultados y discusión
Capítulo 6	Conclusiones y recomendaciones
	Literatura citada
	Anexos

Asimismo, para la aprobación de la tesis y demás trámites deberá sujetarse al reglamento respectivo de la Institución.

**Atentamente.**  
**Patria, Ciencia y Trabajo**

*“2010, Bicentenario de la Independencia Nacional y Centenario de la Revolución Mexicana”*

  
**Dr. David De León Escobedo**  
**Director**



c.c.p. Dr. Jaime De la Colina Martínez.- Coordinador de Estudios Avanzados de la FIUAEM.

Facultad de Ingeniería



Toluca, México Ciudad Universitaria Cerro de Coatepec S/N C.P. 50100  
Tel. 2-14-08-55/2-14-07-95/2-15-45-12

*Todo trabajo implica la ayuda y colaboración de un sinfín de amigos, compañeros y familiares, por lo que agradezco eternamente a . . .*

**Leonor Guadalupe**, compañera y amiga, nuevamente me encuentro en la culminación de una meta. Otra vez te agradezco infinitamente por tu paciencia y amor, por permitirme sentir que cada logro mío también es tuyo. Tu cariño me recompensa cada momento de mi vida. Te amo.

**Iván y Andrés**, hijos, ustedes son y seguirán siendo la luz de la esperanza que guía mi camino y el porqué de todas mis acciones.

**Rafael Gallego Vargas**, padre, gracias por tus sabios consejos y ayuda en los momentos difíciles. Gracias por tus voces de aliento y por tu estímulo para convertirme siempre en una mejor persona. Tu guía me ha servido para continuar firme y seguro con mi camino. Estoy muy orgulloso de ser tu hijo.

**Elia Alarcón Estrada**, madre, no sé como agradecerte el apoyo incondicional que siempre me has dado, las sabias palabras en los momentos más oportunos y el cariño que sólo una madre puede dar. Simplemente decirte, gracias mamá.

**Erick y Rafael**, hermanos, el soporte que siempre me han brindado me fortifica y ayuda para superarme cada día.

**Luciano y María de los Ángeles**, suegros, aunque se encuentran lejos de nosotros, siempre he sentido su apoyo incondicional en cada momento de nuestras vidas.

**Luciano, Leonel, Sergio, Melchor, Noe, Zeus**, cuñados, gracias por su apoyo a mi familia y a mí, los considero mis hermanos.

**Daury García Pulido**, amigo, como agradecerte, es difícil expresarlo, no sólo me has apoyado a cumplir con esta meta, siempre me has dado tu mano amiga, me has brindado tu confianza y tu amistad.

**Carlos Díaz Delgado**, amigo es verdad, no se puede ser un investigador si no primero se estudia un doctorado. Gracias a ti he superado una etapa donde se me abren las puertas a lo que más nos gusta: aprender.

**Cheikh Fall**, muchas gracias por tu mano amiga que ha guiado mi trabajo y me ha permitido llegar a la meta de esta aventura que es el doctorado.

**Carlos Arriaga Jordán**, estimado amigo y compañero de pesca, gracias por mostrarme tu paradigma de la ciencia. Tus consejos han sido muy valiosos para este trabajo, pero más importante me han servido para desarrollarme como persona y como investigador.

**David, Iván y Eric**, amigos, estimo mucho sus voces de aliento, las discusiones sin fin que hemos protagonizado, su apoyo incondicional cada vez que lo he necesitado y principalmente su amistad, gracias.

*Mario, Andrés, Toño, Alfonso, Alejandro y Agustín*, gracias amigos por todo su apoyo que me permitió culminar este trabajo y llegar a una meta más en mi vida.

Agradezco los consejos y voces de aliento de todos aquellos que me han permitido llevar a cabo un trabajo desde paradigmas diferentes, en especial a:

Mario Esparza Soto  
Verónica Martínez Miranda  
Pedro Ávila Reyes  
María del Carmen Arcos Ávila  
José Luis Damas Aguilar

Así también agradezco la beca otorgada por el **Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología** para realizar los estudios de Doctorado en Ciencias del Agua y el trabajo de tesis.

*Lo que sabemos es una gota de agua; lo que ignoramos es el océano*

*Isaac Newton*

*No se puede desatar un nudo sin saber cómo está hecho*

*Aristóteles*

## RESUMEN.

La acuicultura en el Estado de México se ha desarrollado en un marco de presiones ambientales y legales, la competencia por el recurso agua ha impactado negativamente las actividades como el cultivo de la trucha. Las presiones sociales y gubernamentales cada vez son mayores, a tal grado que las concesiones de uso de agua son más difíciles de obtener y el trámite es más estricto que en décadas pasadas.

Para encontrar alternativas de solución bajo este esquema, existen dos propuestas con las que se ha trabajado en esta investigación; la primera es la cosecha de agua de lluvia como fuente abastecedora de agua para el cultivo de trucha arco iris y la segunda es el uso de sistemas de recirculación acuícola para tratar y reutilizar el agua, teniendo como finalidad concebir y construir las instalaciones piloto para desarrollar un cultivo trutícola en un sistema de recirculación acuícola alimentado con agua pluvial con el objeto de representar matemáticamente el comportamiento de los diferentes procesos involucrados en el del tren de tratamiento de agua residual acoplado al sistema de producción trucha y a los procesos biológicos consecuencia del cultivo de organismos acuáticos.

La investigación se llevó a cabo con un experimento de 150 días en un sistema de recirculación acuícola integrado por un estanque circular y un tren de tratamiento compuesto de un sedimentador, un filtro biológico (percolador) y un filtro de arena descendente. En el sistema se sembraron organismos de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) con una biomasa inicial de 41,51 kg, una densidad de 6,61 kg/m<sup>3</sup> hasta llegar a 180,42 kg con una densidad de 28,73 kg/m<sup>3</sup>; crecimiento de los peces de 4,23 g/d; con un caudal de 2,1 L/s; un recambio de agua limpia de lluvia de 2,21 %.

Se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes en el tren de tratamiento, de manera general se obtuvo un 44.54 %, 23.15 %, 78.99 %, 29.36 % para SST, DQO, N-NH<sub>3</sub> y N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> respectivamente; una generación de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el sistema de 4.23 %. Las tasas de remoción generales del tren de tratamiento fueron de los parámetros 96,08 g N-NH<sub>3</sub>/d (66,23 %), 8,87 g N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/d (19,56 %), 286,31 g SST/d (43,38 %), 1 404,63 g DQO/d (38,79 %).

La modelación matemática de los procesos limitantes ocurridos en el SRA se realizó de manera regresiva, los modelos dinámicos no se pudieron implementar debido a que las concentraciones de los contaminantes son bajas, la media matemática, la desviación estándar y el error en la determinación de las mismas son del mismo orden (por ejemplo, en la entrada al biofiltro la concentración de N-NH<sub>3</sub> es de 0,80 ± 0,012 mg/L a la salida se tiene 0,66 ± 0,012 mg/L), siendo estos valores inadecuados para los modelos.

Los modelos matemáticos encontrados en este trabajo para la tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal total fueron, para el percolador:  $TVNA \text{ (g N-NH}_3\text{/L h)} = 63,083 \text{ [(concentración de N-NH}_3\text{ influente (mg/L)]} - 6,33$ ; y para el filtro de arena:  $TVNA \text{ (g N-NH}_3\text{/L h)} = 228,45 \text{ [(concentración de N-NH}_3\text{ influente (mg/L)]} + 7,18$ . Ambos biofiltros presentaron un modelo de primer orden entre la concentración de nitrógeno amoniacal y la TVNA con una fuerte dependencia:  $R = 0,96$  y  $R^2 = 0,91$  para el filtro de arena;  $R = 0,85$  y  $R^2 = 0,72$  para el filtro percolador.

La modelación del consumo de oxígeno en el SRA se describe mediante la ecuación:  $rO_2 \text{ (mg O}_2\text{/L h)} = 0,041 \text{ [Temperatura (}^\circ\text{C)] [Densidad (kg/m}^3\text{)]} - 0,454 \text{ [Densidad (kg/m}^3\text{)]} - 1,324 \text{ [Temperatura (}^\circ\text{C)]} + 22,447$  con una  $R^2 = 0,747$  y  $R = 0,864$ . El modelo es válido para un intervalo de temperatura de 12 a 23 °C, densidades de 8 a 60 kg/m<sup>3</sup> para una altitud de 2 660 msnm.

Los modelos matemáticos que se encontraron en el presente trabajo de generación de residuos contaminantes al cultivo fueron:

Nitrógeno amoniacal, en relación con la biomasa se describe por la ecuación nitrógeno amoniacal  $\text{(mg/L)} = 0,0063[\text{biomasa (kg)}] - 0,3027$ , con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,56$ ,  $R = 0,75$ .

DQO, se expresa por la ecuación  $DQO \text{ (mg/L)} = 0,5992[\text{biomasa (kg)}] - 30,29$ , con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,46$ ,  $R = 0,68$ .

SST, con la ecuación  $SST \text{ (mg/L)} = 0,0873[\text{biomasa (kg)}] - 8,218$ , con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,76$ ,  $R = 0,87$ .

Nitratos, mediante la ecuación  $N\text{-NO}_3^- \text{ (mg/L)} = 0,5821[\text{biomasa(kg)}] - 20,647$ , con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,66$  y un coeficiente de correlación de  $R = 0,81$ .

En conclusión, el agua pluvial cosechada es una opción viable para su uso en cultivos acuícolas cerrados. La contribución tecnológica del prototipo permite tener un manejo más adecuado lo que se puede traducir en un mejor crecimiento y menor tiempo de cultivo. Siendo la parte medular del sistema de tratamiento que hace posible la recirculación el conjunto de biofiltros (percolador – filtro de arena).

Palabras clave

1. *Oncorhynchus mykiss* Trucha arco iris; 2. Sistema de recirculación acuícola; 3. Modelación matemática; 4. Oxígeno disuelto.

## ABSTRACT

The trout culture in Mexico has growth with a lot of pressure on the use of the water resources, in order to optimize this resource there has been researches that search for the development of sustainable water use in aquaculture. In this study we propose the use of harvested rainwater in a recirculating aquaculture system (RAS) as an alternative to strengthen the production of high nutrition food and an alternative water use.

A 150 days experiment was done in a recirculating aquaculture system suitable for the conditions of the trout activity at the State of Mexico. The RAS had one circular tank for the trout culture and a wastewater treatment integrated with a settling tank for solids removal, a trickling filter as a biofilter and a down flow sand filter with two functions, biofilter and to remove death biofilm. It had 2.1 L/s flow. To achieve good rainwater quality, sodium bicarbonate, marine salt and lime was added to the water in daily basis in order to maintain the pH and alkalinity at optimum ranges.

To evaluate the system the individual weight increment, the density and the biomass in the tank were determined. The average removal percentage of the main parameters for the trout culture, COD, TSS, total ammoniacal nitrogen (TAN), nitrite and nitrate was obtained.

The initial density in the system was 6,61 kg/m<sup>3</sup> at the end of the experiment we had 28,73 kg/m<sup>3</sup>. Biomass started at 41,49 kg and ended with 180,42 kg. An average of 4,23 g/d of individual increment weight was observed.

The percentage of removal observed were 44.54 %, 23.15 %, 78.99 %, 29.36 % and -4.23 % for TSS, COD, TAN, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, respectively. The general removal rates of the wastewater treatment were 96,08 g N-NH<sub>3</sub>/d (66,23 %), 8,87 g N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/d (19,56 %), 286,31 g SST/d (43,38 %), 1 404,63 g DQO/d (38,79 %).

The mathematical model constructed for the volumetric TAN conversion rates were, for the trickling filter VTR (g NH<sub>3</sub>-N/L h) = 63,083 [(NH<sub>3</sub>-N influent (mg/L)) - 6,33; and for the sand filter VTR (g NH<sub>3</sub>-N/L h) = 228,45 [(NH<sub>3</sub>-N influent (mg/L)) + 7,18. Both biofilters presented a strong linear dependency: R = 0,96 y R<sup>2</sup> = 0,91 for the sand filter; R = 0,85 y R<sup>2</sup> = 0,72 for the trickling filter.

The oxygen consumption model was represented by the equation rO<sub>2</sub> (mg O<sub>2</sub>/L h) = 0,041 [Temperatura (°C)] [Densidad (kg/m<sup>3</sup>)] - 0,454 [Densidad (kg/m<sup>3</sup>)] - 1,324 [Temperatura (°C)] + 22,447; R<sup>2</sup> = 0,747 y R = 0,864. The model is applicable for a temperature of 12 to 23 °C; densities of 8 to 60 kg/m<sup>3</sup> and an altitude of 2 660 meter above sea level.

The mathematical models constructed for the generation of residual pollution to the trout culture were:

TAN in function of the biomass:  $\text{TAN (mg/L)} = 0,0063[\text{biomass (kg)}] - 0,3027$ ;  $R^2 = 0,56$ ,  $R = 0,75$ .

COD, in function of the biomass:  $\text{COD (mg/L)} = 0,5992[\text{biomass (kg)}] - 30,29$ ;  $R^2 = 0,46$ ,  $R = 0,68$ .

TSS, with the linear equation:  $\text{TSS (mg/L)} = 0,0873[\text{biomass (kg)}] - 8,218$ ;  $R^2 = 0,76$ ,  $R = 0,87$ .

Nitrate,  $\text{NO}_3^- \text{-N (mg/L)} = 0,5821[\text{biomass(kg)}] - 20,647$ ;  $R^2 = 0,66$ ,  $R = 0,81$ .

The results indicate that the RAS with rainwater harvest as an alternative of source water used in this study was suitable to the conditions predominant in the State of Mexico for the trout culture, using less than 2,21% of the water needed for a flow trough farm trout.

Key words

1. *Oncorhynchus mykiss* Rainbow trout; 2. Recirculating aquaculture systems; 3. Mathematical model; 4. Dissolved Oxygen.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción .....	21
Capítulo 2. Antecedentes .....	26
2.1. Truticultura en el Estado de México .....	27
2.2. Uso de agua pluvial en actividades humanas.....	29
2.3. Uso de agua pluvial en acuicultura.....	32
2.4. Sistemas de recirculación acuícola .....	32
2.5. Modelación del Sistema de Recirculación Acuícola.....	41
Capítulo 3. Planteamiento de la investigación.....	47
3.1. Justificación .....	48
3.2. Hipótesis .....	49
3.3. Objetivos .....	50
3.3.1. Objetivo General .....	50
3.3.2. Objetivos Específicos .....	50
3.4. Metas .....	51
Capítulo 4. Materiales y métodos.....	52
4.1. Cosecha de agua pluvial .....	54
4.2. Diseño y puesta en marcha del sistema prototipo .....	56
4.2.1. Estanquería.....	58
4.2.2. Tren de tratamiento .....	59
4.3. Maduración del sistema .....	64
4.4. Cultivo acuícola.....	65
4.5. Eficiencia del tren de tratamiento y evaluación de las tasas de remoción .....	66
4.6. Modelación matemática de los procesos limitantes del SRA.....	69
4.6.1. Biofiltro .....	69
4.6.1.1. Modelación determinística .....	69
4.6.1.2. Modelación de TVNA y TVCN .....	70
4.6.2. Consumo de oxígeno disuelto por los peces .....	70
4.6.3. Tipo regresivo .....	73
Capítulo 5. Resultados y discusión .....	74
5.1. Cosecha de agua pluvial .....	75
5.2. Puesta en marcha y estabilización del SRA .....	77
5.3. Maduración del sistema .....	79

5.4. Cultivo Acuícola .....	81
5.4.1. Desarrollo de la trucha arco iris .....	82
5.4.2. Condición corporal de los organismos acuáticos .....	85
5.4.3. Oxígeno disuelto en el estanque .....	88
5.4.4. Comportamiento del pH en el estanque .....	89
5.5. Evaluación del desempeño y eficiencia del tren de tratamiento.....	91
5.5.1. Eficiencia.....	91
5.5.1.1. Percolador .....	92
5.5.1.2. Filtro de arena .....	95
5.5.1.3. Estanque y sedimentador .....	97
5.5.1.4. Eficiencia general .....	99
5.5.2. Desempeño del prototipo .....	101
5.6. Cinética.....	106
5.6.1. Tasas de remoción.....	106
5.6.1.1. Nitrógeno amoniacal (N-NH <sub>3</sub> ) .....	107
5.6.1.2. N – Nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) .....	108
5.6.1.3. N – Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) .....	108
5.6.1.4. Demanda química de oxígeno (DQO).....	110
5.6.1.5. Sólidos suspendidos totales (SST) .....	111
5.6.1.6. Alcalinidad .....	112
5.6.1.7. Generación de residuos en el estanque .....	113
5.7. Modelación matemática .....	114
5.7.1. Biofiltros .....	115
5.7.2. Consumo de oxígeno disuelto por los peces .....	121
5.7.3. Modelación de la producción de contaminantes .....	127
5.7.3.1. Nitrógeno amoniacal (N-NH <sub>3</sub> ) .....	127
5.7.3.2. Sólidos suspendidos totales (SST) .....	129
5.7.3.3. Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) .....	130
5.7.3.4. Demanda química de oxígeno (DQO).....	132
5.8 Sistema de monitoreo y control del SRA.....	133
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....	140
6.1. Conclusiones .....	141
6.1.1. Cosecha de Agua Pluvial .....	141
6.1.2. Diseño del SRA.....	141

6.1.3. Maduración del Sistema.....	141
6.1.4. Desarrollo de los organismos acuáticos .....	141
6.1.5. Desempeño del tren de tratamiento del SRA.....	142
6.1.6. Modelación de los principales procesos del SRA .....	142
6.2. Recomendaciones .....	145
Literatura citada .....	147
Anexos .....	156
Anexo 1. Determinación de sales agregadas para adecuar el agua de lluvia.....	157
Anexo 2. Promedio, desviación estándar, coeficiente de variación e intervalos de confianza de los parámetros estudiados .....	158
Anexo 3. Datos utilizados para determinar los parámetros fisicoquímicos .....	160
Anexo 4. Parámetros biométricos .....	179
Anexo 5. Resultados de la prueba Plakett – Burman para el consumo de oxígeno....	183
Anexo 6. Tarjetas de valoración (García, 2008) .....	184
Anexo 7. Memoria de cálculo de estimadores estadísticos con base en la teoría de muestreo estratificado.....	192
Anexo 8. Metodología para el análisis de parámetros limitantes .....	222

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros físico – químicos importantes en la evaluación y operación de un biofiltro (Tomado parcialmente de Colt, 2006).....	34
Tabla 2. Criterios de clasificación con base en el nivel trófico y las necesidades en la actividad acuícola (Malone y Pfeiffer, 2006).....	36
Tabla 3. Rangos permitidos para los parámetros y lugares de muestreo para el análisis de biofiltros (Malone y Pfeiffer, 2006).....	36
Tabla 4. Calidad del agua dependiendo del nivel trófico del cultivo (Drennan <i>et al.</i> , 2006) .....	37
Tabla 5. Clasificación de los estudios de SRA de acuerdo con su objetivo (Colt <i>et al.</i> , 2006) .....	37
Tabla 6. Memoria de cálculo del biofiltro (Tomado de Wheaton <i>et al.</i> , 2000) .....	60
Tabla 7. Memoria de cálculo del filtro de arena ascendente (García, 1999).....	62
Tabla 8. Tamaño de la muestra de acuerdo a la población de cada estrato.....	66
Tabla 9. Parámetros analizados en cada punto de muestreo.....	67
Tabla 10. Definición de estratos para la determinación de los estimadores estadísticos..	68
Tabla 11. Estimadores estadísticos de la teoría del muestreo estratificado (Lohr, 2000) .	68
Tabla 12. Valores menores y mayores utilizados en las 16 pruebas de Plackett – Burman .....	71
Tabla 13. Diseño de 16 pruebas Plackett – Burman (Wheeler, 1989).....	72
Tabla 14. Contrastes definidos por el diseño básico de Plackett – Burman (Wheeler, 1989) .....	72
Tabla 15. Caracterización del agua pluvial almacenada (03/11/2008) .....	75
Tabla 16. Velocidades promedio del agua a diferentes profundidades .....	79
Tabla 17. Memoria de cálculo de los estimadores estadísticos para el muestreo estratificado de la concentración de nitrógeno amoniacal en el punto de muestreo C. ....	92
Tabla 18. Características del biofiltro y del empaque .....	102
Tabla 19. Características generales del influente y del cultivo .....	103
Tabla 20. Características del efluente de del percolador y el filtro de arena del SRA prototipo.....	104
Tabla 21. Balance de masa del nitrógeno amoniacal total (N-NH <sub>3</sub> ) en el sistema prototipo. ....	107

Tabla 22. Balance de masa de N – nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) en el sistema prototipo.....	108
Tabla 23. Balance de masa de nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) en el sistema prototipo. ....	109
Tabla 24. Balance de masa de DQO en el sistema prototipo. ....	110
Tabla 25. Balance de masa de SST en el sistema prototipo. ....	111
Tabla 26. Balance de masa de alcalinidad en el sistema prototipo. ....	112
Tabla 27. Escala de las zonas de los parámetros en el sistema de seguimiento y control .....	134

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Operaciones básicas y complementarias de los SRA (Timmons <i>et al.</i> , 2002)...	23
Figura 2. Ubicación por cuenca de las unidades de producción trutícola en el Estado de México (Gallego <i>et al.</i> , 2007) .....	27
Figura 3. Origen del agua utilizada en las unidades de producción trutícola (Gallego <i>et al.</i> , 2007) .....	28
Figura 4. Caudal utilizado en las granjas de trucha por origen del agua (Gallego <i>et al.</i> , 2007).....	28
Figura 5. Clasificación de los SRA propuesta por Malone y Pfeiffer (2006).....	34
Figura 6. Mapa conceptual de la clasificación de los SRA de acuerdo con el tipo de agua, temperatura y nivel trófico (en azul ubicación de SRA usado en esta investigación).....	35
Figura 7. Sistema de recirculación acuícola para el cultivo de cría y juvenil de trucha (Gallego, 2004).....	39
Figura 8. SRA para el cultivo de trucha arco iris propuesto por García (2008).....	40
Figura 9. Eficiencia de remoción reportada por García <i>et al.</i> (en prensa).....	41
Figura 10. Esquema de la metodología propuesta. TVNA: Tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal, TVNC Tasa volumétrica de conversión de nitritos...	54
Figura 11. Reservorios de almacenamiento de agua pluvial .....	55
Figura 12. Prototipo construido en la playa de modelos a escala reducida del laboratorio de modelos hidráulicos. ....	57
Figura 13. Sistema de recirculación acuícola prototipo utilizado .....	57
Figura 14. Vista en planta y corte transversal del estanque y sedimentador (cotas en metros).....	58
Figura 15. Estanque y sedimentador .....	59
Figura 16. Empaque utilizado en el biofiltro (poliducto flexible) .....	61
Figura 17. Diseño de la torre de tratamiento (cotas en metros).....	63
Figura 18. Esquema isométrico sistema prototipo (cotas en metros) .....	64
Figura 19. Puntos de muestreo en el sistema (cotas en metros).....	67
Figura 20. Respirómetro utilizado para determinar las velocidades de consumo de oxígeno de la trucha.....	71
Figura 21. Equipo montado para medir la velocidad del agua en el estanque.....	78
Figura 22. Curva de maduración del tren de tratamiento en la primera etapa .....	80

Figura 23. Maduración del tren de tratamiento en la reposición de biomasa.....	81
Figura 24. Temperatura observada en el estanque del SRA.....	82
Figura 25. Biomasa producida y densidad alcanzada en el SRA.....	84
Figura 26. Mortalidad en el cultivo de la trucha arco iris en el SRA.....	85
Figura 27. Desarrollo de la trucha arco iris en el sistema (relación longitud – peso) .....	86
Figura 28. Condición corporal de la trucha de acuerdo al Factor de Fulton.....	88
Figura 29. Concentración de oxígeno disuelto en el estanque de cultivo .....	89
Figura 30. Comportamiento del pH en el estanque de cultivo .....	91
Figura 31. Comportamiento de las concentraciones y eficiencia de remoción de los diferentes parámetros en el percolador.....	93
Figura 32. Comportamiento de las concentraciones y eficiencia de remoción de los diferentes parámetros en el filtro de arena.....	96
Figura 33. Esquema del balance de masas para SST en el estanque de cultivo y el sedimentador.....	98
Figura 34. Comportamiento de las concentraciones y eficiencia de remoción de los diferentes parámetros en el estanque – sedimentador. ....	99
Figura 35. Comportamiento de las concentraciones y eficiencias de remoción de los diferentes parámetros en el tren de tratamiento.....	100
Figura 36. Esquema utilizado para el balance de masas en el sistema prototipo.....	106
Figura 37. Esquema de generación de residuos en el estanque.....	113
Figura 38. Efecto de la concentración de nitrógeno amoniacal en el influente y la tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal total (TVNA) en el filtro lento de arena.....	116
Figura 39. Efecto de la concentración de nitrógeno amoniacal en el influente y la tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal total (TVNA) en el percolador. ....	116
Figura 40. Comparación de desempeño de filtros de arena de trabajos previos y el actual. .....	118
Figura 41. Comparación de desempeño de filtros percoladores de trabajos previos y el actual.....	118
Figura 42. Comparación de la TVCN con la concentración de nitrógeno amoniacal y la TVNA del filtro lento de arena.....	120
Figura 43. Comparación de la TVCN con la concentración de nitrógeno amoniacal y la TVNA del filtro percolador.....	120

Figura 44. Saturación de oxígeno en el agua para el caso de estudio .....	122
Figura 45. Concentración de equilibrio para el SRA.....	123
Figura 46. Porcentaje de impacto de los factores determinantes de la tasa de consumo de oxígeno en los estanques.....	124
Figura 47. Comportamiento de la tasa de consumo de oxígeno a diferentes temperaturas y densidades para la trucha arco iris a 2660 msnm. ....	126
Figura 48. Relación entre la biomasa y la producción de nitrógeno amoniacal .....	128
Figura 49. Relación entre la biomasa y la concentración de SST.....	130
Figura 50. Relación entre la biomasa y la producción de nitratos .....	131
Figura 51. Comportamiento de los nitratos ( $N-NO_3^-$ ) en el influente y efluente del tren de tratamiento .....	132
Figura 52. Relación de la producción de biomasa y la concentración de DQO .....	133
Figura 53. Representación gráfica de los valores promedio a la entrada y salida del estanque.....	135
Figura 54. Control del SRA donde se muestra el promedio general por punto de muestreo. ....	136
Figura 55. Representación gráfica de los valores puntuales en el SRA a la entrada del percolador. ....	137
Figura 56. Representación gráfica de los valores puntuales en el SRA a la salida del percolador. ....	137
Figura 57. Representación gráfica de los valores puntuales en el SRA a salida del filtro de arena y efluente del tren de tratamiento.....	138
Figura 58. Representación gráfica de los valores puntuales en el SRA a la salida del estanque e influente del tren de tratamiento. ....	138

**NOMENCLATURA**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$a_{AM}$	Producción de nitrógeno amoniacal	kg N-NH <sub>3</sub> /kg de alimento
$A_{AM}$	Área superficial requerida para remover la producción de nitrógeno amoniacal	m <sup>2</sup>
$A_{cross}$	Área seccional del filtro	m <sup>2</sup>
$a_{DO}$	Demanda de oxígeno por kilogramo de alimento dado	kg O <sub>2</sub> /Kg de alimento
$ALK_{in}$	Alcalinidad	mg/L como CaCO <sub>3</sub>
$A_{media}$	Área superficial activa del empaque	m <sup>2</sup>
$ARE$	Eficiencia energética de remoción de nitrógeno amoniacal	g N-NH <sub>3</sub> /kWh
$A_S$	Área superficial	m <sup>2</sup>
$ASE$	Área superficial específica	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
$ASFA$	Asociación "Resúmenes sobre las Ciencias Acuáticas y la Pesca"	
$A_t$	Área transversal	m <sup>2</sup>
BIOSIS	Base de datos de revistas científicas	
$C$	Concentración actual de oxígeno disuelto	mg/L
$C/N$	Relación carbono nitrógeno	
$CA_E$	Concentración de Nitrógeno amoniacal en el efluente del biofiltro	g de N/m <sup>3</sup>
$CA_i$	Concentración de Nitrógeno amoniacal a la salida del reservorio	g de N/m <sup>3</sup>
$CBF$	Carga acumulativa de alimento	mg/L
$C_E$	Concentración de entrada	mg/L
$C_{EQ}$	Concentración de equilibrio de oxígeno disuelto	mg/L
$CH$	Carga hidráulica	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
CIESA	Centro de Investigación y Estudios en Salud Animal	
CIRA	Centro Interamericano de Recursos del Agua	
CIRB	Centro de Investigación en Recursos Bióticos	
$CL$	Carga acumulativa	kg/lpm
CNA/CONAGUA	Comisión Nacional del Agua	
$CO$	Consumo de oxígeno disuelto	kg/m <sup>3</sup>
CONAPESCA	Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca	
$CP$	Contenido de proteínas	%
$C_S$	Concentración de salida	mg/L
$C_{SAT}$	Concentración de saturación de oxígeno disuelto	mg/L
$D$	Diámetro	Kg/m <sup>3</sup>
$D_{10}$	Diámetro efectivo del grano	mm
$DBO_5$	Demanda biológica de oxígeno a los cinco días	mg/L
$DBO_{5in}$	Demanda bioquímica de oxígeno a la entrada del biofiltro	mg/L
DOF	Diario Oficial de la Federación	
$DQO$	Demanda química de oxígeno	mg/L
$DQO_{in}$	Demanda química de oxígeno en la entrada del filtro	mg/L
$DQO_T$	Demanda química de oxígeno total	mg/L

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
E	Eficiencia	%
EMCIRA	Estación meteorológica del CIRA	
FA	Frecuencia de alimentación	#/d
FCA	Factor de conversión alimenticia	
FR	Tasa de alimentación y tipo de alimento	kg/d
H	Altura del empaque en el biofiltro	m
$H_{tank}$	Altura total	m
$H_{water}$	Altura del agua	m
IICA	Instituto Interamericano de la Cooperación para la Agricultura	
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	
K	Factor de condición corporal de Fulton	
$K_L a$	Coefficiente de transferencia volumétrico	$h^{-1}$
$L_{hyd}$	Tasa de carga hidráulica	$m^3/m^2 d$
$L_{media}$	Carga hidráulica del empaque	$m^3/m^2 d$
msnm	Metros sobre el nivel del mar	m
$N-NH_{3in}$	Nitrógeno amoniacal entrada biofiltro	mg N-NH <sub>3</sub> /L
$N-NH_{3out}$	Nitrógeno amoniacal salida biofiltro	mg N-NH <sub>3</sub> /L
$N-NO_2^-_{gen}$	Generación de N – nitritos	%
$N-NO_2^-_{in}$	N – nitritos entrada biofiltro	mg N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /L
$N-NO_2^-_{out}$	N – nitritos salida biofiltro	mg N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /L
$N-NO_3^-_{gen}$	Generación de N-nitratos	%
$N-NO_3^-_{in}$	N – nitratos entrada biofiltro	mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L
$N-NO_3^-_{out}$	N – nitratos salida biofiltro	mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L
NOAA	Administración nacional oceánica y atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration)	
OCR	Razón de consumo de oxígeno	
OD	Oxígeno disuelto en el agua	mg/L
$Od_{in}$	Oxígeno disuelto en el influente	mg/L
OUE	Eficiencia energética de uso de oxígeno	g O <sub>2</sub> /kWh
P	Energía total	kW/d
PAM	Producción de nitrógeno amoniacal por peces	Kg/d
pH	Potencial de hidrógeno	
$pH_{in}$	pH a la entrada del biofiltro	
PMA	Punto de muestreo A	
PMB	Punto de muestreo B	
PMC	Punto de muestreo C	
PMD	Punto de muestreo D	
PME	Punto de muestreo E	
PMG	Punto de muestreo G	
PTR	Porcentaje de remoción de N-NH <sub>3</sub>	%
PTV	“Particle Tracking Velocimetry” (Velocimetría por seguimiento de partículas)	
PVC	Policloruro de vinilo	
Q	Caudal	$m^3/d$ o L/s
$Q_{A...E}$	Caudal en los puntos de muestreo A – E	$m^3/d$
$Q_{DBO5E}$	Carga de DBO <sub>5</sub> (empaque)	g DBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> d
$Q_{DI}$	Caudal de diseño	L/s
$Q_{DQOE}$	Carga de DQO (empaque)	g DQO/m <sup>2</sup> d

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$Q_{ENT}$	Caudal de entrada al SRA	$m^3/d$
$Q_{filter}$	Caudal del biofiltro	$m^3/d$
$Q_{mu}$	Caudal de agua tratada	$m^3/d$
$Q_{NH3AS}$	Carga de amonio (área superficial)	$g\ N-NH_3/m^2\ d$
$Q_{NH3E}$	Carga de amonio (empaquete)	$g\ N-NH_3/m^2\ d$
$Q_{out}$	Caudal de descarga	$m^3/d$
$Q_{reuse}$	Caudal reuso	$m^3/d$
$Q_{ru}$	Caudal estanque	$m^3/d$
$Q_{SAL}$	Caudal de salida	$m^3/d$
R	Coefficiente de correlación	
$R^2$	Coefficiente de determinación	
$r_{ALI}$	Tasa de alimentación	%
$R_{ALI}$	Alimento total diario	Kg/d
$r_{O_2}$	Tasa de consumo de oxígeno disuelto por los peces	$mg\ O_2/L\ h$
$R_{OD}$	Requerimiento de oxígeno	$mg/L$
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentos	
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales	
SRA	Sistema de recirculación acuícola	
SSA	Área de superficie específica	$m^2/m^3$
SST	Sólidos suspendidos totales	$mg/L$
STR	Tasa de conversión de nitrógeno amoniacal superficial	$g\ N-NH_3/m^2\ d$
T	Temperatura del agua	$^{\circ}C$
t	Tiempo de aclimatación antes de empezar la adquisición de datos	d
TAA	Tasa aérea de remoción de nitrógeno amoniacal	$g\ N-NH_3/m^2\ d)$
THR	Tiempo de retención hidráulica	min
TVCN	Tasa volumétrica de conversión de nitritos	$g\ N-NO_2-/m^3d$
$TVCN_A$	Tasa volumétrica de de $N-NO_2$ aparente	$g\ N-NO_2-/m^3d$
TVNA	Tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal	$g\ N-NH_3/m^3\ d$
UAEM	Universidad Autónoma del Estado de México	
V	Volumen	$m^3$
$V_0$	Volumen del filtro	$m^3\ ó\ L$
$V_{AM}$	Volumen del empaque	$m^3$
$V_b$	Volumen de empaque en el biofiltro	$m^3$
$V_E$	Volumen del estanque	$m^3$
$V_{media}$	Volumen del empaque	$m^3$
$VOCR_{het}$	Tasa volumétrica de consumo de oxígeno por bacterias heterótrofas	$g\ O_2/m^3\ d$
$VOCR_{nit}$	Tasa volumétrica de consumo de oxígeno por bacterias nitrificantes	$g\ O_2/m^3\ d$
YSI	Yellow Springs Instrument Company	
$\Delta O_2$	Tasa de cambio de oxígeno disuelto en el agua	$mg/L$
$\Delta pH$	Tasa de cambio en la concentración de pH	
$\rho$	Densidad	$kg/m^3$

# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

## 1. INTRODUCCIÓN

En México, la competencia por el recurso agua ha impactado negativamente algunas actividades como la acuicultura. Las presiones sociales y gubernamentales cada vez son mayores, a tal grado que las concesiones de uso de agua son más difíciles de obtener y el trámite es más estricto que en décadas pasadas (CNA, 2006).

La Ley de Aguas Nacionales decreta que el agua disponible para la acuicultura se encuentra en el número ocho de prelación, es decir, existen siete actividades humanas prioritarias en el uso del agua en México antes que la acuicultura (DOF, 2004).

En el marco de esta problemática, los productores de trucha arcoíris del Estado de México realizan esfuerzos en la búsqueda de estrategias técnicas más viables y rentables que se puedan aplicar a la producción de este organismo. Lo anterior incluye la recirculación acuícola, el uso de fuentes alternas de agua y de energía, la intensificación en la producción del cultivo, la diversificación del producto final, entre otras (Gallego *et al.*, 2007). No obstante que la tecnología puede ayudar a dar soluciones a esta problemática, para que pueda ser transferida a los productores, debe ser adaptada a las características de la actividad trutícola en México.

Bajo este esquema, existen dos propuestas con las que se ha trabajado en esta investigación; la primera es la cosecha de agua de lluvia como fuente abastecedora de agua para el cultivo de trucha arcoíris y la segunda es el uso de sistemas de recirculación de agua (sistemas cerrados) en este cultivo para tratar y reutilizar el agua.

La técnica de captación y aprovechamiento del agua de lluvia se ha utilizado en lugares donde la precipitación anual es media o alta (> 800 mm anuales). En México, los depósitos artificiales de almacenamiento de agua han sido utilizados desde los tiempos precolombinos para actividades agropecuarias en áreas pequeñas. En zonas arqueológicas como Xochicalco, Morelos, así como en la península de Yucatán desde el año 300 a.C., se emplearon sistemas conocidos como chulés (Garrido *et al.*, 2005). Las ventajas de utilizar el agua de lluvia son que ésta tiene, en la mayoría de los casos, una buena calidad físico-química, y que aprovecharla demanda un escaso o nulo consumo de energía eléctrica.

En la actualidad, existe una gran diversidad de técnicas utilizadas para captar agua de lluvia, almacenarla y depurarla. Estas variantes están en función de los usos y costumbres

de cada región. Los estudios que se han realizado, muestran la viabilidad de implementar este tipo de sistemas en comunidades rurales (Ávila, 2008).

Los sistemas de recirculación acuícola se han venido desarrollando desde hace más de 30 años, principalmente en los países en desarrollo con el objeto de disminuir la cantidad de agua utilizada en las unidades de producción acuícola, mejorando también el control de enfermedades, crecimiento y en general la eficiencia del cultivo. No obstante de los beneficios descritos, los sistemas de recirculación acuícola (SRA) tienen la limitante de requerir de un consumo energético (Timmons, *et al.*, 2002). En general, los SRA se componen de cinco principales etapas (procesos y operaciones) que permiten sostener la calidad de agua necesaria para la vida acuática, los cuales son: circulación de agua, remoción de sólidos, biofiltración, oxigenación y eliminación de gases. Otros componentes complementarios son: eliminación de color, filtración y desinfección (figura 1).

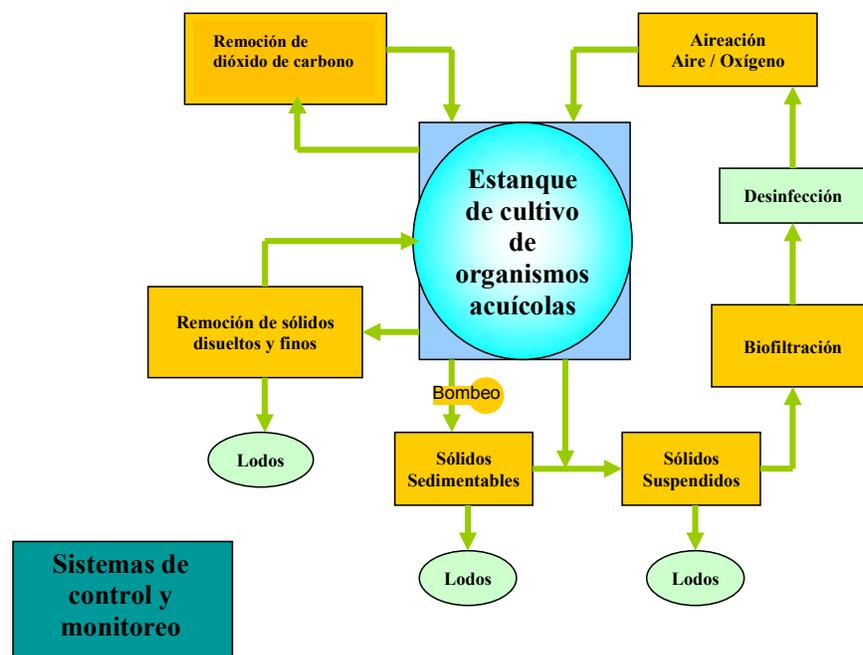


Figura 1. Operaciones básicas y complementarias de los SRA (Timmons *et al.*, 2002).

Estas propuestas han sido probadas en situaciones independientes, es decir, la cosecha de agua pluvial ha sido utilizada principalmente para abastecer al ser humano de agua para consumo directo y los sistemas de recirculación acuícola han sido operados con agua proveniente de cuerpos naturales como lagos, ríos, océanos y pozos entre otros.

Para lograr en un momento dado la transferencia de estas propuestas al sector productivo, es necesario conocer el desempeño de la tecnología adaptada al entorno socioeconómico y ambiental de la región. Por lo que se deben optimizar los prototipos ya probados (García *et al.*, en prensa; Ávila, 2008; Ávila *et al.*, 2006; Gallego, 2004; Díaz *et al.*, 2000), evaluar éstos enfocándose a la eficiencia de remoción de contaminantes para el cultivo de la trucha, determinar las características del recurso agua utilizado, que permita la modelación del comportamiento de los diferentes procesos involucrados en el sistema.

Actualmente la evaluación y modelación de estos prototipos se ha enfocado a expresiones matemáticas simples donde se relaciona la generación de residuos tóxicos para el cultivo con la producción en kilos de carne de trucha (García *et al.* en prensa; García 2008; Gallego 2004), estas ecuaciones se han construido de relaciones derivadas del análisis de observaciones para cada caso. Es necesario profundizar en modelos de parámetros limitantes al cultivo como: OD, generación de residuos y eficiencia o tasa de generación de contaminantes.

Es también útil explorar la aplicabilidad y pertinencia de uso de modelos dinámicos recientes. Son aquellos en los que se representa la realidad basada en leyes fundamentales de la física, química y biología. El proceso de modelos basado en estas leyes generales lleva invariablemente a reforzar el proceso intuitivo, desarrollando ordenada y racionalmente métodos para resolver el problema (Piciooreanu y Van Loosdrecht, 2003).

Como ejemplo, se han desarrollado modelos que simulan los procesos llevados a cabo en reactores biológicos acoplados a trenes de tratamiento de agua residual. El primero, ampliamente estudiado, es el proceso de lodos activados en aguas residuales municipales mediante el modelo ASM1 (Activated Sludge Model No. 1), el cual modela y simula los procesos de remoción de carbono orgánico y nitrógeno, con consumo de oxígeno y nitratos, así como la cantidad de lodos activados producidos por el reactor biológico. Este mismo, se ha modificado para describir otros procesos involucrados en los biofiltros de lodos activados generando así los modelos ASM2, ASM2d y ASM3 (Pettersen, 2000). Así mismo, el modelo ASM1 debido a sus características, se ha modificado para poder modelar plantas de tratamiento de agua residual que acoplan a su tren un biofiltro diferente a lodos activados (Plattes *et al.*, 2006, 2007, 2008; Takacs *et al.*,

2007; Larrea *et al.*, 2007; Mannina *et al.*, 2007), la modificación más importante ha sido el no incorporar la estructura de la biopelícula en ninguna forma.

Un segundo esfuerzo importante en el modelo de procesos biológicos en reactores de tratamiento de agua residual es la biopelícula, la cual se entiende como una capa de células procariotas y eucariotas ancladas a la superficie de un sustrato y envueltas en una matriz orgánica de origen biológico. Los modelos desarrollados han dividido a la biopelícula en cuatro compartimientos: 1) volumen de agua, 2) capa de frontera, 3) biopelícula y, 4) sustrato (Wanner *et al.*, 2006).

Los primeros modelos permitían conocer los procesos de una sola especie en una dimensión haciendo énfasis en la transformación bioquímica y el balance de masas, más adelante se pudo modelar biopelículas de multiespecies y multisustratos permitiendo así conocer la interacción entre los procesos involucrados, sin embargo todavía se trabajaba con una sola dimensión (Noguera *et al.*, 1999), recientemente con el desarrollo de las ciencias computacionales se ha trabajado con modelos en varias dimensiones desarrollando así el estudio de la estructura de la biopelícula (Van Loosdrecht *et al.*, 2002), en el 2006 se publican, por parte del comité de modelación de biopelícula bajo la responsabilidad de la IWA (Wanner *et al.*, 2006), cinco modelos matemáticos que describen los procesos involucrados en el desarrollo de la biopelícula

Como consecuencia del desarrollo de sistemas de producción acuícola con recirculación de agua, el requerimiento de biofiltro en este proceso y la revisión bibliográfica, la presente investigación ha tenido como finalidad diseñar y construir las instalaciones piloto para desarrollar un cultivo trutícola en un sistema de recirculación acuícola alimentado con agua pluvial, con el objeto de estudiar las características del agua residual, que permita el análisis del comportamiento de los diferentes procesos involucrados en el tren de tratamiento de agua residual acoplado al sistema de producción de trucha y a los procesos biológicos consecuencia del cultivo de organismos acuáticos.

## **CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES**

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. TRUTICULTURA EN EL ESTADO DE MÉXICO

El cultivo de la trucha en el Estado de México se inició a finales de los 70's con tres granjas ubicadas en el municipio de Amanalco. En la figura 2 se muestra la ubicación geográfica de cada unidad de producción por cuenca hidrológica, actualmente se ubican aproximadamente 400 granjas trutícolas en el estado en tres cuencas hidrológicas (Balsas, 62,71 %, Lerma 21,61 % y Panuco 15,68%) (Gallego *et al.*, 2007) con un producción en el 2008 de 2 900 toneladas (SAGARPA, 2009).

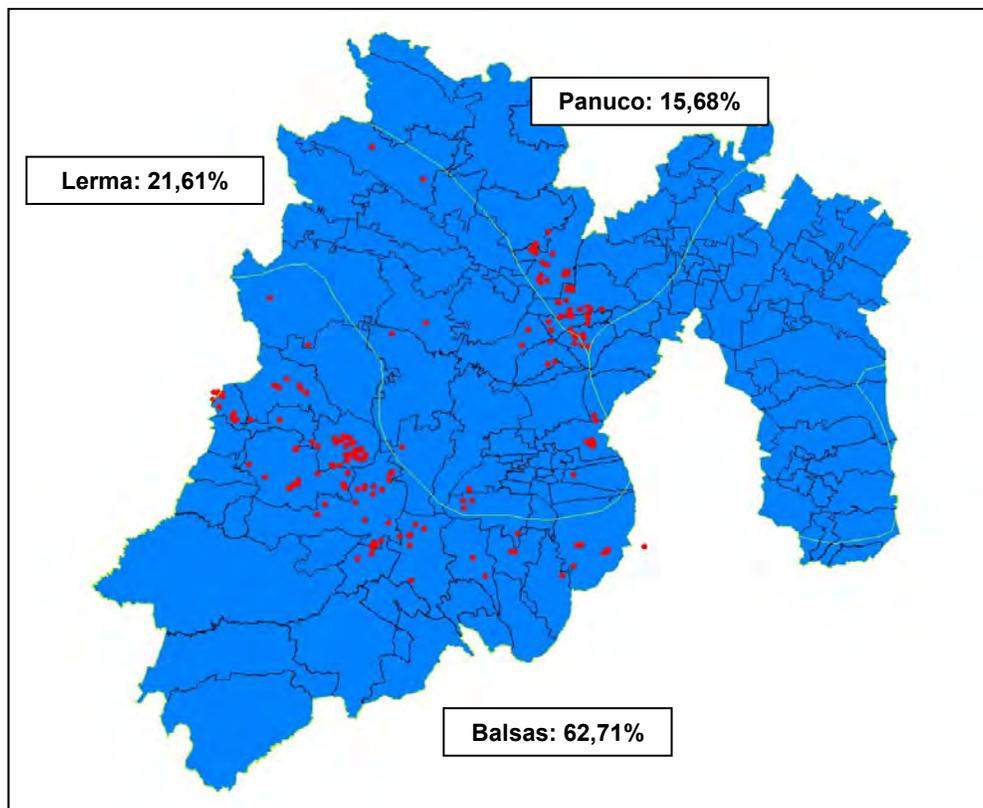


Figura 2. Ubicación por cuenca de las unidades de producción trutícola en el Estado de México (Gallego *et al.*, 2007)

El uso de paso del agua en las granjas de trucha arco iris tiene como origen en un 70 % los manantiales localizados en los terrenos de las unidades o cercanos a éstas, el resto de las granjas obtiene el agua de ríos, presas, arroyos y escurrimientos. Los orígenes del agua se encuentran influenciados por las condiciones climáticas de la región, causando dos de los problemas reportados por los truticultores: la calidad del agua en temporada de lluvia y la cantidad de la misma en el estiaje.

En la figura 3 se muestra el origen del agua que abastece a las unidades de producción en el Estado de México, destacando el uso de manantiales en un 70 %. En la figura 4 se observa el caudal utilizado por origen del agua, la cantidad utilizada en la temporada de lluvia es del doble de la disponible para el mismo cultivo en el estiaje.

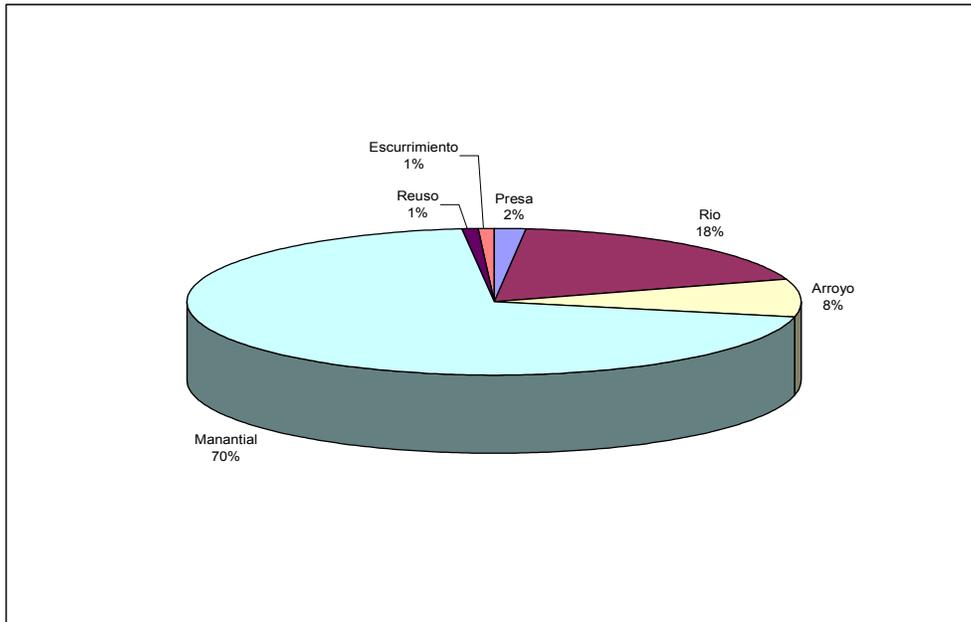


Figura 3. Origen del agua utilizada en las unidades de producción trutícola (Gallego *et al.*, 2007)

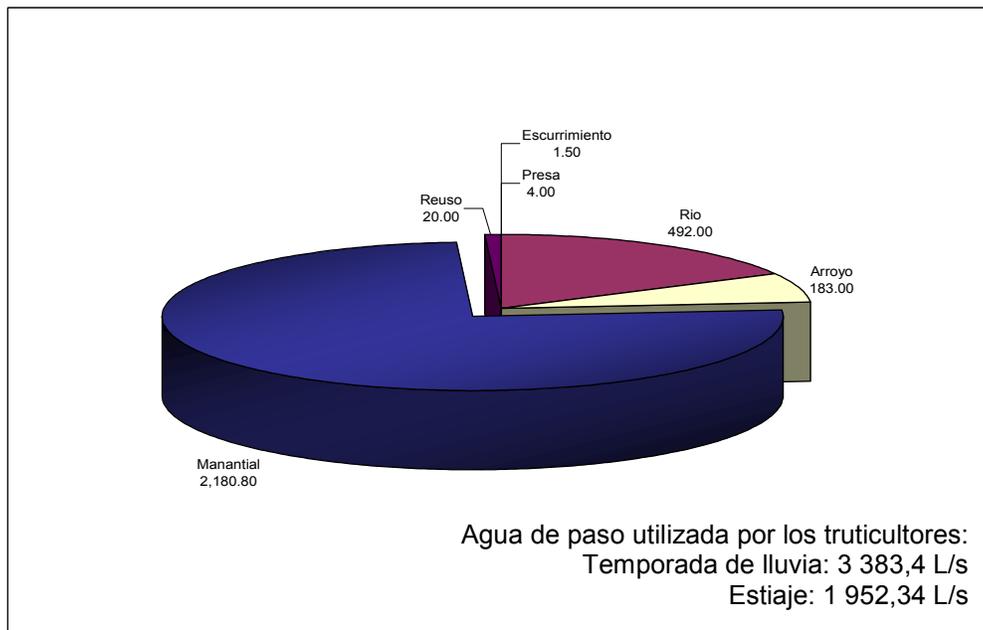


Figura 4. Caudal utilizado en las granjas de trucha por origen del agua (Gallego *et al.*, 2007).

## 2.2. USO DE AGUA PLUVIAL EN ACTIVIDADES HUMANAS

La captación de agua de lluvia es una técnica que se ha desarrollado y llevado a cabo con éxito, en diferentes partes del mundo con éxito. En la región del Chaco Central del Paraguay, el abastecimiento de agua en las comunidades indígenas y latino-paraguayas se realiza principalmente mediante pozos, tanques a cielo abierto cubiertos de plástico (llamados tajamares) y lagunas. El agua acumulada de las precipitaciones que escurre por la superficie muestra concentraciones altas de potasio debido a que es arrastrado en la conducción del agua hacia los tajamares (agua de escorrentía). Lo mismo sucede con el calcio, magnesio, sodio y cloruros, los cuales también reflejan concentraciones altas a causa de la lixiviación del suelo circundante. Además tiene un alto contenido de fosfatos, nitratos y coliformes totales (Duarte *et al.*, 2003).

La elevada contaminación bacteriológica en los tajamares, se debe a las heces fecales humanas y animales, sin embargo, se ha comprobado que el agua es apta para todo uso, previo tratamiento. Los autores mencionan que, para abastecer una familia de seis personas, es necesario construir una techumbre de 100 m<sup>2</sup> y una cisterna de 35 000 L, asumiendo un consumo de 33 L/hab d, precipitaciones de 1 000 mm, una tasa de uso de 75% y la recarga del aljibe dos veces al año (Duarte *et al.*, 2003).

En la región, se registra una precipitación media anual entre 700 y 1000 mm. La Comisión Acueducto “Agua Limpia” ha experimentado con un filtro rápido de piedra y carbón activado seguido de un tanque de cloración para mejorar la calidad del agua de los tajamares (Duarte *et al.*, 2003). Aunque la mejora es apreciable, no se alcanza el grado de potabilidad y, durante el experimento, se observó poca durabilidad del sistema ya que se obstruye con facilidad debido al gran generación de algas. La Comisión recomienda que, a corto plazo, el agua debería ser tratada de manera más completa con un sistema que incluya floculación de algas y coloides, para remover sedimentos finos y color, seguido de una filtración rápida o lenta y, finalmente, la desinfección con cloro, para asegurar una buena calidad física, química y bacteriológica (Duarte *et al.*, 2003).

En Auckland, Nueva Zelanda, 125 casas de un distrito cuentan con sistemas de cosecha de agua en sus techos, con el objeto de abastecerse de agua para uso doméstico. El agua obtenida de esta manera tiene una calidad físico – química y microbiológica pobre debido principalmente al material de los techos con que se construyeron las casas, por lo

que se subraya que se debe de contar con un tratamiento adecuado antes de utilizar este recurso en actividades humanas (Simmons, *et al.*, 2001).

En Japón (Zaizen, *et al.*, 1999) realizaron un estudio de tres estadios deportivos que cuentan con un sistema de captación de agua de lluvia, en techos de más de 28 000m<sup>2</sup>. Esta agua es usada para la limpieza del estadio, baños y riego de jardines, cuentan con una capacidad de almacenaje de hasta 1800m<sup>3</sup>. Estos autores mencionan que para obtener éxito en los sistemas de cosecha de lluvia se debe de tomar en cuenta: 1) Información anual de la precipitación en el área, 2) estimar la cantidad de agua requerida, 3) analizar el balance de demanda de agua del sistema, y 4) calcular el volumen de almacenamiento para el control del agua de lluvia.

En México, en la región Tarahumara, en el 2001, se realizó un proyecto donde mediante un colector de agua de lluvia (Villanueva y Ontiveros, 2001) se provee de agua para consumo humano a los habitantes de la zona. En dicha región, se registran precipitaciones desde 340 mm hasta 1017 mm. El sistema consta de techos de láminas galvanizadas, estructura de almacenamiento, tubería PVC y cisterna. Además, tiene un reservorio para las demasías del tinaco, a éste se le colocó una cubierta plástica para evitar la infiltración y se circundó con malla para evitar que los animales lo utilicen como bebedero.

En el estado de Oaxaca se desarrolló un sistema parecido (Ríos, 2002), sin embargo, éste cuenta con un sistema de tratamiento primario. El sistema de tratamiento cuenta con dos alternativas, una de ellas es una trampa de sedimentos y la otra es una válvula de desfogue. El tratamiento a que se hace referencia es simple y contribuye a que se proporcione agua de mayor calidad. Se aclara que en este sistema no se realiza desinfección, sin embargo estos autores mencionan que es necesario para llegar a potabilizar el agua.

En Yalenday, Chiapas (Mundo–Molina, 1997), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) construyó un colector de agua de lluvia que consiste principalmente de: 1. Techumbre de aluminio, 2. Cisterna bajo tierra, 3. Filtros y 4. Tanque regulador. Para la captación en techumbres (IICA, 1998).

Garrido, *et al.* (2005) describen la potabilización del agua de lluvia en tres comunidades del Estado de Morelos, en donde utilizan la filtración en múltiples etapas modificada para

potabilizar agua de lluvia para comunidades menores a 2 500 habitantes. El objeto de utilizar este sistema de filtración fue debido a que, según los autores, elimina progresivamente los contaminantes para producir agua para uso y consumo humano con criterios de continuidad y calidad a un costo manejable por los usuarios. Los autores concluyen que el agua de lluvia es una excelente solución alternativa en el abastecimiento de agua para uso y consumo humano.

Ávila *et al.* (2006), reportan el uso de filtros de lecho flotante como un sistema de tratamiento adecuado para modificar la calidad del agua de lluvia, utilizada en actividades humanas en el estado de Morelos, México. Este tipo de filtros, reportan los autores, satisface una demanda de tecnología de bajo costo y alta eficiencia, recomendando su uso en comunidades pequeñas y con poder adquisitivo limitado.

Adicionalmente, Fall *et al.* (2006), trabajaron con un sistema de potabilización de agua de lluvia para una comunidad rural de no más de 200 habitantes ubicada en el municipio de Almoloya de Juárez en el Estado de México, el agua de lluvia fue acondicionada para el uso y consumo de los habitantes de la comunidad con un tratamiento de agua al cual se le implementó un sistema de bombeo soportado por energía hidráulica.

Otros estudios se enfocan sobre la calidad del agua cosechada; Lee *et al.* (2004) reportan que la calidad del agua colectada con origen en las primeras lluvias de la temporada no es la adecuada para actividades humanas, concluyendo que ésta se debe desechar o aumentar el control en el tratamiento, ya que las primeras lluvias acarrear los contaminantes acumulados durante la temporada de sequía.

Taylor *et al.* (2005), encontraron la composición de las especies nitrogenadas en el agua de lluvia urbana, la presencia de amonio es el ión de menos abundancia en el agua de lluvia, sin embargo, la concentración de iones nitrito es la mayor en este tipo de agua. Así también recomiendan que los sistemas de tratamiento de agua de lluvia deben ser diseñados para cubrir las características de variación de las concentraciones de especies nitrogenadas en el influente.

Evans *et al.* (2006), estudiaron el efecto del clima en la composición bacteriana de la cosecha de agua de lluvia urbana, la cual puede ser conformada por dos factores: la contaminación por insectos, aves, pequeños mamíferos o por la contaminación mediante

la deposición atmosférica. En general encontraron que el efecto de los coliformes fecales no es significativo en la cosecha de lluvia.

### **2.3. USO DE AGUA PLUVIAL EN ACUICULTURA**

En Australia, Ingram *et al.* (2002), estudiaron el crecimiento de diferentes organismos acuáticos en aguas salobres, las cuales eran alimentadas por agua de lluvia y agua de pozo. Entre los organismos estudiados se tiene a la trucha arco iris; en este estudio, el animal presentó un crecimiento de 0,8 g diarios a 11 g/L de salinidad y de 4,6 g diarios a 16,8 g/L de salinidad.

En India, Mohanty (2004) reporta el crecimiento de diferentes especies de carpas en reservorios de agua de lluvia a diferentes densidades de siembra. En conclusión, Mohanty, observó que la producción máxima de carpa en estos sistemas es de 1 572 Kg por hectárea. Además señala que cuando se incrementa la densidad, los incrementos en la biomasa disminuyen y aumentan las tasas de mortalidad, todo esto independiente de la calidad del agua en el sistema.

Tollner *et al.* (2006) desarrollaron hojas de cálculo para estimar el abastecimiento de agua superficial en cultivos de agua dulce para países en desarrollo. Estos autores señalan que una de las variables importantes a tomar en cuenta es el agua de lluvia que puede abastecer al sistema. La hoja de cálculo puede llegar a ser muy útil siempre y cuando sea alimentada con los datos de entrada adecuados, particularmente la precipitación mensual, la frecuencia de tormentas y su duración.

El uso de agua pluvial como fuente de agua alterna para el cultivo de especies acuícolas no ha sido contemplado como una propuesta factible a la problemática acuícola, lo que se refleja en la escasa literatura reportada hasta el momento, sin embargo en esta investigación se considera a la cosecha de agua pluvial como una solución viable a la variabilidad en cantidad y calidad del agua disponible para los cultivos de organismos acuáticos combinada con el uso de los sistemas de recirculación acuícola.

### **2.4. SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN ACUÍCOLA**

Los sistemas de recirculación acuícola (SRA) han sido estudiados desde hace más de cuatro décadas, enfocando los esfuerzos hacia los SRA con biofiltros de película fija y recientemente a los SRA con biofiltros suspendidos (Malone y Pfeiffer, 2006). En los

últimos años se han evaluado diferentes SRA orientados a especies de alto valor comercial o ecológico (Sharrer *et al.*, 2007; Maillard *et al.*, 2006; Montagne, 2006; Atwood *et al.* 2005; Summerfelt *et al.*, 2004; Hafed *et al.*, 2003; Paterson y Watts, 2003; Simonel *et al.*, 2002; Tilley *et al.*, 2002). En todos se reporta el uso de diferentes trenes de tratamiento, su eficiencia y desarrollo de las unidades del tratamiento de agua, así como, el crecimiento ideal de cada especie.

Aunque se tienen diversos estudios de los sistemas, recientemente se han propuesto estándares para la investigación de los sistemas de recirculación acuícola, entre los más importantes han surgido cuatro propuestas: 1) requerimientos de la calidad del agua en los SRA (Colt, 2006); 2) clasificación de biofiltros nitrificantes de biopelícula fija (Malone y Pfeiffer, 2006); 3) estandarización de la evaluación de biofiltros (Drennan *et al.*, 2006); y 4) estándares para reportar el desempeño en los estudios de biofiltros (Colt *et al.*, 2006).

Estas propuestas están encaminadas hacia el ordenamiento de las investigaciones para que la industria acuícola pueda contar con una transferencia tecnológica entendible que a su vez permita a los productores, consultores, asesores, etc., tomar decisiones para diseñar, construir y operar un SRA en una unidad de producción.

La primera propuesta, respecto a los requerimientos de la calidad del agua en los SRA sugerida por Colt (2006), divide a los criterios de calidad del agua en dos tipos: criterios para el cultivo de la especie y criterios para la operación de procesos y unidades del tren de tratamiento. El primer tipo, según este autor, está ampliamente abordado en la literatura como en libros acuícolas y bases de datos (BIOSIS, NOAA y ASFA). Sin embargo, los criterios para la operación de procesos y unidades del tren de tratamiento se han discutido desde un punto de vista ambiental, por lo que este trabajo propuso considerar diferentes parámetros críticos para la evaluación y operación de los biofiltros (tabla 1).

Tabla 1. Parámetros físico – químicos importantes en la evaluación y operación de un biofiltro (Tomado parcialmente de Colt, 2006).

Parámetro	Implicaciones
Nitrógeno amoniacal	Tiene un efecto directo en el desempeño del biofiltro, el contenido de nitrógeno amoniacal debe de estar dentro de los rangos permitidos para una buena nitrificación
Nitratos	Un nivel mínimo de iones nitrato previene la formación de H <sub>2</sub> S debido a condiciones anaeróbicas
Oxígeno disuelto	La nitrificación se detiene a concentraciones bajas de oxígeno
pH (y alcalinidad)	La nitrificación disminuye a pH altos y bajos, debido a que es un proceso biológico.
Salinidad	Diferentes bacterias son responsables de la nitrificación en agua dulce o salada, cambios repentinos en la salinidad reducen la tasa de nitrificación del biofiltro.
Drogas terapéuticas y químicas	Impactan severamente en los microorganismos responsables de la nitrificación en los biofiltros

La segunda propuesta, es decir la clasificación de biofiltros nitrificantes de biopelícula fija por Malone y Pfeiffer (2006), plantea que en los estudios que evalúen el desempeño de propuestas de biofiltros se clasifiquen con base en la salinidad (g/L), temperatura y niveles tróficos (figura 5).

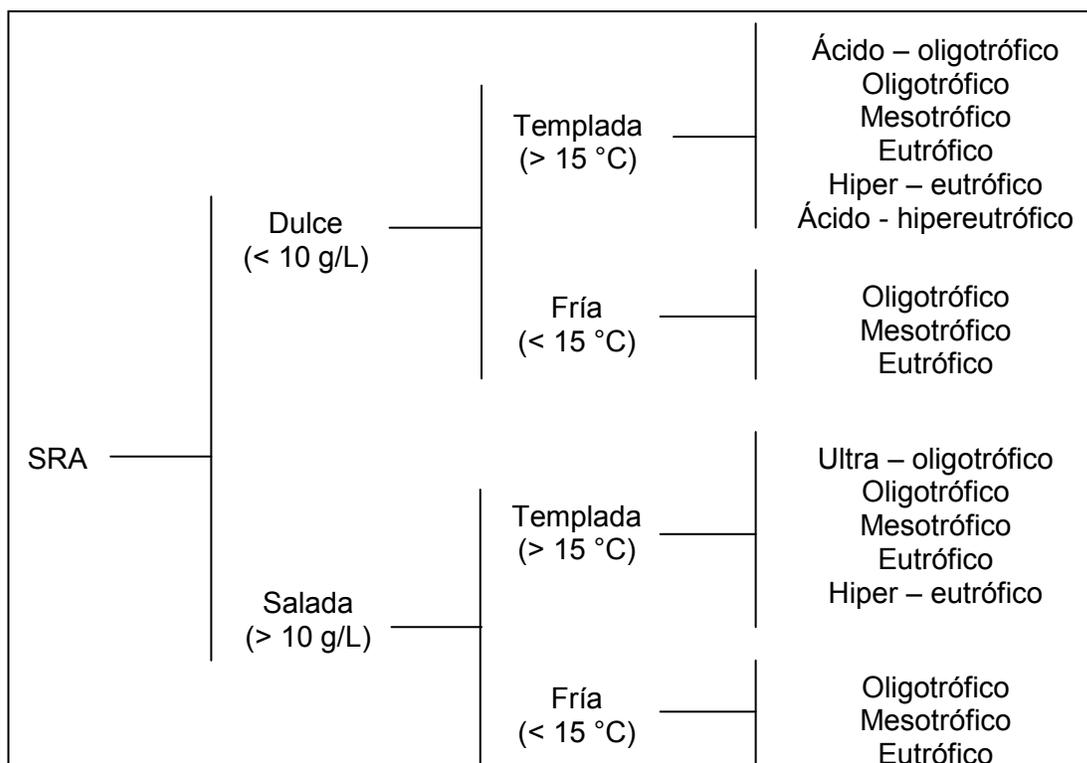


Figura 5. Clasificación de los SRA propuesta por Malone y Pfeiffer (2006).

Esta clasificación obedece a que las características de diseño y operación de los biofiltros son diferentes para cada nivel expresado en la figura 5, a su vez, esta propuesta permite encasillar el uso de los biofiltros y su dimensionamiento según los factores que influyen en el proceso de nitrificación.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de organismos o especies aptos para los tipos de nivel trófico determinados por Malone y Pfeiffer (2006), en color azul se indica en donde se ubica el SRA utilizado para esta investigación.

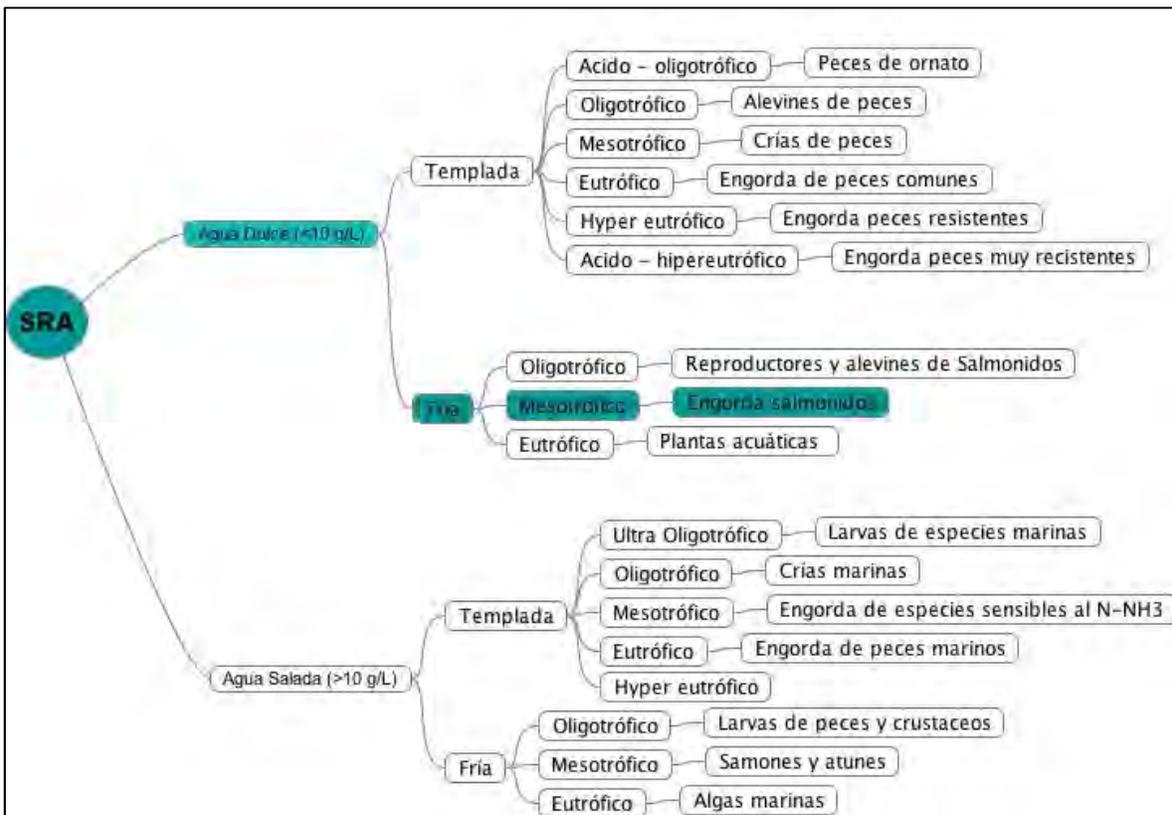


Figura 6. Mapa conceptual de la clasificación de los SRA de acuerdo con el tipo de agua, temperatura y nivel trófico (en azul ubicación de SRA usado en esta investigación)

De acuerdo a los organismos a cultivar estos se pueden catalogar en un nivel trófico y en un intervalo de nitrógeno amoniacal total. En la tabla 2, se detallan los criterios de clasificación de los biofiltros con base en su nivel trófico, los más comunes son: oligotróficos, mesotróficos y eutróficos.

**Tabla 2. Criterios de clasificación con base en el nivel trófico y las necesidades en la actividad acuícola (Malone y Pfeiffer, 2006).**

<b>Nivel trófico</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Intervalo de N-NH<sub>3</sub> (mg/L)</b>
Ultra – oligotrófico	Larvas (marinas)	0,0 – 0,1
Ácido – oligotrófico	Peces ornamentales	0,1 – 0,3
Oligotrófico	Reproductores	0,1 – 0,3
Mesotrófico	Alevines y engorda	0,3 – 0,5
Eutrófico	Engorda	0,5 – 1,0
Hiper – eutrófico	Engorda de especies resistentes	1,0 – 5,0
Ácido hiper - eutrófico	Engorda de especies resistentes	1,0 – 20,0

Estos autores también proponen que para el análisis de los filtros biológicos con biopelícula fija, se deben estandarizar algunas variables, así como el lugar de muestreo en el biofiltro. Lo anterior se realiza para poder determinar la capacidad de carga de la unidad. En la tabla 3, se muestran los parámetros y los lugares de muestreo en un experimento secuencial (batch). Una vez que se presentan estas condiciones en el experimento, se puede modelar la tasa volumétrica de transformación de nitrógeno amoniacal, mediante la ecuación (1).

$$TVNA \left( \frac{g-N}{m^3 d} \right) = \left( CA_I \left( \frac{g-N}{m^3} \right) - CA_E \left( \frac{g-N}{m^3} \right) \right) \frac{Q \left( \frac{m^3}{d} \right)}{V_b (m^3)} \quad (1)$$

Donde: TVNA = Tasa volumétrica de remoción de nitrógeno amoniacal; CA<sub>I</sub> = Concentración de nitrógeno amoniacal a la salida del reservorio; CA<sub>E</sub> = Concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente del biofiltro; Q = Caudal que pasa a través del biofiltro y V<sub>b</sub> = Volumen de empaque en el biofiltro.

**Tabla 3. Rangos permitidos para los parámetros y lugares de muestreo para el análisis de biofiltros (Malone y Pfeiffer, 2006)**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Lugar</b>	
		<b>Reservorio</b>	<b>Efluente de biofiltro</b>
Temperatura	°C	20 ± 0,5	20 ± 0,5
Oxígeno disuelto	mg/L	> 5,0	> 3,0
Alcalinidad (estándar)	mg/L como CaCO <sub>3</sub>	150	
pH		7,7 ± 0,1	

Una tercera propuesta, está ligada con la anterior. Drennan *et al.* (2006) estandarizan la calidad del agua para cada nivel trófico (tabla 4) y proponen que cada biofiltro analizado presente una gráfica donde se correlacione la concentración de nitrógeno amoniacal en el influente del biofiltro y la tasa volumétrica de remoción de nitrógeno amoniacal, es decir, se muestre el modelo matemático de la capacidad de carga del biofiltro.

Tabla 4. Calidad del agua dependiendo del nivel trófico del cultivo (Drennan *et al.*, 2006)

Parámetro	Unidades	Nivel trófico		
		Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
Oxígeno disuelto	mg/L	> 6,0	> 5,0	> 4,0
Dióxido de carbono	mg/L	< 1,0	< 5,0	< 25,0
Nitrógeno amoniacal	mg/L	< 0,3	< 1,0	< 2,0
Nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	< 0,3	< 1,0	< 2,0
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	< 50,0	< 200,0	< 500,0
DBO <sub>5</sub>	mg/L	< 5,0	< 10,0	< 20,0
Sólidos suspendidos totales	mg/L	< 5,0	< 15,0	< 25,0
Turbidez	UNT	< 1,0	< 10,0	< 100,0

La cuarta propuesta se enfoca al desempeño de los biofiltros, en la tabla 5 se muestra la clasificación de los estudios de acuerdo con su objetivo (Colt *et al.*, 2006).

Tabla 5. Clasificación de los estudios de SRA de acuerdo con su objetivo (Colt *et al.*, 2006)

Tipo de estudio	Tamaño típico del biofiltro (L)	Objetivo	Características del agua residual
Cinética	1 – 50	Determinación de la cinética de remoción de nitrógeno amoniacal, bajo condiciones controladas	Agua residual sintética comúnmente con una DBO no significativa
Escala piloto	5 – 100	Evaluación de empaque o configuración de filtros en condiciones controladas	Se puede utilizar agua residual sintética o de un sistema experimental
Sistema de cultivo	100 – 1 000	Evaluación de empaque o configuración de filtros en condiciones de cultivo	Agua residual de sistemas grandes de producción

Igualmente, determinaron los parámetros estándar que un trabajo en esta área de investigación debe de tomar en cuenta. En específico, estos autores, mencionan que dependiendo del tipo de estudio que se realice (tabla 5) se deben de reportar los principios básicos del diseño del biofiltro como las características del empaque utilizado y del biofiltro, de la calidad del agua en el influente y efluente del mismo e indicadores del desempeño del filtro.

El trabajo reportado por Eding *et al.* (2006), da base al diseño y operación de filtros percoladores para SRA, los autores señalan que estos biofiltros tienen varias ventajas sobre otros como: alta estabilidad de los procesos debido a una alta concentración de oxígeno, remoción de CO<sub>2</sub> por desgasificación, agua con temperaturas bajas en verano y diseño, construcción, operación y mantenimiento simples.

Sin embargo, también comentan que se tienen desventajas como: Tasas de remoción bajas, desprendimiento de biopelícula y colmatación del empaque cuando está mal operado.

Su diseño, comentan, está basado en los picos de producción de residuos por parte de los organismos que coincide con el momento de máxima biomasa y consumo de alimento. Una vez que se conoce este momento se debe de calcular la producción de residuos por kilogramo de alimento proporcionado a los organismos, para determinar el caudal y las dimensiones del percolador. Otro factor importante es el objetivo del biofiltro, es decir la concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente del percolador necesaria para permitir el cultivo acuícola, en general, esto puede ser controlado cuando se tienen bajas concentraciones de nitrógeno amoniacal en el influente y altas tasas de remoción en el filtro.

Por otra parte, estos mismos autores mencionan que el uso de percoladores debe de ser apoyado por unidades de clarificación y/o filtración para eliminar la biopelícula que se desprende del empaque. Al final concluyen, que el uso de los percoladores para los SRA es una opción que se debe considerar en situaciones, tales como, bajo presupuesto de construcción, poca mano de obra y generalmente poco capacitada, necesidades de altas concentraciones de oxígeno disuelto y baja concentración de CO<sub>2</sub> en el agua.

Es importante subrayar que la propuesta de investigación es la continuidad de investigaciones sobre sistemas de recirculación acuícola de la presente tesis que se han realizado desde 1999 (García *et al.*, en prensa; García, 2008; Gallego, 2004) por un grupo de investigadores pertenecientes al Centro Interamericano de Recursos del Agua y al Centro de Investigación en Recursos Bióticos, pertenecientes a la Universidad Autónoma del Estado de México. En estos trabajos se reporta un SRA para el cultivo de trucha arco iris en diferentes etapas de su ciclo de vida en cautiverio, obteniendo como resultados un prototipo que permite densidades de biomasa de trucha de hasta 12 kg/m<sup>3</sup>.

Gallego (2004) diseñó y evaluó un tratamiento de agua residual acuícola para el cultivo de cría y juvenil de trucha arco iris, el tren consistió en un filtro de maya de 300 µm en forma de parábola, un percolador como biofiltro y un filtro de arena (figura 7). Se concluye en este trabajo que el cultivo de cría y juveniles de trucha en sistemas cerrados es factible para las condiciones socioeconómicas de la actividad en el Estado de México, logrando

un crecimiento promedio durante la fase experimental de 7,62 g de peso y 5,85 cm de longitud en un periodo de 12 semanas, los cuales son considerados aceptables al compararse con lo reportado en la literatura correspondiente. La biomasa alcanzada fue de 2,0 kg/m<sup>3</sup>. La eficiencia acumulada obtenida por el tren de tratamiento para los parámetros clave fue de 90,51 % de remoción para sólidos suspendidos totales, de 88,00 % para turbidez, 78,97 % para DBO<sub>5</sub>, 82,47 % para DQO, 78,14 % para N-NH<sub>3</sub> y 57,73 % para N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>. Una contribución original del trabajo fue el uso de poliducto flexible como empaque para el biofiltro que cuenta con una superficie específica de 414 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

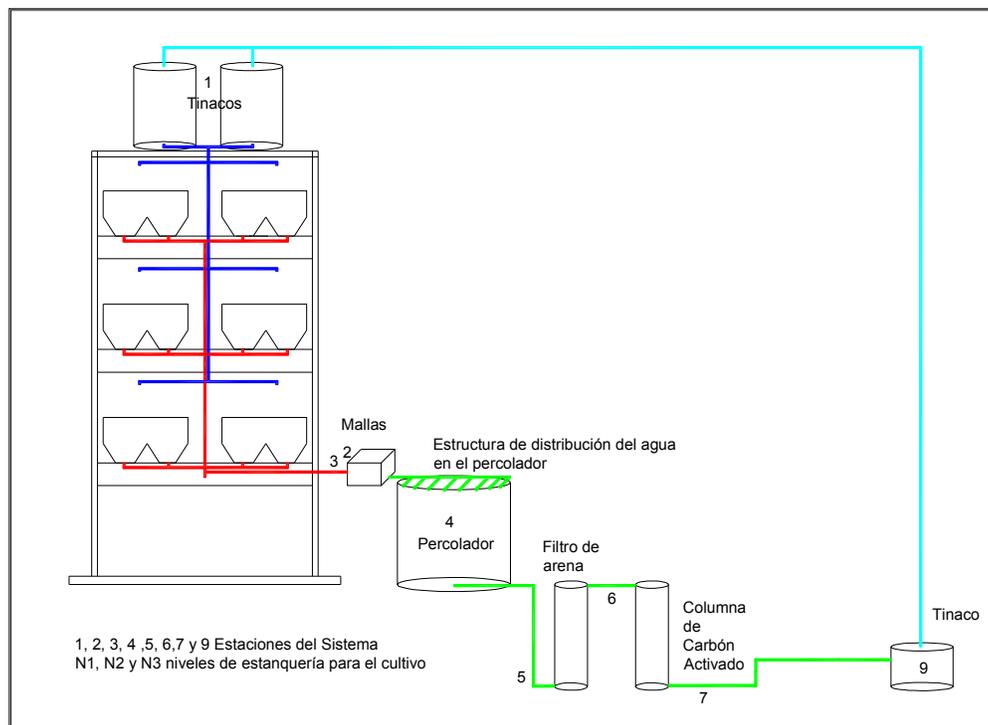


Figura 7. Sistema de recirculación acuícola para el cultivo de cría y juvenil de trucha (Gallego, 2004)

García (2008) modificó el tren de tratamiento propuesto por Gallego (2004) proponiendo un filtro reticular con la misma luz de malla sin forma parabólica, como biofiltro un percolador y filtro de arena (figura 8), el cual fue adecuado para producir 12 kg/m<sup>3</sup> de trucha arco iris a talla comercial (250 g) en 180 días, con un caudal de 1 L/s, lo que significó un ahorro de agua de hasta el 98% comparado con la tecnología vigente. Es decir, el prototipo permite producir un kilogramo de trucha con 500 litros de agua, lo que representa menos del 1 % del consumo de agua de un sistema abierto (tecnología de cultivo tradicional).

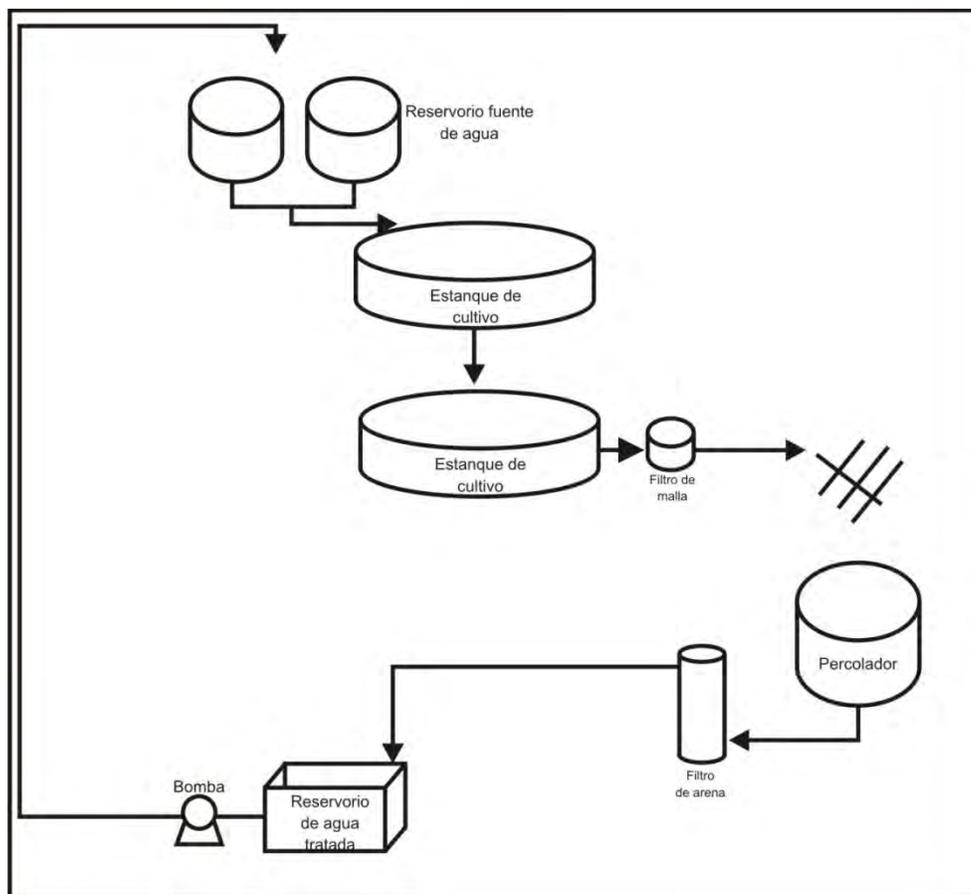


Figura 8. SRA para el cultivo de trucha arco iris propuesto por García (2008)

Las eficiencias de remoción alcanzada por este prototipo fueron reportadas por García *et al.* (en prensa); la remoción de nitrógeno amoniacal fue de 86 %, en el biofiltro fue de 57 % y en el filtro de arena fue del 66 %. La remoción de  $DQO_T$  en el tren de tratamiento fue de 66 %, en el filtro biológico de 61 % y en el filtro de arena 12 %. En cuanto a la remoción de SST, la eficiencia global fue de 88%, en el percolador de 67 % y en el filtro de arena 64 % (figura 9).

La eficiencia lograda en el sistema, reportan estos autores, permitió un cultivo adecuado, logrando que las concentraciones de contaminantes (nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos,  $DQO_T$ , SST) permanecieran por debajo de los límites máximos recomendados para el cultivo trutícola durante la totalidad del ciclo de producción (García *et al.*, en prensa)

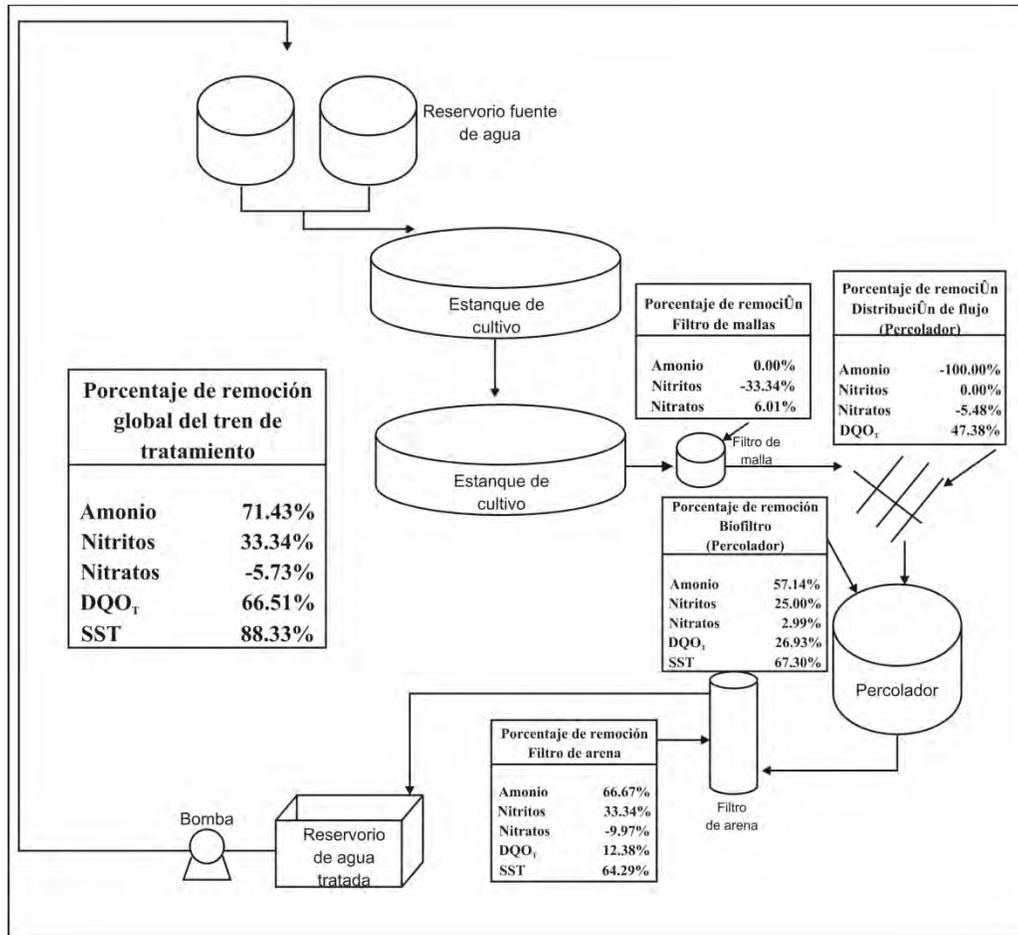


Figura 9. Eficiencia de remoción reportada por García *et al.* (en prensa)

## 2.5. MODELACIÓN DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN ACUÍCOLA.

Un modelo matemático, es la representación simplificada de un sistema complejo en el que su mismo comportamiento es representado por un conjunto de ecuaciones lógicas, necesarias para expresar las relaciones entre las variables y parámetros, que representan el estado del sistema y su evolución bajo la influencia de ciertas variables (Bâ *et al.*, 1995).

En general los modelos matemáticos describen desde un solo proceso mediante una ecuación matemática obtenida de forma empírica o encontrando las relaciones entre dos o más variables involucradas en el proceso a describir. Ejemplo de procesos en la biofiltración acuícola son: la tasa de remoción de nitrógeno amoniacal o la eficiencia de remoción de un contaminante en un biofiltro en particular. En este tipo de modelación los datos que permiten construir modelos matemáticos de tipo regresivo, que relacionan

diferentes variables, son concentraciones totales, como oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, DBO<sub>5</sub>, DQO, entre otros (Wheaton *et al.*, 1991).

Este acercamiento a la modelación matemática de funcionamiento de biofiltros en acuicultura (tipo regresivo) es el que más se ha desarrollado. Comprende principalmente métodos empíricos donde se determina el cambio de la variable en estudio manteniendo las demás constantes. La ventaja de estos métodos es que son fáciles de implementar y al poder ser replicados por diferentes investigadores se puede llegar a un modelo mejorado de la razón de cambio de la variable en estudio (Wheaton *et al.*, 1991). Sin embargo, esta modelación simple conlleva a correlaciones restringidas a las condiciones en las cuales los datos experimentales fueron obtenidos (Picioreanu y Van Loosdrecht, 2003).

Los modelos más utilizados para conocer el comportamiento de los sistemas de recirculación acuícola son:

- 1) La tasa volumétrica de remoción de nitrógeno amoniacal. Esto permite conocer la capacidad de carga de los biofiltros (Guerdat *et al.*, 2010; Ling y Chen, 2005; Zhu y Chen, 2001; Zhu y Chen, 1999; Ester *et al.*, 1994).
- 2) La generación de contaminantes por parte de los peces. Estos modelos se utilizan como base de diseño para las unidades de los procesos biológicos en los SRA en condiciones particulares para una región (García, 2008; Gallego *et al.*, 2004; Gallego 2004).
- 3) La modelación de consumo de oxígeno disuelto en el agua. En los sistemas cerrados; este parámetro es limitante para la densidad de peces en los estanques. Por ejemplo, para cultivos oxigenados con aire la densidad máxima reportada es de 40 kg/m<sup>3</sup>, para cultivos que utilizan oxígeno puro se estima una densidad de 150 kg/m<sup>3</sup> (Timmons *et al.*, 2002). Otro uso de la modelación del consumo de oxígeno disuelto por parte de los organismos acuáticos es para conocer como es afectado su metabolismo por los diversos factores involucrados en el cultivo (Cerezo – Valverde *et al.*, 2009; Perera *et al.*, 2007; Debnath *et al.*, 2006; Fivelstad *et al.*, 1999).

Otros trabajos reportan la modelación de consumo de oxígeno disuelto por parte de especies acuícolas para determinar el comportamiento de la concentración de este

parámetro en el agua cuando es sometido el cultivo a diversos fenómenos como variación de temperatura, altitud, consumo de alimento, etc. (González *et al.*, 2010; Dalvi *et al.*, 2009; Merino *et al.*, 2009; Salas-Leiton *et al.*, 2008; Tudor 1999; Grottum y Sigholt, 1998).

Para conocer la transferencia de oxígeno, se han planteado diferentes teorías, Sin embargo Lewis Whitman en 1924 postularon la que se considera la más sencilla y que ha probado ser correcta en un 95 % de los casos estudiados, llegando inclusive a presentar los mismos resultados que teorías más evolucionadas y complejas (Fall, 1999).

La teoría más utilizada para explicar el mecanismo de transferencia de gases en el intercambio gas-líquido es la teoría de la doble capa (Ramírez *et al.*, 2002). El modelo se basa en la existencia de dos capas, una de líquido y otra de gas en la interface gas-líquido. Ambas capas dan una resistencia al paso de moléculas de gas entre las fases líquida y gaseosa. Los gases de solubilidad intermedia hallan una importante resistencia en ambas capas. La tasa de transferencia del gas es, en general, proporcional a la diferencia entre la concentración existente y la concentración de saturación del gas en la solución. En forma analítica, la relación puede expresarse como (Metcalf y Eddy, 1991):

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_{sat} - C) \quad (2)$$

Donde: C = Concentración del gas a un tiempo t (mg/L), t = Tiempo (s), C<sub>s</sub>= Concentración de saturación del gas (mg/L), K<sub>L</sub>a = Coeficiente de transferencia volumétrico (h<sup>-1</sup>)

Sin embargo, cuando existe aireación y respiración endógena la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_{sat} - C) - \phi o_2 \quad (3)$$

Donde: C = Concentración del gas a un tiempo t (mg/L), t = Tiempo (s), C<sub>s</sub>= Concentración de saturación del gas (mg/L), K<sub>L</sub>a = Coeficiente de transferencia volumétrico (h<sup>-1</sup>) y  $\phi o_2$  = Velocidad de consumo de oxígeno por los organismos.

Cabe mencionar que trabajar con la modelación de los parámetros limitantes al SRA permite conocer desde las distintas formas del comportamiento de un sistema integral de recirculación de agua, y de esta manera complementar la comprensión de la nueva tecnología para el cultivo de trucha con sistemas cerrados alimentados con agua pluvial.

4) Modelación determinística. En los últimos años, surgieron cambios importantes en las teorías y prácticas de diseño de los procesos biológicos de tratamiento de aguas

residuales, constituyendo un parte aguas entre el enfoque clásico, muchas veces empírico, y las tendencias asentadas en la formulación de proyectos de modelos más precisos (Fall, 2007).

En 1982, la IAWQ incentivó la formación de un grupo de estudio internacional encargado de acelerar el desarrollo de la modelación dinámica de las plantas de tratamiento, crear una plataforma comuna consensual y proponer un modelo simple de inicio (“Task Group on Mathematical Modeling for Design and Operation of Activated Sludge Process”). El grupo concentró sus primeros esfuerzos en inventariar los modelos existentes así como los obstáculos para su desarrollo (Fall, 2007).

Por otra parte, existía un gran número de modelos dinámicos, cuya difusión fue obstaculizada por la complejidad, la falta de orden para presentarlos y las limitaciones en el poder de las computadoras. En los años 70, la Universidad de Cap Town (Sudáfrica) fue una de las pioneras de la modelación dinámica con los trabajos del profesor G.V.R. Marais.

Las conclusiones del grupo fueron publicadas en 1987 en un informe que presentaba lo conocido hoy como el Modelo ASM1, modelo dedicado a describir la degradación de materia orgánica, nitrificación y desnitrificación en un proceso de lodos activados (de tipo lodos únicos). Los logros más destacados del grupo fueron un consenso en los procesos biológicos que integran el modelo, la estandarización de los símbolos, la presentación del modelo utilizando una notación matricial, la propuesta de valores de “default” de los parámetros del modelo, la adopción de la DQO y su fraccionamiento para caracterizar las aguas y lodos, un código de programación para el desarrollo futuro de software de modelización (Fall, 2007; Fall, 2003).

Por otro lado, en las últimas cuatro décadas se han desarrollado modelos matemáticos que han servido como herramientas para simular el comportamiento de biopelículas. Los modelos iniciales, en los 70's, describen a la biopelícula en un estado estacionario y uniforme conteniendo un solo tipo de organismos, haciendo énfasis en la transformación bioquímica y el balance de masas de manera unidimensional (Kreft *et al.*, 2001).

Para los 80's se desarrollaron modelos dinámicos que podían representar multisubstratos y multiespecies en las biopelículas (Wanner y Gujer, 1986), sin embargo estos modelos todavía se desenvolvían en una sola dimensión y no describían las características

estructurales de la película microbiana (Noguera *et al.*, 1999). En los 90's, según el desarrollo computacional, modelos en dos y tres dimensiones se desarrollaron, donde incorporan no sólo el balance de masas y la transformación bioquímica, también se estudia la hidrodinámica y la dinámica de poblaciones de los microorganismos contenidos en la película. La diferencia principal entre estos últimos y los modelos de una dimensión estriba en que no se asumen factores como la interacción específica entre los microorganismos (Van Loosdrecht *et al.*, 2002).

En el 2006 se publican, por parte del comité de modelación de biopelícula bajo la responsabilidad de la IAWQ (Wanner *et al.*, 2006), cinco modelos matemáticos que describen los procesos involucrados en el desarrollo de la biopelícula, De los cinco modelos propuestos por Wanner *et al.* (2006), (Wanner y Grujer, 1986; Wanner y Reichert, 1996).

Este método, como ya se mencionó, sirve en la investigación como una herramienta para expresar hipótesis sobre la estructura de la biopelícula, para evaluar datos obtenidos de manera experimental y para determinar valores numéricos de los parámetros cinéticos y las propiedades físicas de la biopelícula. (Wanner *et al.*, 2006).

Plattes *et al.* (2008) describen un modelo cero – dimensional (es decir consideran a la biopelícula y el biofiltro como un solo elemento) utilizado para la simulación de un biorreactor y su aplicación en una planta piloto. Estos autores proponen que el trabajo desarrollado por el equipo de biopelículas de la IWA, ha descrito y desarrollado modelos que tienen una laguna entre la investigación y su aplicación en la ingeniería ambiental, sostienen que el principal factor para que no puedan ser aplicados es la complejidad de los modelos dedicando más atención al micro ambiente y la estructura de la biopelícula que al comportamiento macro cinético del sistema de la biopelícula.

Como mencionan Plattes *et al.* (2008), se ha realizado poca investigación aplicada sobre la modelación de biopelículas, existe una tendencia hacia la descripción de la estructura de las biopelículas (Pérez *et al.*, 2005; Picioreanu *et al.*, 2001; Morgenroth *et al.*, 2004; Noguera y Picioreanu, 2004; Wolf *et al.*, 2007; Picioreanu *et al.*, 2007; Xavier *et al.*, 2005) y no a la simulación de los diferentes procesos de un sistema biológico acoplado a un tren de tratamiento.

Los modelos matemáticos mencionados (tipo regresivo y determinístico) son de alguna manera opuestos pero a la vez se complementan. El regresivo, por lo general la primera opción, se desarrolla de relaciones empíricas del análisis de las observaciones pero con base en la relación causa – efecto (funcionabilidad), estas correlaciones son restringidas a las condiciones experimentales en las que se adquirieron los datos. El segundo tipo de modelación parte del supuesto de conocer los procesos físicos, biológicos y químicos que ocurren en un biofiltro, es decir, parte de las leyes generales de los principios primarios, el desarrollo de estos modelos permite dar solidez a los procesos involucrados y a la vez desarrollar métodos para dar solución a los problemas de una manera ordenada y racional (Picioreanu y Van Loosdrecht, 2003).

La opción de utilizar uno u otro tipo de modelo, o ambos, depende del balance entre que tan precisa se requiere la respuesta y la cantidad de recursos para obtenerla. Para propósitos ingenieriles, los modelos simples (regresivos) son adecuados, con objeto de poder tomar decisiones de diseño seguras, estos modelos describen al biofiltro en un estado estable con biopelículas que tienen un solo tipo de organismos. Para conocer el comportamiento de los diferentes procesos involucrados en la biopelícula es necesario trabajar con modelos matemáticos más sofisticados (Picioreanu y Van Loosdrecht, 2003).

Trabajar con ambos tipos de modelación permite conocer desde dos formas distintas el comportamiento de un biofiltro de película fija, y de esta manera complementar con ambos métodos el diseño de nueva tecnología para el cultivo de trucha con sistemas cerrados alimentados con agua pluvial.

## **CAPÍTULO 3 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

### 3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. JUSTIFICACIÓN

El recurso agua disponible para las actividades acuícolas cada vez es más restringido. Esta actividad económica está sujeta a presiones ambientales y sociales, por lo que cultivos como el de la trucha arco iris se ven amenazados, ya que hoy en día con la tecnología vigente (tradicional) para producir un kilo de carne de trucha es necesario utilizar hasta 150 000 L de agua (Timmons *et al.* 2002).

La importancia del cultivo de la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) en el Estado de México se fundamenta por la producción de alimento nutritivo a bajo costo, la generación de empleos directos e indirectos en el estado en zonas con alto índice de marginación, en municipios como Amanalco de Becerra, Villa del Carbón, Temascaltepec, entre otros. Sin embargo existen diversas zonas en el Estado de México y en el país donde las condiciones del clima permiten el cultivo de esta especie, pero la cantidad y la calidad de agua existente en el lugar no es la suficiente para llevar a cabo el cultivo y a la vez dotar de este líquido a las poblaciones cercanas a las unidades de producción.

Por lo anterior, es necesario un cambio de paradigma, de un modelo de cultivo de producción desligado del ambiente, hacia un modelo donde lo importante es el equilibrio entre la forma de producir y el resultado de la producción, que no dependa al 100% de las fuentes de agua tradicionales como manantiales, arroyos, ríos y presas.

En el marco del proceso de construcción del nuevo paradigma surge la necesidad de contar con tecnología que por un lado sea amigable con el ambiente y por el otro permita obtener resultados adecuados y rentables para el productor y el consumidor. Por lo que este trabajo propone en una primera instancia el desarrollo de nueva tecnología, es decir, implementar en el uso de sistemas de recirculación acuícola la alimentación del agua mediante cosecha de agua pluvial. Lo cual presentará ventajas como bajo consumo de agua, disponibilidad y estabilidad en la calidad y cantidad del recurso agua, menor incidencia de enfermedades, producción de alimento de alto valor proteico en zonas donde antes no se contaba con esta alternativa.

Sin embargo, para que el desarrollo de tecnología tenga un impacto real en la sociedad es necesario conocer a fondo todos los procesos involucrados en esta nueva tecnología. Con

esta información es posible poder establecer las bases de diseño y estar en medida de transferir el desarrollo a los diferentes sectores de la sociedad.

Una forma de conocer y representar de forma simple los complejos procesos de un sistema biológico, como son los que se presentan en el cultivo de la trucha en sistemas cerrados es la modelación matemática, misma que se ha realizado para este cultivo en diferentes regiones del mundo en condiciones benignas para el cultivo.

No obstante que se tienen modelos matemáticos de tipo estadístico o regresivo para representar los procesos involucrados en un sistema de recirculación acuícola, las condiciones imperantes en la región del altiplano de México (altitudes mayores a los 2 500 msnm, temperaturas que oscilan entre los 5 a 23 °C, etc.) hacen necesario que dichos modelos matemáticos se acoplen a esta región. Aún más, los modelos utilizados para representar los procesos que ocurren en los SRA, han sido empíricos y estadísticos por lo que en esta investigación no sólo se pretendió construir los modelos matemáticos tradicionales que nos permitieron conocer más el comportamiento de los procesos en el SRA para la región centro del país, sino también explorar las posibilidades de aplicar modelos más precisos como lo son los determinísticos o dinámicos que estudian los procesos a partir del comportamiento físico, químico y biológico de los parámetros del fenómeno.

Y a su vez sentar bases teórico – prácticas que faciliten el cultivo trutícola en sistemas cerrados para las condiciones que privan en el altiplano mexicano y así preservar bosques y cuerpos de agua.

### **3.2. HIPÓTESIS**

1. El cultivo de trucha arco iris a altas densidades se puede realizar en un sistema de recirculación acuícola alimentado por agua pluvial.
2. El desempeño del biofiltro y la calidad del agua en el sistema son predecibles a través de modelos matemáticos empíricos y de tipo regresivo.

### 3.3. OBJETIVOS

#### 3.3.1. OBJETIVO GENERAL

Modelar matemáticamente el comportamiento de los diferentes procesos biológicos ocurridos en un SRA acoplado a un cultivo de trucha alimentado con cosecha de agua pluvial.

#### 3.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Los objetivos específicos se enlistan de acuerdo con el desarrollo logístico del proyecto de investigación, para dar respuesta al objetivo general y a las hipótesis planteadas.

- I. Determinar las características físico, químicas y biológicas del agua de pluvial colectada.
- II. Adecuar los parámetros de calidad de agua pluvial (N-NH<sub>3</sub>, alcalinidad y pH) a los criterios de producción de trucha arco iris, para que sea posible el desarrollo de un cultivo trutícola.
- III. Diseñar e instalar un sistema “*Estanque de cultivo – Tren de tratamiento para el agua residual acuícola*”, con base en los desarrollos tecnológicos anteriores del prototipo adecuado para el cultivo de *Oncorhynchus mykiss* en el Estado de México.
- IV. Madurar el sistema integral, asegurando el correcto funcionamiento de las unidades del tren de tratamiento.
- V. Evaluar el crecimiento (peso y longitud) de los organismos acuícolas en el sistema integral.
- VI. Evaluar la eficiencia de los principales procesos del tren de tratamiento.
- VII. Modelar matemáticamente los procesos más importantes en el sistema integral de recirculación acuícola.

### 3.4. METAS

- I. Instalar un sistema de almacenamiento y acondicionamiento de agua de lluvia a las características principales de calidad de agua de un cultivo trutícola.
- II. Colectar y acondicionar el agua pluvial con la calidad necesaria para el cultivo de la trucha.
- III. Contar con un sistema integral prototipo optimizado, que permita niveles en la calidad del agua residual tratada suficientes para soportar un cultivo trutícola, bajo un ciclo cerrado de flujo de agua.
- IV. Mantener en un sistema maduro, los niveles de los contaminantes por debajo del nivel tóxico para el cultivo de la trucha arcoíris.
- V. Producir un mínimo de 170 kg de trucha en el sistema prototipo, con peso promedio mínimo de 250 g cada trucha.
- VI. Mantener la eficiencia de remoción de cada parámetro en el tren de tratamiento del sistema prototipo mayor a un 80%.
- VII. Contar con un modelo matemático que describa los procesos limitantes en el biofiltro del tren de tratamiento.
- VIII. Contar con modelos matemáticos que describan los procesos ocurridos en el estanque y en el tren de tratamiento del SRA.

## **CAPÍTULO 4**

# **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### 4. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó con un prototipo ubicado en las instalaciones del Centro Interamericano de Recursos del Agua, el cual consta de un estanque circular con un tren de tratamiento, que reacondiciona el agua.

En el sistema se sembraron 178 organismos de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) con una longitud aproximada de 29 cm y de un peso promedio de 402 g que se llevaron hasta los 34 cm de longitud y 644 g de peso, los cuales fueron donados por la Subdelegación de Pesca del Estado de México y provenientes de sus instalaciones de la unidad Piscícola “El Zarco”. Se propusieron organismos de esta talla para llegar en un periodo de tiempo corto a los picos más altos de producción de residuos por parte de los peces.

El tiempo de cultivo fue de 58 días; y contó con un incrementó de biomasa, partiendo de 6,61 kg/m<sup>3</sup> hasta llegar a 17,24 kg/m<sup>3</sup>. En el día 59, se tuvo una falta de energía eléctrica y una falla en el sistema de contingencias, lo que llevó a la mortalidad total de los organismos. La biomasa se repuso 27 días después con 418 organismos de la misma especie, provenientes de la granja trutícola “Llano del Rayo” ubicada en Temoaya, Estado de México, con una longitud y peso promedio de 19 cm y 287 g, respectivamente, es decir 13,13 kg/m<sup>3</sup>.

En el presente estudio se contó con agua cosechada de lluvia, colectada dentro de las instalaciones universitarias y cuyas características fisicoquímicas se determinaron para conocer y, en su caso, corregir las condiciones iniciales del agua en el sistema. Cabe aclarar que el sistema de captación de lluvia fue construido previamente por el Centro Interamericano de Recursos del Agua.

El agua empleada fue la suficiente para llenar una vez el prototipo y para reponer el agua debido a pérdidas por evaporación, drenado de lodos, toma de muestras, operación del tren de tratamiento y posibles fugas. De acuerdo con investigaciones anteriores (García, 2008) este volumen es estimado en aproximadamente el 2 % del total del sistema. En la figura 10 se esquematiza el método seguido.

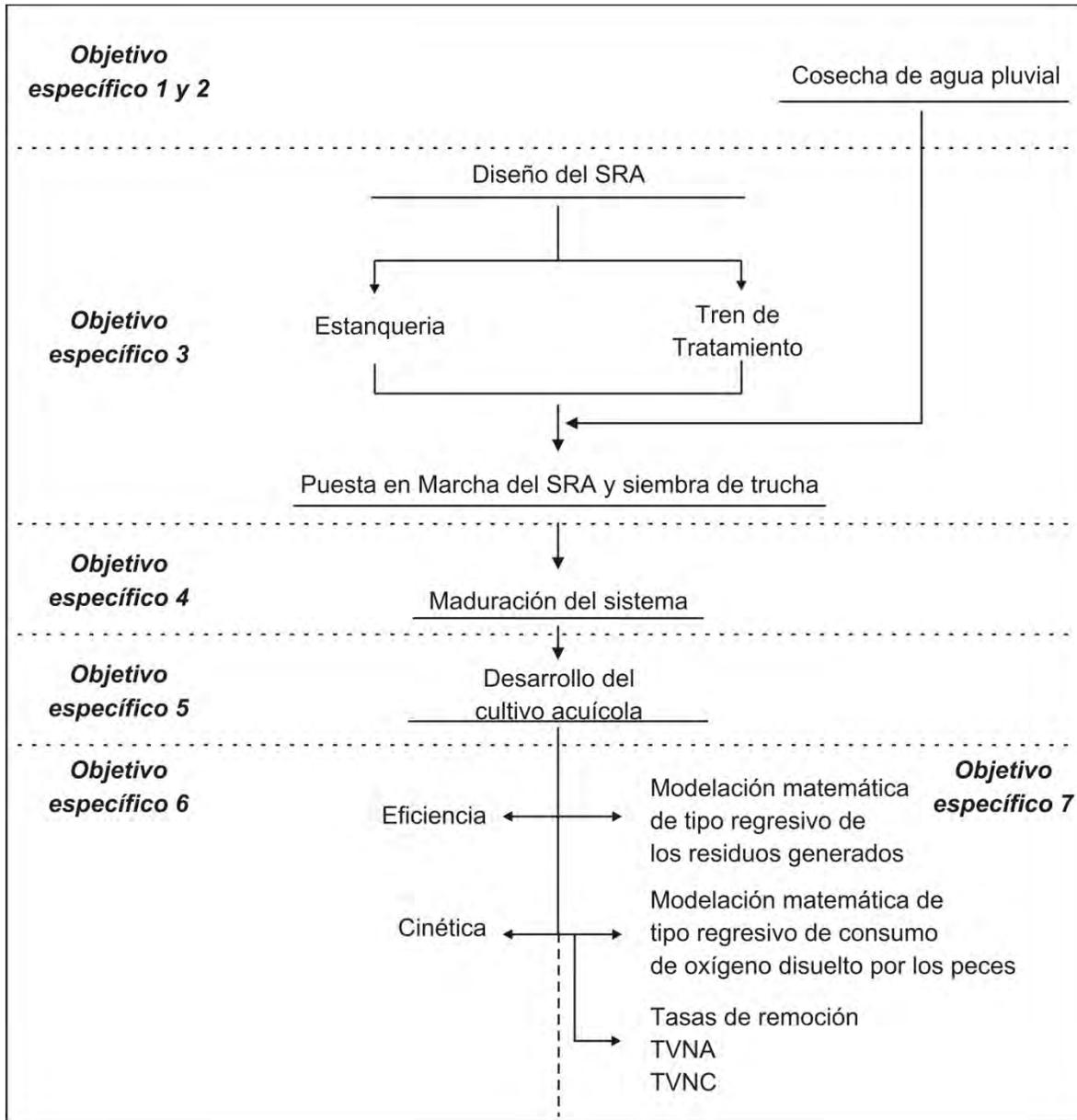


Figura 10. Esquema de la metodología propuesta. TVNA: Tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal, TVNC Tasa volumétrica de conversión de nitritos.

#### 4.1. COSECHA DE AGUA PLUVIAL

De acuerdo con la estación meteorológica del CIRA (19° 23' 58.5"N, 99° 42' 50.3"W), la precipitación anual promedio en el sitio de estudio es de 818 mm (EMCIRA, 2006). El agua pluvial se cosechó del edificio del Laboratorio de Modelos Hidráulicos del CIRA, el cual cuenta con aproximadamente 1 000,00 m<sup>2</sup> de techo preparado para esta función. El volumen potencial de colecta de agua por lo tanto fue de 800,00 m<sup>3</sup>. Para este trabajo, el

agua cosechada se almacenó en tres tinacos con un volumen total de 33,00 m<sup>3</sup>, para abastecer el SRA durante el cultivo, se continuó cosechando agua pluvial para recuperar niveles de almacenamiento según lo permitía el clima en la zona. El almacenaje se hizo en reservorios de plástico que no permitieron el paso de luz hacia el interior del mismo, lo que evitó el crecimiento de microalgas y la modificación de la calidad del agua pluvial, dos reservorios de 5 m<sup>3</sup> de capacidad y uno de 22 m<sup>3</sup> (figura 11). La cosecha se inició en el mes de septiembre. Una vez que se contó con los reservorios y se instaló el desvío de agua pluvial del desagüe del techo hacia los tinacos. Cabe señalar que los reservorios de 5 m<sup>3</sup> se alimentaron de una sola bajada de agua pluvial cada uno y el reservorio de 22 m<sup>3</sup> se alimentó de 3 bajadas, lo que permitió aprovechar todo el techo del laboratorio. Se inició con el almacenamiento de agua pluvial después de las primeras tres lluvias intensas de la temporada (Lee *et al.*, 2004; Taylor *et al.*, 2005).



**Figura 11. Reservorios de almacenamiento de agua pluvial**

El tiempo de cosecha fue de un mes, no obstante los reservorios de almacenamiento se llenaron a dos terceras partes en una semana. En el transcurso del cultivo el agua pluvial utilizada se repuso con lluvias en toda la temporada. El agua pluvial almacenada, se caracterizó de acuerdo con los parámetros más importantes para el cultivo de la trucha.

La adecuación del agua pluvial almacenada se realizó mediante la adición de sales alcalinas, en cantidades que se establecieron según los valores de pH, alcalinidad, acidez y los iones determinados (Ca, K, Mn, Na, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Fe y Mg), mediante el programa AgrInc – Agua V.2. (Agresividad e Incrustabilidad del Agua, Método de MOJMIR MACH; Trujillo y Martínez, 2005). Para disminuir la concentración de N-NH<sub>3</sub> disuelto en el agua pluvial, ésta se ingreso en el sistema al inicio del tren de tratamiento para que pasara a través del biofiltro, reduciendo los valores de esta especie nitrogenada hasta niveles propios del cultivo de la trucha.

#### **4.2. DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA PROTOTIPO**

El sistema prototipo se construyó en la playa del laboratorio de modelos hidráulicos (figura 12), se alimentó de un reservorio de agua de 5 m<sup>3</sup>, el cual brindó de manera constante 2,1 L/s al percolador de forma periférica y permitiendo que todo el empaque sea humedecido. El abastecimiento de agua a este reservorio tuvo su origen en el tanque de agua cruda, la cual fue suministrada con ayuda de una bomba sumergible de un caballo de fuerza (figura 13).



Figura 12. Prototipo construido en la playa de modelos a escala reducida del laboratorio de modelos hidráulicos.

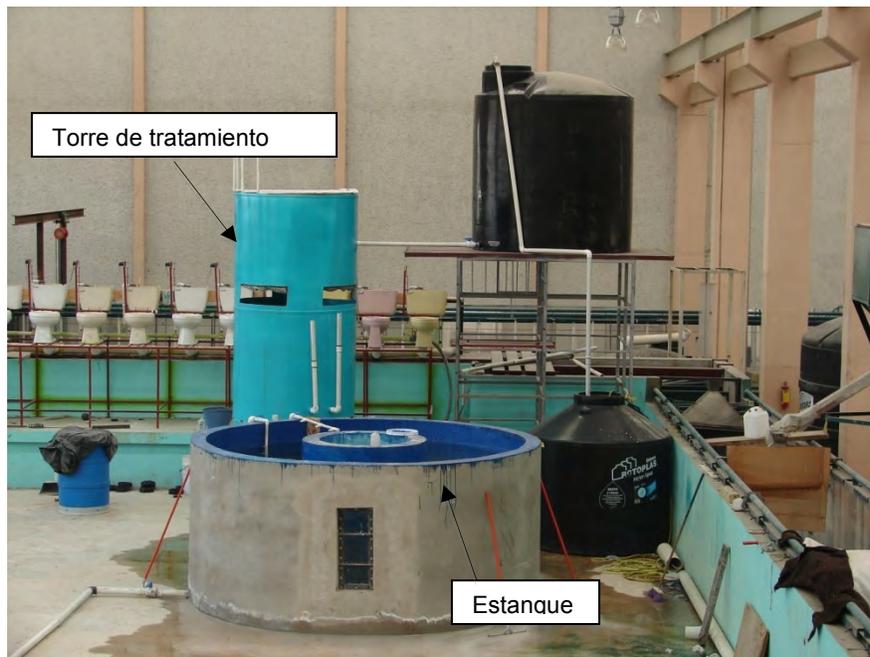


Figura 13. Sistema de recirculación acuícola prototipo utilizado

#### 4.2.1. ESTANQUERÍA

El estanque de cultivo en el que se llevó a cabo el trabajo fue circular, de 3,0 m de diámetro, con una capacidad de 7,06 m<sup>3</sup>, con un volumen efectivo para peces de 6,27 m<sup>3</sup> (figura 14), construido con tabique rojo recocido y terminado con una capa de fibra de vidrio. Su interior se pintó de color azul, ya que este color es el menos estresante para la trucha (Papoutsoglou *et al.*, 2005). La entrada de agua se realizó de forma periférica induciendo un flujo vorticoso con el fin de mantener con buena salud a los peces y de conducir los sólidos al centro y al fondo del estanque, esto, según las recomendaciones de García (2008) y de Timmons *et al.* (1998). El efluente del estanque se encontró en la parte central, los sólidos fueron capturados y separados mediante un sedimentador en el centro del estanque, el caudal fue conducido del sedimentador al resto del sistema de tratamiento para su reacondicionamiento, los lodos residuales provenientes del sedimentador se purgaron diariamente.

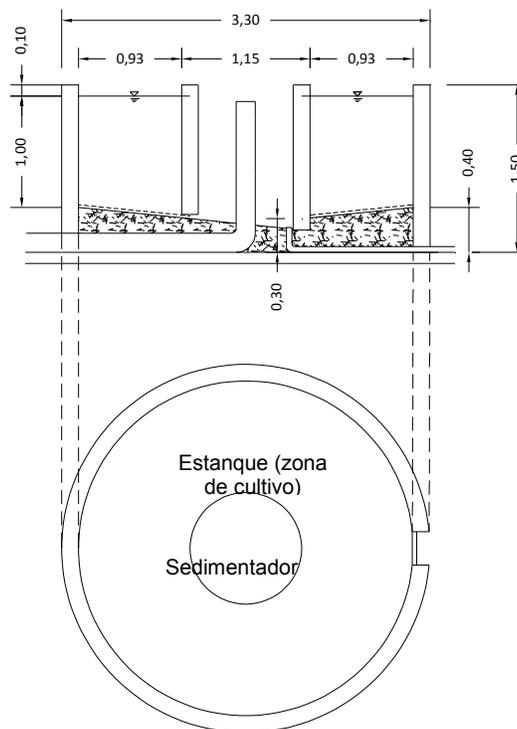


Figura 14. Vista en planta y corte transversal del estanque y sedimentador (cotas en metros).

Una característica importante en el diseño del estanque es que al centro, como se mencionó anteriormente, se contó con un sedimentador para remover los sólidos generados y que a su vez permitió en la zona de cultivo un flujo uniforme (figura 15).



Figura 15. Estanque y sedimentador

#### 4.2.2. TREN DE TRATAMIENTO

El tren de tratamiento se compuso de tres unidades, sedimentador (ubicado en el centro del estanque), percolador y filtro descendente de arena. Esta configuración de biofiltro y filtro de arena ha sido estudiada en casos anteriores con éxito (García, 2008; Gallego, 2004; Díaz *et al.*, 2000).

El sedimentador tuvo como objeto la remoción de los sólidos suspendidos que se encuentran en el caudal de entrada al tren de tratamiento (Malone y Pfeiffer, 2006). Como biofiltro, en el tren de tratamiento, se contó con un filtro percolador con una estructura de distribución de agua para que llegue al empaque de manera uniforme el líquido, las dimensiones principales de este biofiltro son: 1,34 m de diámetro y 0,80 m de altura de empaque. La memoria de cálculo del filtro percolador se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Memoria de cálculo del biofiltro (Tomado de Wheaton *et al.*, 2000)

<p>Paso 1. Oxígeno disuelto requerido</p> $R_{OD} = a_{OD} \cdot r_{ali} \cdot \rho \cdot V_E$ $R_{OD} = 0,25 \frac{KgdeO_2}{Kgdealimento} \cdot 0,02 \frac{Kgdealimento}{Kgdepez \cdot día} \cdot 25 \frac{Kgdepez}{m^3} \cdot 7,1m^3$ $R_{OD} = 0,88 \frac{Kg de O_2}{día}$	<p><math>R_{OD}</math>=Requerimiento de oxígeno.</p> <p><math>a_{DO}</math>= Demanda de oxígeno (0,25 Kg O<sub>2</sub>/Kg de alimento)</p> <p><math>r_{ali}</math>=Tasa de alimentación (2%)</p> <p><math>\rho</math>=densidad de siembra (25Kg de trucha/m<sup>3</sup>)</p> <p><math>V_E</math>=Volumen del estanque</p>
<p>Paso 2. Caudal de diseño requerido de acuerdo a la demanda de oxígeno</p> $Q_D = \frac{R_{OD}}{OD_I - OD_S} = \frac{0,88 \frac{Kg de O_2}{día}}{(7,9 - 5) \frac{mg}{L}} \cdot \frac{día}{1400min} \cdot \frac{1000000mg}{kg}$ $Q_D = \frac{210L}{min} = \frac{3,5L}{s} = \frac{302,4m^3}{día}$	<p><math>P_{Am}</math>=Producción de nitrógeno amoniacal por peces</p> <p><math>a_{Am}</math>= Producción de nitrógeno amoniacal (0,03Kg nitrógeno amoniacal/kg de alimento)</p> <p><math>R_{ali}</math>=Alimento total diario</p>
<p>Paso 3. Producción de nitrógeno amoniacal por los peces</p> $P_{Am} = a_{Am} \cdot R_{Ali}$ $P_{Am} = \frac{0,03Kg_{Am}}{Kg alim} \cdot 3,5 \frac{Kg alim}{día}$ $P_{Am} = 0,105 \frac{Kg_{Am}}{día}$	<p><math>A_{Am}</math>= Área superficial requerida para remover la producción de nitrógeno amoniacal</p> <p>TAA=Tasa aérea de remoción de nitrógeno amoniacal (0,25g de nitrógeno amoniacal/m<sup>2</sup> día)</p>
<p>Paso 4. Área superficial requerida para remover la producción de nitrógeno amoniacal</p> $A_{Am} = \frac{P_{AM}}{TAA} = \frac{0,105 \frac{Kg_{Am}}{día} \cdot \frac{1000g}{Kg}}{0,25 \frac{g de N - NH_3}{m^2 \cdot día}}$ $A_{Am} = 420m^2$	<p><math>V_{Am}</math>= Volumen del empaque</p> <p>ASE=Área superficial específica (414m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)</p> <p><math>A_t</math>=Área transversal</p> <p>CH=Carga hidráulica (212m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</p>

<p>Paso 5. Estimación del volumen del empaque con base en el área superficial específica</p> $V_{Am} = \frac{A_{AM}}{ASE} = \frac{420m^2}{414 \frac{m^2}{m^3}} = 1,015m^3$ <p>Paso 6. Área transversal</p> $A_t = \frac{Q_D}{CH} = \frac{302,4 \frac{m^3}{día}}{212 \frac{m^3}{m^2}} = 1,4m^2$ $D = \sqrt{\frac{4A_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,4m^2}{\pi}} = 1,34m \cong 1,35m$ <p>Paso 7. Altura del empaque</p> $H = \frac{V_{Am}}{A} = \frac{1,015m^3}{1,4m^2} = 0,73m \cong 0,80m$	<p>D=Diámetro del biofiltro</p> <p>H=Altura del empaque en el biofiltro</p>
---	---

El empaque utilizado fue manguera plástica corrugada con una superficie específica de contacto de  $414 \text{ m}^2/\text{m}^3$  (Gallego, 2004) (figura 16).



Figura 16. Empaque utilizado en el biofiltro (poliducto flexible)

Después del biofiltro, el caudal ingresó a un filtro de arena descendente cuyo propósito fue eliminar los sólidos que ingresaron al biofiltro y aquellos que se generaron en el mismo. Las dimensiones de esta unidad fueron: diámetro de 1,29 m y altura de 1,5 m. En la tabla 7 se muestra la memoria de cálculo del filtro lento de arena.

Tabla 7. Memoria de cálculo del filtro de arena ascendente (García, 1999)

<p>Área superficial del filtro:</p> $A_S = \frac{Q_D}{C_H} = \frac{302,4 \text{ m}^3/\text{d}}{230 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}} = 1,314 \text{ m}^2$ <p>Diámetro del filtro:</p> $D = \sqrt{\frac{4A_S}{\pi}} = \sqrt{\frac{(4)(1,314 \text{ m}^2)}{\pi}} = 1,29 \text{ m}$ <p>Soporte de grava:</p> <p>Según lo recomendado por Fall (2000) y García (2000) se diseñó el filtro de arena con un soporte de grava de cinco diferentes tamaños, cada soporte tiene una altura de 0,05 m:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Grava tamizada de 19,05 mm de diámetro</li> <li>2. Grava tamizada de 12,7 mm de diámetro</li> <li>3. Grava tamizada se 6,35 mm de diámetro</li> <li>4. Grava tamizada de 3,18 mm de diámetro</li> <li>5. Grava tamizada de 2,57 mm de diámetro</li> </ol> <p>La altura de la columna de arena se tomó de lo recomendado por Metcalf y Eddy (1991) como valor típico para filtros convencionales de un solo medio.</p> <p>H = 0,45 m</p> <p>Se consideró una altura de 0,45 m para evitar la fluidización de la arena y un bordo libre de 0,10 m.</p> <p>La altura total del filtro de arena es: H = 1,50m</p> <p>Las características del empaque del filtro de arena son diámetro efectivo del grano (<math>D_{10}</math>) de 0,36 mm, coeficiente de uniformidad (<math>D_{60}/D_{10}</math>) de 1,47</p>	<p>CH = 230 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> d</p> <p>Q<sub>D</sub> = 3,5L/s = 302,4m<sup>3</sup>/d</p> <p>Se considera un falso fondo de 0,15 m.</p> <p>AS = Área superficial</p> <p>D = Diámetro</p> <p>H = Altura del filtro</p>
--	--

Al final de los procesos, el caudal ingresó al estanque donde posteriormente regresó al inicio del tren de tratamiento (sedimentador). El agua proveniente del sedimentador se almacenó en un reservorio de agua cruda de 2,0 m<sup>3</sup> donde fue bombeado hasta el reservorio de alimentación de agua al sistema de cultivo.

El tren de tratamiento se configuró en forma de torre para ahorrar espacio y material de construcción a excepción del sedimentador que se encuentra al centro del estanque (figura 17). Se verificó que las pérdidas de carga estimadas según Gallego (2004) entre el percolador y el filtro de arena (0,94 m) no se incrementasen. Se destaca la presencia de

una ventana en material transparente de 0,30 m de ancho y 0,90 m de alto ubicada en el estanque para observar la conducta de los peces (figura 18).

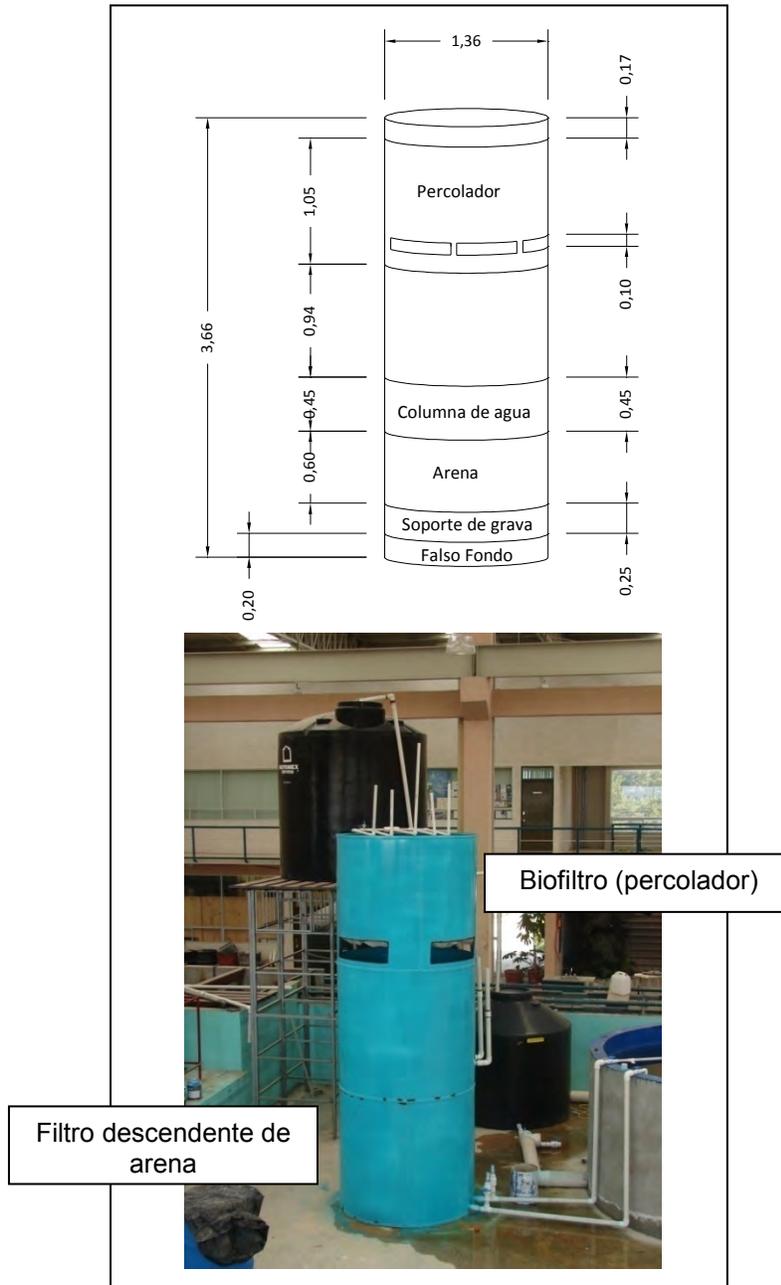


Figura 17. Diseño de la torre de tratamiento (cotas en metros)

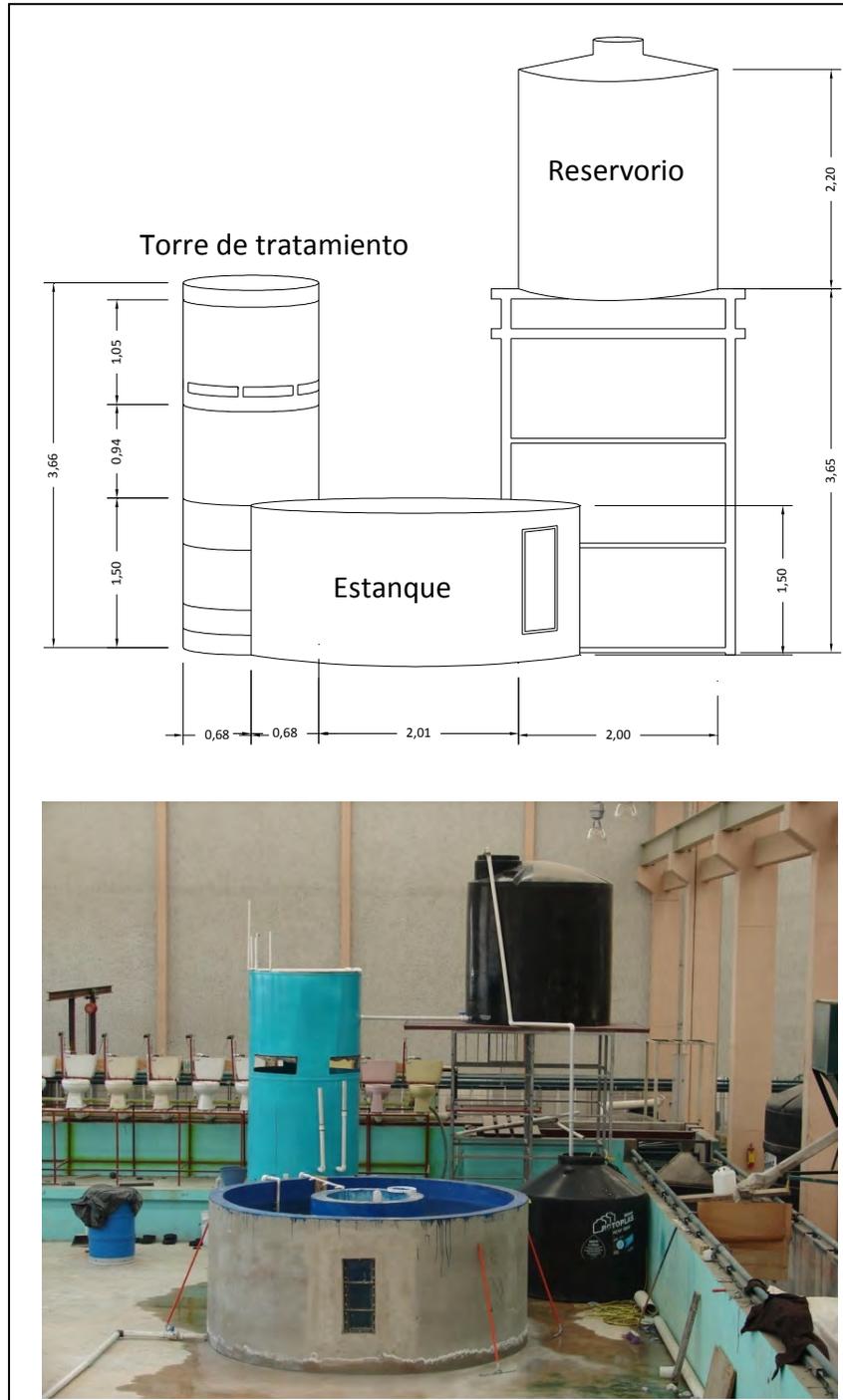


Figura 18. Esquema isométrico sistema prototipo (cotas en metros)

#### 4.3. MADURACIÓN DEL SISTEMA

Para que un sistema de biofiltración remueva las especies nitrogenadas tóxicas para los peces en cultivo, el empaque debe ser poblado por una comunidad de bacterias especializadas que oxiden los nutrientes disueltos en el agua. Se consideró pseudo –

maduro el biofiltro, una vez sembrados los organismos y cuando la concentración de nitrógeno amoniacal total en el efluente del estanque fue constante por debajo de 0,2 mg N-NH<sub>3</sub>/L (Colt *et al.*, 2006).

En el presente trabajo se emplearon, para la maduración del sistema, 178 organismos de la especie *Oncorhynchus mykiss* (trucha arco iris) con una longitud promedio de 29 cm y un peso promedio de 402 g.

#### **4.4. CULTIVO ACUÍCOLA**

Los organismos se alimentaron con pellet extruido de 5,5 mm de la marca “El Pedregal”, de acuerdo con las especificaciones del fabricante (Pedregal, 2005). La alimentación se hizo de forma manual con la técnica del boleó, es decir, se esparció el alimento en toda la superficie del estanque describiendo una media luna en el lance del mismo. Se registró diariamente la cantidad de alimento suministrado al cultivo.

El cultivo de los peces se efectuó durante 150 días. La evaluación del cultivo se llevó a cabo con un seguimiento diario de la mortalidad, un análisis quincenal de parámetros biométricos (longitud y peso), un análisis de salud de los organismos y observaciones de conductas anormales de los peces en el estanque.

Para las mediciones biométricas de los organismos se utilizaron dos tipos de métodos de muestreo; primero, uno tipo sistemático, cada 15 días, iniciando el 15<sup>vo</sup> día a partir de la siembra de los organismos. Segundo, para tomar la muestra de organismos de los estanques, se siguió un muestreo aleatorio simple.

En la tabla 8, se observa el tamaño de muestra estimada previo a la fase experimental con un intervalo de confianza  $(1 - \alpha)$  de 95 % y una precisión del 6,5 %, sin embargo la población real que se tuvo en el estanque fue menor a la estimada y al mismo tiempo el tamaño de muestra se redujo para asegurar una precisión de 6,5 %. Al iniciar los muestreos se determinó usar un tamaño de muestra de 50 organismos debido al estrés ocasionado a la población cuando eran capturados los animales por lo que la precisión dada por el tamaño de muestra varió conforme a la población.

**Tabla 8. Tamaño de la muestra de acuerdo a la población de cada estrato**

Tiempo (días)	Población (individuos)		Tamaño de la muestra (individuos)			Precisión
	Estimada	Real	Estimada a 6.5% de precisión	Real a 6.5% de precisión	Llevada acabo	
0 - 15	193	102	105	71	48	10.50
16 - 30	257	102	121	71	50	10.10
31 - 45	322	178	134	100	55	11.10
46 - 60	386	168	144	97	168	-
61 - 75	450	441	152	151	50	13.10
76 - 90	515	396	158	145	65	11.20
91 - 105	579	390	164	144	47	13.50
106 - 120	643	384	168	144	50	13.00
121 -135	708	382	173	143	50	13.00
136 - 150	772	382	176	143	382	-
Nivel de confianza ( $\alpha-1$ ) de 95%						

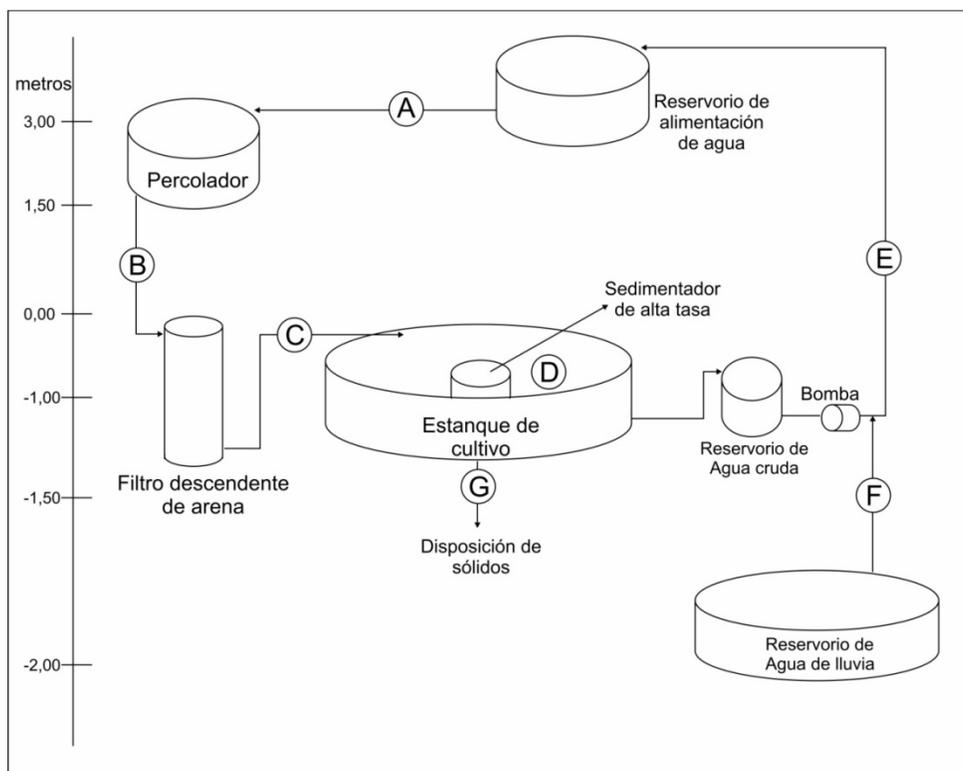
#### **4.5. EFICIENCIA DEL TREN DE TRATAMIENTO Y EVALUACIÓN DE TASA DE REMOCIÓN**

Para conocer la eficiencia del sistema se analizaron los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, alcalinidad total, acidez y sólidos suspendidos totales (SST), en laboratorio; oxígeno disuelto (OD), temperatura y pH *in situ*. El muestreo de los parámetros que se realizó *in situ* fue de tipo sistemático, de manera diaria entre las 7:00 y 8:00 horas para evaluar las condiciones más críticas de los mismos.

En cuanto a la obtención de los valores de los parámetros de nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, DBO<sub>5</sub>, DQO, alcalinidad, acidez y sólidos suspendidos totales, se efectuó mediante un muestreo aleatorio estratificado, lo que dio estimaciones más precisas (con menor varianza) para toda la población (Lohr, 2000), tomando como estratos los cambios de la biomasa, dos días por semana y con un tamaño de muestra de 67 mediciones, lo que permitió tener una precisión del 12,5% con un nivel de confianza (1 –  $\alpha$ ) de 95 %. No obstante lo planeado, debido a las fallas de energía eléctrica el tiempo de cultivo se redujo de 150 a 121 días efectivos y considerando que el muestreo se empezó después de que se tuviera un sistema maduro se realizaron 28 muestreos en la fase experimental lo que llevó a tener una precisión del 15 % con un nivel de confianza (1 –  $\alpha$ ) de 95 %. Para evitar errores por posibles comportamientos cíclicos en el muestreo sistemático, las muestras se

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

tomaron aleatoriamente a lo largo del día. Para la medición y determinación de los parámetros se tomaron en los puntos de muestreo identificados (figura 19) de acuerdo con cada proceso precedente o posterior al punto de muestreo (tabla 9).



**Figura 19. Puntos de muestreo en el sistema (cotas en metros)**

**Tabla 9. Parámetros analizados en cada punto de muestreo**

Puntos de muestreo	A	B	C	D	E	F	G
Parámetros	( <i>In situ</i> ) OD pH Temperatura						
	(Laboratorio) DQO <sub>T</sub> DBO <sub>5</sub> N-NH <sub>3</sub> N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Alcalinidad SST	(Laboratorio) DQO <sub>T</sub> DBO <sub>5</sub> N-NH <sub>3</sub> N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Alcalinidad SST	(Laboratorio) DQO <sub>T</sub> DBO <sub>5</sub> N-NH <sub>3</sub> N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Alcalinidad SST	(Laboratorio) DQO <sub>T</sub> DBO <sub>5</sub> N-NH <sub>3</sub> N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Alcalinidad SST	(Laboratorio) DQO <sub>T</sub> DBO <sub>5</sub> N-NH <sub>3</sub> N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Alcalinidad SST	(Laboratorio) DQO <sub>T</sub> DBO <sub>5</sub> N-NH <sub>3</sub> N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Alcalinidad SST	(Laboratorio) DQO <sub>T</sub> DBO <sub>5</sub> N-NH <sub>3</sub> N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Alcalinidad SST

La periodicidad de muestreo para los parámetros medidos *in situ* fue diaria. Los parámetros determinados en laboratorio se realizaron dos veces por semana para los puntos de muestreo A, B, C, D, E y G, con excepción de la DBO<sub>5</sub> que se determinó cada 15 días. El punto F se muestreo al inicio del cultivo. La información adquirida se ordenó y se efectuó un análisis de boxplot para analizar la posibilidad de existencia de datos aberrantes entre los resultados y, en su caso, revisar, corregir o eliminar.

Para determinar los estimadores estadísticos de las concentraciones de los parámetros en estudio con un muestreo aleatorio estratificado, la información se dividió en cinco estratos con base en la biomasa obtenida en el estanque. En las tabla 10 y 11 se describen los cinco estratos utilizados, la población de cada uno ( $N_h$ ), las observaciones de las unidades de población en el estrato ( $n_h$ ), el tiempo de cultivo en cada estrato, con esta información se determino el promedio de los parámetros de calidad del agua en cada punto de muestreo por cada estrato y el promedio de la población con su varianza.

Tabla 10. Definición de estratos para la determinación de los estimadores estadísticos

Estrato	Biomasa (kg)			Días	$N_h$ (kg)	$n_h$ (kg)
	Inicial	Final	Incremento			
1	99,46	108,6	9,14	18	108,60	108
2	112,07	121,03	8,96	11	121,03	81
3	121,63	130,21	8,58	18	130,21	77
4	130,64	155,12	24,48	16	155,12	92
5	156,52	180,42	23,9	17	180,21	132

Tabla 11. Estimadores estadísticos de la teoría del muestreo estratificado (Lohr, 2000)

Promedio de cada estrato	Varianza de cada estrato	Población del estrato
$\bar{y}_h = \frac{\sum_{j \in S_h} y_{hj}}{n_h}$	$s_h^2 = \sum_{j \in S_h} \frac{(y_{hj} - \bar{y}_h)^2}{n_h - 1}$	$\hat{t}_h = \frac{N_h}{n_h} \sum_{j \in S_h} y_{hj} = N_h \bar{y}_h$
Promedio de toda la población	Varianza de la población	Población
$\bar{y}_U = \bar{y}_{est} = \frac{\hat{t}_{est}}{N}$	$\hat{V}(\bar{y}_{est}) = \sum_{h=1}^H \left(1 - \frac{n_h}{N_h}\right) \left(\frac{N_h}{n_h}\right)^2 \frac{s_h^2}{n_h}$	$\hat{t}_{est} = \sum_{h=1}^H N_h \bar{y}_h$
Intervalos de confianza del 95%		
$\bar{y}_{est} \pm 1,96 \sqrt{\hat{V}(\bar{y}_{est})}$		

La eficiencia se calculó para cada unidad del tren de tratamiento y de manera global para todo el tren, conforme a la ecuación 2 (García *et al.*, en prensa; García 2008; Gallego 2004).

$$E(\%) = \frac{C_E - C_S}{C_E} 100 \quad (2)$$

Donde: E = Eficiencia (%),  $C_E$  = Concentración de entrada (mg/L),  $C_S$  = Concentración de salida (mg/L).

Se llevó a cabo un análisis de balance de masa para obtener las tasas de remoción o generación de cada unidad del sistema prototipo. Por último, la descripción del desempeño del biofiltro se realizó conforme a los estándares propuestos por Colt *et al.* (2006).

#### **4.6. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS PROCESOS LIMITANTES DEL SRA**

##### **4.6.1. BIOFILTRO**

###### **4.6.1.1. MODELACIÓN DETERMINÍSTICA**

La modelación determinística del biofiltro se propuso realizarse con base en lo reportado por Plattes *et al.* (2008). Es decir, se pretendió utilizar el modelo ASM1 modificado de acuerdo a estos autores, para lo cual, sería necesario determinar la concentración de DQO total y soluble en el influente y efluente del tren de tratamiento, se obtendría también la concentración tanto total como soluble de  $N-NH_3$ ,  $N-NO_2^-$  y  $N-NO_3^-$ , por último se realizaría un análisis de la DBO última a la entrada y salida del tren de tratamiento. Las constantes cinéticas se utilizarían con sus valores estándar reportados por Wanner *et al.* (2006).

Los muestreos se realizarían mediante muestras compuestas, por un periodo de dos semanas de manera diaria tanto a la entrada como salida del filtro biológico.

Una vez adquiridos los datos se procedería a realizar la modelación con ayuda del software AQUASIM y con el modelo propuesto por Wanner y Grujer (1986); Wanner y Reichert (1996) y Wanner *et al.* (2006).

#### 4.6.1.2. MODELACIÓN DE TVNA Y TVCN

Con base en los datos de nitrógeno amoniacal total y  $\text{N-NO}_2^-$  adquiridos según la sección 4.5, se modeló la tasa volumétrica de remoción de nitrógeno amoniacal (TVNA) y la tasa volumétrica de conversión de nitritos (TVCN). Las tasas se determinaron diariamente de acuerdo con el método reportado por Guerdat *et al.* (2010), Malone y Pfeiffer (2006) y Drennan *et al.* (2006).

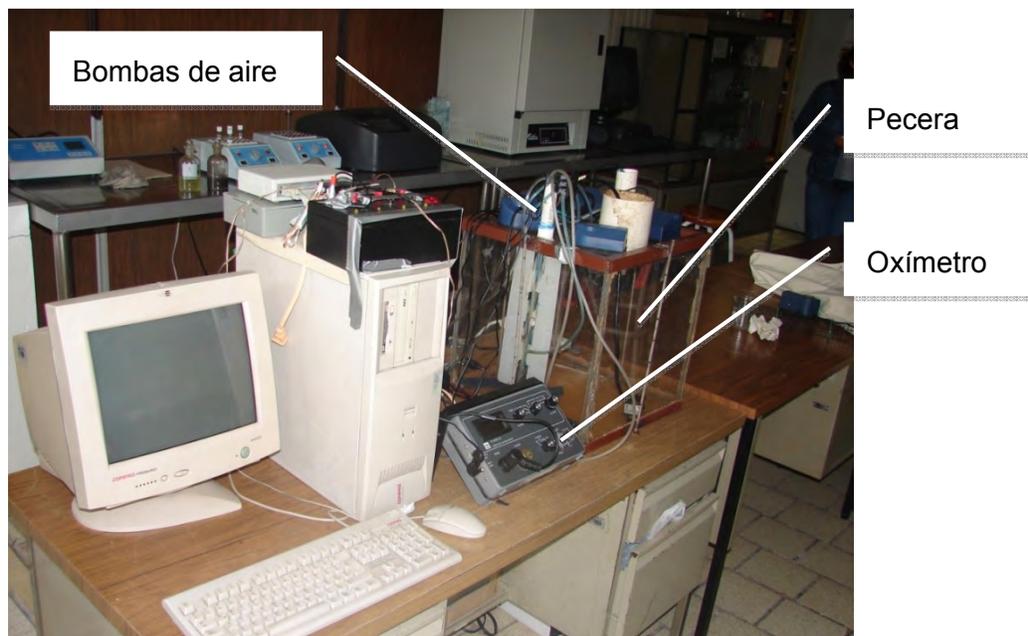
Una vez que se obtuvo el modelo de la tasa de conversión de nitrógeno amoniacal total, se relacionó con la generación de  $\text{N-NH}_3$  y la biomasa para generar un modelo que describa la eficiencia del biofiltro con base en la biomasa de peces en el estanque de cultivo.

#### 4.6.2. CONSUMO DE OXÍGENO DISUELTO POR LOS PECES

Para determinar el consumo de oxígeno disuelto por parte de la trucha se utilizó la teoría de transferencia de gases en el intercambio gas-líquido, es decir, la Teoría de la Doble Capa (Ramírez *et al.*, 2002). El modelo se basa en la existencia de dos capas, una de líquido y otra de gas en la interface gas-líquido. Ambas capas generan una resistencia al paso de moléculas de gas entre las fases líquida y gaseosa.

Por otro lado, método ampliamente utilizado para conocer las velocidades de consumo de oxígeno por organismos acuáticos es la respirometría. En este caso se preparó el sistema de adquisición de datos para un oxímetro de la marca YSI, conectado a un sistema que adquiere datos y los transfiere a una computadora. El control de las bombas de aire fue a través de la computadora. Una hora antes de empezar el experimento se calibró el oxímetro, esto se logró cuando se estabilizó la lectura de porcentaje de saturación al 72 %, según la altitud que prevalece en la zona (figura 20).

Como reactor se utilizó una pecera hermética de 64 L, donde se colocaron organismos de acuerdo con las variables a determinar en cada prueba, según un plan de escrutinio tipo factorial fraccionado clase Plackett – Burman (Wheeler, 1989).



**Figura 20. Respirómetro utilizado para determinar las velocidades de consumo de oxígeno de la trucha**  
El diseño experimental se basó en establecer cómo afectan los principales factores (peso de los peces, densidad de cultivo, temperatura y alimentación) en el consumo de oxígeno en el estanque por parte de los peces, estableciendo 16 pruebas (combinaciones) con dos niveles cada factor (Tabla 12).

**Tabla 12. Valores menores y mayores utilizados en las 16 pruebas de Plackett – Burman**

Factor	Etiqueta	Valor menor (-)	Valor mayor (+)	Unidades
Peso	A	100	350	g
Temperatura	B	13	23	°C
Densidad	D	27	55	kg/m <sup>3</sup>
Alimentación	H	Sin alimentar	30 min después de alimentar	

Las truchas se mantuvieron en el SRA hasta dos horas antes de las pruebas. Se capturaron los organismos suficientes para llegar a la densidad y el peso establecidos (tabla 13). Las mediciones de oxígeno se realizaron después de pasar el periodo de aclimatación al respirómetro (2 h). Las pruebas del factor alimentación con el valor mayor, se iniciaron 2.5 h después de introducir los peces al respirómetro y solamente cuando se observó que las truchas ingerían el alimento 30 min antes de empezar la prueba.

Tabla 13. Diseño de 16 pruebas Plackett – Burman (Wheeler, 1989).

Prueba No.	A	B	D	H	Prueba No.	A	B	D	H
1	-	-	-	-	9	+	+	-	-
2	-	-	-	+	10	+	+	-	+
3	-	-	+	+	11	+	+	+	+
4	-	-	+	-	12	+	+	+	-
5	-	+	+	-	13	+	-	+	-
6	-	+	+	+	14	+	-	+	+
7	-	+	-	+	15	+	-	-	+
8	-	+	-	-	16	+	-	-	-

Una vez que se obtuvo la tasa de consumo de oxígeno disuelto en el agua ( $rO_2$ ) se realizó un análisis de varianza para obtener el porcentaje de impacto de cada uno de los cuatro factores y todas sus posibles interacciones (Wheeler, 1989), mediante la metodología mostrada en la (tabla 14).

Tabla 14. Contrastes definidos por el diseño básico de Plackett – Burman (Wheeler, 1989)

Prueba No.	Contrastes														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
4	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
5	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
6	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
7	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
8	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
9	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
10	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
11	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
13	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
15	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
16	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1

Para obtener el modelo matemático que describió la tasa de consumo de oxígeno en el SRA a 2660 msnm y con base en los factores (peso, temperatura, densidad y alimentación), se construyó un modelo matemático de tipo regresivo lineal múltiple con el programa SPSS v 15.0 (LEAD technologies Inc. Chicago, IL).

#### **4.6.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE TIPO REGRESIVO**

Con base en los datos adquiridos en la sección 4.5 y un previo análisis de boxplot, se modeló la generación de contaminantes por parte de los organismos acuáticos en el estanque.

Para encontrar cada modelo se correlacionaron las diferentes variables del sistema, particularmente, para cada parámetro limitante del mismo y con base en relaciones funcionales entre las variables explicativas y la variable modelada. Se utilizó el coeficiente de Pearson con un nivel de significancia de 0,05 mediante el programa SPSS V 15.0.1 (LEAD Technologies Inc. Chicago, IL).

Finalmente, se establecieron los límites y rangos de aplicación de los modelos encontrados, así como las condiciones específicas de validez de los resultados obtenidos.

## **CAPÍTULO 5**

# **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 COSECHA DE AGUA PLUVIAL

El agua pluvial almacenada se caracterizó de acuerdo con los parámetros más importantes para el cultivo de la trucha, mismos que a continuación se enumeran: DQO, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, oxígeno disuelto (OD), temperatura, pH, sólidos suspendidos, alcalinidad. Así como aquellos parámetros necesarios para establecer un equilibrio de sales en el agua (Loyless y Malone, 1997): acidez, calcio, magnesio, sodio, potasio, manganeso, hierro, sulfatos y cloruros (tabla 15). En este caso existieron parámetros que no se encontraron dentro del intervalo adecuado para el cultivo de la trucha (Blanco, 1995; Klontz, 1991; DOF, 1989), que fueron pH, nitrógeno amoniacal, calcio, alcalinidad y temperatura.

Tabla 15. Caracterización del agua pluvial almacenada (03/11/2008)

Parámetro	Unidades	Valor medido		Intervalo óptimo para el cultivo de la trucha	Referencia
		Aceptable	No aceptable		
OD	(mg/L)	6,6		> 5,0 7,8	Blanco (1995) Timmons <i>et al.</i> (2002) DOF (1989)
DQO <sub>T</sub>	(mg/L)	4,9		< 150	García (2008)
N-NH <sub>3</sub>	(mg/L)		<b>0,92</b>	< 1,0	Timmons <i>et al.</i> (2002)
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	(mg/L)	0,021		< 0,5 < 0,39	Timmons <i>et al.</i> (2002) Russo y Thurston (1991)
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	(mg/L)	1,7		< 1 360	Russo y Thurston (1991)
SST	(mg/L)	14		< 80	Blanco (1995) Timmons <i>et al.</i> (2002)
Ca	(mg/L)		<b>1,41</b>	> 50 4 – 160	Klontz (1991) Timmons <i>et al.</i> (2002)
K	(mg/L)	0,18		< 5	Timmons <i>et al.</i> (2002)
Mn	(mg/L)	0,25		< 0,01	Timmons <i>et al.</i> (2002)
Na	(mg/L)	0,22		< 75	Timmons <i>et al.</i> (2002)
Cl <sup>-</sup>	(mg/L)	2,30		< 250	DOF (1989)
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	(mg/L)	< 5,0		< 50	Timmons <i>et al.</i> (2002)
Fe	(mg/L)	0,14		< 1,0 < 0,15	Klontz (1991) DOF (1989) Timmons <i>et al.</i> (2002)
Mg	(mg/L)	0,19		< 15	Timmons <i>et al.</i> (2002)
pH			<b>5,5</b>	6,7 – 8,5 6,5 – 8,5 6,5 – 8,0	Klontz (1991) Timmons <i>et al.</i> (2002) DOF (1989)
Alcalinidad	(mg/L Ca CO <sub>3</sub> )		<b>3,21</b>	50 – 300	Timmons <i>et al.</i> (2002)
Acidez	(mg/L CaCO <sub>3</sub> )	5,16			
Temperatura	(°C)		<b>17</b>	14 – 16 10 – 15	Timmons <i>et al.</i> (2002) DOF (1989)

La cantidad necesaria de agua de lluvia fue de  $65 \text{ m}^3$  para los 121 días efectivos que duró el cultivo de la trucha en el SRA prototipo. De acuerdo con la estación meteorológica del CIRA ( $19^\circ 23' 5835''\text{N}$ ,  $99^\circ 42' 50,33''\text{W}$ ), la precipitación anual promedio es de 818 mm (EMCIRA, 2006). Para cultivar trucha arco iris en el sistema son necesarios 178,27 L/kg de pez (sección 7.5.1) por lo que para cada kilo de trucha se ocupan como mínimo  $41 \text{ m}^2$  de superficie de colecta de agua de lluvia en esta región, esto es  $0,22 \text{ m}^2/\text{kg}$  de pez.

El origen de las especies nitrogenadas en el agua de lluvia fue, como lo mencionan Evans *et al.* (2006), debido a contaminación del techo del laboratorio por aves, insectos o pequeños mamíferos que defecan o mueren en la superficie que colecta el agua. Para eliminar el problema causado por la contaminación del sistema de cosecha de agua pluvial se eliminó el agua derivada de las primeras lluvias de la temporada o tener un control más estricto (Lee *et al.*, 2004). Sin embargo, aún así se tuvo una concentración de nitrógeno amoniacal en el agua pluvial de  $0,92 \text{ mg N-NH}_3/\text{L}$ , la cual se disminuyó al pasar por el filtro percolador y al filtro de arena.

En cuanto a la temperatura, en el Estado de México se ha observado un desarrollo normal de los organismos con valores superiores a los intervalos recomendados, por lo tanto la temperatura alcanzada por el agua almacenada no se considera un problema para el cultivo (García, 2008; Gallego *et al.*, 2007).

Dos parámetros importantes para el buen funcionamiento de un biofiltro son el pH y la alcalinidad. Wheaton *et al.* (1994) y Eding *et al.* (2006) presentan valores de pH, para una óptima nitrificación, entre 6 y 9. Mencionan que el probable intervalo de operación es de 5 a 10, sin embargo la biopelícula en el percolador se acopla lentamente. Este parámetro fue necesario adecuarlo a los intervalos óptimos.

La alcalinidad es un reactivo para que se lleve adecuadamente oxidación del nitrógeno amoniacal total y de los nitritos, forma parte nutricional de las bacterias nitrificantes, además, provee de un efecto amortiguador necesario para prevenir cambios en el pH (Chen *et al.*, 2006). Para tener una nitrificación mayor a un 80 % en el biofiltro es necesario mantener una concentración de alcalinidad mayor de 1,5 a 2,0 meq/L (Eding *et al.*, 2006), es decir una concentración del reactivo entre 91,5 – 122,0 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ .

Loyless y Malone (1997) proponen el acondicionamiento del agua utilizada en los SRA con bicarbonato de sodio para aumentar la concentración de alcalinidad y mantener los valores de pH lo más cercano a 8.

Para acondicionar el agua de lluvia cosechada y mantener los valores de pH y alcalinidad en equilibrio en la operación del SRA se añadió bicarbonato de sodio, cal y sal marina (Anexo 1), en un orden de 40 g/d, 25 g/d y 40 g/d respectivamente. Una vez que se disolvió la sal, el bicarbonato y la cal en una cubeta de 20 L, la mezcla se añadió en el primer reservorio de agua cruda.

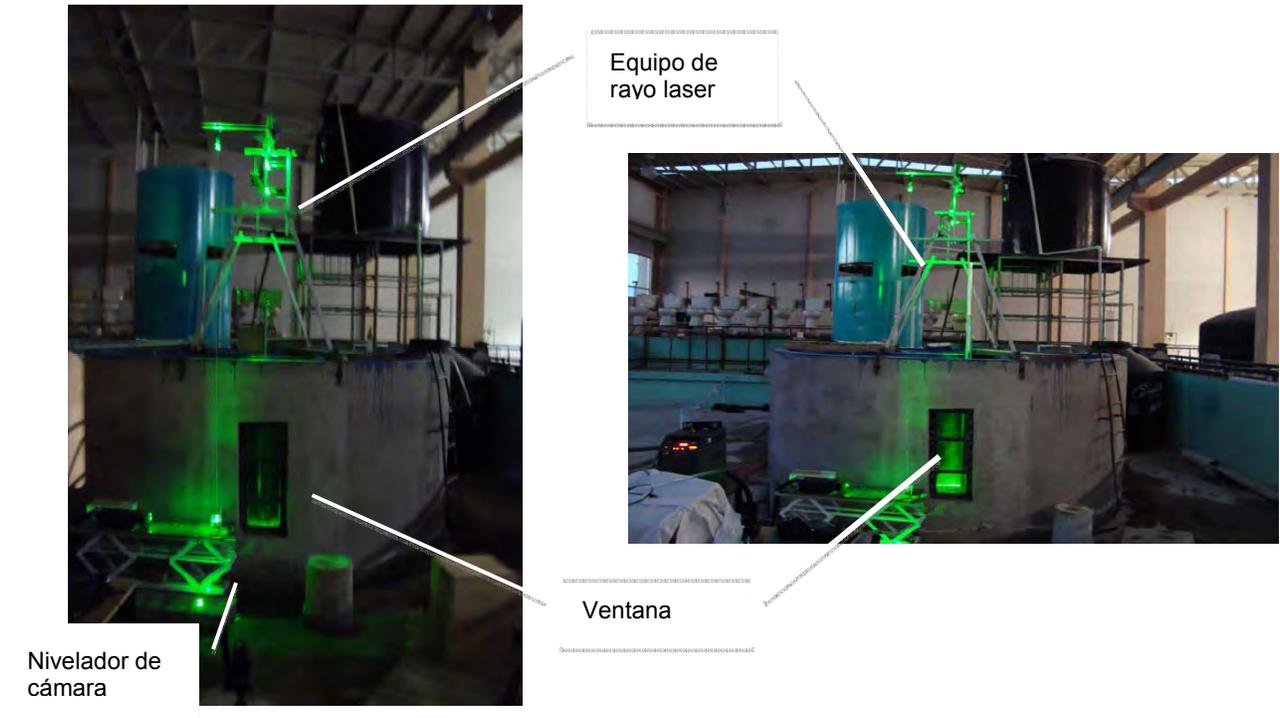
Los valores de estos parámetros se mantuvieron en los intervalos óptimos y de tolerancia para el cultivo de la trucha y para llegar a una nitrificación donde las concentraciones del efluente del tren de tratamiento, con respecto a las especies nitrogenadas, estuvieron en intervalos tolerantes y óptimos.

Al determinar la concentración de alcalinidad en meq/L (menor a 1 meq/L), ésta se mantuvo por debajo de 100 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , recomendado por Eding *et al.* (2006), los efectos ocasionados en la nitrificación se discuten en la sección 5.6.1.

## **5.2. PUESTA EN MARCHA Y ESTABILIZACIÓN DEL SRA**

Una vez construido el sistema, se iniciaron las pruebas para detectar y eliminar fugas en el SRA, se encontró una fuga en el estanque y varias en la torre de tratamiento. Éstas fueron eliminadas iniciando la operación del sistema y su estabilización hidráulica.

En colaboración con investigadores del cuerpo académico de Hidrología del CIRA, se montó un equipo de rayo laser (figura 21) que utilizando la técnica de visualización “velocimetría por seguimiento de partículas” (Particle Tracking Velocimetry, PTV) se ha determinado la velocidad del agua en el estanque con un caudal constante de 2,1 L/s a 0,03 m del perímetro externo del estanque a diferentes profundidades (tabla 16).



**Figura 21. Equipo montado para medir la velocidad del agua en el estanque**

La velocidad de nado recomendada en los estanques circulares para un buen crecimiento de la trucha arco iris es entre 0,5 – 2,0 veces la longitud del pez por segundo (Davison, 1997), cuando se tiene velocidades en este intervalo se mejora la conversión alimenticia y la tasa de crecimiento.

En la tabla 16 se observan velocidades homogéneas desde la superficie hasta el fondo del estanque. Considerando una longitud promedio de  $30,57 \pm 2,4$  cm y una velocidad promedio de  $12,95 \pm 1,82$  cm/s, se tuvo un índice de  $2,3 \pm 0,19$  cm pez/s. Las velocidades alcanzadas fueron superiores al intervalo reportado por Davison (1997), sin embargo la tasa de crecimiento (4,23 g/d) de la trucha fue adecuado para las condiciones imperantes en la región.

Tabla 16. Velocidades promedio del agua a diferentes profundidades

Altura teniendo como base el fondo del estanque	Unidades	Velocidad	Unidades
7	cm	12,83	cm/s
17	cm	15,20	cm/s
28	cm	9,93	cm/s
36	cm	14,56	cm/s
49	cm	11,37	cm/s
60	cm	13,02	cm/s
68	cm	13,71	cm/s
Promedio		12,95	cm/s
Desviación estándar		1,82	cm/s

### 5.3. MADURACIÓN DEL SISTEMA

Para madurar el sistema se sembraron 102 organismos en el SRA, el flujo a través del tren de tratamiento inició el proceso de formación de biopelícula en el filtro percolador y en el filtro de arena. El tiempo de maduración fue de 37 días, momento en el cual la concentración de nitrógeno amoniacal total en el estanque se estabilizó siendo menor a 0,2 mg/L de N-NH<sub>3</sub> (Colt et al., 2006). Cuando el sistema se consideró maduro se sembraron otros 76 organismos para llegar a la biomasa inicial de estudio.

La figura 22 muestra la concentración de N-NH<sub>3</sub> a la salida del tren de tratamiento en función del tiempo, se observa en esta figura un incremento de la concentración de nitrógeno amoniacal total hasta el día 22, después ésta cae a valores menores a 0,2 mg N-NH<sub>3</sub>/L, lo que indicó que se tenía una población aceptable de bacterias en el biofiltro que oxidan los compuestos nitrogenados.

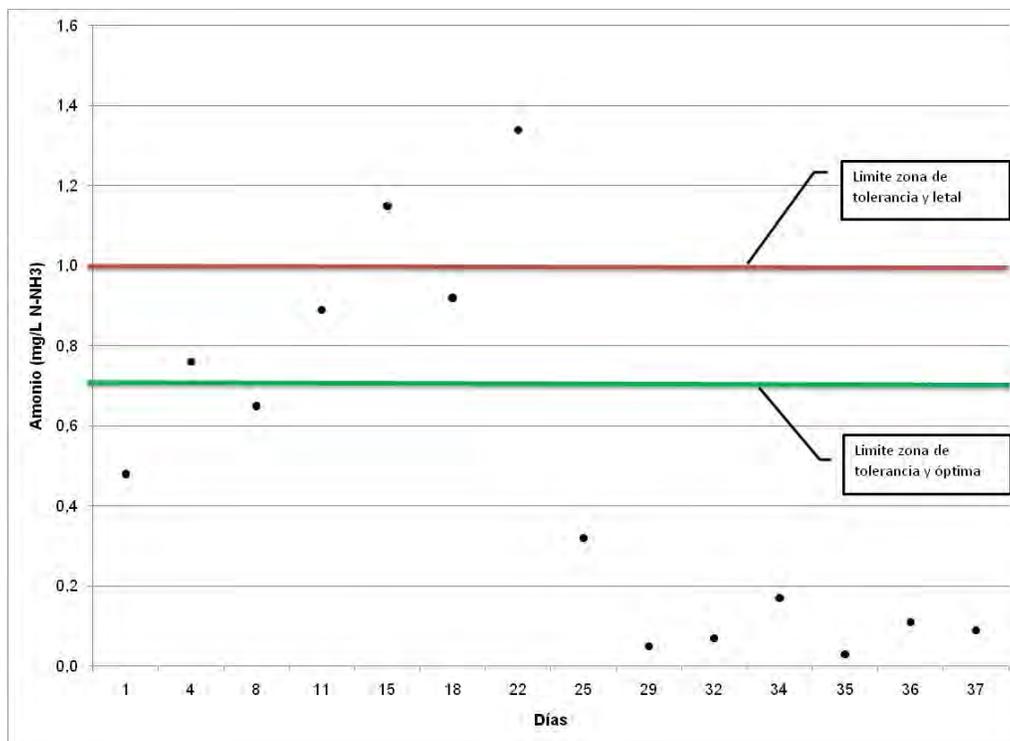


Figura 22. Curva de maduración del tren de tratamiento en la primera etapa

En un segundo momento (día 83) después de una falla en la energía eléctrica y de los sistemas de respaldo, se repuso la biomasa y fue necesario volver a madurar el sistema con 418 organismos con una longitud inicial promedio de 19 cm y un peso inicial promedio de 287 g, el tiempo necesario para este segundo caso para llegar a la maduración fue de 15 días. En la figura 23 se gráfica la concentración de  $N-NH_3$  en el efluente del tren de tratamiento en función del tiempo, el cual fue menor a la primera maduración del sistema probablemente porque ya se tenía latente una población de bacterias en el empaque del biofiltro.

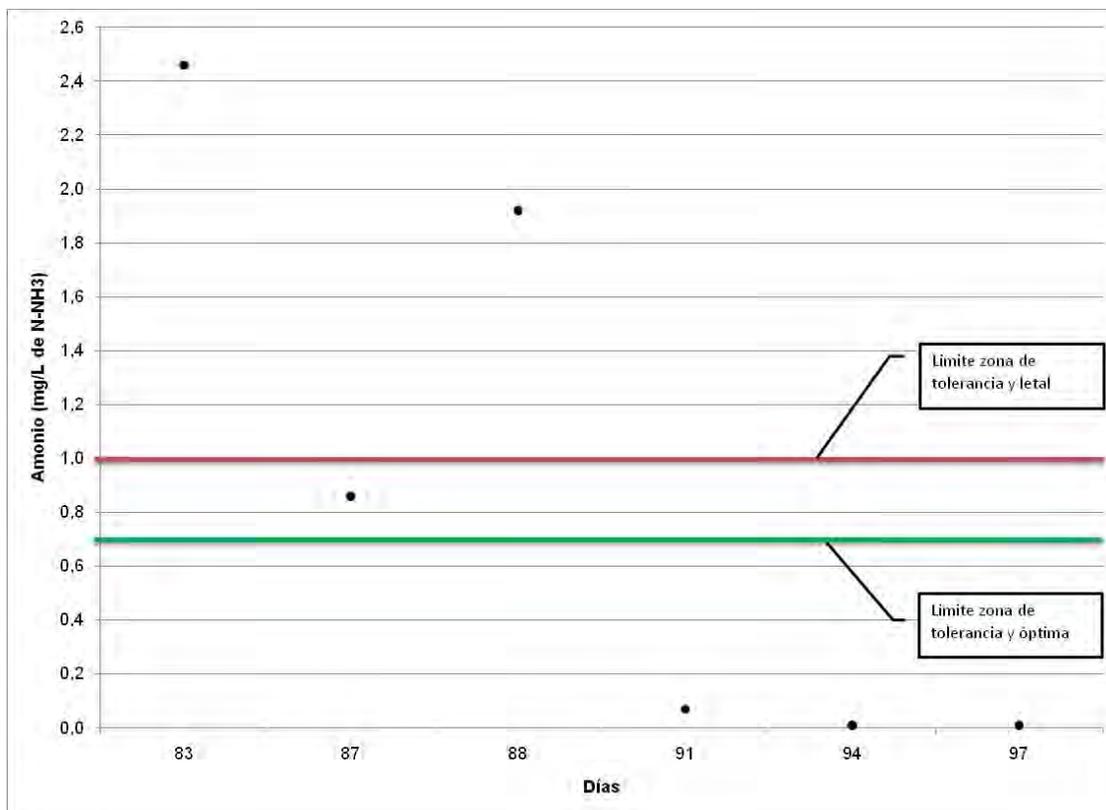


Figura 23. Maduración del tren de tratamiento en la reposición de biomasa

#### 5.4. CULTIVO ACUÍCOLA

La operación del SRA fue realizada en condiciones ambientales y socioeconómicas imperantes en la zona centro de la República Mexicana, en específico en la zona centro sur del Estado de México, con un clima templado frío, una altitud entre los 2 500 y 3 000 msnm y temperaturas entre los 5 y 25°C (INEGI,2004).

El cultivo acuícola, en particular, se desarrolló bajo techo a una altitud de 2 660 msnm, permitiendo temperaturas promedio de 17,42°C durante los primeros 100 días, después la temperatura del agua en el estanque descendió entre los 13 y 15°C a consecuencia del clima frío de otoño – invierno de la zona, en la figura 24 se gráfica la temperatura en el estanque de cultivo en función del tiempo. Sin embargo, el crecimiento observado de los organismos en el sistema (4,23 g/d) fue mayor al reportado por la literatura 0,95 g/d (Blanco, 1995), 0,3 g/d (Klontz, 1991) y 0,8 g/d (Ingram *et al.*, 2002) crecimiento promedio en todo el periodo de cultivo en condiciones ideales.

Para explicar este crecimiento se debe de tomar en cuenta una serie de factores: primero y más probable fue el incremento de caudal en el sistema con respecto a experiencias anteriores (García, 2008; Gallego, 2004); segundo, un manejo del alimento de acuerdo con las recomendaciones del fabricante; tercero, una temperatura mayor a 16°C que aumentó el metabolismo de los peces (Daoud *et al.*, 2007; Cerezo – Valverde *et al.*, 2006; Dong *et al.*, 2006); y cuarto, el aumento de sales al equilibrar el agua pluvial con sal marina, cal y bicarbonato de sodio (Loyless y Malone, 1997).

Ingram *et al.* (2002) en el mismo estudio con trucha cultivada en agua dulce, reportan crecimiento de trucha en agua salobre (16,8 g/L) con una ganancia de 5,2 g/d, similar a lo obtenido en la investigación actual en agua dulce.

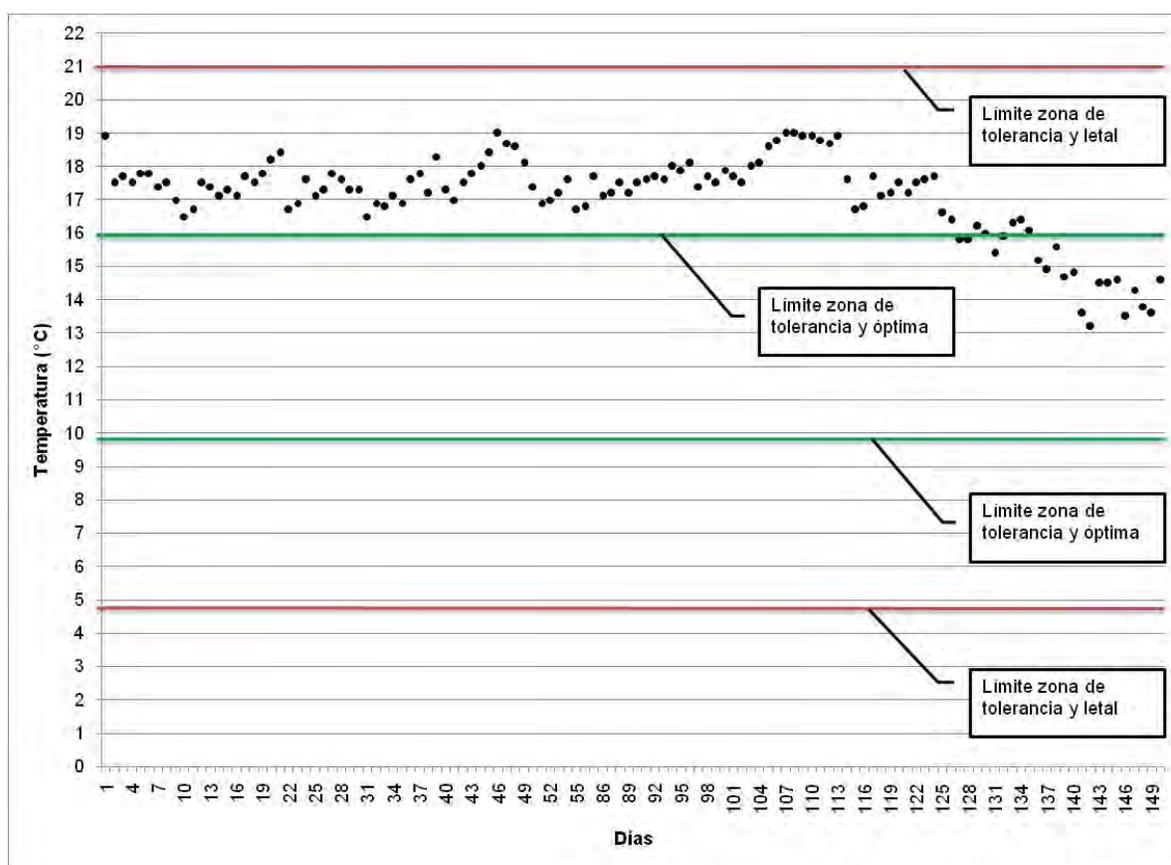


Figura 24. Temperatura observada en el estanque del SRA

#### 5.4.1. DESARROLLO DE LA TRUCHA ARCO IRIS

El desarrollo observado del cultivo trutícola en esta investigación se refleja en el valor de biomasa alcanzada de 180,42 kg, con un peso promedio de 472,31 ± 66,78 g; una

densidad de 28,73 kg/m<sup>3</sup> (60,82 org/m<sup>3</sup>); un caudal de 2,1 L/s; un recambio de agua limpia de lluvia de 4,3 % diario. En este porcentaje de recambio de agua se considera: 1) purga de lodos generados en el sedimentador, 2) fugas en el estanque y evaporación de agua, 3) toma de muestras para análisis de agua, 4) pérdidas de agua debida a la curva de aprendizaje de operación del SRA y 5) fallas de energía eléctrica que obligaron a cambiar toda el agua en el SRA dos veces. Eliminando los factores 3, 4 y 5, el consumo de agua de lluvia del SRA fue del orden del 2,21 % del volumen total en el sistema diariamente.

Timmons *et al.* (2002) reportan que se necesitan 210 000 L/kg de pez para una granja con un flujo abierto. Es decir, el agua entra a los estanques, se utiliza en los mismos y se descarga a un cuerpo de agua colindante a la unidad de producción. Para el sistema evaluado se utilizaron 265,20 L/d y el cultivo duró 121 días por lo que se requirió un total de 178,27 L/kg de pez.

En sistemas de recirculación acuícola incorporados a cultivos de salmónidos, se ha reportado el uso de 100 L/kg de pez (Timmons *et al.*, 2009). En esta investigación se tuvo un gasto de 178,27 L/kg de pez, para disminuir la cantidad de agua utilizada en el SRA para producir un kilogramo de trucha, es necesario captar de regreso el agua utilizada en la purga de lodos del sedimentador y optimizar el retrolavado del filtro de arena.

La figura 25, muestra el comportamiento de la biomasa en el SRA, los primeros días se observa un incremento de la biomasa lento pero constante, al final del proceso de maduración y una vez que se inició con la fase experimental se tiene un incremento mayor de la biomasa que a su vez se relaciona con un sistema biológico maduro que permitió mantener a los peces en niveles adecuados de cultivo, favoreciendo el crecimiento de los mismos.

En el día 58 se tuvo un problema de falta de energía por lo que se perdió la biomasa lograda hasta el momento, pero ésta se repuso con 120 kg sembrados el día 83 del cultivo. Sin embargo, se observa una disminución significativa de la misma, que se debió a que el tren de tratamiento del SRA no se encontraba maduro y no soportó la carga a la que fue sometido el sistema, tardando 15 días en madurar el filtro biológico. No obstante la biomasa se repuso para continuar el estudio en el estrato que se trabajó.

Así mismo, se propuso incrementar la biomasa cada 15 días, con la adición de organismos en el estanque, para evaluar el desempeño del SRA en los diferentes

estratos, tomando en cuenta el crecimiento reportado en la literatura (Blanco, 1995; Klontz, 1991). Sin embargo, debido al crecimiento superior de la trucha en el SRA en estudio (10,30 g/kg pez d) no fue necesario agregar más organismos al estanque, ya que cada 15 días se superó la biomasa fijada para el estrato siguiente.

En la figura 25, se puede observar que se tuvo un incremento de biomasa en el cultivo de 114,52 kg, así mismo se presentan los crecimientos determinados para diferentes etapas del cultivo en función de la biomasa inicial de los organismos y la alcanzada en cada etapa.

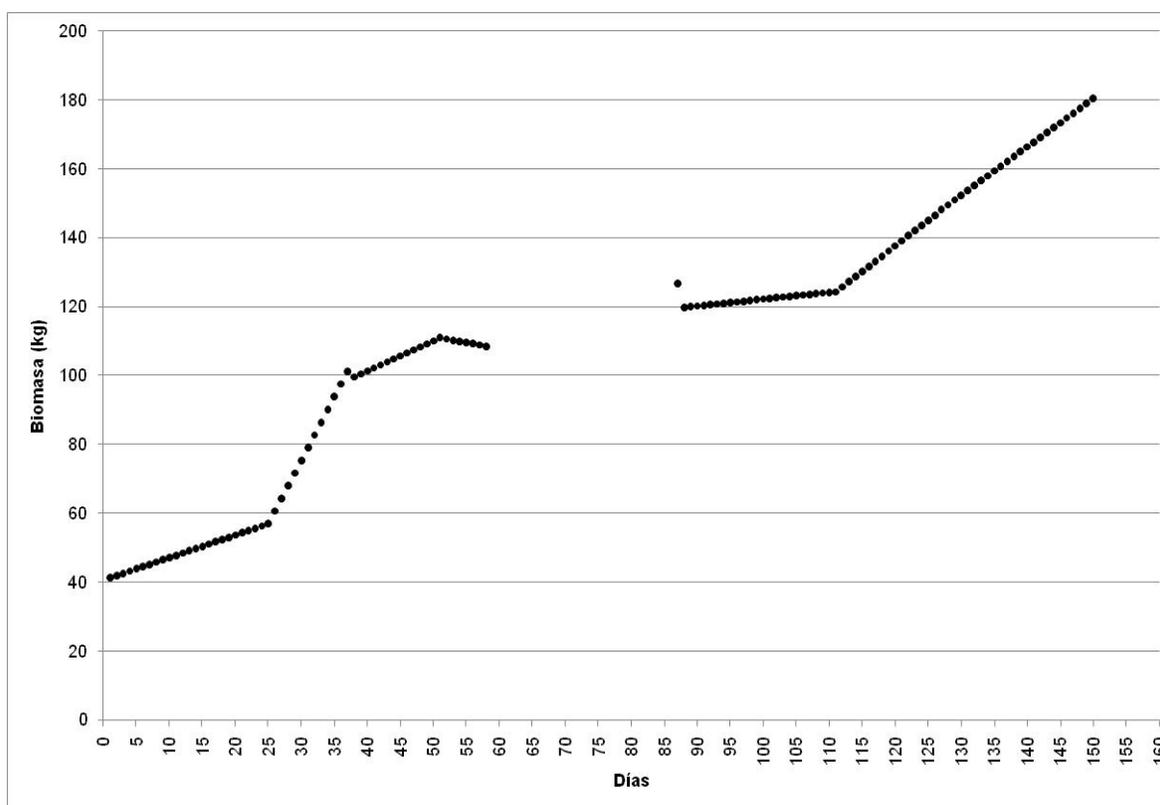


Figura 25. Biomasa producida y densidad alcanzada en el SRA

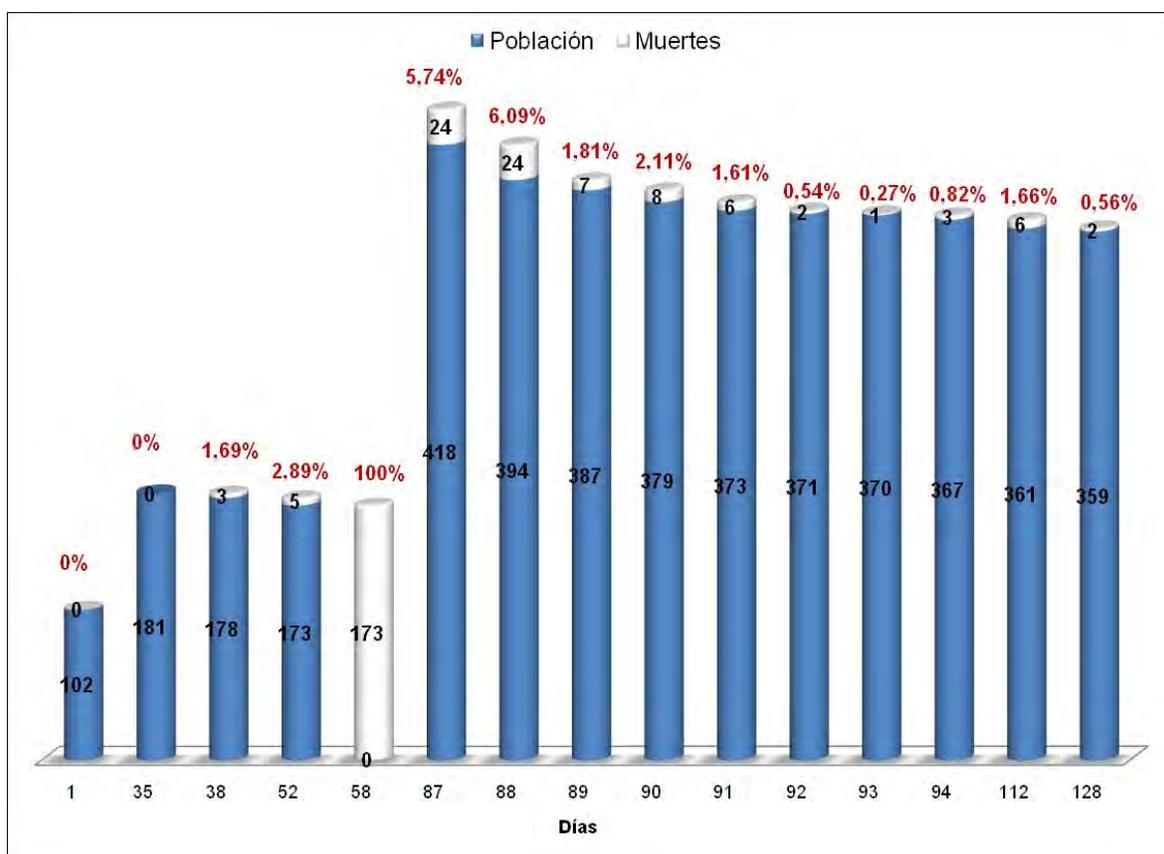
El consumo total de alimento fue de 157,07 kg, con un porcentaje de ración diaria de alimento balanceado (45 % de proteína y 16 % de lípidos) de  $1,13 \pm 0,23$  %. Permitiendo determinar el factor de conversión alimenticia (FCA) de 1,37.

La mortalidad en el cultivo se mantuvo por debajo de lo reportado por Blanco (1995) para la fase de engorda de la trucha arco iris; de acuerdo con este autor un cultivo de flujo abierto (tecnología tradicional) tiene mortalidades del orden del 2 % en esta fase. La

mortalidad en el cultivo fue en promedio de  $1,84 \pm 1,93$  %, considerando que los organismos se encontraban en una etapa de engorda para llegar a talla comercial (350 g).

Los porcentajes de mortalidad mayores al 2 % se presentaron a consecuencia de problemas con el suministro de energía eléctrica o cuando el sistema no estaba maduro. En específico la mortalidad por falta de madurez de los biofiltros pudo ser mayor, sin embargo los valores de pH fueron bajos, por lo que la toxicidad del  $N-NH_3$  fue menor.

En la figura 26 se gráfica la mortalidad en función del tiempo, los porcentajes son la mortalidad con respecto a la población.

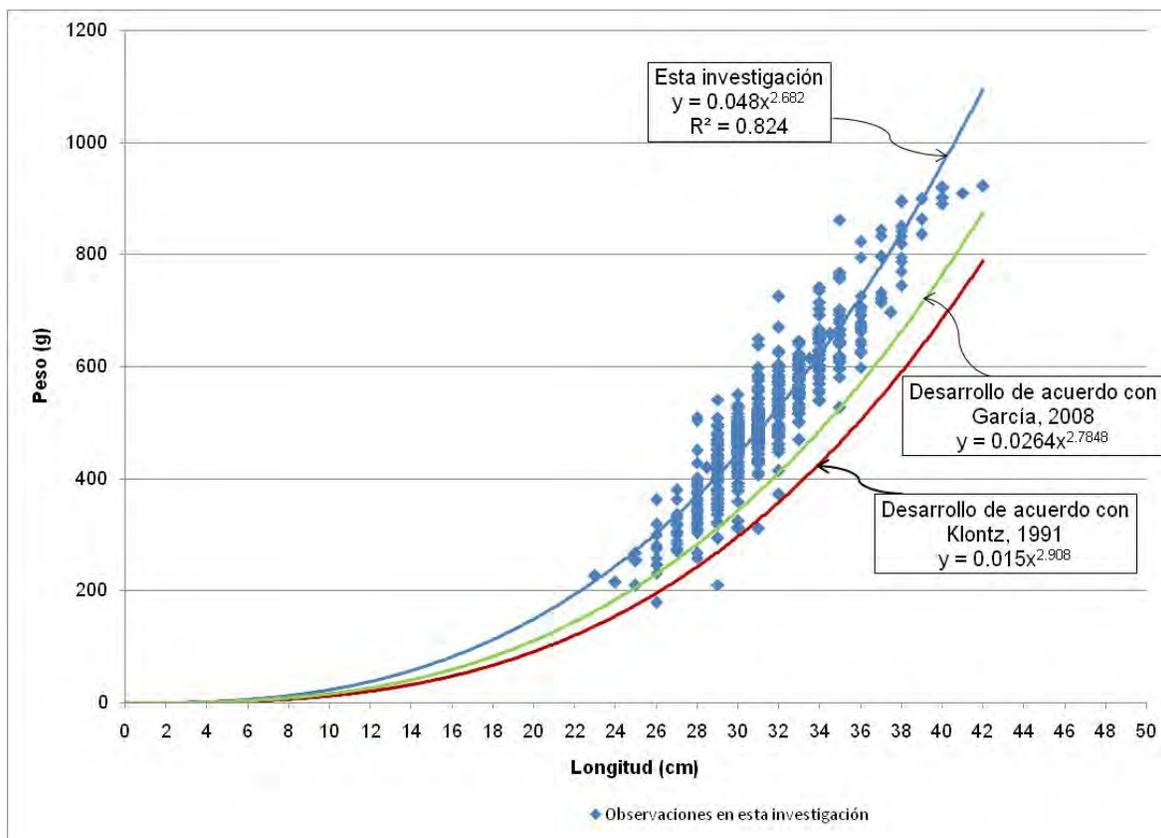


**Figura 26. Mortalidad en el cultivo de la trucha arco iris en el SRA**

#### **5.4.2. CONDICIÓN CORPORAL DE LOS ORGANISMOS ACUÁTICOS**

El desarrollo de la trucha arco iris ha sido reportado por su relación entre el peso y la longitud del organismo, en la figura 27 se representan las mediciones realizadas en esta investigación a los organismos durante el periodo de estudio. Así mismo, se observan dos curvas de trabajos previos reportados en la literatura (García, 2008; Klontz, 1991).

Klontz (1991) menciona que esta relación permite conocer el estado que guardan los organismos acuáticos y es acotada por varios factores como la temperatura, el oxígeno disuelto, la densidad, la biomasa, etc. Sin embargo, su uso es aceptado como un análisis exploratorio del desarrollo de los peces en un estanque.



**Figura 27. Desarrollo de la trucha arco iris en el sistema (relación longitud – peso)**

La ecuación 4 es la relación observada por Klontz (1991) para condiciones de laboratorio a una altitud menor a 1 500 msnm y a temperaturas entre 13 y 15°C.

$$y = 0.015x^{2.908} \tag{4}$$

Donde: x = peso (g), y = longitud (cm)

Sin embargo, para las condiciones en las cuales se llevó a cabo esta investigación, García (2008) reporta una ecuación para la relación longitud – peso (ecuación 5) que describe un mejor desarrollo de los organismos acuáticos.

$$y = 0.0264x^{2.7848} \tag{5}$$

Donde: x = peso (g), y = longitud (cm)

Esta última ecuación (2) se compara mejor con la relación determinada en el presente trabajo (ecuación 6), ya que los factores en que se realizó el cultivo fueron los dominantes en la región para ambos casos.

$$y = 0.048x^{2.682} \quad (6)$$

Donde: x = peso (g), y = longitud (cm)

El desarrollo de los organismos en el sistema fue mucho mejor a lo reportado por García (2008) y Klontz (1991) con la diferencia que la ecuación desarrollada por García comprende un intervalo de peso que va de los 4 a los 450 g. Para la ecuación determinada en esta investigación el intervalo de peso es de los 180 a los 930 g, por lo que las ecuaciones 5 y 6 pueden ser complementarias para describir la salud de trucha arco iris desde cría hasta un kilogramo de peso.

La descripción matemática de la relación entre la longitud y peso, en la figura 27, implica un mejor rendimiento para fines de producción cuando a menor talla se alcanza un mayor peso. El trabajo desarrollado por García (2008) se efectuó en condiciones de temperatura similares a esta investigación por lo que el tamaño de las truchas fue alcanzado en el mismo tiempo, no así el peso, el cual se logró en esta evaluación a tallas menores.

Para corroborar que el estado corporal de las truchas en el sistema fue mejor que los trabajos anteriores, se determinó el factor de Fulton (K). Este factor determina que a un valor mayor de K, peces con una misma longitud, tendrán mejores condiciones físicas, es decir una mejor condición corporal (Morales, 2004).

En la figura 28 se observa que en esta investigación los peces tienen una mejor condición corporal que trabajos previos de acuerdo con el factor corporal de Fulton, en la grafica se muestra la curva obtenida para esta investigación, para el trabajo realizado por García (2008) efectuado en un SRA en el altiplano mexicano y lo reportado por Klontz en un cultivo de flujo abierto.

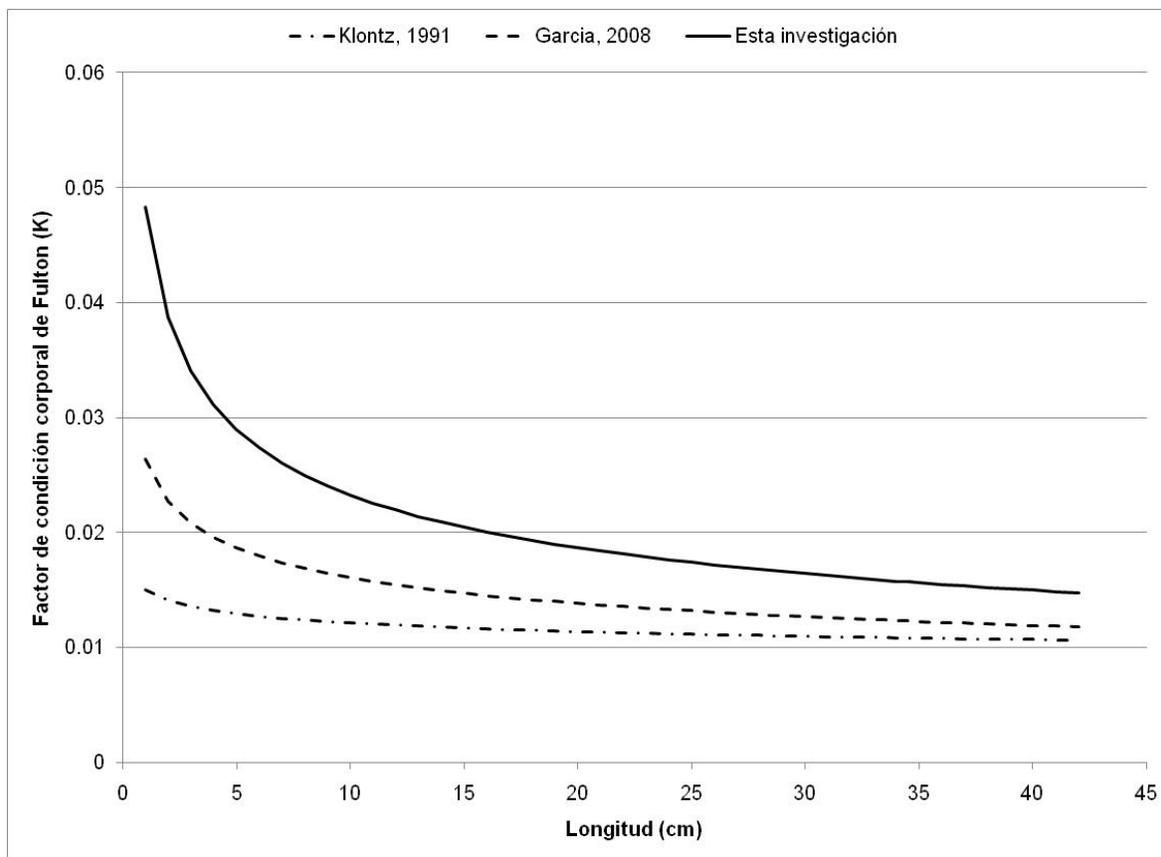


Figura 28. Condición corporal de la trucha de acuerdo al Factor de Fulton

### 5.4.3. OXÍGENO DISUELTO EN EL ESTANQUE

Uno de los parámetros más importantes que se debe considerar al momento de operar cualquier cultivo acuícola es el oxígeno disuelto (OD). Este parámetro es un factor limitante para determinar la capacidad de carga de un estanque y el tipo de biofiltro que se debe de utilizar en un tren de tratamiento.

Para el cultivo de trucha, los criterios ecológicos (DOF, 1989) mencionan que la concentración de OD en el agua debe ser mayor a 7,8 mg/L. Por otro lado, Stickney (2000) reporta que a niveles mayores a 5,0 mg/L ó 70 % de saturación de OD se puede llevar a cabo el cultivo.

En el estanque del cultivo trutícola, la concentración de oxígeno disuelto fue de  $5,35 \pm 0,08$  mg/L ( $78,24 \pm 7,99$  % de saturación) en promedio. Como se puede observar en la figura 29 en promedio el OD se mantuvo sobre los niveles recomendados por Stickney

(2000), sin embargo, muy por debajo de lo establecido en los criterios ecológicos (DOF, 1989).

En la altitud que se encuentra el sistema de recirculación acuícola (2 660 msnm) la saturación del agua por oxígeno se encuentra aproximadamente a los 6,5 mg/L con una temperatura promedio de  $16,77 \pm 0,12$  °C, por lo que en la región no se puede alcanzar los niveles establecidos en estos criterios. Aún cuando los criterios ecológicos fueron pensados en cultivos tradicionales de trucha, es decir sistemas abiertos, en el Estado de México no es posible físicamente presentar concentraciones mayores a 7,5 mg/L en promedio (Gallego *et al.*, 2007).

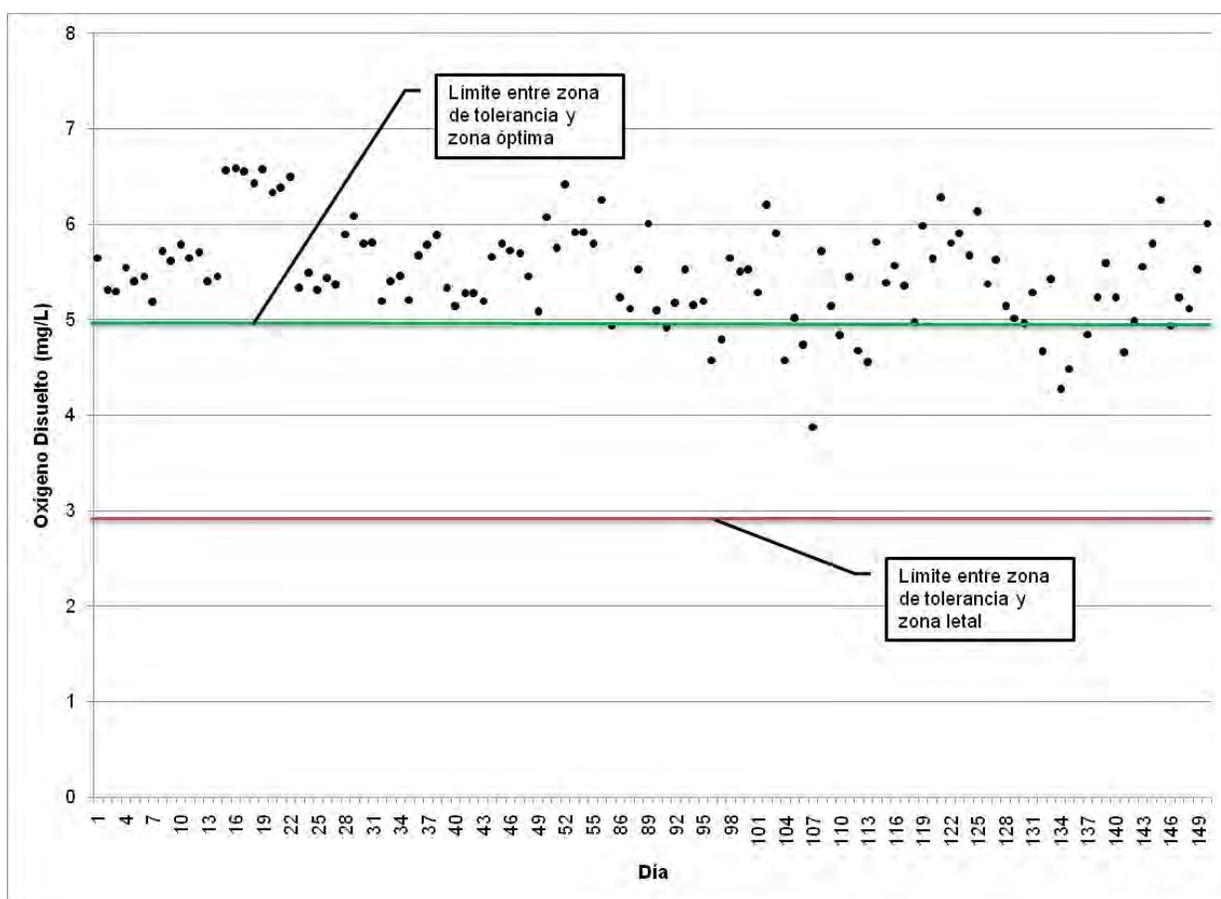


Figura 29. Concentración de oxígeno disuelto en el estanque de cultivo

#### 5.4.4. COMPORTAMIENTO DEL pH EN EL ESTANQUE

De acuerdo con García (2008), el rango óptimo para que el cultivo de trucha funcione adecuadamente es de 7,6 a 8,5. Klontz (1991) menciona que el intervalo adecuado es de

6,7 a 8,5. En el estudio se tuvo un pH que osciló entre 5,78 y 7,63 con un valor promedio de  $6,99 \pm 0,07$ . Una de las consecuencias de utilizar agua de lluvia cosechada fueron los valores bajos de pH, por lo que fue necesario acondicionar el agua pluvial a las necesidades del cultivo, por lo que los valores de este parámetro fueron muy variables.

En la figura 30 se muestran los valores de pH en el estanque de cultivo y aún cuando estos se encontraron bajos para el cultivo de la trucha según García (2008), se observó un buen desarrollo de los peces de acuerdo con la relación existente entre la longitud y el peso. Sin embargo, para una buena nitrificación el pH debe tener valores entre 7,0 y 8,0 (Loyless y Malone, 1997; Malone 2002), donde valores superiores mejoran este proceso. La actividad bacteriana disminuye hasta en un 70 % cuando el valor de pH se acerca a 6,0 (Bonvendeur, 1989).

El comportamiento de este parámetro en el periodo de cultivo fue de difícil control impactando en diferentes procesos dinámicos que dependen del pH en el agua, como la toxicidad del  $\text{NH}_3$  y el  $\text{NH}_4^+$ , el ciclo del carbono, entre otros (Loyless y Malone, 1997). Estas variaciones afectaron directamente la eficiencia de la nitrificación en el percolador y el filtro de arena (descrito en la siguiente sección) y corroboran la falta de madurez en los biofiltros ya que concuerdan bajos valores de pH y alcalinidad, altas concentraciones de  $\text{N-NH}_3$  con la mortalidad presentada entre los días 83 – 89.

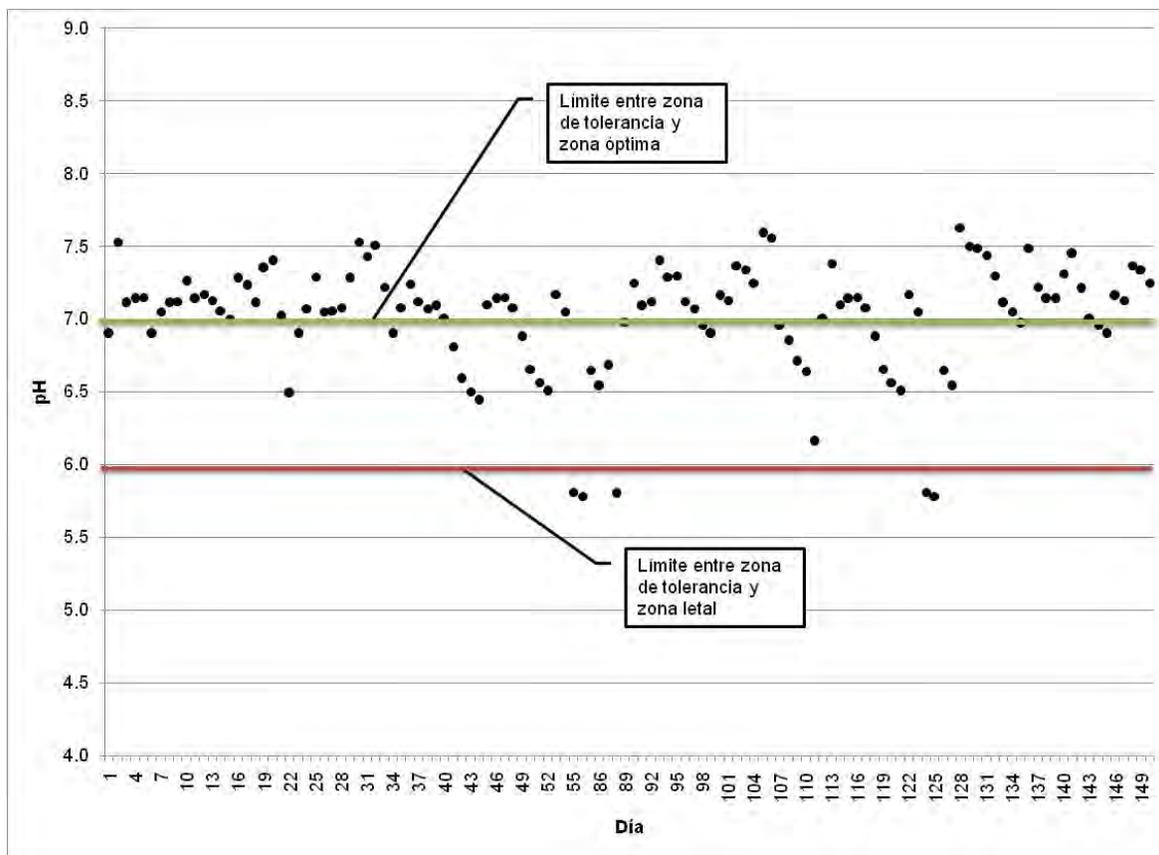


Figura 30. Comportamiento del pH en el estanque de cultivo

## 5.5. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO Y EFICIENCIA DEL TREN DE TRATAMIENTO

### 5.5.1. EFICIENCIA

La eficiencia del tren de tratamiento se determinó mediante las concentraciones promedio a la entrada y salida del percolador, filtro de arena y estanque – sedimentador, así como en el influente y efluente del tren en general. Para obtener los estimadores estadísticos se utilizó la teoría de muestreos estratificados para aumentar la precisión del análisis.

En la tabla 17 se presenta un ejemplo de la memoria de cálculo para determinar los estimadores estadísticos como el promedio, la desviación estándar, el coeficiente de variación y los intervalos de confianza a 95 %, en este caso en el punto de muestreo “C”, es decir a la salida del tren de tratamiento y para la concentración de nitrógeno amoniacal total.

Tabla 17. Memoria de cálculo de los estimadores estadísticos para el muestreo estratificado de la concentración de nitrógeno amoniacal en el punto de muestreo C.

Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,0940	0,0165	10,20	0,0100	2,06995E-08
2	121,03	81	1,0640	1,2055	128,77	72,2137	0,00014943
3	130,21	77	0,0860	0,0056	11,19	0,5140	1,06369E-06
4	155,12	92	0,0820	0,0013	12,71	0,1465	3,03242E-07
5	180,21	132	0,1333	0,0069	24,02	0,4540	9,39586E-07
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	<b>186,93</b>	<b>73,3384</b>	<b>0,000151757</b>
						$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>0,269</b>
						Desviación estándar	<b>0,0123</b>
						Intervalo de confianza	$0,269 \pm 1,96\sqrt{0,000151}$ $0,269 \pm 0,024$

### 5.5.1.1. PERCOLADOR

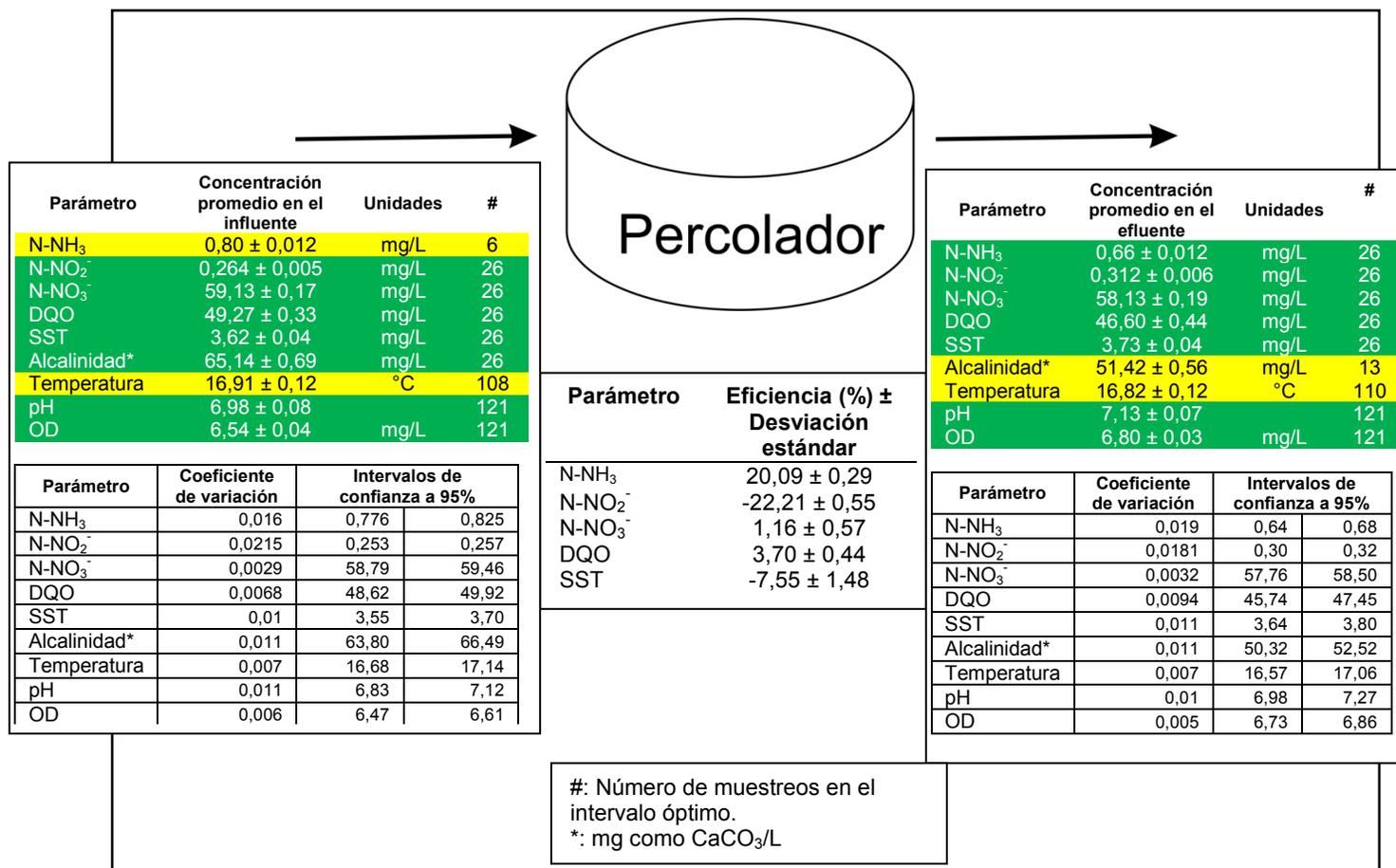
Esta unidad del tren de tratamiento fue diseñada como un biofiltro para remover las especies nitrogenadas disueltas en el agua, principalmente el nitrógeno amoniacal total. Este ión es el principal factor limitante para la vida acuática y por consecuencia en el cultivo trutícola es indispensable conocer y controlar su concentración, ya que aún a niveles muy bajos (< 1,0 mg/L) puede llegar a ser tóxico. Russo y Thurston (1991) mencionan que en concentraciones mayores a 1,16 mg/L es letal para la trucha arco iris.

En la figura 31, se observa un esquema del filtro percolador con las concentraciones de entrada y salida al mismo, estas concentraciones, con un fondo de color verde cuando se encuentra en intervalos óptimos, amarillo cuando se está en intervalos tolerantes y rojo cuando la concentración promedio se encuentra en un intervalo letal, así también se muestran las eficiencias de la unidad de tratamiento.

En el SRA prototipo no se alcanzaron concentraciones letales en el percolador pues el porcentaje de remoción para el nitrógeno amoniacal fue  $20,09 \pm 0,29$  % en promedio.

La remoción de DQO en el percolador fue muy baja, en un rango de  $3,70 \pm 0,44$  %, debido a que las cargas de materia orgánica que entraban a esta unidad eran bajas y a la vez no representaban un peligro para el cultivo acuícola.

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**



**Figura 31. Comportamiento de las concentraciones y eficiencia de remoción de los diferentes parámetros en el percolador.**

El porcentaje de remoción de N-NH<sub>3</sub> (en este caso baja), en el percolador, se debió principalmente a que se tuvo un concentración promedio pequeña a la entrada de la unidad (0,80 mg N-NH<sub>3</sub>/L) generado en el estanque de cultivo, lo que no permite desarrollar de manera adecuada una población de bacterias nitrificantes y por ende la remoción de las especies nitrogenadas. Aunado a lo anterior, en el diseño del percolador se propuso que el empaque fuera colocado dentro del biofiltro a granel, lo que en realidad disminuyó la superficie específica de contacto del mismo (Eding *et al.*, 2006).

Uno de los factores que contribuyó a contar con una remoción menor a 20 % de nitrógeno amoniacal total fue el pH. Aunque este parámetro se mantuvo en intervalos de tolerancia y óptimos Bonvendeur (1989) indica que el pH a un valor de 8 permite el 100 % de la nitrificación en un biofiltro y en función de la disminución este valor desciende la remoción

de compuestos nitrogenados. Este autor propone una ecuación polinomial (ecuación 7) para determinar la fracción en la reducción de la nitrificación.

$$y = 0,148x^2 - 2,43x + 9,972 \quad (7)$$

Donde: y = fracción en la reducción de la nitrificación, x = pH.

Con base en este modelo los valores de pH medios a la entrada del percolador, la fracción para determinar la reducción en la nitrificación por efecto de este parámetro fue de  $24 \pm 17 \%$ .

La alcalinidad es un parámetro determinante para que el proceso de nitrificación se lleve a cabo en condiciones adecuadas en esta unidad (Boyd, 1990); sin embargo, en el agua de lluvia utilizada la alcalinidad fue de 3,21 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  muy por debajo de los niveles recomendados para el proceso de nitrificación (Timmons *et al.* 2002).

Para aumentar la alcalinidad, así como el pH se agregó bicarbonato de sodio, sal y cal química (Trujillo y Martínez, 2008; Loyless y Malone, 1997) logrando un incremento en promedio de 60 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , que permitió la remoción de nitrógeno amoniacal total en los biofiltros aunque no en los porcentajes reportados por García (2008) y Gallego (2004), los cuales fueron 57,0 % y 53,24 %, respectivamente.

Timmons *et al.* (2002) y Loyless y Malone (1997) mencionan que para una buena nitrificación la alcalinidad debe ser mayor a 100 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , sin embargo a 50 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  este proceso se empieza a llevar a cabo con eficiencia aceptable, pero a concentraciones menores a 25 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  puede ser letal.

Por último un factor no considerado en la literatura es la concentración de nitratos disueltos en el agua, este ión puede provocar una acidez iónica y en presencia de  $\text{CO}_2$  libre una acidez mineral. De acuerdo al índice de Larson a valores mayores de 1,0 el agua se considera altamente corrosiva y con acidez iónica alta (Hernández, 2010) e inhibe la actividad catalítica de las bacterias encargadas de la oxidación del nitrógeno amoniacal total (García, 2010).

El índice de Larson determinado para el percolador con base en la modificación realizada por García (2010), donde se considera la concentración del ión nitrato y asumiendo que las concentraciones de sulfatos y cloruros son despreciables, fue de  $\text{IL}^* = 5,02$ . El índice

obtenido permite asumir a la concentración del ión nitrato como responsable de la baja remoción del nitrógeno amoniacal total.

Aún con el impacto de estos tres factores las concentraciones de los parámetros limitantes en el efluente del biofiltro fueron aceptables para permitir la vida de la trucha arco iris.

#### **5.5.1.2. FILTRO DE ARENA**

El filtro de arena en un principio fue concebido como un filtro rápido con flujo ascendente, sin embargo, al momento de la operación se tomó la decisión de utilizarlo como un filtro de arena descendente. Este cambio aumentó el tiempo de retención hidráulica y al estar mayor tiempo el agua en contacto con las bacterias que poblaron las partículas de arena se permitió que existiera remoción de los contaminantes monitoreados (Metcalf y Eddy, 1991). En La figura 32 se observa un esquema del filtro de arena con las concentraciones de entrada y salida de los parámetros limitantes al cultivo de la trucha, así como, los porcentajes de remoción de los mismos.

Los valores en la salida del biofiltro, si bien ya se encontraban en rangos donde no ponían en peligro el cultivo, se tenía el riesgo de que las concentraciones de las especies nitrogenadas llegaran a valores de tolerancia.

La función principal del filtro de arena fue la remoción de sólidos suspendidos totales generados al desprenderse la biopelícula muerta del filtro percolador (Eding *et al.* 2006). En efecto, los SST en el influente de esta unidad del tren de tratamiento fueron removidos en un porcentaje de  $40,79 \pm 0,78$  %, aunque se puede considerar como una remoción baja, el intervalo de trabajo de este filtro para los sólidos entre la concentración de entrada y salida fue de 1,67 mg/L.

En el filtro de arena el porcentaje de remoción del nitrógeno amoniacal fue de  $74,15 \pm 0,50$  %, con un valor promedio a la salida de 0,27 mg/L de N-NH<sub>3</sub> cumpliendo con el objetivo de cambiar la operación de un filtro ascendente a un filtro lento de arena.

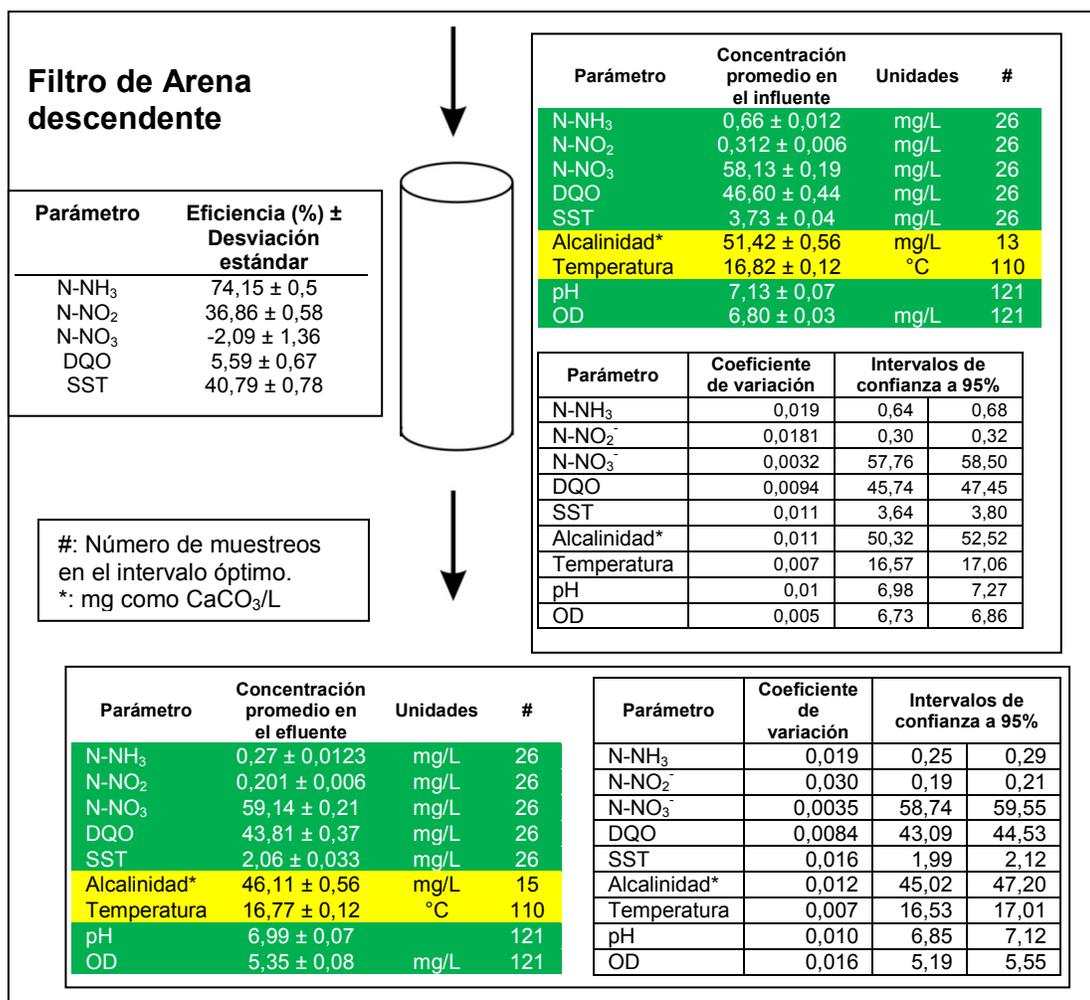


Figura 32. Comportamiento de las concentraciones y eficiencia de remoción de los diferentes parámetros en el filtro de arena.

Cánepa (1992), indica que la filtración lenta tiene como objetivo depurar el agua mediante la sedimentación, filtración mecánica y biológica. Una de las funciones básicas de la filtración lenta es que se lleve a cabo los procesos de nitrificación y oxidación de la materia orgánica. Sin embargo para que éstos funcionen de manera eficiente el tiempo de retención hidráulica (TRH) debe ser mayor a dos horas cuando se tratan aguas residuales domésticas.

En el sistema prototipo se tuvo un TRH de 30 min. Lo cual no es un tiempo adecuado de acuerdo con Cánepa (1992), no obstante las concentraciones de la materia orgánica, sólidos y compuestos nitrogenados se mantuvieron en niveles óptimos para el cultivo. Lo

que indica que para sistemas de recirculación acuícola se puede considerar TRH menores a los reportados para otro tipo de aguas residuales.

Otro fenómeno que ocurre en el filtro de arena es el fuerte consumo de oxígeno disuelto en el agua, siendo la diferencia en promedio de 1,45 mg/L. Esta disminución afectó el manejo del equipo de soporte de vida en el estanque, esto es, el OD que entraba al estanque se encontraba cerca del límite inferior del rango óptimo para el cultivo y considerando una alta densidad de peces, el equipo de aireación tuvo que ser modificado para aumentar su capacidad de transferir este gas al agua.

### **5.5.1.3. ESTANQUE Y SEDIMENTADOR**

La concentración de contaminantes no se pudo analizar a la entrada del sedimentador por lo que la eficiencia evaluada en esta sección comprende los procesos involucrados en el estanque y el sedimentador. Esto es un balance entre las condiciones del agua en el influente del estanque, lo generado por los peces, el alimento no consumido y el agua residual en el efluente del sedimentador.

El objetivo principal del sedimentador fue remover los sólidos generados en el estanque de cultivo, para conocer la eficiencia de esta unidad del tren de tratamiento fue necesario realizar un balance de masas de los SST, que se reporta en la sección 5.7.1.5. La figura 33 esquematiza el balance de masas utilizado para determinar la generación de sólidos en el estanque de cultivo. La eficiencia del sedimentador se midió con el flujo másico de sólidos en la purga de lodos dividida por el flujo másico de entrada más la generación en el estanque. La eficiencia alcanzada por el sedimentador fue de 5,56 %, muy por debajo de la reportada por investigaciones anteriores (García 2008; Gallego *et al.* 2004; Gallego, 2004).

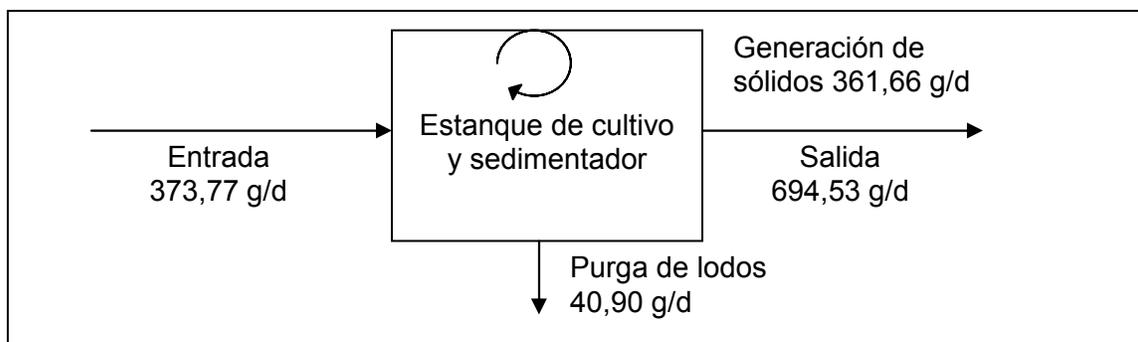


Figura 33. Esquema del balance de masas para SST en el estanque de cultivo y el sedimentador

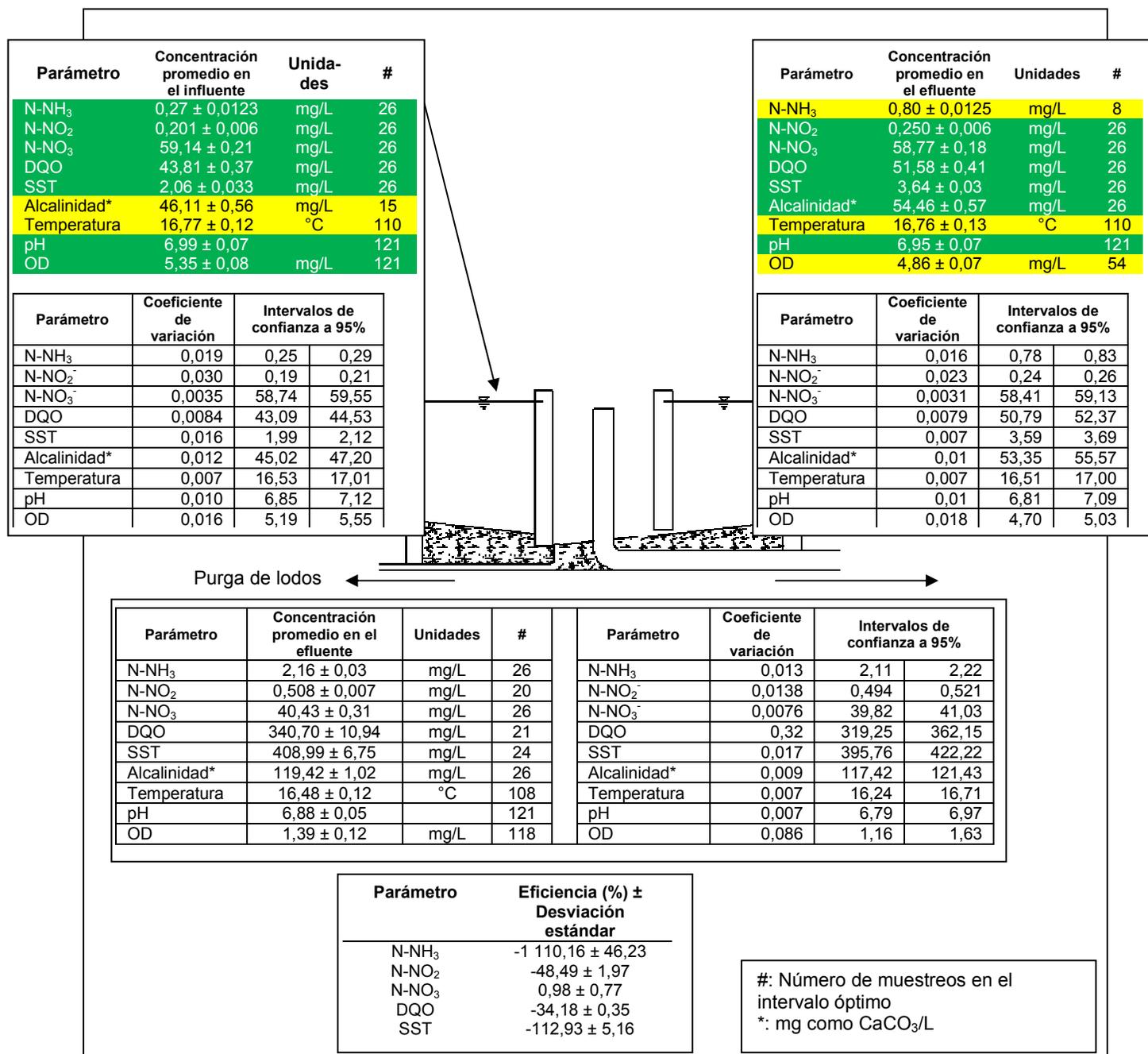
La baja eficiencia alcanzada por el sedimentador se debió a dos problemas: 1) a un error en la construcción de la unidad falta, ya que no se incorporó el cono concentrador de los lodos y; 2) una purga de lodos realizada 24 h, debido a que los sólidos en contacto con el agua se fraccionaban por lo que el flujo de agua los arrastraba a las siguientes unidades del tren de tratamiento.

En la figura 34 se muestran las concentraciones de entrada al estanque, salida del sedimentador y purga de lodos, así como, la eficiencia general de la unidad combinada. La purga de lodos en el estanque requirió que se extrajeran aproximadamente 100 L diarios de agua, estos alcanzaban una concentración promedio de  $408,99 \pm 6,75$  mg/L de SST.

De los valores promedios determinados, la concentración de nitratos en la purga de lodos es menor tanto en la entrada del estanque como a la salida del sedimentador. El OD llegó, en la purga de lodos, a  $1,39 \pm 0,12$  mg/L considerando la zona de lodos en el sedimentador anaerobia por lo que el proceso de desnitrificación podría ocurrir (Grady *et al.*, 1999).

Como se puede observar en la figura 34, la acumulación de sólidos en cualquier unidad del tren de tratamiento hace que los parámetros limitantes alcancen concentraciones que incluso son letales para la trucha, por lo que se reitera la importancia de remover los sólidos del sistema lo más rápido posible.

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**



**Figura 34. Comportamiento de las concentraciones y eficiencia de remoción de los diferentes parámetros en el estanque – sedimentador.**

**5.5.1.4. EFICIENCIA GENERAL**

Tomando en cuenta al tren de tratamiento como un sistema integral, la eficiencia del mismo fue aceptable para permitir el cultivo de la trucha arco iris hasta una densidad de 28,73 kg/m<sup>3</sup> y a un peso promedio de 472,31 ± 66,78 g. Obteniendo una eficiencia de

remoción general de nitrógeno amoniacal total mayor a la reportada por García (2008) que fue de 66 %.

En la figura 35 se puede observar la eficiencia en general del tren de tratamiento para los parámetros limitantes para el cultivo de trucha, así como las concentraciones de los mismos a la entrada y salida del sistema. De manera general la concentración de los parámetros se encontró dentro de los intervalos óptimos para el cultivo con excepción de la alcalinidad y la temperatura.

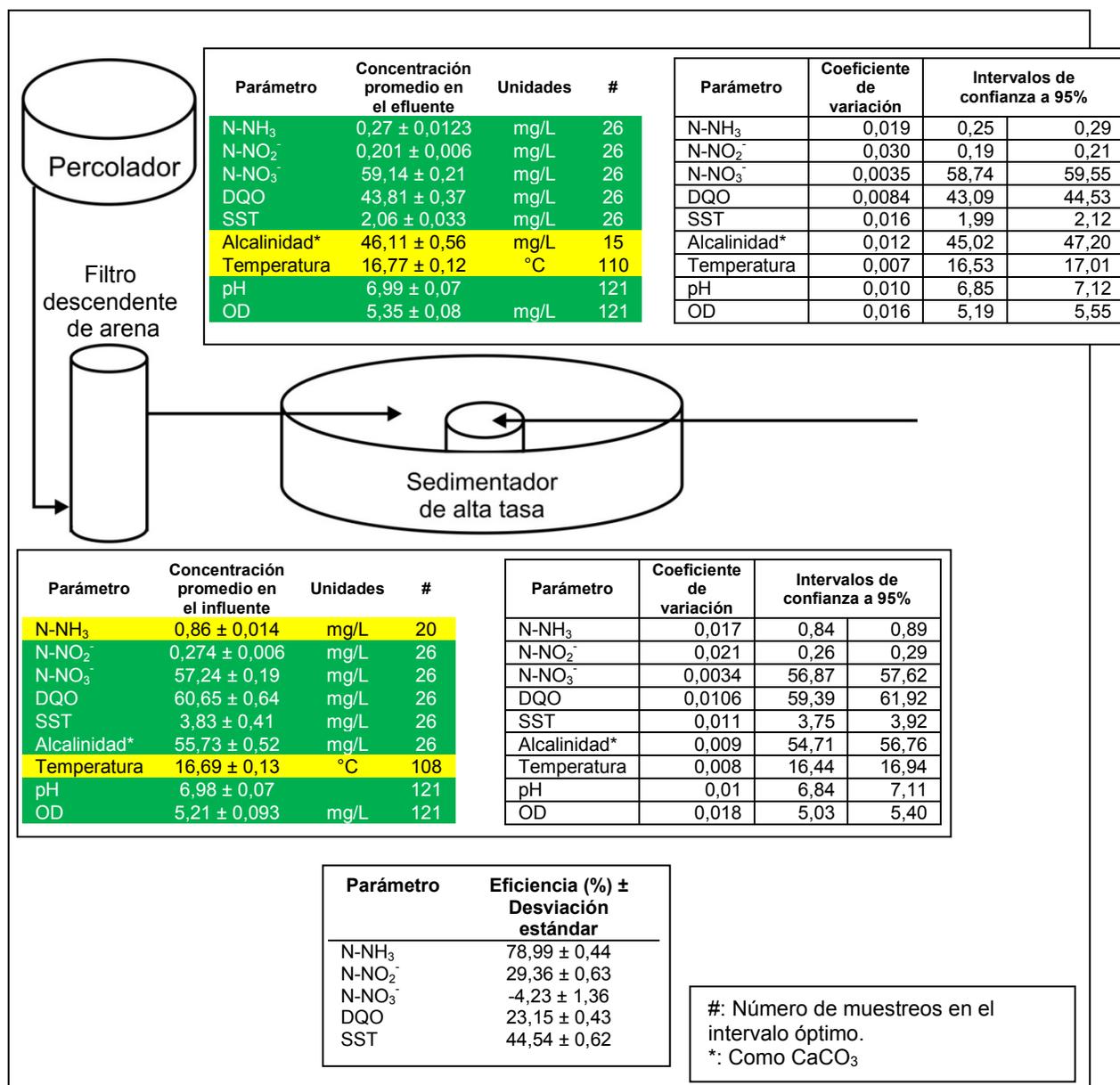


Figura 35. Comportamiento de las concentraciones y eficiencias de remoción de los diferentes parámetros en el tren de tratamiento.

Parámetros como la alcalinidad, aunque se encontró aceptable para el cultivo de la trucha, no alcanzó valores recomendados para el proceso de nitrificación (Timmons *et al.*, 2009; Eding *et al.*, 2006). La concentración de este parámetro fue la suficiente para llevar a cabo la nitrificación debido a las concentraciones bajas de N-NH<sub>3</sub> encontradas en el percolador y filtro de arena. Es importante poner atención en el acondicionamiento del agua de lluvia debido a que la concentración de alcalinidad fue difícil de acotar a niveles constantes dentro del sistema, dado el consumo de éste en la nitrificación, la mitigación de ácidos minerales y alto contenido de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> que produce acidez iónica.

La temperatura fue otro parámetro que siempre se mantuvo por encima del rango óptimo para el cultivo, el desarrollo de los organismos fue aceptable y mejor de lo reportado por García (2008), Ingram *et al.* (2002) y Klontz (1991).

### 5.5.2. DESEMPEÑO DEL PROTOTIPO

El desempeño del prototipo fue evaluado de acuerdo con los criterios y factores propuestos por varios investigadores en el tema de estandarización de dicha evaluación (Colt *et al.*, 2006; Drennan *et al.*, 2006; Malone y Pfeiffer, 2006). Estos criterios y factores han sido agrupados en las próximas 3 tablas (18, 19 y 20).

Bajo consideraciones de que los biofiltros en evaluación son un percolador especializado en la nitrificación y un filtro de arena descendente, cuyas características físicas se describen en la tabla 18. El área de superficie específica del filtro percolador se vio disminuida por la forma que se colocó el empaque. En estudios anteriores la manguera corrugada se dispuso en cartuchos de manera que se formara un zigzag entre cada nivel, permitiendo eficiencias mayores al 60 % en la remoción de compuestos nitrogenados (García *et al.*, en prensa; Gallego *et al.*, 2004). En este estudio el empaque se colocó a granel lo que en un momento dado pudo hacer que no toda la superficie del mismo si estuviera en contacto con el agua, reduciendo la eficiencia del biofiltro en comparación con los trabajos reportados por García (2008) y Gallego (2004) donde el empaque está conformado por cartuchos de manguera corrugada de 30 cm de longitud y colocados de manera encontrada (zig-zag).

Las características del influente a cada biofiltro se documentan en la tabla 19. Se puede observar que aún cuando las concentraciones de los diferentes contaminantes se

encuentran en niveles altos, éstas no son tóxicas para el cultivo de la trucha (Timmons *et al.*, 2002; Blanco, 1995; Klontz, 1991; Russo y Thurston, 1991).

Tabla 18. Características del biofiltro y del empaque

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Unidades</i>	<i>Percolador</i>	<i>Filtro de arena</i>	
Características del empaque						
1a	Fabricante		Información	CIRA - CIRB UAEM	CIRA - CIRB UAEM	
1b	Tipo		Información	Manguera corrugada	Arena sílica	
1d	Material		Información	Plástico	Arena sílica	
1e	Dimensiones del empaque		cm x cm	5 x 3,75		
1f	Área de superficie específica	SSA	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	414,00		
Características del biofiltro						
2a	Altura total	$H_{tank}$		m	1,10	1,50
2b	Altura del agua	$H_{water}$		m	0,80	0,90
2d	Volumen del filtro	$V_0$		m <sup>3</sup>	1,55	2,01
2e	Área seccional del filtro	$A_{cross}$		m <sup>2</sup>	420,00	1314,00
2f	Área superficial activa del empaque	$A_{media}$		m <sup>2</sup>	289,80	1314,00
2g	Volumen del empaque	$V_{media}$		m <sup>3</sup>	0,80	0,60
2h	Tasa de carga hidráulica	$L_{hyd}$	$= Q/A_{cross}$	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	0,43	0,14
2i	Carga hidráulica del empaque	$L_{media}$	$= Q/A_{media}$	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	0,63	0,14
2l	Tipo de sistema de distribución de agua			Tubería de PVC	Descendente	
2o	Caudal del biofiltro	$Q_{filter}$		m <sup>3</sup> /d	181,44	181,44
2p	Caudal de agua tratada	$Q_{mu}$		m <sup>3</sup> /d	181,44	181,44
2q	Caudal estanque	$Q_{ru}$		m <sup>3</sup> /d	181,44	181,44
2r	Caudal reciclado	$Q_{reuse}$		m <sup>3</sup> /d	181,34	181,34
2t	Caudal de descarga	$Q_{out}$		m <sup>3</sup> /d	0,10	0,10

Tabla 19. Características generales del influente y del cultivo

Parámetro	Símbolo	Fórmula	Unidades	Percolador	Filtro de arena
Características generales del influente y del cultivo					
3a	Especie cultivada	Trucha arco iris <i>Oncorhynchus mykiss</i>			
3b	Temperatura	$T$	°C	17,0	17,1
3b	Tasa de alimentación y tipo de alimento	$FR$	45% / Pellet extruido flotante	kg/d	1,90
3c	Frecuencia de alimentación	$FA$		veces/d	2,00
3d	Contenido de proteínas	$CP$	Nitrógeno x 6,25	%	45,00
3e	Carga acumulativa de alimento	$CBF$	$=10^6 FR/Q_{mu}$	mg/L	104,72
3g	Carga acumulativa	$CL$	$=kg\text{ pez}/Q_{ru}$	kg/lpm	1,43
3h	Nitrógeno amoniacal	$N-NH_{3in}$		mg N-NH <sub>3</sub> /L	0,80
3i	N - nitritos	$N-NO_2^-in$		mg N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /L	0,255
3j	N - nitratos	$N-NO_3^-in$		mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L	57,38
3k	Demanda bioquímica de oxígeno	$DBO_{5in}$		mg/L	17,28
3l	Demanda química de oxígeno	$DQO_{in}$		mg/L	47,58
3m	Alcalinidad	$ALK_{in}$		mg/L como CaCO <sub>3</sub>	64,77
3n	pH	$pH_{in}$			6,96
3p	Oxígeno disuelto	$Od_{in}$		mg/L	6,53

La alcalinidad determinada para los influentes de cada biofiltro comparada con lo reportado por Loyless y Malone (1997) se mantuvo en niveles bajos, pero dentro de un intervalo que permite la nitrificación, estos autores mencionan que este proceso se lleva a cabo de mejor manera con concentraciones de alcalinidad mayores a 100 mg/L de CaCO<sub>3</sub>.

El objetivo del tren de tratamiento fue acoplar el agua residual acuícola para permitir el cultivo de la trucha arco iris, la tabla 20 se presentan las características del efluente del tren de tratamiento de las dos unidades en que se llevaron a cabo procesos biológicos de remoción de contaminantes.

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

**Tabla 20. Características del efluente de del percolador y el filtro de arena del SRA prototipo**

<b>Parámetro</b>		<b>Símbolo</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Unidades</b>	<b>Percolador</b>	<b>Filtro de arena</b>
5a	Tiempo de aclimatación antes de empezar la adquisición de datos	$t$		d	38,00	38,00
5b	Flujo de amonio (área superficial)	$Q_{NH3AS}$	$= (Q_{filter} N-NH_{3in}) / A_{cross}$	g N-NH <sub>3</sub> /m <sup>2</sup> d	0,35	0,09
5c	Flujo de amonio (empaquete)	$Q_{NH3E}$	$= (Q_{filter} N-NH_{3in}) / A_{media}$	g N-NH <sub>3</sub> /m <sup>2</sup> d	0,50	0,09
5d	Flujo de DBO <sub>5</sub> (empaquete)	$Q_{DBO5E}$	$= (Q_{filter} DBO_{5in}) / A_{media}$	g DBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> d	10,82	2,68
5d'	Flujo de DQO (empaquete)	$Q_{DQOE}$	$= (Q_{filter} DQO_{in}) / A_{media}$	g DQO/m <sup>2</sup> d	29,79	6,20
5e	Temperatura	$T$		°C	17,00	17,10
5f	Nitrógeno amoniacal salida	$N-NH_{3out}$		mg N-NH <sub>3</sub> /L	0,67	0,29
5g	N-nitritos	$N-NO_2^-$ out		mg N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /L	0,298	0,197
5h	N-nitratos	$N-NO_3^-$ out		mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L	56,70	57,56
5i	Porcentaje de remoción de N-NH <sub>3</sub>	$PTR$	$= (N-NH_{3in} - N-NH_{3out}) / N-NH_{3in}$	%	16,25	56,72
5k	ΔO <sub>2</sub>	$ΔO_2$	$= (OD_{out} - OD_{in})$	mg/L	0,27	-1,30
5m	ΔpH	$ΔpH$	$= (pH_{out} - pH_{in})$		0,14	-0,08
5n	Generación de N-nitritos	$N-NO_2^-$ gen	$= (N-NO_2^- out - N-NO_2^- in) / N-NH_{3in}$	%	0,05	-0,15
5o	Generación de N-nitratos	$N-NO_3^-$ gen	$= (N-NO_3^- out - N-NO_3^- in) / N-NH_{3in}$	%	-0,85	1,63
5p	Tasa volumétrica de consumo de nitrógeno amoniacal	$TVNA$	$= Q_{filter} (N-NH_{3in} - N-NH_{3out}) / V_{media}$	g N-NH <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> d	34,99	119,65
5q	Tasa volumétrica de de N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> aparente	$TVCN_A$	$= Q_{filter} (N-NO_2^- in - N-NO_2^- out) / V_{media}$	g N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /m <sup>3</sup> d	-9,75	30,39
5r	Tasa volumétrica de conversión de nitritos	$TVCN$	$= VTR + VNR_A$	g N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /m <sup>3</sup> d	19,73	144,73
5s	Tasa de conversión de nitrógeno amoniacal superficial	$STR$	$= Q_{filter} (N-NH_{3in} - N-NH_{3out}) / A_{media}$	g N-NH <sub>3</sub> /m <sup>2</sup> d	0,08	0,05
5t	Tasa volumétrica de consumo de oxígeno	$VOCR_{tot}$	$= Q_{filter} (OD_{in} - OD_{out}) / V_{media}$	g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> d	-61,24	391,16
5u	Tasa volumétrica de consumo de oxígeno por bacterias nitrificantes	$VOCR_{nit}$	$= (3,47TVNA + 1,09TVCN) (0,92)$	g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> d	113,91	510,16

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

<b>Parámetro</b>		<b>Símbolo</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Unidades</b>	<b>Percolador</b>	<b>Filtro de arena</b>
5v	Tasa volumétrica de consumo de oxígeno por bacterias heterótrofas	$VOCR_{het}$	$=VOCR_{tot}-VOCR_{nit}$	$g\ O_2/m^3\ d$	-175,15	-118,99
5w	Razón de consumo de oxígeno	$OCR$	$=VOCR_{nit}/VOCR_{tot}$		-1,86	1,30
5z	Energía total	$P$		$kW/d$	25,34	25,34
5aa	Eficiencia energética de remoción de nitrógeno amoniacal	$ARE$	$=Q_{filter}(N-NH_{3in} - N-NH_{3out})/24P$	$g\ N-NH_3/kWh$	0,93	2,72
5cc	Eficiencia energética de uso de oxígeno	$OUE$	$=Q_{filter}(OD_{in} - OD_{out})/V_{media}$	$g\ O_2/kWh$	-1,92	9,31

Los biofiltros tuvieron un desempeño aceptable, la calidad del agua del efluente fue la necesaria para permitir un crecimiento mayor al reportado en la literatura. Al comparar el desempeño de estos biofiltros con otros estudios se encuentra que la tasa volumétrica de consumo de nitrógeno amoniacal está por debajo de lo reportado, tal vez debido a los niveles bajos de N-NH<sub>3</sub> tratado. No obstante, en general los dos biofiltros permitieron una remoción de N-NH<sub>3</sub> de 78,15 ± 24 % por lo que aún teniendo una baja TVNA se cumple el objetivo del tren de tratamiento que es mantener la vida de la trucha arco iris en el sistema.

El desempeño de los biofiltros con respecto al consumo de energía eléctrica no fue adecuado llegando a consumir 25,34 kW/d, lo que significa hasta \$ 20,39/kg de pez. Este consumo de energía se debe de optimizar reduciendo el gasto por oxigenación y bombeo. Una alternativa es direccionar el gasto de energía a sistemas de generación eléctrica solar, eólica o hidráulica.

Otra opción para que el sistema sea rentable es el de cultivar organismos desde cría hasta los 12 cm de longitud o 10 g de peso promedio, ya que el número de peces de esta talla por kilogramo de biomasa amortiza el costo energético.

## 5.6. CINÉTICA

### 5.6.1. TASAS DE REMOCIÓN

Las tasas de remoción del sistema prototipo se calcularon mediante un balance de masas de los procesos involucrados en la oxidación de las especies nitrogenadas, la materia orgánica, la generación y captura de sólidos suspendidos totales, el oxígeno disuelto utilizado por los peces y bacterias, en cada unidad del tren de tratamiento y del estanque.

El periodo utilizado para obtener las tasas fueron los 121 días del cultivo. En la figura 36 se tiene un esquema, donde se consideró, para obtener el balance de masa, una salida del sistema prototipo en el estanque (purga de lodos) y una entrada en los reservorios de acuerdo con el siguiente esquema.

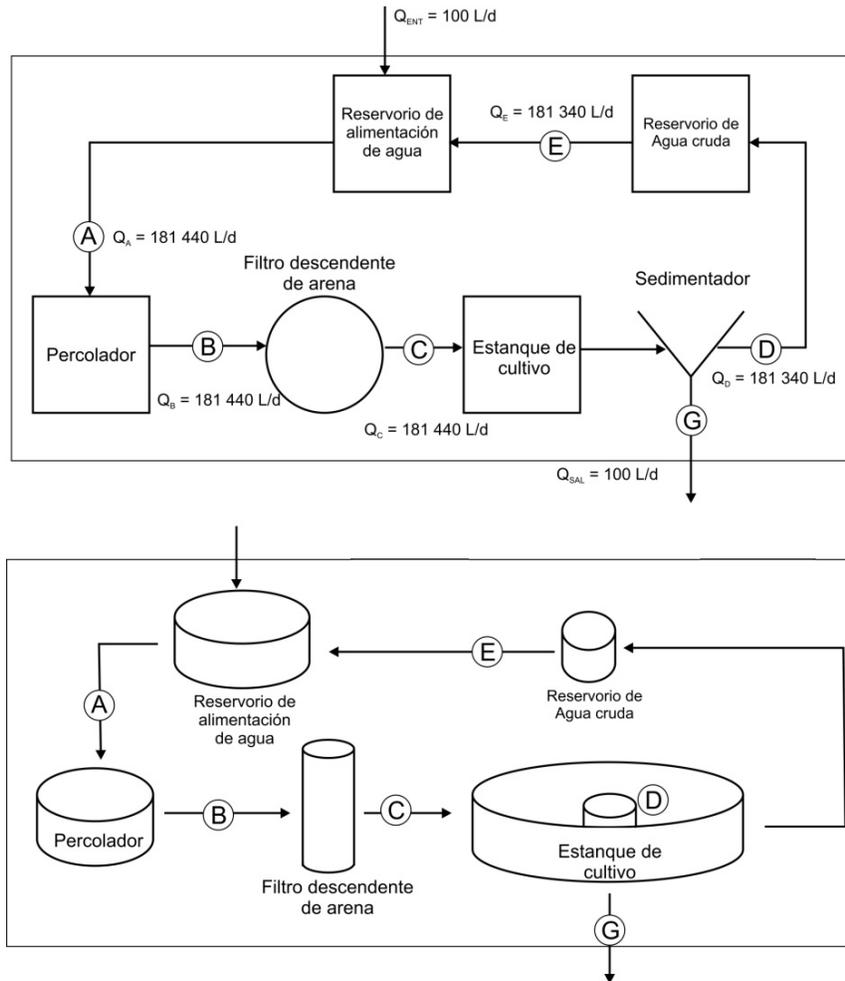


Figura 36. Esquema utilizado para el balance de masas en el sistema prototipo.

### 5.6.1.1. NITRÓGENO AMONIAACAL TOTAL (N-NH<sub>3</sub>)

La tabla 21 presenta el balance de masas en el SRA con respecto al nitrógeno amoniacal total, se muestra para cada punto de muestreo el caudal, la concentración promedio y flujo másico. Se indica con “1” la entrada a la unidad de tratamiento y con “-1” las salidas a la misma. Bajo el esquema de entradas y salidas de las unidades de tratamiento se calcula el flujo másico del influente y efluente para determinar las diferencias que cuando el valor es positivo significa una remoción y cuando es negativo se tiene una generación de nitrógeno amoniacal total.

La generación de nitrógeno amoniacal en el SRA fue, en el estanque de 106,85 g N-NH<sub>3</sub>/d principalmente por hidrólisis de aminoácidos y proteínas provenientes de las heces fecales de los peces y del alimento no consumido. El biofiltro (unidad especializada para eliminar las especies nitrogenadas) removi6 23,94 g N-NH<sub>3</sub>/d, sin embargo el filtro de arena descendente operado removi6 69,44 g N-NH<sub>3</sub>/d. De acuerdo con Timmons *et al.* (2002) existe una remoción en tuberías y otras unidades de los trenes de tratamiento que puede llegar hasta un 30%, en este caso fue del orden de 0,84 g N-NH<sub>3</sub>/d es decir un 0,57 %.

Tabla 21. Balance de masa del nitr6geno amoniacal total (N-NH<sub>3</sub>) en el sistema prototipo.

Punto de muestreo	Caudal (L/d)	Concentraci6n (mg/L)	Flujo m6sico (g/d)	Entrada (+1) y salida (-1)				Balances (g/d)							
				Percolador	Filtro de arena	Estanque	General	Percolador	Filtro de arena	Estanque	General				
<b>A</b>	181 440	0,80	145,15	1				145,15							
<b>B</b>	181 440	0,66	119,75	-1	1			- 119,75	119,75						
<b>C</b>	181 440	0,27	48,99		-1	1	-1	- 48,99	48,99	- 48,99					
<b>D</b>	181 340	0,80	145,07				1				145,07				
<b>E</b>	181 340	0,86	155,95			-1				- 155,95					
<b>G</b>	100	2,16	0,22			-1				- 0,22					
				Entrada (g/d)				145,15	119,75	48,99	145,07				
				Salida (g/d)				- 119,75	- 48,99	- 156,17	- 48,99				
				Diferencia				g/d				25,40	70,76	- 107,18	96,08
								g/kg pez d				0,28	0,78	- 1,17	1,05
				%				17,50	59,09	- 218,78	66,23				

El SRA en general tiene la capacidad de remover 96,08 g/d de nitrógeno amoniacal total, en el estanque se generan 107,18 g/d, lo que indica que siempre se tiene un residuo de N-NH<sub>3</sub> en el SRA

### 5.6.1.2. N – NITRITOS (N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)

Los procesos de nitrificación generan como resultado de la misma, especies nitrogenadas como nitritos y nitratos. En el sistema, la tasa de generación de nitritos fue de 7,91 y 12,27 g N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/d en el percolador y estanque respectivamente (tabla 22). En el filtro de arena se observó una tasa de remoción de 18,42 g N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/d, misma unidad del tren de tratamiento que cuenta con la tasa de remoción de nitrógeno amoniacal más alta, de manera general la tasa de remoción de este parámetro en el sistema es de 8,25 g N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/d.

Tabla 22. Balance de masa de N – nitritos (N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) en el sistema prototipo.

Punto de muestreo	Caudal (L/d)	Concentración (mg/L)	Flujo másico (g/d)	Entrada (+1) y salida (-1)				Balances (g/d)							
				Percolador	Filtro de arena	Estanque	General	Percolador	Filtro de arena	Estanque	General				
<b>A</b>	181 440	0,264	47,90	1				47,90							
<b>B</b>	181 440	0,312	56,61	-1	1			- 56,61	56,61						
<b>C</b>	181 440	0,201	36,47		-1	1	-1		- 36,47	36,47	- 36,47				
<b>D</b>	181 340	0,250	45,34				1				45,34				
<b>E</b>	181 340	0,274	49,69			-1				- 49,69					
<b>G</b>	100	0,508	0,05			-1				- 0,05					
				Entrada (g/d)				47,90	56,61	36,47	45,34				
				Salida (g/d)								- 56,61	- 36,47	- 49,74	- 36,47
				Diferencia				g/d				- 8,71	20,14	- 13,27	8,87
								g/kg pez d				- 0,10	0,22	- 0,15	0,10
				%				- 18,18	35,58	- 36,38	19,56				

### 5.6.1.3. N – NITRATOS (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

En el tren de tratamiento no se consideró una unidad que remueva el resultado final de la nitrificación, los nitratos, para esto se debe de contar con reactores anóxicos y una fuente de energía alterna para poder llevar a cabo el proceso de desnitrificación.

Los niveles tóxicos de esta especie nitrogenada para el cultivo de la trucha se encuentran por arriba de 1 360 mg/L (Russo y Thurston, 1991). En el muestreo realizado se

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

determinó la concentración más alta en 85,40 mg/L, similar a lo reportado por García (2008) y Gallego (2004). Sin embargo el incremento de  $N-NO_3^-$  con los niveles de alcalinidad que se tienen en el sistema y los valores de pH, permiten considerar que se tiene una acidez alta de nitratos por lo que se debe de considerar en su momento la remoción de éstos en el proceso biológico.

De acuerdo con el balance de masas en el percolador y en el estanque existen, zonas donde se remueven nitratos con una tasa de 163,99 y 362,39 g de  $N-NO_3^-/d$  respectivamente (tabla 23). Van Rijn *et al.* (2006) describen la teoría y aplicaciones de la desnitrificación en SRA, estos autores señalan que existe en cualquier sistema una desnitrificación pasiva cuando se tienen condiciones anóxicas en presencia de oxidación del carbono y compuestos inorgánicos nitrogenados.

Estas condiciones se dan principalmente, Según Van Rijn *et al.* (2006), en zonas de acumulación de sólidos y 0,2 – 0,3 mm por debajo de la superficie de la biopelícula y su remoción puede ser de 9 a 21 %.

**Tabla 23. Balance de masa de nitratos ( $N-NO_3^-$ ) en el sistema prototipo.**

Punto de muestreo	Caudal (L/d)	Concentración (mg/L)	Flujo másico (g/d)	Entrada (+1) y salida (-1)				Balances (g/d)			
				Percolador	Filtro de arena	Estanque	General	Percolador	Filtro de arena	Estanque	General
<b>A</b>	181 440	59,13	10 728,55	1				10 728,55			
<b>B</b>	181 440	58,13	10 547,11	-1	1			- 10 547,11	10 547,11		
<b>C</b>	181 440	59,14	10 730,36		-1	1	-1		- 10 730,36	10 730,36	- 10 730,36
<b>D</b>	181 340	58,77	10 657,35				1				10 657,35
<b>E</b>	181 340	57,24	10 379,90			-1				- 10 379,90	
<b>G</b>	100	40,43	4,04			-1				- 4,04	
				Entrada (g/d)				10 728,55	10 547,11	10 730,36	10 657,35
				Salida (g/d)				- 10 547,11	- 10 730,36	- 10 383,94	- 10 730,36
				Diferencia	g/d			181,44	- 183,25	346,42	- 3,01
					g/kg pez d			1,99	- 2,01	3,80	- 0,80
				%			1,69	- 1,74	3,23	- 0,69	

Por otra parte en el filtro de arena se genera este compuesto a una razón de 196,79 g de  $N-NO_3^-/d$ , lo cual concuerda con el proceso de nitrificación llevado a cabo en esta unidad

del tren de tratamiento, implicando que no se cuenta con zonas anóxicas en este filtro (Eding *et al.*, 2006).

#### 5.6.1.4. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Otra de las funciones importantes de los procesos biológicos en un tren de tratamiento es la remoción de la materia orgánica disuelta en el agua. En los sistemas de recirculación acuícola generalmente se proponen tres unidades donde se remueve la DQO, el biofiltro (percolador), el filtro de arena y los reservorios, todos ellos caracterizados por contener una biomasa bacteriana capaz de nutrirse de la materia orgánica. Las tasas de remoción fueron de 488, 502 y 1 363 g de DQO/d para el percolador, el filtro de arena y de manera general respectivamente. El proceso de crecimiento de los peces genera materia orgánica (desechos y residuos de alimento no consumido), en el estanque equivalente a 3 103,40 g de DQO/d (tabla 24).

**Tabla 24. Balance de masa de DQO en el sistema prototipo.**

Punto de muestreo	Caudal (L/d)	Concentración (mg/L)	Flujo másico (g/d)	Entrada (+1) y salida (-1)				Balances (g/d)				
				Percolador	Filtro de arena	Estanque	Reservorios	Percolador	Filtro de arena	Estanque	Reservorios	
<b>A</b>	181 440	49,27	8 939,55	1				8 939,55				
<b>B</b>	181 440	46,60	8 455,10	-1	1			- 8 455,10	8 455,10			
<b>C</b>	181 440	43,81	7 948,89		-1	1	-1		- 7 948,89	7 948,89	- 7 948,89	
<b>D</b>	181 340	51,58	9 353,52				1				9 353,52	
<b>E</b>	181 340	60,65	10 998,27			-1				- 10 998,27		
<b>G</b>	100	340,70	34,07			-1				- 34,07		
				Entrada (g/d)				8 939,55	8 455,10	7 948,89	9 353,52	
				Salida (g/d)				- 8 455,10	- 7 948,89	- 11 032,34	- 7 948,89	
				Diferencia	g/d				484,44	506,22	- 3 083,45	1 404,63
					g/kg pez d				5,31	5,55	- 33,79	15,39
				%				5,42	5,99	- 38,79	15,02	

### 5.6.1.5. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Timmons *et al.* (2002) mencionan que los SST son los responsables de aproximadamente el 80 % de los contaminantes en el agua, por lo que conocer su comportamiento y removerlos del SRA lo más pronto posible es una prioridad para cualquier cultivo.

La generación de los SST, como era estimado, sucedió en el filtro percolador, esto por la biopelícula muerta desprendida del empaque del biofiltro (Eding *et al.*, 2006) con una tasa de generación de 20,94 g de SST/d. Otro lugar donde se generaron SST fue el estanque, en efecto, las heces fecales, el alimento no consumido y la biomasa de bacterias muertas generaron 345,63 g SST/d. La unidad del tren de tratamiento que removió los sólidos fue el filtro de arena (286,12 g de SST/d) ya que no sólo trabajó como un filtro biológico, también para el objetivo inicial que es la remoción de los sólidos a la salida del tren de tratamiento (Cánepa, 1992). Otra unidad que cumplió con este objetivo fue el sedimentador que eliminó gran cantidad de SST en el balance de masa fue considerado junto con el estanque (tabla 25).

Tabla 25. Balance de masa de SST en el sistema prototipo.

Punto de muestreo	Caudal (L/d)	Concentración (mg/L)	Flujo másico (g/d)	Entrada (+1) y salida (-1)				Balances (g/d)				
				Percolador	Filtro de arena	Estanque	Reservorios	Percolador	Filtro de arena	Estanque	Reservorios	
<b>A</b>	181 440	3,62	656,81	1				656,81				
<b>B</b>	181 440	3,73	676,77	-1	1			- 676,77	676,77			
<b>C</b>	181 440	2,06	373,77		-1	1	-1		- 373,77	373,77	- 373,77	
<b>D</b>	181 340	3,64	660,08				1				660,08	
<b>E</b>	181 340	3,83	694,53			-1				- 694,53		
<b>G</b>	100	408,99	40,90			-1				- 40,90		
				Entrada (g/d)				656,81	676,77	373,77	660,08	
				Salida (g/d)				- 676,77	- 373,77	- 735,43	- 373,77	
				Diferencia	g/d				- 19,96	303,00	- 361,66	286,31
					g/kg pez d				- 0,22	3,32	- 3,96	3,14
				%				- 3,04	44,77	- 96,76	43,38	

### 5.6.1.6. ALCALINIDAD

En el SRA se utilizó agua pluvial cosechada como fuente para el cultivo, donde la alcalinidad fue un parámetro muy variable, ya que el agua nueva contenía muy pocas sales y se necesitaba aumentar este parámetro para el buen funcionamiento de los procesos biológicos. En este caso el balance de masas se efectuó para corroborar donde se realiza el consumo.

En la tabla 26 se observa que en el balance de masa, la alcalinidad tiene una generación en el estanque posiblemente por un proceso de desnitrificación que se pudo llevar a cabo en el fondo del sedimentador (Van Rijn *et al.*, 2006), por una precipitación de sólidos insolubles por ausencia de CO<sub>2</sub> o por la falta de una total disolución de sales agregadas al sistema que se precipitaban en el sedimentador. Así mismo, se verificó el consumo de alcalinidad en las unidades del tren de tratamiento donde se realizan los procesos biológicos del sistema (percolador y filtro de arena).

Tabla 26. Balance de masa de alcalinidad en el sistema prototipo.

Punto de muestreo	Caudal (L/d)	Concentración (mg/L como CaCO <sub>3</sub> )	Flujo másico (g como CaCO <sub>3</sub> /d)	Entrada (+1) y salida (-1)				Balances (g como CaCO <sub>3</sub> /d)							
				Percolador	Filtro de arena	Estanque	General	Percolador	Filtro de arena	Estanque	General				
A	181 440	65,14	11 819,00	1				11 819,00							
B	181 440	51,42	9 329,64	-1	1			- 9 329,64	9 329,64						
C	181 440	46,11	8 366,20		-1	1	-1		- 8 366,20	8 366,20	- 8 366,20				
D	181 340	54,46	9 875,78				1				9 875,78				
E	181 340	55,73	10 106,08			-1				- 10 106,08					
G	100	119,42	11,94			-1				- 11,94					
				Entrada (g/d)				11 819,00	9 329,64	8 366,20	9 875,78				
				Salida (g/d)				- 9 329,64	- 8 366,20	- 10 118,02	- 8 366,20				
				Diferencia				g/d				2 489,36	963,45	- 1 751,82	1 509,58
								g/kg pez d				27,28	10,56	- 19,20	16,54
				%				21,06	10,33	- 20,94	15,29				

De manera general el sistema consume sales (alcalinidad) a una razón de 1 390,31 g/d. La causa es el uso de agua cosechada de lluvia para el cultivo acuícola, su alcalinidad es muy baja. Los procesos de nitrificación consumen más alcalinidad de la que proporciona

la fuente de agua, debido a la acidez del agua que se genera por la descomposición de la materia fecal y alimento no consumido.

### 5.6.1.7. GENERACIÓN DE RESIDUOS EN EL ESTANQUE

A partir del balance de masas llevado a cabo en el estanque, se pudo determinar la generación de residuos por parte de los peces, del alimento no consumido y de los procesos biológicos llevados a cabo en el mismo estanque, es importante señalar que los sólidos generados fueron del orden de 3,80 g/kg de pez d. Como se menciona anteriormente debido al fraccionamiento de los sólidos al permanecer 24 h en el sedimentador. Se generaron 19,20 g/kg pez d, de alcalinidad en el estanque principalmente por una sedimentación de sales debido a la forma de diluir el bicarbonato de sodio, la cal y la sal en el sistema como medida de adecuación del agua de lluvia.

En la figura 37 se esquematiza la generación promedio de residuos en el estanque, donde se observa la tasa en función de la biomasa.

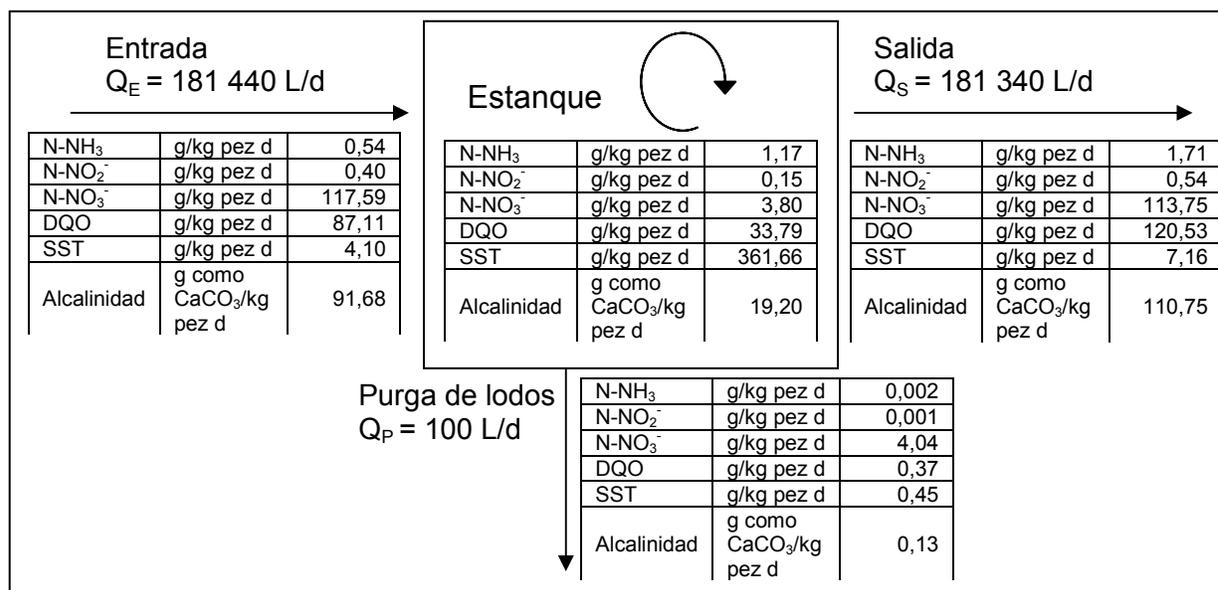


Figura 37. Esquema de generación de residuos en el estanque.

## 5.7. MODELACIÓN MATEMÁTICA

En esta investigación se pretendió modelar matemáticamente el filtro biológico mediante dos métodos: 1) el estadístico o regresivo por medio del cual se determinaron ecuaciones, principalmente de primer orden, que expresaron las relaciones entre variables y parámetros, representando el estado del sistema; 2) el determinístico o dinámico, que estudian los procesos a partir del comportamiento físico, químico y biológico de los parámetros del fenómeno.

De los dos tipos mencionados se pudo trabajar con el primero, modelando las tasas volumétricas de conversión de nitrógeno amoniacal total, la tasa volumétrica de transformación de nitritos, el consumo de oxígeno disuelto en el agua por los organismos acuáticos en estudio y la generación de residuos contaminantes por parte de estos.

La propuesta inicial de este trabajo fue la posibilidad de utilizar mejores modelos matemáticos como lo son los dinámicos. Después de profundizar el estado de arte sobre éstos, se encontró que su desarrollo se ha enfocado en conocer los procesos involucrados en la estructura de la biopelícula y la distribución de las poblaciones que la forman (Wanner *et al.*, 2006; Van Loosdrecht *et al.*, 2002; Noguera *et al.*, 1999; Wanner y Reichert, 1996; Wanner y Gujer, 1986), alejándose del objetivo de modelación de esta investigación, que fue el de conocer el comportamiento de los procesos involucrados en los filtros biológicos de un sistema cerrado de cultivo de trucha arco iris.

Por otro lado se han realizado esfuerzos para utilizar modelos dinámicos derivados de el trabajo desarrollado en Holanda para filtros de lodos activados (Fall, 2007), es decir modificando el modelo ASM1 (Plattes *et al.*, 2008; 2007; 2006) que permitirían dar respuesta al objeto de estudio de la investigación, desafortunadamente los estudios consideran una mezcla completa en el reactor, lo cual no se tiene para el filtro percolador.

No obstante se estudio la posibilidad de utilizar el modelo modificado reportado por Plattes *et al.* (2008), pero se encontró que las concentraciones de los parámetros necesarios para el modelo que se tienen en un sistema de recirculación acuícola son muy bajas. El intervalo entre una concentración de entrada y de salida es muy reducido, la medias aritméticas de las concentraciones presentan desviaciones estándar grandes por

la naturaleza de los procesos biológicos ocurridos en el SRA, por lo que los intervalos de confianza y el error estándar llegan a confundir los valores medios de las concentraciones del influente y el efluente de las unidades del SRA para el modelo.

Por lo anterior, no fue posible utilizar los métodos de modelación dinámica o determinística desarrollados hasta el momento para llegar a conocer como se representan matemáticamente los procesos ocurridos el filtro biológico a partir del comportamiento físico, químico y biológico.

### 5.7.1. BIOFILTROS

Para el caso de un biofiltro especializado en la nitrificación, se modela la tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal (TVNA) que se define como el incremento diario de nitrógeno amoniacal convertido a nitritos por unidad de volumen (Timmons *et al.*, 2009). Para la investigación se utilizó al filtro percolador como una unidad especializada en la nitrificación, también se tomó en cuenta al filtro de arena, debido a que se encontró que esta unidad removió un porcentaje importante de nitrógeno amoniacal total.

Tanto el percolador como el filtro de arena presentaron una dependencia lineal entre la concentración de nitrógeno amoniacal y la TVNA (figura 38 y 39) con una fuerte dependencia  $R^2 = 0,913$ ,  $R = 0,956$  y  $R^2 = 0,723$ ,  $R = 0,851$ , para el filtro de arena y el percolador respectivamente. El filtro de arena presentó un mayor desempeño que el filtro percolador. La dependencia lineal entre la concentración de nitrógeno amoniacal a bajas concentraciones y la TVNA ha sido concurrente en estudios previos donde se evalúa el desempeño de biofiltros (Guerdat *et al.*, 2010; Zhu y Chen, 1999; Ester *et al.* 1994). Los modelos matemáticos que describen el comportamiento de los biofiltros se expresan con la ecuación 8 para el filtro lento de arena y ecuación 9 para el filtro percolador.

$$y = 228,45x + 7,18 \quad (8)$$

Donde: x = Concentración de N-NH<sub>3</sub> en el influente en mg/L; y = Tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal (TVNA) en g de N-NH<sub>3</sub>/L h.

$$y = 63,083x - 6,33 \quad (9)$$

Donde: x = Concentración de N-NH<sub>3</sub> en el influente en mg/L; y = Tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal (TVNA) en g de N-NH<sub>3</sub>/L h.

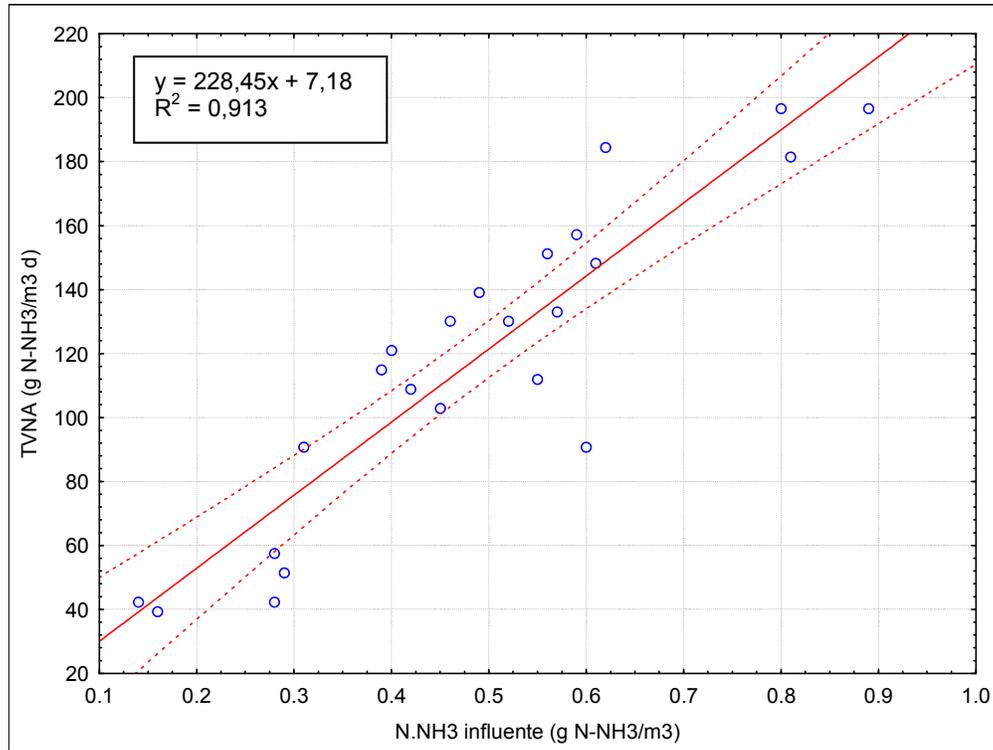


Figura 38. Efecto de la concentración de nitrógeno amoniacal en el influente y la tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal total (TVNA) en el filtro lento de arena

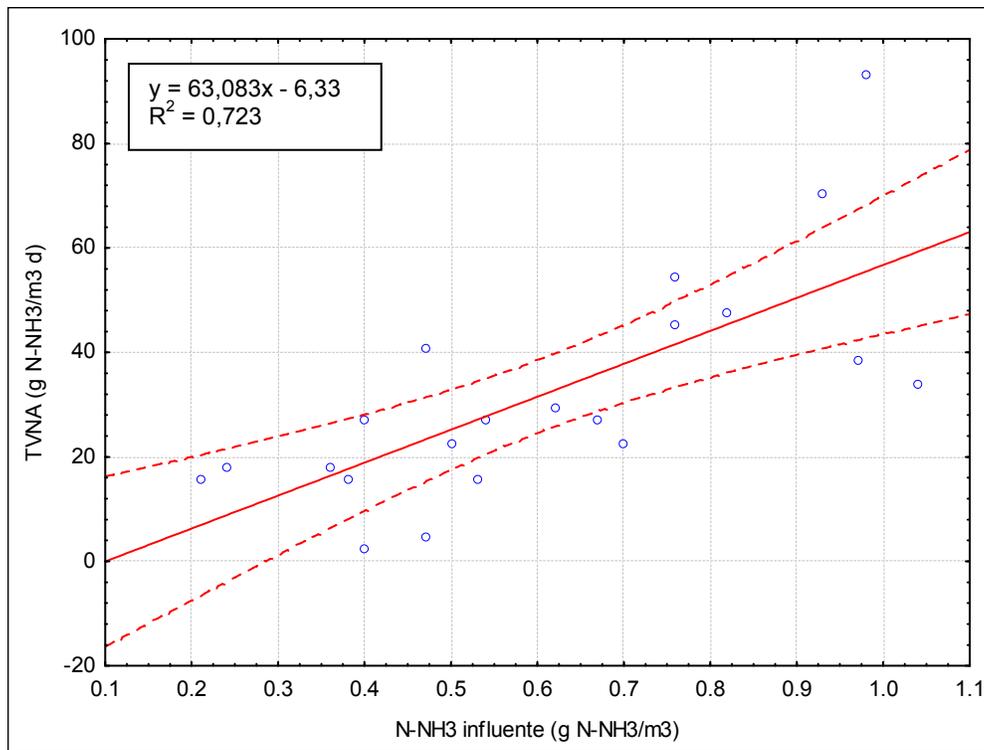


Figura 39. Efecto de la concentración de nitrógeno amoniacal en el influente y la tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal total (TVNA) en el percolador.

Las TVNA alcanzadas en este trabajo fueron en promedio de  $119,65 \pm 42,71$  y  $34,99 \pm 41,20$  g N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> d para el filtro de arena y el percolador. Estas tasas fueron menores a las reportadas en estudios previos. Zhu y Chen (1999) reportan tasas en reactores de lechos fluidizados de 374 g N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> d, sin embargo, en trabajos subsecuentes reportan tasas de 312 y 291 g N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> d para el mismo filtro utilizado (Zhu y Chen, 2001). Para filtros de arena fluidizado Ling y Chen (2005) lograron tasas de 956 g N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> d y 4 917 g N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> d, con una razón (C/N) de 1,0 y 2,0 respectivamente. Cabe subrayar que todos los estudios previos fueron realizados bajo condiciones de laboratorio y con cultivos mono – específicos.

Estudios realizados a escala piloto reportan tasas volumétricas de conversión de nitrógeno amoniacal para filtros de perdigones y fluidizados de arena de 127 y 117 g N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> d respectivamente (Pfeiffer y Malone, 2006). A nivel comercial Guerdat et al. (2010) reportan tasas de 704 g N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> d para un filtro de lecho fluidizado, 267 g N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> d para un bioreactor de poco espacio y 586 g N-NH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> d para un filtro de perdigones.

Comparadas las TVNA obtenidas en esta investigación con los trabajos previos, estas tasas siempre se encontraron por debajo de las reportadas, para el caso del percolador se tiene una baja TVNA y un bajo porcentaje de remoción (19,47 %), el cual es lógico respecto a la misma relación entre la concentración de nitrógeno amoniacal total y la TVNA, donde se espera que ha concentraciones bajas de N-NH<sub>3</sub> (como en este trabajo) se tengan bajas TVNA. El filtro de arena sin embargo, presenta una TVNA similar a la reportada por Pfeiffer y Malone (2006) para filtros de arena fluidizados y con una alta remoción de nitrógeno amoniacal (73,53 %) lo que indica un alto desempeño para un filtro lento de arena, debido principalmente a bajas cargas a las que fue sometido.

Aún cuando los biofiltros estudiados presentaron bajas TVNA comparados con otros trabajos, en estudios similares en México se obtuvieron tasas menores (figura 40 y 41) lo cual lleva a una mejor comprensión de los procesos ocurridos en los filtros percoladores y de arena cuando están insertos en un sistema de recirculación acuícola (García, 2008; Gallego *et al.*, 2004; Gallego 2004).

EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL

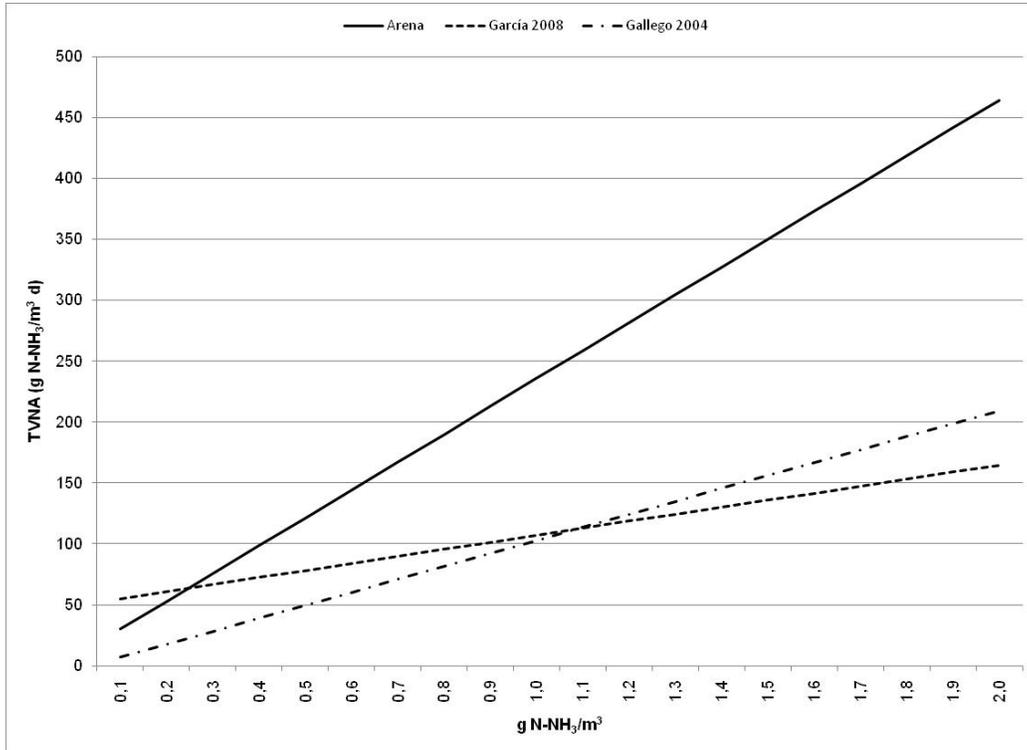


Figura 40. Comparación de desempeño de filtros de arena de trabajos previos y el actual.

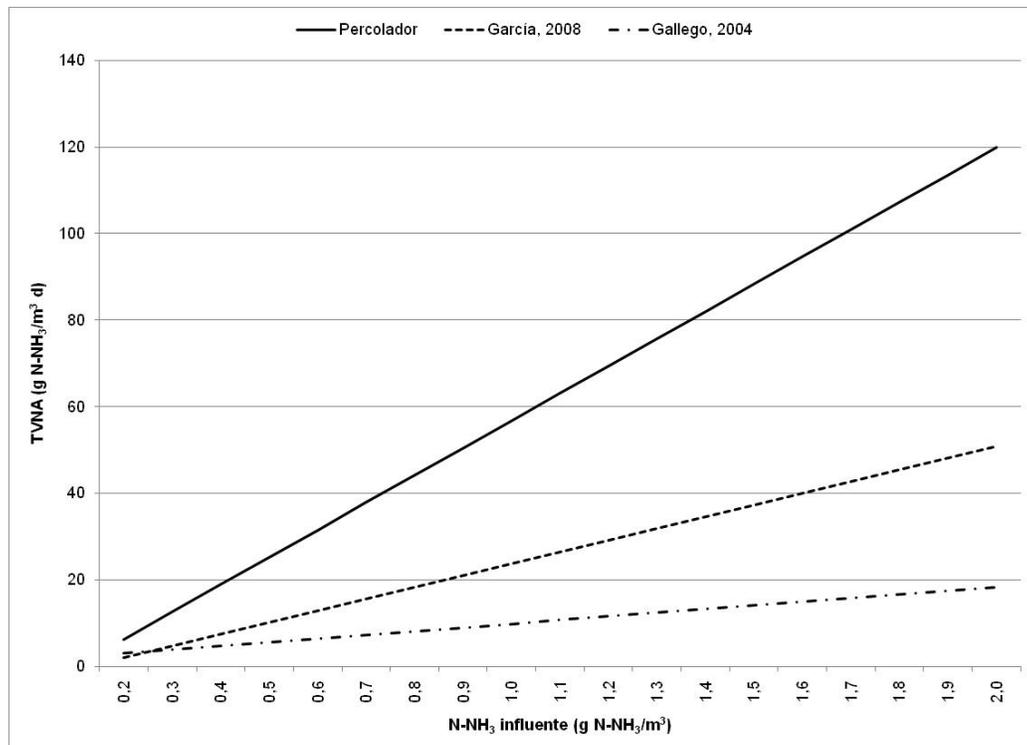


Figura 41. Comparación de desempeño de filtros percoladores de trabajos previos y el actual.

La tasa volumétrica de conversión de nitritos (TVCN) permite conocer la cantidad de esta especie nitrogenada que se remueve en el biofiltro por una unidad de volumen. Con base en esta información es posible obtener las constantes cinéticas y construir los modelos matemáticos de la segunda etapa del proceso de nitrificación.

Para el caso en estudio se realizó una comparación de la concentración de nitrógeno amoniacal en el influente del biofiltro con la TVNA y la TVCN para cada biofiltro del tren de tratamiento (figura 42 y 43), ya que la segunda es dependiente de la primera. Es decir para que exista una oxidación de nitritos primero debe de existir la oxidación del nitrógeno amoniacal (Guerdat *et al.*, 2010).

En la gráfica de la figura 42 se puede observar que la remoción de nitritos depende tanto de la concentración de nitrógeno amoniacal a la entrada del filtro de arena y de la TVNA. En efecto, la TVNA se comporta de manera constante cuando se aumenta la carga en el filtro. Para tener una remoción de nitritos en esta unidad del tren de tratamiento es necesario contar con una carga mínima entre 0,30 y 0,40 g de  $N-NO_2^-/m^3$ .

El filtro de arena para el caso en estudio presenta un desempeño óptimo al llegar a TVNA de 160 a 180 g de  $N-NH_3/m^3$  d; una vez alcanzada esta tasa, la TVCN se reduce considerablemente. En el periodo de la fase experimental el promedio de la TVNA fue de  $119,65 \pm 42,71$  g de  $N-NH_3/m^3$  d, permitiendo así que la remoción de nitrógeno amoniacal se encontrará en un intervalo adecuado para remover  $N-NO_2^-$ .

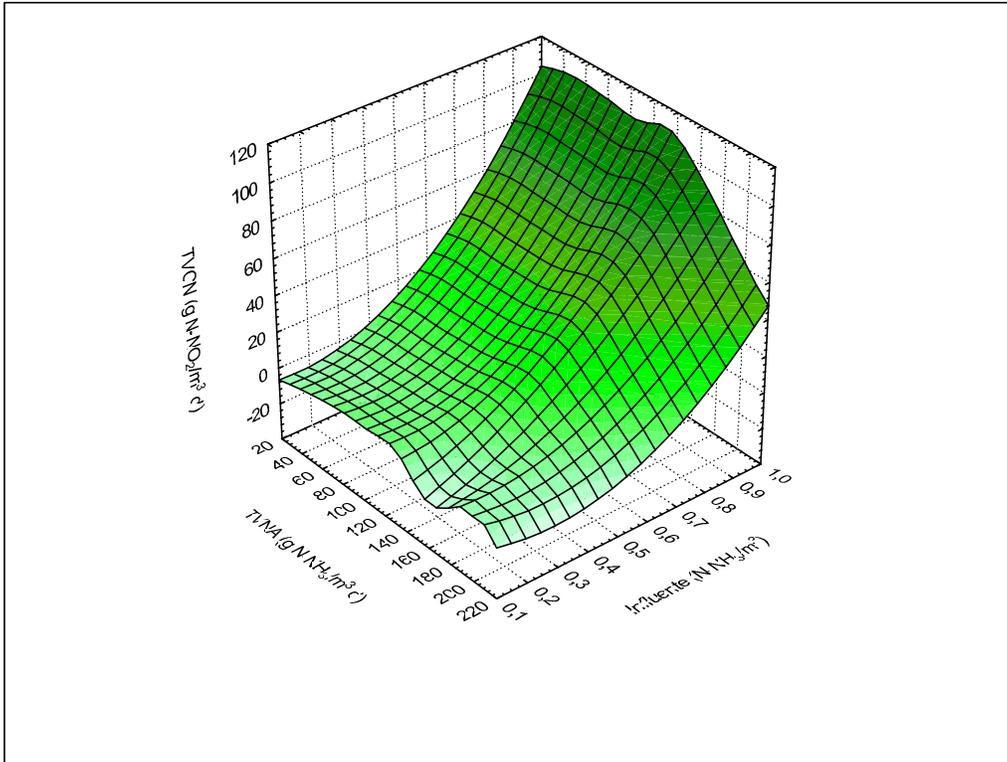


Figura 42. Comparación de la TVCN con la concentración de nitrógeno amoniacal y la TVNA del filtro lento de arena

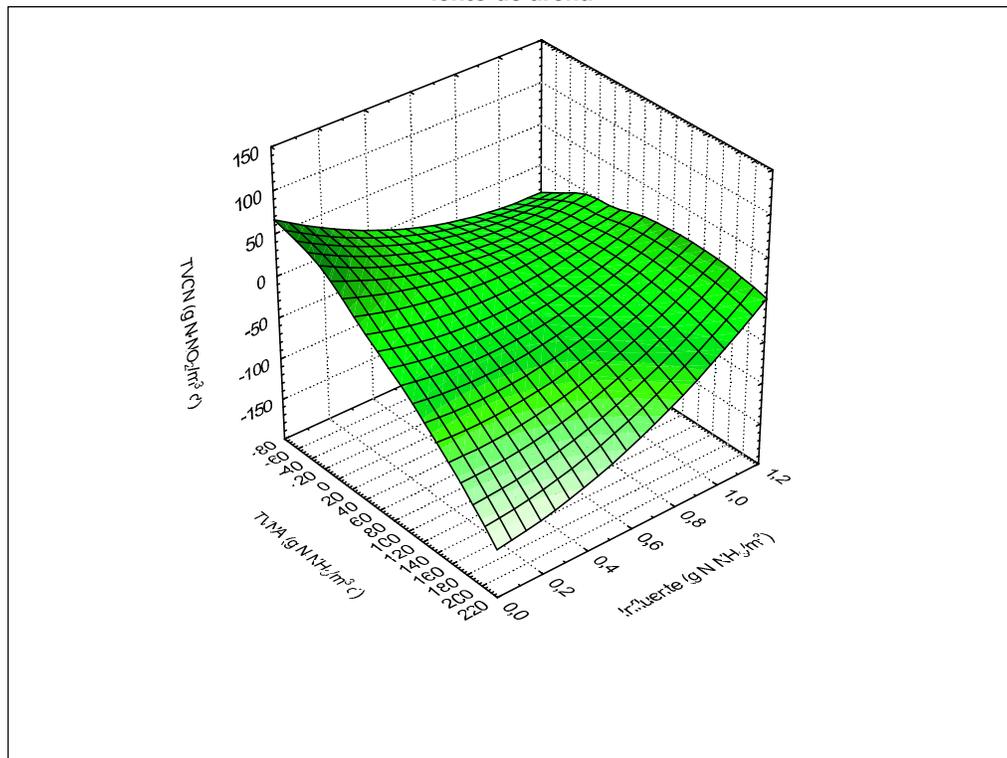


Figura 43. Comparación de la TVCN con la concentración de nitrógeno amoniacal y la TVNA del filtro percolador

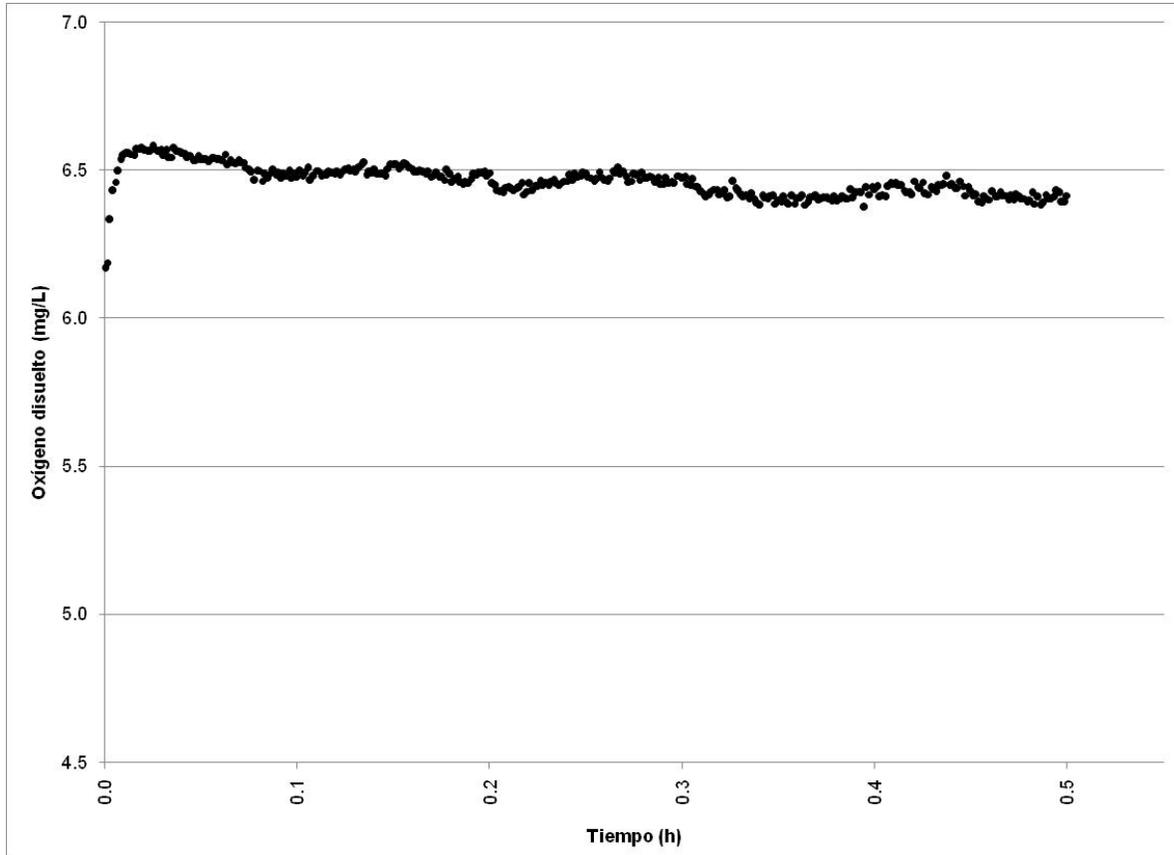
El comportamiento de la TVCN en el filtro percolador fue negativo, es decir, no se llegó de manera adecuada a remover completamente la cantidad de nitritos generados en esta unidad. Se puede observar, en la figura 43, el proceso de remoción de nitritos cuando se tienen concentraciones de nitrógeno amoniacal en el influente y TVNA altas, de otra forma los nitritos generados en la primera etapa de la nitrificación no son removidos en este filtro. La causa de que la nitrificación se no se culminará adecuadamente puede ser por las bajas concentraciones de pH (Bonvendeur, 1989; Gujer y Boller, 1986).

### **5.7.2. CONSUMO DE OXÍGENO DISUELTO POR LOS PECES**

En el SRA existen dos parámetros limitantes para conocer la capacidad de carga del sistema: el oxígeno disuelto en el agua y el nitrógeno amoniacal. La importancia del primer parámetro se debe a que es imprescindible para la respiración de los organismos involucrados en los procesos del SRA (peces y bacterias). Una concentración mínima adecuada para sostener la vida (Fivelstad *et al.*, 1999; Tudor, 1999) que para el caso de la trucha que según García (2008) debe ser mayor a 5 mg/L.

Modelar el consumo de oxígeno disuelto por parte de los peces en las diferentes fases del cultivo es necesario para poder establecer las necesidades de aire que se deben añadir al sistema de acuerdo con la densidad del cultivo, así también para poder establecer el tipo de equipo requerido para abastecer el OD y disminuir la demanda de energía eléctrica.

La concentración de saturación ( $C_{sat}$ ) de oxígeno disuelto en el agua a una altitud de 2660 msnm fue en promedio de  $6,42 \pm 0,05$  mg/L (figura 44). La concentración de equilibrio en el sistema fue de  $5,53 \pm 0,25$  mg/L, para determinar esta concentración se utilizaron 6 truchas con un biomasa de 2,52 kg, ambas constantes a una temperatura de 18°C.



**Figura 44. Saturación de oxígeno en el agua para el caso de estudio**

La figura 45, ilustra que la concentración efectiva que se tendrá en los estanques será a un nivel inferior a la concentración de saturación, esto por la respiración de los peces en el estanque. En este caso, el equilibrio se encontró a 5,53 mg de  $O_2/L$ .

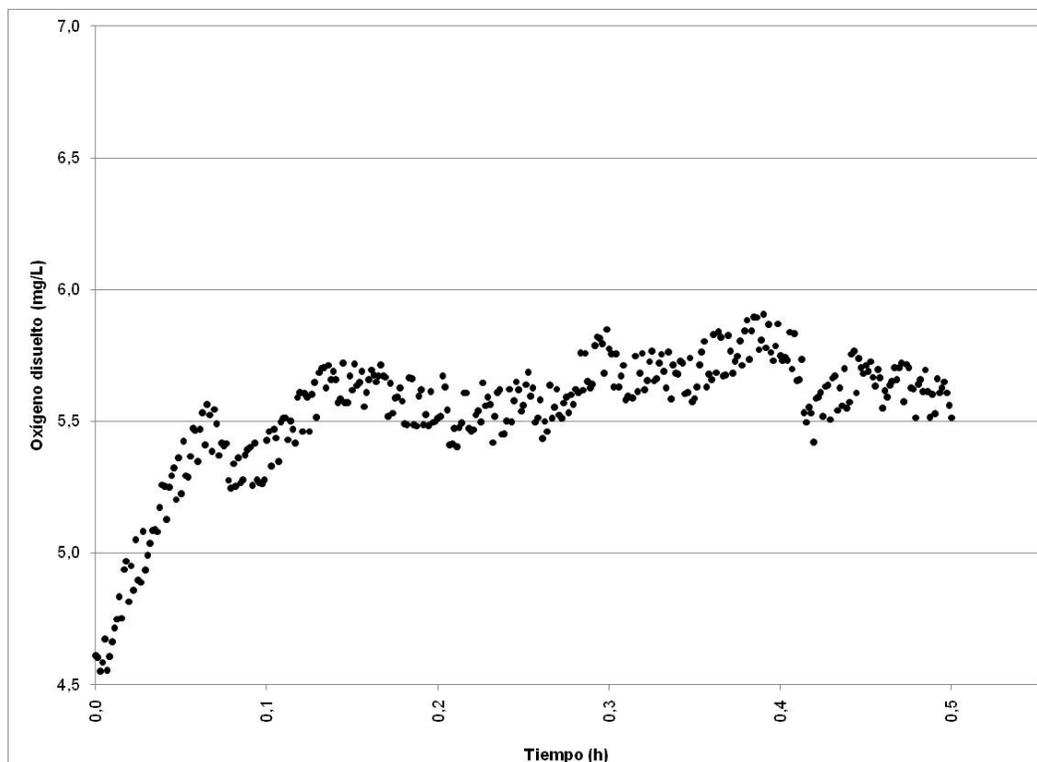


Figura 45. Concentración de equilibrio para el SRA

Los factores que determinan la concentración de oxígeno disuelto en el agua son la temperatura y la altitud principalmente (Timmons *et al.*, 2009). En los cultivos acuícolas la concentración de oxígeno disuelto en los estanques también depende de la densidad y el tamaño de los organismos (Bergheim *et al.*, 1993; Merino *et al.*, 2007; Reig *et al.*, 2007). En la operación de un SRA trutícola, al momento de consumir alimento y después de alimentar existen picos de consumo de oxígeno generados por el metabolismo de los organismos cultivados (Salas – Leiton *et al.*, 2008).

Con base en la revisión de literatura (Cerezo – Valverde *et al.*, 2009; Dalvi *et al.*, 2009; Salas – Leiton *et al.*, 2008; Perera *et al.*, 2007; Debnath *et al.*, 2006) y los resultados aquí obtenidos se determinó que los cuatro factores más importantes relacionados con la concentración de oxígeno disuelto en el agua son: densidad, tamaño de los organismos, temperatura y alimento.

Ahora bien, con un diseño experimental de tipo Plackett – Burman de 16 pruebas (Wheeler, 1989) se obtuvo mediante un análisis de varianza, que el factor principal que determina la conducta de consumo de oxígeno en el estanque es la densidad con un

41,92 %, seguido de un efecto combinado de temperatura y densidad con un 21,48 % y por último la temperatura con un 11,27 % (los resultados de las 16 pruebas se muestran en el anexo 5).

Mediante un análisis de varianza se determinó el porcentaje de varianza explicada, la cual permite conocer los contrastes principales y las interacciones de los mismos que expresan la variación del consumo de oxígeno por parte de los peces con base en los factores estudiados (figura 46).

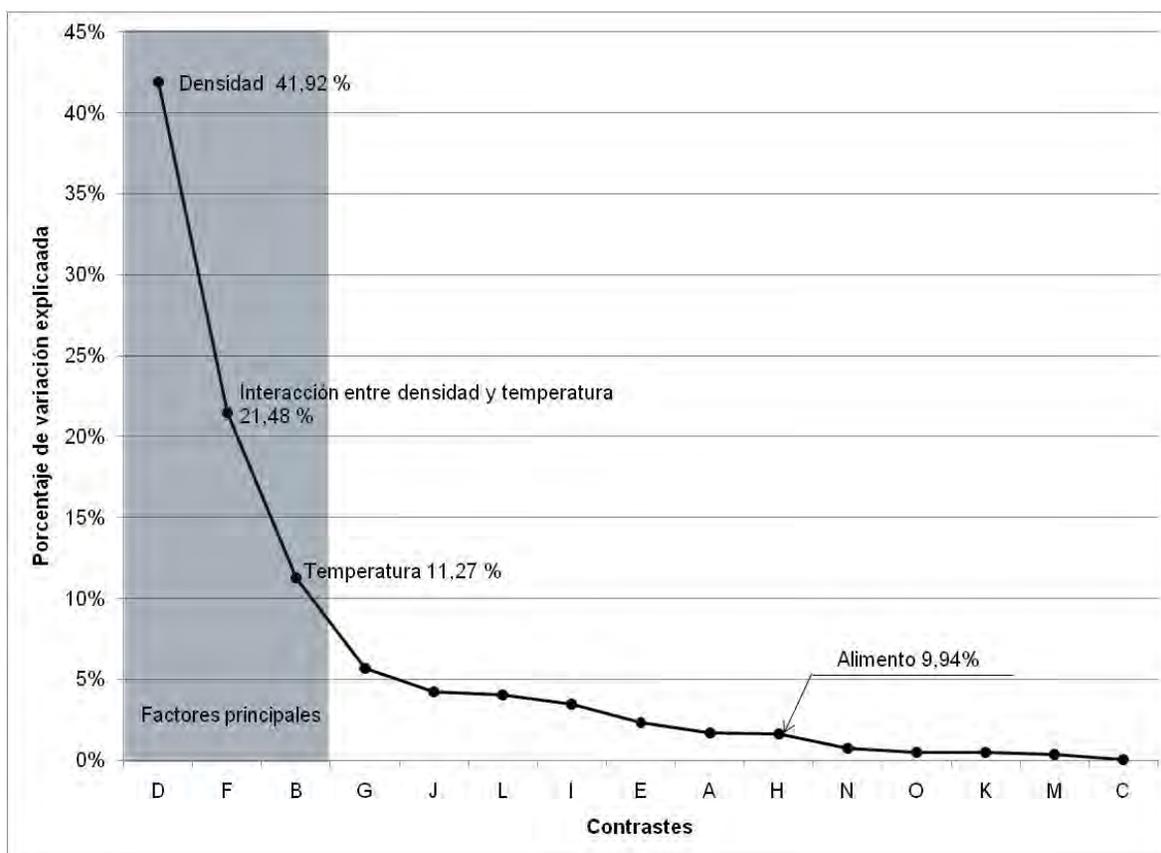


Figura 46. Porcentaje de impacto de los factores determinantes de la tasa de consumo de oxígeno en los estanques.

Para la modelación matemática del consumo de oxígeno en el SRA a una altitud de 2660 msnm se construyó un modelo de tipo regresivo lineal múltiple obteniendo la ecuación 10 con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,747$  y un coeficiente de correlación de  $R = 0,864$ .

$$rO_2 = 0,041 (T) (\rho) - 0,454 (\rho) - 1,324 (T) + 22,447 \quad (10)$$

Donde:  $rO_2$  es la tasa de consumo de oxígeno ( $mg\ O_2/L\ h$ ),  $T$  es la temperatura del agua ( $^{\circ}C$ ) y  $\rho$  es la densidad a la que se encuentra el cultivo ( $kg/m^3$ ).

Este modelo contrasta con lo reportado en diversos estudios para peces marinos y crustáceos (Cerezo – Valverde *et al.*, 2009; Merino *et al.*, 2009; Perera *et al.*, 2007; Tudor, 1999) donde los modelos matemáticos están en función del peso del organismo y no en función de la temperatura y la densidad. Sin embargo el modelo propuesto en este trabajo está en función de los factores más impactantes en el patrón de consumo de oxígeno por parte de la trucha en sistemas cerrados a grandes altitudes (2660 msnm).

El modelo es válido para un intervalo de temperatura de 12 a 23 $^{\circ}C$ , densidades de 8 a 60  $kg/m^3$  para una altitud de 2 660 msnm, se sustituyeron las variables en el modelo con valores dentro de los intervalos mencionados obteniendo el nomograma de consumo de oxígeno en un cultivo de trucha.

En la figura 47, el modelo construido a partir de las pruebas de respirometría detalla que a temperaturas bajas el consumo de oxígeno por parte de los peces incrementa conforme aumenta la densidad, a temperaturas altas dicho aumento en el consumo es más amplio. A densidades bajas (menores a 28  $kg/m^3$ ) cuando se aumenta la temperatura el consumo de oxígeno disminuye debido a que los organismos se encuentran en un intervalo de temperatura adecuado, permitiendo un mejor desarrollo de la trucha. Al acrecentar la densidad y la temperatura, el modelo indica que existen condiciones de estrés, probablemente por hacinamiento, causando un aumento considerable en el consumo de oxígeno.

De este modelo se puede determinar para el caso del SRA en evaluación la cantidad de oxígeno disuelto en el estanque para una densidad de 28  $kg/m^3$  a una temperatura de 17 $^{\circ}C$ .

Una vez determinada la concentración de saturación y de equilibrio para el SRA, se determina la velocidad de consumo de oxígeno disuelto de los peces de la figura 47, en este caso 6,74  $g\ O_2/m^3\ h$ .

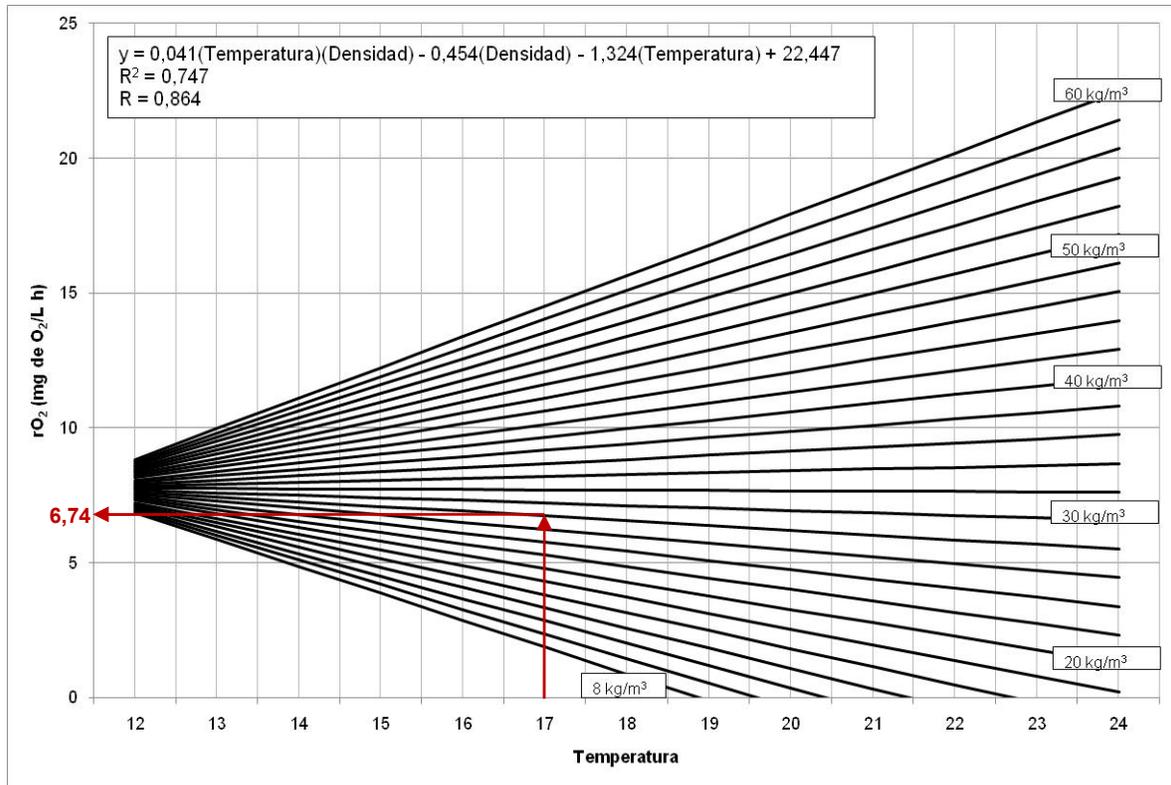


Figura 47. Comportamiento de la tasa de consumo de oxígeno a diferentes temperaturas y densidades para la trucha arco iris a 2660 msnm.

Posteriormente se calcula la constante  $K_L a$  que permite conocer la capacidad de oxigenación que el sistema necesita para soportar la biomasa en el estanque.

$$K_L a = \frac{-rO_2}{(C_{eq} - C_{sat})} = \frac{-6,74 \frac{g}{m^3 h}}{\left(5,53 \frac{g}{m^3} - 6,42 \frac{g}{m^3}\right)} = 7,5730 h^{-1} \quad (11)$$

Donde:  $K_L a$  = Coeficiente de transferencia volumétrico ( $h^{-1}$ ),  $C_{sat}$  = Concentración de saturación del gas ( $kg/m^3$ ),  $C_{eq}$  = Concentración de equilibrio del gas ( $kg/m^3$ ),  $rO_2$  = Tasa de consumo de oxígeno ( $kg O_2/m^3 h$ )

La capacidad de oxigenación se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CO = K_L a \cdot V(C_{sat} - C) = 7,5730 h^{-1} \cdot 7,06 m^3 \left(6,42 \frac{g}{m^3} - 5,0 \frac{g}{m^3}\right) = 75,92 \frac{g}{h} \quad (12)$$

Donde:  $CO$  = Consumo de oxígeno ( $kg/h$ ),  $C$  = Concentración del gas a un tiempo  $t$  ( $kg/m^3$ ),  $C_{sat}$  = Concentración de saturación del gas ( $kg/m^3$ ),  $K_L a$  = Coeficiente de transferencia volumétrico ( $h^{-1}$ ).

Por lo que el requerimiento de oxigenación en el sistema fue de 75,92 g OD/h, es decir para mantener el OD en niveles de 5 mg/L en el sistema es necesario contar con equipo con la capacidad de transferir al agua 75 920 mg de  $O_2/h$ .

### 5.7.3. MODELACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE CONTAMINANTES

La modelación de la producción de contaminantes se realizó tomando en cuenta el punto de muestreo D, es decir en el influente del tren de tratamiento. Utilizando una correlación de Pearson, se determinó que parámetros limitantes del cultivo de trucha en un SRA tienen una relación con la producción (biomasa generada).

Se encontró una correlación significativa de la biomasa con la generación de nitrógeno amoniacal, DQO, SST y nitratos. En general se pudo observar que la producción de contaminantes en el prototipo evaluado fue menor a lo reportado por García (2008), así mismo los intervalos de trabajo en cuanto a densidad y biomasa fueron superiores a los utilizados por este autor.

Los valores estimados por las ecuaciones encontradas en esta investigación y los determinados por las ecuaciones encontradas por García (2008) son significativamente diferentes. Esto implica que el manejo del cultivo, la operación del sistema y las modificaciones realizadas al sistema utilizado, disminuyeron las concentraciones de los contaminantes limitantes al cultivo de la trucha arco iris. El tiempo de contacto de los generadores de contaminantes (alimento balanceado no consumido y heces fecales de los peces) fue mínimo por lo que el proceso de hidrólisis de los compuestos nitrogenados y materia orgánica no se llevó a cabo de igual manera que en trabajo realizado por García (2008).

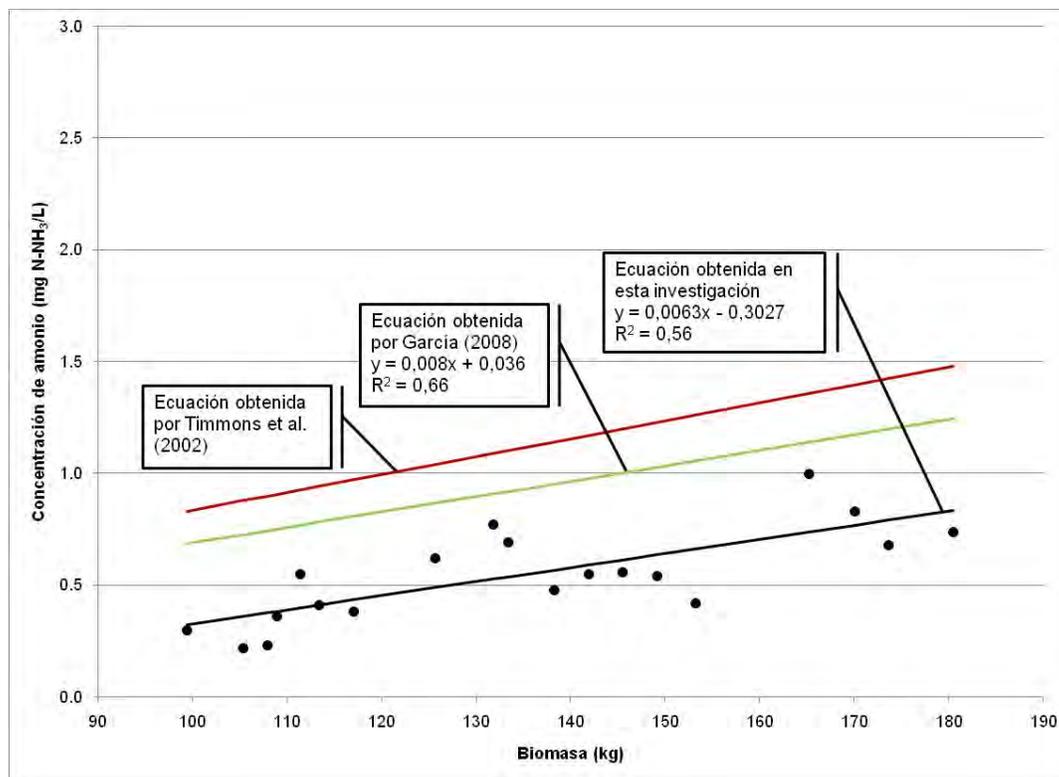
#### 5.7.3.1. NITRÓGENO AMONIACAL (N-NH<sub>3</sub>)

Dentro de los parámetros limitantes más importantes para la vida acuática se encuentra el nitrógeno amoniacal. Para el cual se encontró una relación entre la biomasa y la generación de nitrógeno amoniacal por los peces, fue obtenida relacionado los resultados de nitrógeno amoniacal en el estanque.

En la figura 48 se describe en forma analítica y en función de la biomasa, la producción de nitrógeno amoniacal por las truchas para un intervalo de biomasa de 15 a 28,7 kg/m<sup>3</sup>, con un R<sup>2</sup> = 0,5667. Esta ecuación se comparó con la obtenida por García (2008) y Timmons *et al.* (2002).

$$y = 0,0063x - 0,3027 \quad (13)$$

Donde y = nitrógeno amoniacal (mg/L); x = biomasa (kg)



**Figura 48. Relación entre la biomasa y la producción de nitrógeno amoniacal**

El comportamiento de la concentración resultante de nitrógeno amoniacal fue directamente proporcional al incremento de biomasa en el estanque y se encuentra por debajo de la producción estimada por García (2008) y Timmons *et al.* (2002). García (2008) propone el uso de esta ecuación para el diseño de percoladores para sistemas de recirculación acuícola, sin embargo, en su estudio el intervalo para el cual se determinó la ecuación es hasta 12 kg/m<sup>3</sup>, la ecuación encontrada en este estudio permite como menciona este autor incluir los errores de manejo por el ser humano (antrópicos) propios en la alimentación de los cultivos acuícolas para densidades mayores (hasta 28,7 kg/m<sup>3</sup>).

El caudal de operación de los SRA tiene un papel importante dentro de la conducción de los contaminantes entre el estanque (generación) y el tren de tratamiento (remoción), entre más rápido pase del estanque a las unidades del tren de tratamiento y viceversa los contaminantes son removidos y el agua acondicionada llega a los peces (Timmons *et al.*, 2009). Observando la grafica de la figura 48 se tiene que la pendiente de los modelos tanto de esta investigación como de García (2008) son similares. Eliminando la variable caudal de ambos modelos se tiene que las ecuaciones no son significativamente diferentes, es decir que la generación de nitrógeno amoniacal total en el estanque se

comporta de manera igual en ambos SRA, siendo el caudal de operación un factor importante en la eficiencia del sistema.

Generalmente los modelos matemáticos reportados en la literatura se han realizado con base en la cantidad de alimento suministrado a los organismos acuáticos (Timmons et al., 2009; Timmons y Losordo 1994), lo cual no refleja la realidad de los cultivos comerciales (García *et al.*, en prensa; García, 2008). En las unidades de producción trutícola el factor antropogénico impacta fuertemente en el comportamiento de los procesos limitantes al cultivo de la trucha, realizar los modelos matemáticos en función de la biomasa en el estanque se considera que cubre este factor.

El modelo generado de la TVNA del biofiltro (ecuación 8) describe la eficiencia de la TVNA en función de la concentración de nitrógeno amoniacal total a la entrada a la unidad del tren de tratamiento. Esta misma concentración es la generada en el estanque de cultivo por los peces y es conducida por tubería y reservorios hasta el biofiltro. El modelo matemático que describe este fenómeno se representa por la ecuación 13.

Al sustituir la concentración de nitrógeno amoniacal total de la ecuación 8 por la ecuación 13, podemos describir el fenómeno de la tasa volumétrica de conversión del nitrógeno amoniacal en función de la biomasa existente en el estanque de cultivo bajo los siguientes supuestos: biomasa de 90 – 180 kg, altitud de 2 600 msnm, temperatura de 10 – 18 °C. La ecuación 14 representa el modelo de la TVNA en función de la biomasa.

$$\text{TVNA (g N-NH}_3\text{/m}^3\text{ d)} = 1.439 (\text{Biomasa [kg]}) - 61.97 \quad (14)$$

### 5.7.3.2. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

La generación de SST en el sistema prototipo fue, comparado con García (2008), mucho menor (figura 49) y directamente proporcional a la producción de SST (ecuación 15). Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,7556$ .

$$y = 0,0873x - 8,218 \quad (15)$$

Donde y = SST (mg/L); x = biomasa (kg)

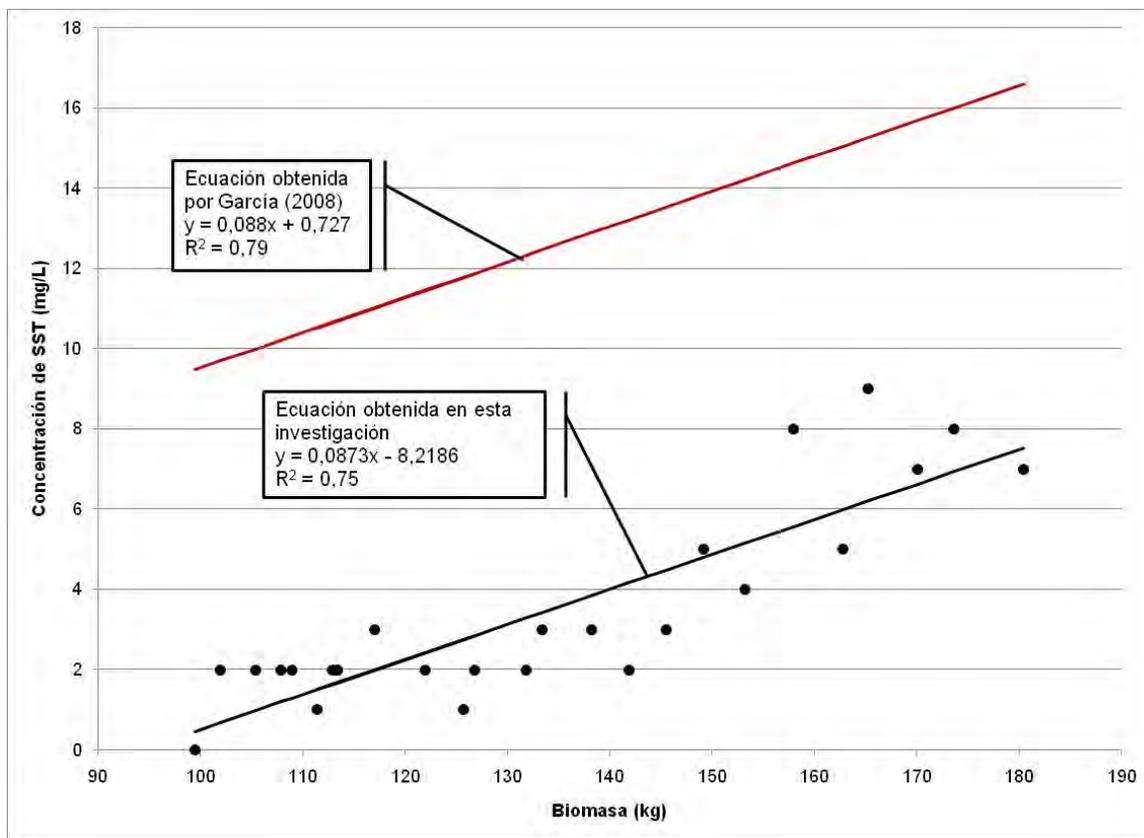


Figura 49. Relación entre la biomasa y la concentración de SST.

Para el caso que se observa en la figura 49, la concentración de SST es menor a la concentración estimada por la ecuación encontrada por García (2008), indicando que la generación de SST en un sistema de recirculación acuícola no es proporcional a la biomasa en el estanque para densidades de 6 a 28 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.7.3.3. N – NITRATOS (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Aunque este parámetro no es limitante al cultivo de la trucha, ya que la concentración a la cual es tóxico es mayor a 1 360 mg/L (6 020,45 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L) (Russo y Thurston, 1991), se encontró que los nitratos se producen de forma directamente proporcional a la biomasa presente en el sistema. Esta relación se describe matemáticamente de acuerdo a la ecuación 16, en la figura 50 se representa el modelo matemático de la concentración N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en función de la biomasa.

$$y = 0,5821x - 20,647 \tag{16}$$

Donde y = nitratos (mg/L) y x = biomasa (kg)

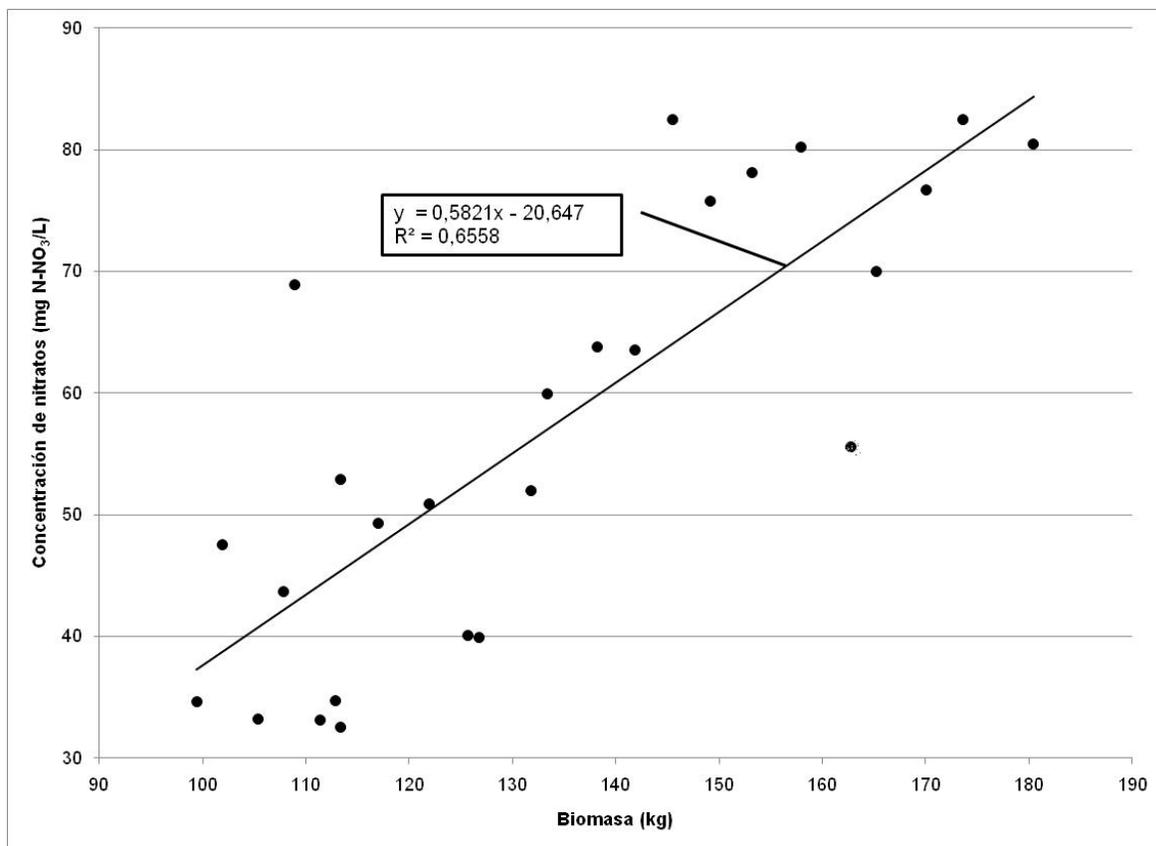


Figura 50. Relación entre la biomasa y la producción de nitratos

La expresión matemática de la figura 50 permite asumir que entre más biomasa la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  será mayor, es decir para tener una concentración mayor a 1360 mg  $\text{N-NO}_3^-/\text{L}$  es necesario tener una biomasa de 2371,83 kg. Así mismo, Van Rijn *et al.* (2006), mencionan que aún cuando los niveles tóxicos de concentración de nitratos para peces es muy alta, a valores de 100 mg  $\text{N-NO}_3^-/\text{L}$  se tienen consecuencias como: 1) desnitrificación pasiva incompleta, 2) desestabilización de la capacidad de amortiguación, 3) no se lleva a cabo la eliminación concomitante de ortofosfatos y sulfatos.

Concentraciones mayores a 100 mg  $\text{N-NO}_3^-/\text{L}$  se evitan en los SRA mediante la adición de agua limpia al sistema, de esta manera se elimina la acumulación de nitratos y sólidos disueltos totales (Eding *et al.*, 2006). En la figura 51 se aprecia el comportamiento de los nitratos en el tren de tratamiento el cual aumenta y disminuye de acuerdo con los intercambios de agua realizados en el proceso del cultivo.

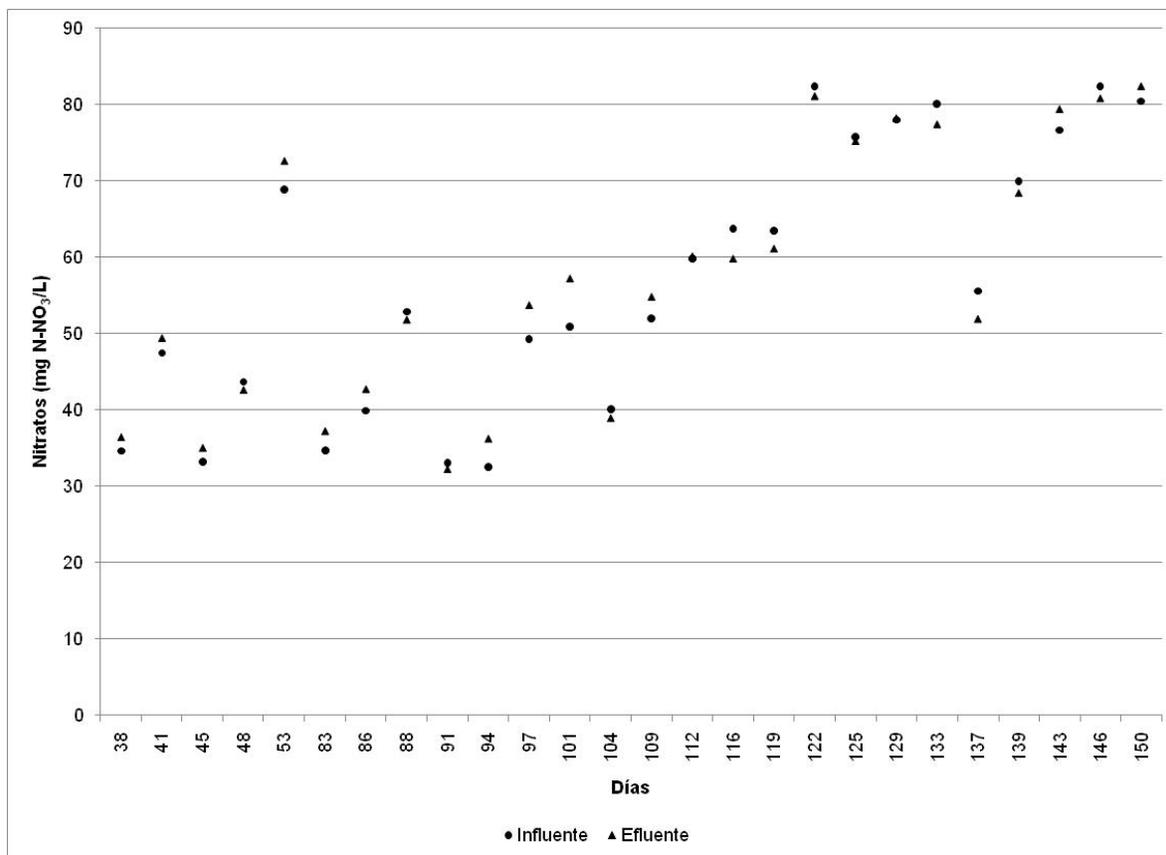


Figura 51. Comportamiento de los nitratos (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en el influente y efluente del tren de tratamiento

#### 5.7.3.4. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La producción de materia orgánica generada determinada como la DQO es el único parámetro en el que no se encontró una diferencia significativa entre los datos estimados en esta investigación y los determinados por García (2008). Este mismo autor recomienda utilizar este parámetro en lugar de la DBO<sub>5</sub>, ya que este último implica un valor histórico al tener que esperar hasta cinco días para conocer el valor del análisis y las concentraciones son muy bajas encontrándose en el error de la prueba. Se puede observar en la figura 52 que la concentración de materia orgánica es proporcional a la biomasa y aún a densidades de 28,7 kg/m<sup>3</sup> no se llega a concentraciones que dañen a los peces. No obstante la acumulación de este parámetro indica una competencia de bacterias heterótrofas y nitrificantes en el biofiltro por lo que es importante mantener los niveles de DQO bajos para que los biofiltros se especialicen en la nitrificación.

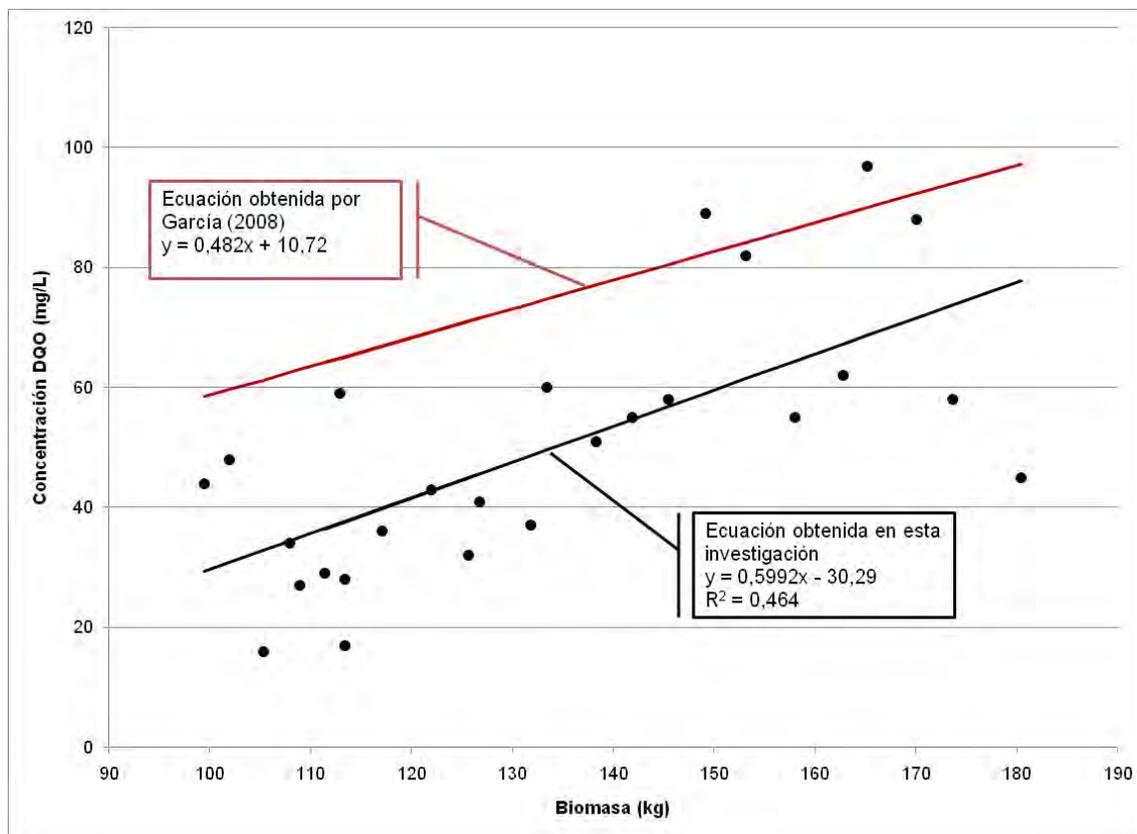


Figura 52. Relación de la producción de biomasa y la concentración de DQO

## 5.8. SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL DEL SRA

El control del SRA utilizado en este trabajo se llevó según el modelo modificado presentado por García (2008), considerando diez parámetros limitantes en el tratamiento del agua y cultivo de la trucha: SST, DQO, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, alcalinidad, pH, OD, temperatura y caudal (Anexo 6).

Así, el control del SRA se realizó gráficamente para los parámetros relacionados con la contaminación, donde se identificaron tres estados, letal (rojo), de tolerancia (amarillo) y óptimo (verde).

Estos valores deben permanecer preferentemente en la zona verde con tendencia a cero, esto indica que el sistema se encuentra trabajando adecuadamente. Sin embargo, si algún valor se encuentra en la zona amarilla es necesario corregirlo a la brevedad. Cuando algún parámetro se encuentre en la zona roja, el cultivo acuícola presentará altas mortalidades y de no ser atendido inmediatamente el sistema colapsará.

Para los parámetros que representan las características físicas y químicas del agua, se dividen en cinco estados, dos letales, dos de tolerancia y uno óptimo, donde su función es similar a los parámetros anteriores, pero cuentan con valores máximos y mínimos para cada uno de ellos. Para que estos parámetros se encuentren en condiciones adecuadas para el SRA, éstos deben de estar en la zona verde.

La escala presentada en las siguientes figuras se detalla en la tabla 27 para cada zona letal, de tolerancia y óptima.

Tabla 27. Escala de las zonas de los parámetros en el sistema de seguimiento y control

Zona	Parámetro				
	Caudal (L/s)	Temperatura (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Alcalinidad (mg/L como CaCO <sub>3</sub> )	pH
Letal	< 0,5	< 5,0	< 3,0	< 23,0	< 6,5
Tolerancia	0,5 – 2,0	5,0 – 10,0	3,0 – 5,0	23,0 – 50,0	6,5 – 7,0
Óptima	2,1 – 3,0	10,1 – 18,0	> 5,0	51,0 – 150,0	7,1 – 8,5
Tolerancia	3,1 – 4,0	18,1 – 22,0		> 150,00	8,6 – 9,0
Letal	> 4,0	> 22,0			> 9,0
Zona	N-NH <sub>3</sub> (mg/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
Óptima	< 0,7	< 0,7	< 50	< 150	< 80
Tolerancia	0,7 – 1,0	0,7 – 1,0	50 – 100	150 – 190	80 – 100
Letal	> 1,0	> 1,0	> 100	> 190	> 100

En promedio, el comportamiento de los parámetros limitantes en el estanque, se mantuvieron en las zonas óptimas de operación, sin embargo la temperatura, el OD y el nitrógeno amoniacal se encontraron en zonas de tolerancia para la trucha. En la figura 53, el sistema de monitoreo muestra los valores promedio de la entrada y salida del estanque, siendo estos valores los críticos para la toma de decisiones.

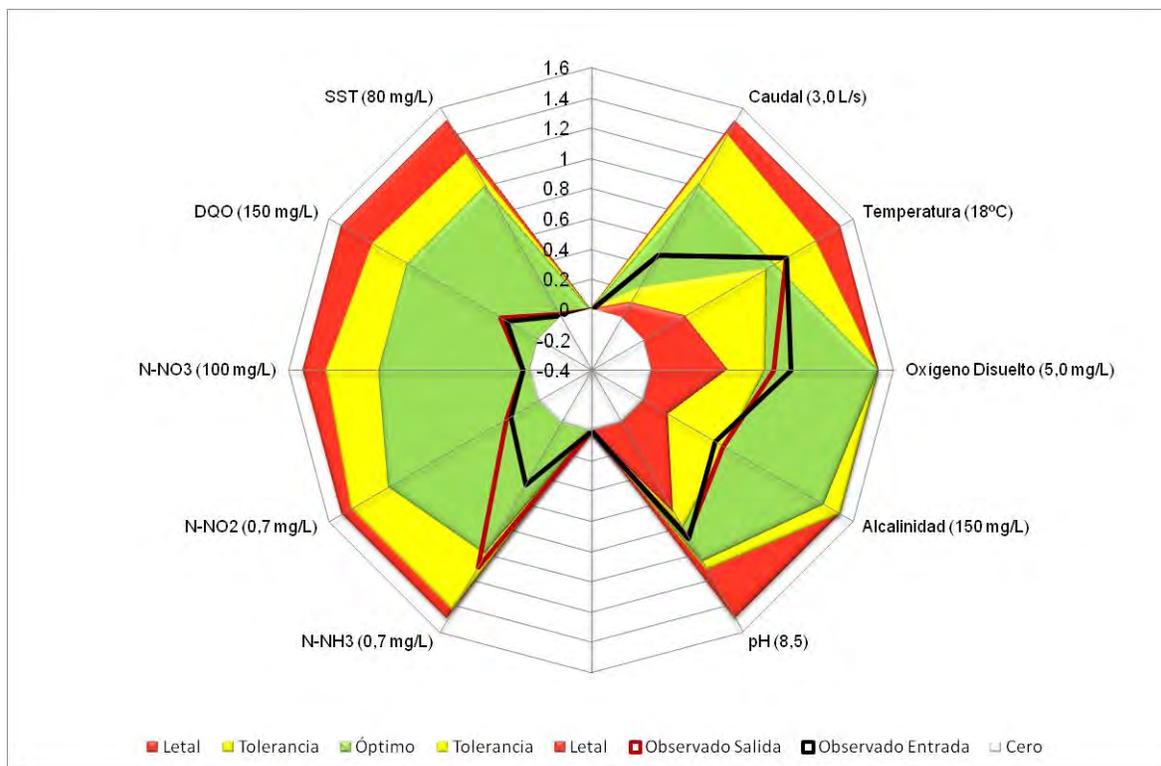
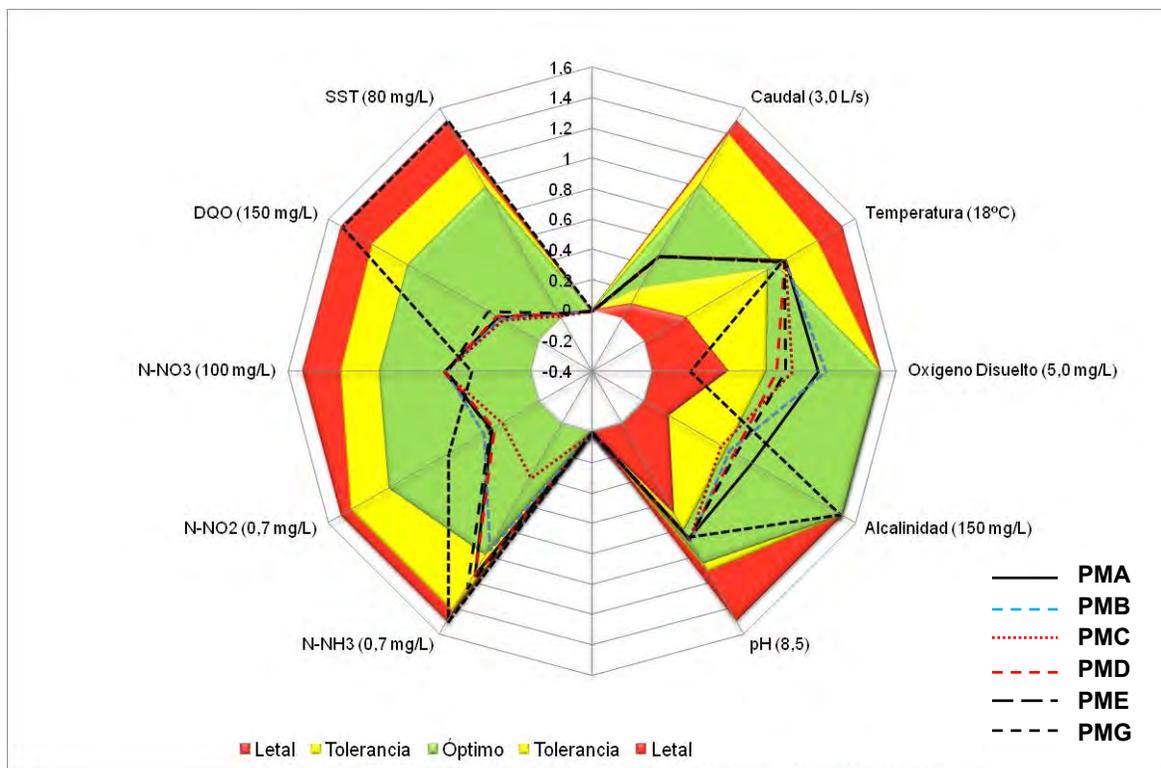


Figura 53. Representación gráfica de los valores promedio a la entrada y salida del estanque

El control en el sistema mediante este modelo mostró en general un comportamiento similar en los puntos de muestreo A, D y E. Exceptuando el oxígeno disuelto y la alcalinidad, para el primero y debido al movimiento del agua se aumenta en el punto de muestreo A y la alcalinidad disminuye (figura 53). En particular se observa, en la figura 54, que los nitratos a pesar de ser el resultado de la nitrificación (Wheaton, 1982) estos no llegan a ser tóxicos para el cultivo de la trucha, sin embargo, forman ácidos minerales que inhiben el proceso de nitrificación.

El control del SRA mediante este modelo denota que los parámetros como el OD, la alcalinidad y el nitrógeno amoniacal son los más importantes de monitorear de forma continua e indican el buen manejo del prototipo (Colt *et al.*, 2006; Colt, 2006).

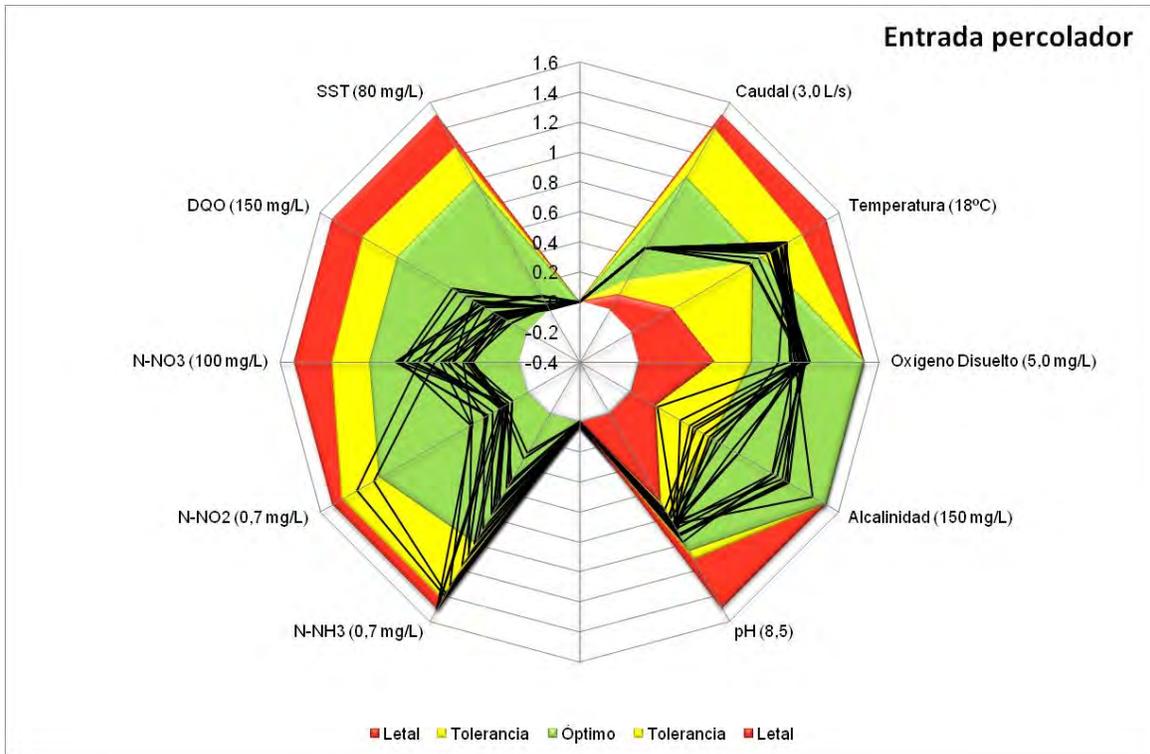


**Figura 54. Control del SRA donde se muestra el promedio general por punto de muestreo. PMA: punto de muestreo A, PMB: punto de muestreo B, PMC: punto de muestreo C, PMD: punto de muestreo D, PME: punto de muestreo E, PMG: punto de muestreo G.**

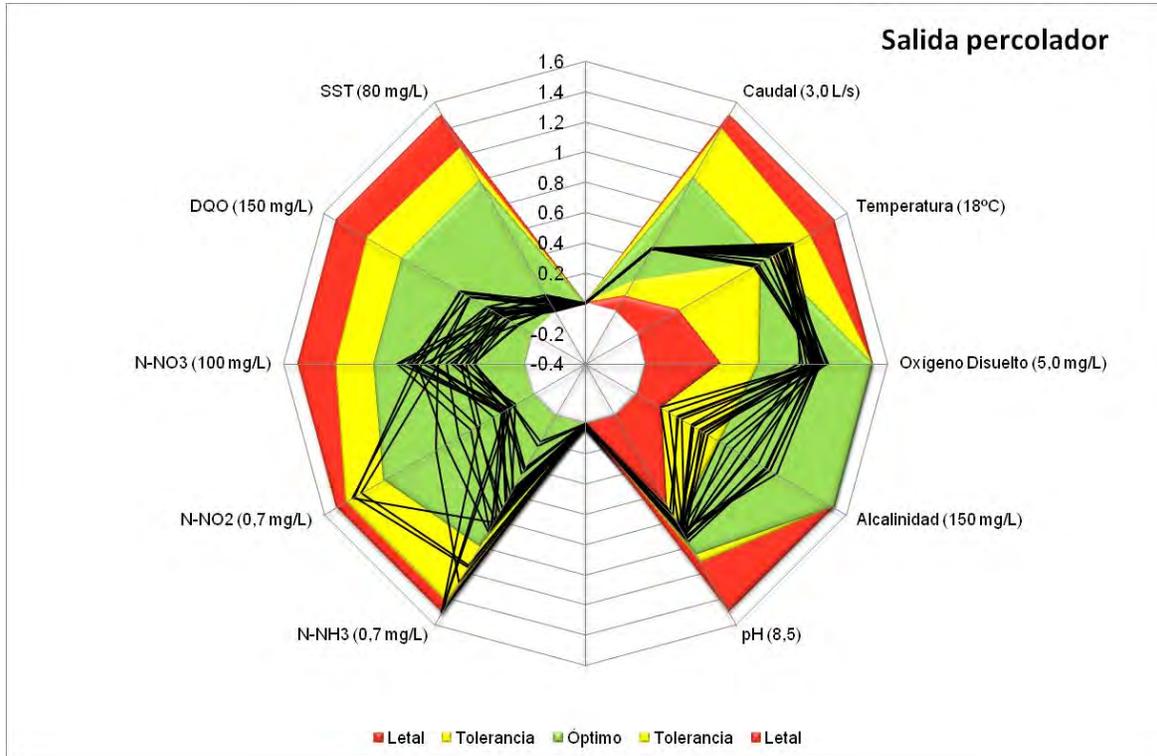
Se llevó un monitoreo puntual de las unidades biológicas del tren de tratamiento para conocer si estaban cumpliendo con los objetivos planteados en su diseño. En las figuras 55 y 56 se observa el control del percolador, el cual tuvo una variación muy importante en la alcalinidad, variación que se refleja también en el efluente del filtro de arena (figura 57).

Este comportamiento se debe al proceso de nitrificación que se lleva a cabo en los filtros biológicos (Wheaton, 1982) y a que el agua de lluvia contiene concentraciones muy bajas de sales, siendo necesario la incorporación de estas de manera diaria.

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**



**Figura 55. Representación gráfica de los valores puntuales en el SRA a la entrada del percolador.**



**Figura 56. Representación gráfica de los valores puntuales en el SRA a la salida del percolador.**

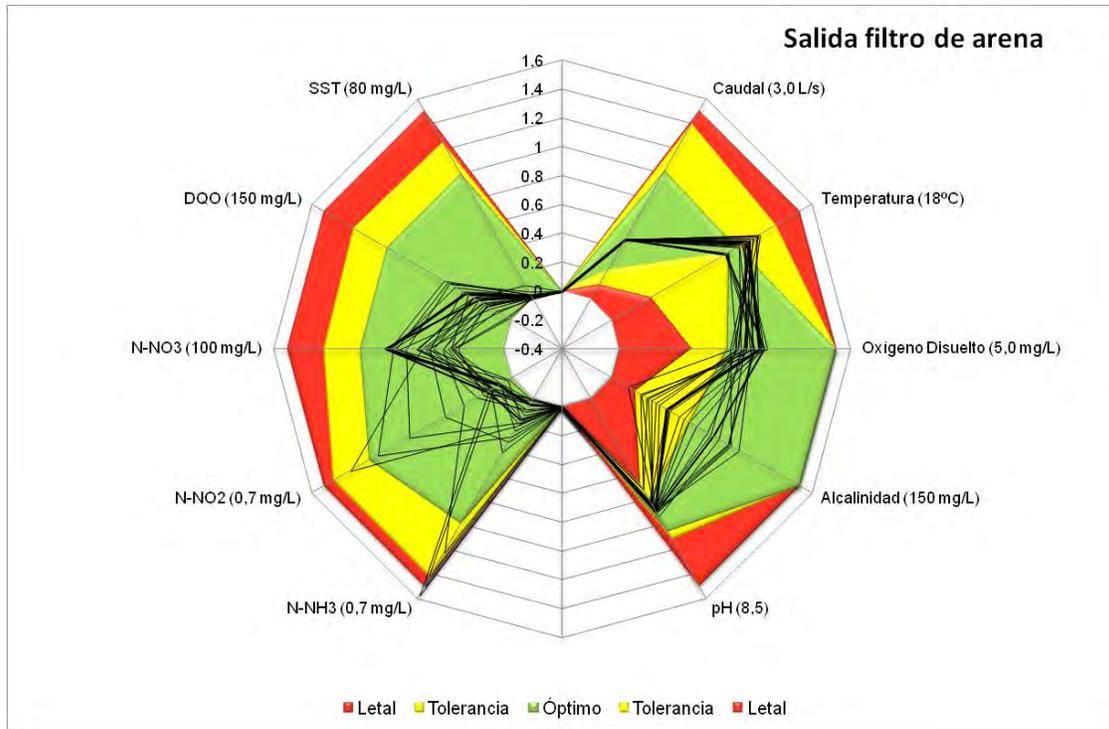


Figura 57. Representación gráfica de los valores puntuales en el SRA a salida del filtro de arena y efluente del tren de tratamiento.

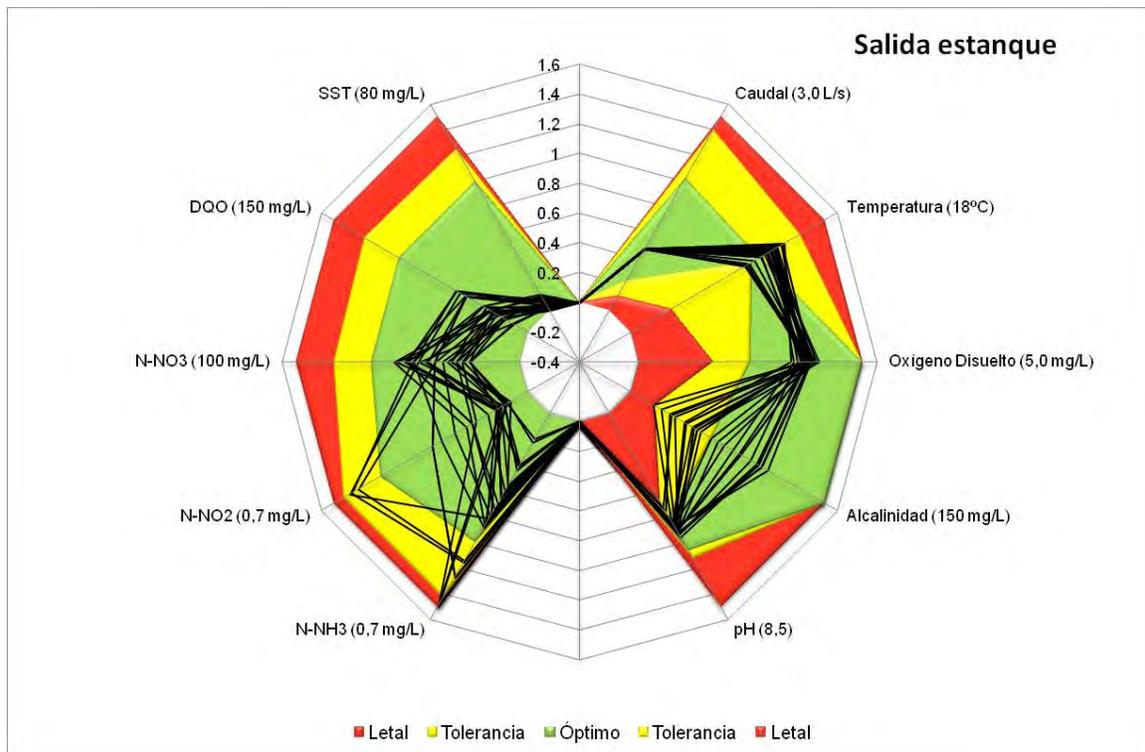


Figura 58. Representación gráfica de los valores puntuales en el SRA a la salida del estanque e influente del tren de tratamiento.

De manera puntual el monitoreo del el efluente del tren de tratamiento muestra que los parámetros de control se encontraron en la zona óptima y de tolerancia para el cultivo. Algunos datos se determinaron en zonas letales, estos muestreos fueron tomados después de la falla eléctrica y cuando el biofiltro no estaba maduro (figura 55 a la 58).

Una característica del uso de agua pluvial en el SRA es la baja concentración de alcalinidad y valores ácidos para el pH, el control de estos parámetros fue difícil, las figuras 55, 56, 57 y 58 muestran valores muy dispersos para estos parámetros, los cuales tienden aún más a variar por el incremento de ácidos minerales que consumen parte de la alcalinidad.

## **CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. CONCLUSIONES**

#### **6.1.1. COSECHA DE AGUA PLUVIAL**

El agua pluvial cosechada es una opción viable para su uso en cultivos acuícolas cerrados. La baja concentración de alcalinidad y pH contenida en este tipo de agua hace necesario equilibrar el contenido de iones y cationes disueltos en el agua.

Para adecuar la calidad del agua para el cultivo de la trucha es necesario agregar una combinación de bicarbonato, sal marina y cal cuyas cantidades varían de acuerdo a las concentraciones de iones y cationes disueltos en el agua.

La cantidad de agua de lluvia utilizada para producir un kilo de carne de trucha fue de 178 L, para la región donde se llevó a cabo el estudio (19° 23' 5835"N, 99° 42' 50,33"W).

Se requieren 0,22 m<sup>2</sup> de superficie expuesta a la lluvia para su cosecha por kilogramo de trucha a cultivar.

#### **6.1.2. DISEÑO DEL SRA**

La contribución tecnológica del prototipo permite tener un manejo más adecuado lo que se puede traducir en un mejor crecimiento y menor tiempo de cultivo. Siendo la parte medular del sistema de tratamiento que hace posible la recirculación el conjunto de biofiltros (percolador – filtro de arena).

#### **6.1.3. MADURACIÓN DEL SISTEMA**

La maduración del sistema se alcanzó cuando se tuvo una concentración constante de nitrógeno amoniacal total menor a 0,2 mg/L.

#### **6.1.4. DESARROLLO DE LOS ORGANISMOS ACUÁTICOS**

El desarrollo observado en el presente trabajo se refleja en una biomasa alcanzada de 180,42 kg; una densidad de 28,73 kg/m<sup>3</sup>; un caudal de 2,1 L/s, un recambio diario de agua limpia de lluvia de 2,21 %.

El crecimiento observado de los organismos en el sistema (4,23 g/d) fue mayor al reportado por la literatura 0,95 g/d (Blanco, 1995), 0,3 g/d (Klontz, 1991) y 0,8 g/d (Ingram *et al.*, 2002).

En el SRA estudiado se obtienen crecimientos mejores a lo reportado en investigaciones anteriores en la región del altiplano mexicano con sistemas de recirculación acuícola.

#### **6.1.5. DESEMPEÑO DEL TREN DE TRATAMIENTO DEL SRA**

La operación del filtro de arena permitió una remoción general del sistema del  $78,99 \pm 0,44$  % de nitrógeno amoniacal y un  $44,54 \pm 0,62$  % de SST.

La generación de nitrógeno amoniacal en el SRA fue, en el estanque de 107,18 g N-NH<sub>3</sub>/d (218,78 %), el biofiltro removió 25,40 g N-NH<sub>3</sub>/d (17,50 %), el filtro de arena descendente removió 70,76 g N-NH<sub>3</sub>/d (59,09 %). La tasa de remoción general fue de 96,08 g N-NH<sub>3</sub>/d (66,23 %).

La tasa de generación de nitritos fue de 8,71 (18,18 %) y 13,27 (36,38 %) g N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/d en el percolador y estanque, respectivamente. En el filtro de arena se obtuvo una tasa de remoción de 20,14 g N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/d (35,58 %), de manera general la tasa de remoción de este parámetro en el sistema fue de 8,87 g N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/d (19,56 %).

Para la DQO, las tasas de remoción fueron de 484,44 (5,42 %), 506,22 (5,99 %) y 1404,63 (15,02 %) g de DQO/d para el percolador, el filtro de arena y de manera general respectivamente. El proceso de crecimiento de los peces genera materia orgánica, en el estanque, en el orden de 3 083,45 g de DQO/d (38,79 %).

La generación de los SST en el filtro percolador fue de 19,96 g de SST/d (3,04 %), el estanque de 361,66 g SST/d (96,76 %). La unidad del tren de tratamiento que removió los sólidos fue el filtro de arena (303 g de SST/d; 44,77 %). De manera general la tasa de remoción de sólidos suspendidos totales fue de 286,31 g SST/d (43,38 %).

#### **6.1.6. MODELACIÓN DE LOS PRINCIPALES PROCESOS DEL SRA**

No fue posible llevar a cabo una modelación determinística de los procesos limitantes en el biofiltro del tren de tratamiento, debido a las bajas concentraciones de contaminantes a la entrada y salida de la unidad biológica, la diferencia entre una y otra no son adecuadas para los modelos desarrollados en la actualidad.

Ambos biofiltros presentaron una dependencia de primer orden entre la concentración de nitrógeno amoniacal y la TVNA con una fuerte dependencia:  $R = 0,96$  y  $R^2 = 0,91$  para el filtro de arena;  $R = 0,85$  y  $R^2 = 0,72$  para el filtro percolador. El primero presentó un mayor desempeño que el filtro percolador. La dependencia lineal entre la concentración de nitrógeno amoniacal a bajas concentraciones y la TVNA ha sido concurrente en estudios previos donde se evalúa el desempeño de filtros.

Los modelos matemáticos encontrados en este trabajo para la TVNA fueron, para el percolador:  $TVNA \text{ (g N-NH}_3\text{/L h)} = 63,083 \text{ [(concentración de N-NH}_3\text{ influente (mg/L)) - 6,33]$ ; y para el filtro de arena:  $TVNA \text{ (g N-NH}_3\text{/L h)} = 228,45 \text{ [(concentración de N-NH}_3\text{ influente (mg/L)) + 7,18]$ .

Comparadas las Tasas Volumétricas de Conversión de Nitrógeno Amoniacal obtenidas en este estudio con los trabajos previos, estas siempre se encontraron por debajo de las reportadas, para el caso del percolador se tiene una baja TVNA ( $34,99 \pm 41,20 \text{ g N-NH}_3\text{/m}^3 \text{ d}$ ) y un bajo porcentaje de remoción ( $19,47 \%$ ) causado por diferentes factores como la temperatura, pH por debajo de  $7,0$ , y bajas concentraciones de alcalinidad ( $45 - 52 \text{ mg/L}$  como  $\text{CaCO}_3$ ).

El filtro de arena sin embargo presenta una TVNA ( $119,65 \pm 42,71 \text{ g N-NH}_3\text{/m}^3 \text{ d}$ ) similar a la reportada por Pfeiffer y Malone (2006) para filtros de arena fluidizados y con una alta remoción de nitrógeno amoniacal ( $73,53 \%$ ) lo que indica un alto desempeño para un filtro lento de arena, debido principalmente a bajas cargas a las que fue sometido.

La remoción de nitritos depende tanto de la concentración de nitrógeno amoniacal a la entrada del filtro de arena y de la TVNA, esta segunda se comporta de manera constante cuando se aumenta la carga en el filtro. Para tener una remoción de nitratos en esta unidad del tren de tratamiento es necesario contar con una carga mínima entre  $0,30$  y  $0,40 \text{ g de N-NO}_2\text{/m}^3$ .

El filtro de arena presenta un desempeño óptimo al llegar a TVNA de  $160$  a  $180 \text{ g de N-NH}_3\text{/m}^3 \text{ d}$ , una vez alcanzada esta tasa la TVCN se reduce considerablemente. El comportamiento de la TVCN en el filtro percolador fue negativo, es decir, no se llegó de manera adecuada a remover completamente la cantidad de nitritos generados en esta unidad. La causa de que la nitrificación no se llevara a cabo adecuadamente fue por las bajas concentraciones de alcalinidad y pH, así como las bajas temperaturas.

La concentración de saturación de oxígeno disuelto en el agua a una altitud de 2660 msnm y una temperatura de 13°C, fue en promedio de  $6,42 \pm 0,05$  mg/L. La concentración de equilibrio en el sistema fue de  $5,53 \pm 0,25$  mg/L.

El consumo de oxígeno disuelto en el agua por parte de los peces en el SRA está determinado por la densidad de organismos en el estanque ( $\text{kg/m}^3$ ) con un 41,92 % seguido de un efecto combinado de temperatura y densidad con un 21,48 % y por último la temperatura con un 11,27 %.

La modelación del consumo de oxígeno en el SRA se describe mediante la ecuación:  $r\text{O}_2$  ( $\text{mg O}_2/\text{L h}$ ) =  $0,041 [\text{Temperatura } (^{\circ}\text{C})] [\text{Densidad } (\text{kg/m}^3)] - 0,454 [\text{Densidad } (\text{kg/m}^3)] - 1,324 [\text{Temperatura } (^{\circ}\text{C})] + 22,447$  con una  $R^2 = 0,747$  y  $R = 0,864$ . El modelo es válido para un intervalo de temperatura de 12 a 23°C, densidades de 8 a 60  $\text{kg/m}^3$  para una altitud de 2 660 msnm.

Para el diseño de los filtros biológicos de un SRA, es necesario conocer la producción de contaminantes generados por los organismos acuáticos. Los modelos matemáticos que se encontraron en el presente trabajo fueron:

- Nitrógeno amoniacal total, en relación con la biomasa se describe por la ecuación nitrógeno amoniacal ( $\text{mg/L}$ ) =  $0,0063[\text{biomasa } (\text{kg})] - 0,3027$ , con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,56$ ,  $R = 0,75$ .
- DQO, se expresa por la ecuación DQO ( $\text{mg/L}$ ) =  $0,5992[\text{biomasa } (\text{kg})] - 30,29$ , con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,46$ ,  $R = 0,68$ .
- SST, con la ecuación SST ( $\text{mg/L}$ ) =  $0,0873[\text{biomasa } (\text{kg})] - 8,218$ , con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,76$ ,  $R = 0,87$ .
- Nitratos, mediante la ecuación  $\text{N-NO}_3^-$  ( $\text{mg/L}$ ) =  $0,5821[\text{biomasa}(\text{kg})] - 20,647$ , con un coeficiente de determinación de 0,66 y un coeficiente de correlación de 0,81.

## 6.2. RECOMENDACIONES

Todo trabajo de investigación pretende dar respuestas a problemas derivados de las necesidades sociales, sin embargo este proceso siempre es perfectible. Por lo anterior se debe continuar desarrollando la tecnología propuesta en esta investigación con el fin de responder cada vez mejor a las necesidades planteadas por la sociedad, así como validar el desarrollo tecnológico en instalaciones comerciales del cultivo de trucha.

Se recomienda realizar un análisis hidrológico para determinar el llenado del sistema de producción en la temporada de lluvia para la región central del altiplano mexicano. Así mismo, un análisis de calidad del agua precipitada promedio en el ciclo hidrológico para contar con información que permita conocer el potencial del SRA alimentado con agua pluvial.

Para conocer mejor el comportamiento del SRA es necesario profundizar en el monitoreo de la alcalinidad pues éstos pueden ser limitantes en el proceso de nitrificación en los biofiltros. Profundizar en los protocolos de compensación de sales para lograr un manejo más eficiente de la alcalinidad, pH y el equilibrio de iones y cationes disueltos en el agua. Investigar el efecto que estas compensaciones de sales tienen en el desarrollo de la trucha.

En investigaciones posteriores se debe de trabajar con mayores densidades en el sistema tratando de llegar a lo reportado de 40 kg/m<sup>3</sup>, determinando la rentabilidad del SRA.

Realizar estudios para optimizar el caudal de operación en el SRA con base en la velocidad recomendada para la longitud de cada etapa del cultivo y el flujo necesario para conducir los contaminantes al tren de tratamiento y el agua acondicionada al estanque.

En cuanto al diseño de las unidades del tren de tratamiento se recomienda para el percolador utilizar como empaque cartuchos de manguera corrugada acomodados en forma de cruz para evitar perder área superficial del mismo, así también incluir un sistema de desinfección para evitar una posible contingencia patológica en el SRA, de preferencia ozono para que a su vez elimine el color del agua que se origina en la dilución del alimento.

Es necesario considerar en el tren de tratamiento, una unidad en la que se realice la desnitrificación para remover los nitratos del SRA y evitar acidez iónica o mineral que

provoca inhibición de la nitrificación, otro camino sería el uso de reactores anaeróbicos para la conversión de nitrógeno amoniacal total a gas nitrógeno, evitando la formación de nitratos en el SRA.

Se recomienda realizar estudios de sedimentabilidad en columnas de sedimentación de los sólidos generados en el estanque con el propósito de determinar la eficiencia del sedimentador con base en su carga específica.

El oxígeno disuelto en el agua es un parámetro limitante importante para determinar la carga máxima del estanque, por lo que es recomendable realizar estudios de consumo de oxígeno por los peces a diferentes altitudes y su abastecimiento en el estanque con jets aireadores y generadores de oxígeno puro.

Se recomienda, también, procurar contar con una fuente de energía alterna que evite la dependencia total del suministro de los proveedores de energía eléctrica (CFE), ya que un fallo en el servicio puede traer consecuencias fatales para los peces.

El desempeño de los biofiltros con respecto al consumo de energía eléctrica no fue adecuado llegando a consumir 25,34 kW/d lo que significa hasta \$ 20,39/kg de pez. Este consumo de energía se debe de optimizar reduciendo el gasto por oxigenación y bombeo. Una alternativa es direccionar el gasto de energía a sistemas de generación eléctrica solar, eólica o hidráulica.

Otra opción para que el sistema sea rentable es el de cultivar organismos desde cría hasta los 12 cm de longitud o 10 g de peso promedio, ya que el número de peces de esta talla por kilogramo de biomasa amortiza el costo energético.

Para SRA de producciones altas, se recomienda la automatización del sistema en general. Así también es necesario afinar el procedimiento de monitoreo y control para que se tenga gráficamente en tiempo real las condiciones en que se encuentra el SRA.

## LITERATURA CITADA.

## LITERATURA CITADA

Atwood H., J. Bruce, L. Sixt, R. Kegl, A. Stokes y C. Browdy. 2005. Intensive zero exchange systems incorporation of filtration technologies to improve survival and growth. *International journal of recirculating aquaculture*. 6: 49 – 64.

Ávila J., D. García, C. Díaz, I. Gallego, C. Fall y S. Garrido. 2006. Diseño y evaluación de un filtro de lecho flotante para tratar agua de lluvia en Villa Nicolás Zapata, Morelos. XII Reunión Nacional y II de América Latina y el Caribe sobre sistemas de captación y aprovechamiento de agua de lluvia. Querétaro. México.

Avila J. 2008. Diseño y evaluación de un filtro de lecho flotante para tratar agua de lluvia en Villa Nicolás Zapata, Morelos. Tesis de Maestría. FI. UAEM.

Bâ M. K., C. Díaz, J. Llamas y H. Llanos. 1995. Zonas semiáridas y su modelación hidrológica (lluvia – escurrimiento). *Ingeniería hidráulica en México*. X: 21 – 31.

Bergheim A., O. Forsberg, S. Sanni. 1993. Biological basis for landbased farming of atlantic salmon: oxygen consumption. En: Reinersten H., Dahle, Jorgensen (Ed.). *Fish Farming Technology*. Balkema. Holanda. pp. 289 – 295.

Blanco C. C. 1995. La trucha, cría industrial. Mundi-prensa. España. 503pp.

Bonvendeur J. 1989. Fixed biofilm reactors applied to wastewater treatment and aquacultural water recirculating systems. Wageningen University. Holanda. 133p.

Boyd C.E. 1990. Water quality in ponds for aquaculture. Auburn University. USA. 479pp.

Cánepa V. L. 1992. Filtración lenta, Manual 1: Teoría y evaluación. CEPIS. Perú. 104p.

Cerezo – Valverde J., M. Dolores Hernandez, F. Aguado – Gimenez y B. García García. 2009. Oxygen consumption in spider crab (*Maja brachydactyla*): Effect of weight, temperatura, sex, feeding and daily light – dark cycle. *Aquaculture*. 298: 131 – 138.

Chen S., J. Ling, y J. Blanceton. 2006. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural engineering*. 34: 179 – 197.

Colt J., J. Lamoureux, R. Patterson y G. Rogers. 2006. Reporting standards for biofilter performance studies. *Aquacultural engineering*. 34: 377 – 388.

Colt J. 2006. Water quality requirements for reuse systems. *Aquacultural engineering*. 34: 143 – 156.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2006. Concesión de Aprovechamiento de Aguas Superficiales. CNA-01-003-B. en línea: [http://www.cofemertramites.gob.mx/intranet/co\\_dialog\\_PublishedTramite.asp?coNodes=1328488&num\\_modalidad=2](http://www.cofemertramites.gob.mx/intranet/co_dialog_PublishedTramite.asp?coNodes=1328488&num_modalidad=2). Consultado:2006.

Dalvi R., A.K. Pal, L.R. Tiwari, T. Das y K. Baruah. 2009. Thermal tolerance and oxygen consumption rates of the catfish *Horabagrus brachysoma* (Günther) acclimated to different temperaturas. *Aquaculture*. 295: 116 – 119.

Daoud D., D. Chabot, C. Audet y Y. Lambert. 2007. Temperature induced variation in oxygen consumption of juvenile and adult stages of the northern shrimp, *Pandalus borealis*. *Experimental Marine Biology and Ecology*. 347: 30 – 40.

- Davison W. 1997. The effects of exercise training on teleost fish, a review of recent literature. *Comp. Biochem. Physiol.* 117A(1): 67–75.
- Debnath D., A.K. Pal, N.P. Sahu, K. Baruah, S. Yengkokpam, T. Das y S.M. Manush. 2006. Thermal tolerance and metabolic activity of yellowtail catfish *Pangasius pangasius* (Hamilton) advanced fingerlings with emphasis on their culture potential. *Aquaculture*. 258: 606 – 610.
- Diario Oficial de la Federación. 2004. LEY DE AGUAS NACIONALES. Diario Oficial de la Federación. DCVII(14): 27 – 95.
- Diario Oficial de la Federación. 1989. Acuerdo por el que se establecen los criterios de calidad del agua CE-CCA-001/89. Tomo CDXXXV No. 9
- Díaz D. C., D. García, C. Morelos. 2000. Water supply in small rural communities: system of rainfall collection – treatment. *Ciencia Ergo Sum.* 7:129 – 133.
- Dong Y., S. Dong, X. Tian, F. Wang y M. Zhang. 2006. Effects of diel temperature fluctuations on growth, oxygen consumption and proximate body composition in the sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka. *Aquaculture*. 255: 514 – 521.
- Drennan D., K. Hosler, M. Francis, D. Weaver, E. Aneshansley, G. Beckman, C. Johnson y C. Cristina. 2006. Standardized evaluation and rating of biofilters II. Manufacturer's and user's perspective. *Aquacultural engineering*. 34: 403 - 416
- Duarte, J. Palmieri, S. Frutos, O. Guerrero. 2003. Estudio de alternativas de abastecimiento de agua para el Chaco Central. Informe Final de Consultoría. Banco Interamericano de Desarrollo. Asunción, Secretaría Técnica de Planificación.
- Eding E., A. Kamstra, J. Verreth, E. Huisman y A. Klapwijk. 2006. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. *Aquacultural engineering*. 34: 234 – 260.
- Estación Meteorológica del Centro Interamericano de Recursos del Agua (EMCIRA). (2006). Registro de precipitación. CIRA. México.
- Ester C., J. Novak, G. Libey y G. Boardman. 1994. Rotating biological contactor performance. En: Timmons E., T. Losordo. (Eds). *Aquaculture water reuse systems*. Elsevier. Holanda.
- Evans C.A., P.J. Coombes y R.H. Dunstan. 2006. Wind, rain and bacteria: The effect of weather on the microbial composition of roof-harvested rainwater. *Water Research* 40:37 – 44.
- Fall C., C. Díaz, D. García y C. Solís. 2006. Hydraulically powered treatment plant: Mexico. En: *Sharing innovative experiences, example of successful experiences in providing safe drinking water*. (Ed.) TWAS/TWNSO, UNDP. Trieste, Italia. pp. 237 – 245.
- Fall C. 2007. Modelación y simulación del proceso de lodos activados. CIRA. UAEM. México.
- Fall C. 1999. Operaciones unitarias básicas. CIRA. UAEM. México.
- Fivelstad S., A. Bergheim, H. Kloften, R. Haugen, T. Lohne y A. Olsen. 1999. Water flow requirements in the intensive production of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fry: growth and oxygen consumption. *Aquacultural Engineering*. 20: 1 – 15.
- Gallego A. I., R. Carrillo, D. García, L. Sasso, J. Guerrero, R. Carrillo, D. García, C. Díaz, C. Fall, C. Burrola, L. White, J. Manjarrez, C. Zepeda, X. Aguilar, G. Legorreta y A. Sánchez. 2007. Programa maestro, Sistema producto trucha del estado de México. UAEM, México. 135 p.

Gallego A. I., D. García, C. Díaz y C. Fall. 2004. Production of juveniles of *Oncorhynchus mykiss* using an aquaculture water treatment plant. En: Adams S. y Olafsen J. Biotechnologies for quality. EAS. Bélgica. 884p.

Gallego A. I. 2004. Diseño y evaluación de un sistema prototipo para el tratamiento de agua residual acuícola con reuso de agua en el cultivo de *Oncorhynchus mykiss* en la fase alevín – juvenil. Tesis de maestría. CIRA, Facultad de Ingeniería, UAEM. México.

García C. M. 2010. Evaluación de especies nitrogenadas en agua de pozos aledaños a panteones. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. CIRA. UAEM.

García – Pulido. D., Gallego – Alarcón I., Díaz - Delgado C., Fall C. y Burrola- Aguilar C. En prensa. Evaluación de un sistema de recirculación y acondicionamiento de agua en truiticultura. Tecnología y Ciencias del Agua. 2(1).

García P.D. 2008. Evaluación de un sistema prototipo integral de cultivo de trucha con tratamiento y reciclado del efluente. Tesis de Doctorado. CIRA. Facultad de Ingeniería. UAEM. México.

García P.D. 1999. "Planta experimental de tratamiento de aguas residuales por medios biológicos" Tesis para la obtención de grado de maestría. UAEM. 232pp

Garrido S., M. Avilés, A. Ramírez, L.A. Barrera, A. González, L. Montellano, R.M. Ramírez, O. Cervantes y C. Díaz. 2005. Sistema para la captación y potabilización de aguas pluviales para uso y consumo humano en comunidades rurales del norte del Estado de Morelos, Parte I. En: Memorias del Taller Regional Iberoamericano preparatorio para el IV Foro Mundial del Agua. México.

González R., F. Díaz, A. Licea, A. D.Re, L. N. Sánchez y Z. García-Esquivel. 2010. Thermal preference, tolerance and oxygen consumption of adult white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) exposed to different acclimation temperatures. Journal of Thermal Biology. 35: 218 – 224.

Grady L., G. Diagger y H. Lim. 1999. Biological wastewater treatment. Marcel – Dekker. USA. 1076 p.

Grottum J. y T. Sigholt. 1998. A model for oxygen consumption of atlantic salmon (*Salmo salar*) based on measurements of individual fish in a tunnel respirometer. Aquacultural engineering. 17: 241 – 251.

Guerdat T., T. Losordo, J. Classen, J. Osborne y D. DeLong. 2010. An evaluation of commercially available biological filters for recirculating aquaculture systems. Aquacultural Engineering. 42:38 – 49.

Gujer, W. y M. Boller. 1986. Design of a nitrifying tertiary trickling filter based on theoretical concepts. Water Research. 20: 1353 – 1362.

Hafedh Y., A. Alam y M. Alam. 2003. Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquacultural engineering. 29: 139 – 154.

Hernández S. A. 2010. Propuesta de modificación del índice de Larson para la evaluación total de la acidez que aportan los iones minerales del agua. Estudio de caso, agua que se distribuye en la Ciudad de Toluca. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UAEM.

IICA. 1998. Sistemas de Captación de agua de lluvia para uso doméstico en América latina y El Caribe. Manual Técnico. Agencia de cooperación técnica IICA-México.

- Ingram B. A., L. McKinnon y G. Gooley. 2002. Growth and survival of selected aquatic animals in two saline groundwater evaporation basins: an Australian case study. *Aquaculture Research*. 33: 425 – 436.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2004. Cartografía del Estado de México. En línea: [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx). Consultado: 2010.
- Klontz W.G. 1991. Producción de trucha arco iris en granjas familiares. Universidad de Idaho. USA. 88pp.
- Kreft J.U., Picioreanu C., Wimpenny J.W.T., y van Loosdrecht M.C.M. 2001. Individual-based modeling of biofilms. *Microbiology-SGM* 147:2897-2912
- Larrea L., Albizuri J., Abad A., Larrea A. y Zalakain G. 2007. Optimizing and modeling nitrogen removal in a new configuration of the moving-bed biofilm reactor process. *Water Science & Technology*, 55: 317 – 327
- Lee H., S. Lau, M. Kayhanian, y M. Stenstrom. 2004. Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges. *Water Research* 38: 4153 – 4163.
- Ling J. y S. Chen. 2005. Impact of organic carbon on nitrification performance of different biofilters. *Aquacultural Engineering*. 33: 150 – 162.
- Lohr S. L. 2000. Muestreo: Diseño y análisis. International Thomson Editores. México. 480p.
- Loyless J. C. y R. Malone. 1997. A Sodium Bicarbonate Dosing Methodology for pH Management in Freshwater-Recirculating Aquaculture Systems. *The Progressive Fish-Culturist* 59:198-205.
- Maillard V., G. Boardman, J. Nayland y D. Kuhn. 2006. Water quality and sludge characterization at raceway-system trout farms. *Aquacultural engineering*. 33: 271 – 284
- Malone R. y T. Pfeiffer. 2006. Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural engineering*. 34: 389 – 402.
- Malone F. R. 2002. “Integrated design of recirculating aquaculture systems”. *Aquaculture Engineering Society. News letter* 5(4):2-6
- Mannina G., Di Trapani D., Torregrossa M. y Viviani G. 2007. Modelling of hybrid moving bed biofilm reactors: a pilot plant experiment. *Water Science & Technology*, 55: 237 – 246.
- Merino G., R. Piedrahita, D. Conklin. 2009. Routine oxygen consumption rates of California halibut (*Paralichthys californicus*) juveniles under farm – like conditions. *Aquacultural engineering*. 41: 166 – 175.
- Merino G., R. Piedrahita, D. Conklin. 2007. The effect of fish stocking density on the growth of California halibut (*Paralichthys californicus*) juveniles. *Aquaculture*. 271: 206 – 215.
- Metcalf y Eddy. 1991. *Wastewater Engineering, treatment, disposal, reuse*. Metcalf & Eddy. McGraw Hill. USA. 1334pp
- Mohanty K. R. 2004. Density – dependent growth performance of Indian major carps in rainwater reservoir. *Journal of applied ichthyology*. 20: 123 – 127.

Montagne M. 2006. Two warm – water recirculating hatcheries used for propagation of endangered species in the upper Colorado river drainage system. *International journal of recirculating aquaculture*. 7: 43 – 52.

Mundo-Molina M. 1997. Rain Collection as Water Source for Small Rural Communities in Chiapas, México. IMTA, México.

Noguera D.R. y Picioreanu C. 2004. Results from the Multi-Species Benchmark Problem 3 (BM3) using Two-Dimensional Models. *Water Sci Technol* 49:169-176.

Noguera D.R., S. Okabe y C. Picioreanu. 1999. Biofilm modeling, present status an future directions. *Wat. Sci. Tec.* 39:273-278.

Papoutsoglou S., N. Karakatsouli y G. Chiras. 2005. Dietary L-tryptophan and tank colour effects on growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) juveniles reared in a recirculating water system. *Aquacultural engineering*. 32: 277 – 284.

Patterson R. y K. Watts. 2003. Micro-particles in recirculating aquaculture systems: particle size analysis of culture water from a commercial Atlantic salmon site. *Aquacultural engineering*. 28:99 – 113

Pedregal, 2005. Tablas de alimentación para 1,000 truchas arco iris con alimento Silver Cup. 1pp.

Perera E., E. Diaz – Iglesias, I. Fraga, O. Carrillo y G. Galich. 2007. Effect of body weight, temperatura and feeding on the metabolic rate in the spiny lobster *Panulirus argus* (Latreille, 1804). *Aquaculture*. 265: 261 – 270.

Pérez J., Picioreanu C., y van Loosdrecht M.C.M. 2005. Modeling biofilm and floc diffusion processes based on analytical solution of reaction-diffusion equations. *Water Research*, 39:1311-1323.

Pfieffer T. y R. Malone. 2006. Nitrification performance of a propeller-washed bead clarifier supporting a fluidized sand biofilter in a recirculating warmwater fish system. *Aquacultural engineering*. 34:311 – 321.

Picioreanu C., Head I.M., Katuri K.P., Van Loosdrecht M.C.M., y Scott K. 2007. A computational model for biofilm-based microbial fuel cells. *Water Research*, 41:2921-2940.

Picioreanu C. y Van Loosdrecht M.C.M. 2003. Use of mathematical modeling to study biofilm development and morphology. En: Lens P., O'Flaherty V., Moran A. P., Stoodley P. y Mahony T. (ed). *Biofilms in Medicine, Industry and Environmental Biotechnology – Characteristics, Analysis and Control*. IWA Publishing. p 413- 437.

Picioreanu C., Van Loosdrecht M.C.M., y Heijnen J.J. 2001. Two-dimensional model of biofilm detachment caused by internal stress from liquid flow. *Biotechnol Bioeng* 72:205-218.

Plattes M., Henry y Schosseler P.M. 2008. A zero-dimensional biofilm model for dynamic simulation of moving bed bioreactor systems: Model concepts, Peterson matrix, and application to a pilot-scale plant. *Biochemical Engineering Journal*. 40: 392–398.

Plattes M., Fiorelli D., Gill S., Girard C., Henry E., Minette F., O'Nagy O. y Schosseler P.M. 2007. Modelling and dynamic simulation of a moving bed bioreactor using respirometry for the estimation of kinetic parameters. *Biochemical Engineering Journal*. 33: 253–259.

Plattes M., E. Henry, P.M. Schosseler y A. Weidenhaupt. 2006. Modelling and dynamic simulation of a moving bed bioreactor for the treatment of municipal wastewater. *Biochemical Engineering Journal* 32: 61–68.

Ramírez C. R., M.S Alonso Gutiérrez, R Bruno Esparza y A. L. Rodríguez Lepure. 2002. Caracterización de un contactor de gas-líquido mediante el coeficiente volumétrico de transferencia de masa a diferentes condiciones de operación. XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria. México. p 141-148.

Reig L., R. Piedrahita, D. Conklin. 2007. Influence of California halibut (*Paralichthys californicus*) on the vertical distribution of dissolved oxygen in a raceway and circular tank at two depths. *Aquacultural engineering*. 36: 261 – 271.

Ríos A. 2002. El uso del Ferrocemento para la captación de agua de lluvia en San Francisco Yucucundo, Oaxaca. IX Reunión nacional sobre sistemas de captación de agua de lluvia.

Russo C.R. y R.V. Thurston. 1991. "Toxicity of ammonia, nitrite and nitrate to fishes". *Aquaculture and Water Quality* (3):58 – 89.

Salas – Leiton E., V. Anguis, M. Manchado y M. Cañavete. 2008. Growth, feeding and oxygen consumption of Senegalese sole (*Solea senegalensis*) juveniles stocked at different densities. *Aquaculture*. 285: 84 – 89.

Sharrer M., Y. Tal, D. Ferrier, J. Hankins y S. Summerfelt. 2007. Membrane biological reactor treatment of a saline backwash flow from a recirculating aquaculture system. *Aquacultural engineering*. 36: 159 – 176.

Simmons G., V. Hope, G. Lewis, J. Whitmore y W. Gao. 2001. Contamination of potable roof – collected rainwater in Auckland, New Zealand. *Water Research* 35(6): 1518 – 1524.

Simonel S., G. Boardman, B. Watten y B. Brazil. 2002. Factors influencing the nitrification efficiency of fluidized bed filter with a plastic bead medium. *Aquacultural Engineering* 26: 41–59.

Stickney R. 2000. *Encyclopedia of Aquaculture*. Wiley-Interscience. Canada. 1063pp.

Summerfelt S., G. Wilton, D. Roberts, T. Rimmer y K. Fonkalsrud. 2004. Developments in recirculating systems for Arctic char culture in North America. *Aquacultural engineering*. 30: 31 – 71.

Takács I., Bye C.M., Chapman K., Dold P.L., Fairlamb P.M. y Jones R.M. 2007. A biofilm model for engineering design. *Water Science & Technology*, 55: 329–336

Taylor G., T. Fletcher, T. Wong, P. Breen y H. Duncan. 2005. Nitrogen composition in urban runoff – implications for stormwater management. *Water Research* 39: 1982 – 1989.

Tilley D., H. Badrinarayanan, R. Rosati y J. Son. 2002. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture. *Aquacultural engineering*. 26: 81 – 109

Timmons M. B., J. M. Ebeling y R.H. Piedrahita. 2009. *Acuicultura en sistemas de recirculación*, LLC Edición. USA. Cayuga Aqua Ventures. 959 pp.

Timmons M. B., J. Ebeling, S. Summerfelt, F. Wheaton y B. Vinci. 2002. *Recirculating aquaculture systems*. Cayuga Aqua Ventures. USA. 769p.

Timmons E. y T. Losordo. 1994. *Aquaculture water reuse systems*. Elsevier. Holanda. 390p.

- Timmons M., S. Summerfelt y B. Vinci. 1998. Review of circular tank technology and management. *Aquacultural Engineering* 18:51–69.
- Tollner E W., D. Meyer, S. Triminio-Meyer, B. Verma, G. Pilz y J. Molnar. 2006. Spreadsheet tools for developing surface water supplies for freshwater fish production in developing countries. *Aquacultural Engineering* 31: 31–49.
- Trujillo E. y V. Martínez. 2005. AgrInc – 2.0 programa para computadora. Cálculo de agresividad e incrustabilidad del agua. Facultad de Ingeniería. UAEM. México.
- Tudor M. 1999. Diurnal changes of dissolved oxygen in fouling land-based tanks for rearing of sea bass. *Aquacultural Engineering*. 19: 243 – 258.
- Van Loosdrecht, M.C.M., J.J. Heijnen, H. Eberl, J. Kreft y C. Picioreanu. 2002. Mathematical modelling of biofilm structures. *Antonie van Leeuwenhoek* 81: 245.256.
- Van Rijn J., Y. Tal, H. Schreier. 2006. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering*. 34:364-376.
- Villanueva F. y Ontiveros F. 2001. Desarrollo de sistemas de captación de agua del programa de mejoramiento de vivienda en la región Tarahumara. Coordinación Estatal de la Taramara. Memoria de Ponencia VIII Reunión Nacional de Captación de Agua de Lluvia.
- Wanner O., H. Eberl, E. Morgenroth, D. Noriega, C. Picioreanu, B. Rittmann y M. van Loosdrecht. 2006. *Mathematical modeling of biofilms*. IWA. Inglaterra. 179pp.
- Wanner, O. y P. Reichert. 1996. Mathematical modeling of mixed-culture biofilms. *Biotechnol. Bioeng.* 49: 172-184.
- Wanner, O. y W. Gujer. 1986. A multispecies biofilm model. *Biotechnol. Bioeng.* 28:314-328.
- Wheaton F., J. Hochheimer, G. Kaiser, R. Malone, M. Krones, G. Libey y C. Easter. 2000. "Nitrification filter design methods". En: Timmons M. y T. Losordo (Eds). *Aquaculture water reuse systems: engineering, design and management*. Elsevier. Holanda. pp: 127- 171.
- Wheaton F., J. Hochheimer, G. Kaiser, M. Krones, G. Libey y C. Easter. 1994. Nitrification filters design methods. En: Timmons E., T. Losordo. (Eds). *Aquaculture water reuse systems*. Elsevier. Holanda.
- Wheaton F., J. Hochheimer y G. E. Kaiser. 1991. Fixed film nitrification filters for aquaculture. En: Brune D. y J. Tomasso. *Aquaculture and water quality*. WAS. USA. p 272 – 303.
- Wheaton F. 1982. *Acuicultura*. AGT Editor. México. 703p.
- Wheeler D. 1989. *Tables of screening designs*. SPC Press Inc. USA. 305 pp.
- Wolf G., Picioreanu C., van Loosdrecht M. C. M. 2007. Kinetic Modeling of Phototrophic Biofilms: The PHOBIA Model. *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 97: 1064 – 1079.
- Xavier J., Picioreanu C., van Loosdrecht M.C.M. y Stewart S.P. 2005. Biofilm-control strategies based on enzymic disruption of the extracellular polymeric substance matrix – a modelling study. *Microbiology*, 151:3817–3832.
- Zaizen M., T. Urakawa, Y. Masumoto y H. Takai. 1999. Te collection of rainwater from dome stadiums in Japan. *Urban Water* 1(4): 355 – 359.

Zhu S. y S. Chen. 2001. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed films biofilters. *Aquacultural Engineering*. 25:1 – 11.

Zhu S. y S. Chen. 1999. An experimental study on nitrification biofilm performances using a series reactor system. *Aquacultural Engineering*. 20:245 – 259.

# ANEXOS

ANEXO 1. DETERMINACIÓN DE SALES AGREGADAS PARA ADECUAR EL AGUA DE LLUVIA.

AgrInc-Agua Ver 2.0 (Agresividad e Incrustabilidad del Agua)  
Método de MOJMIR MACH

Ivan

\*\*\*\*\* Elementos Participantes \*\*\*\*\*

Especie [mol/L]	[mg/L]
NH4 0.000066	0.92
H2CO3 0.000103	5.16 (Acidez como CaCO3)
NO2 0.000001	0.021
NO3 0.000121	1.7
HCO3 0.000063	3.21 (Alcalinidad como CaCO3)

Ión [mol/L]	[mg/L]
Na 0.000010	0.22
Mg 0.000008	0.19
K 0.000005	0.18
Ca 0.000035	1.41
Fe 0.000003	0.14
Mn 0.000005	0.25
Cl 0.000065	2.3

\*\*\*\*\* Resultados a 17.0 °C \*\*\*\*\*

- a. Fuerza iónica  
inicial = 0.0002652  
equilibrio = 0.0006758
- b. Valores de Langelier  
(IL negativo indica agua agresiva)  
pHi (medi) = 5.50  
pHi (calc) = 6.18  
pHs (real) = 9.29  
IL = -3.105
- c. Valores de Mojmir Mach  
(Agr positivo indica agua agresiva)  
Agr1 = 0.0001369 (con respecto a fza. iónica)  
Agr2 = 0.0001705 (con respecto a Ca)  
Agr3 = 0.0001032 (con respecto a HCO3)
- d. Ubicación del agua en el Diagrama de Tillmans  
(Arriba de la curva de equilibrio indica agua agresiva)  
x = 0.5[HCO3-] = 0.0000316  
y = [H2CO3=] = 0.0001032
- e. Ubicación del agua en equilibrio en el Diagrama de Tillmans  
(por contacto con CaCO3)  
x = 0.5[HCO3-]= 0.0001348  
y = [H2CO3=] = 0.0000003  
[Ca2+] = 0.0002057
- f. Bióxido de Carbono Total  
[CO2]t = 0.0001663
- g. Tratamiento para mantener el equilibrio  
Ca(OH)2 = 3.811 mg/L  
CaCO3 = 10.295 mg/L

**ANEXO 2. PROMEDIO, DESVIACIÓN ESTÁNDAR (DE), COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV) E INTERVALOS DE CONFIANZA (IC) DE LOS PARÁMETROS ESTUDIADOS.**

Parámetro		Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
N-NH <sub>3</sub>	Promedio (mg/L)	0,80	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
	DE (mg/L)	0,013	0,012	0,012	0,012	0,014	0,029
	CV	0,016	0,019	0,019	0,019	0,022	0,044
	IC (95%)	0,776	0,636	0,636	0,636	0,632	0,603
		0,825	0,684	0,684	0,684	0,688	0,717
N-NO <sub>2</sub>	Promedio (mg/L)	0,2641	0,3115	0,2009	0,2503	0,2740	0,5077
	DE (mg/L)	0,0057	0,0056	0,0060	0,0058	0,0057	0,0070
	CV	0,0215	0,0181	0,0298	0,0233	0,0209	0,0138
	IC (95%)	0,253	0,300	0,189	0,239	0,263	0,494
		0,275	0,323	0,213	0,262	0,285	0,521
N-NO <sub>3</sub>	Promedio (mg/L)	59,13	58,13	59,14	58,77	57,24	40,43
	DE (mg/L)	0,17	0,19	0,21	0,18	0,19	0,31
	CV	0,0029	0,0032	0,0035	0,0031	0,0034	0,0076
	IC (95%)	58,796	57,764	58,738	58,414	56,868	39,824
		59,460	58,499	59,545	59,130	57,621	41,034
DQO	Promedio (mg/L)	49,27	46,60	43,81	51,58	60,65	340,70
	DE (mg/L)	0,33	0,44	0,37	0,41	0,64	10,94
	CV	0,0068	0,0094	0,0084	0,0079	0,0106	0,0321
	IC (95%)	48,615	45,739	43,086	50,785	59,392	319,245
		49,920	47,453	44,527	52,374	61,918	362,145
SST	Promedio (mg/L)	3,62	3,73	2,06	3,64	3,83	408,99
	DE (mg/L)	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	6,75
	CV	0,010	0,011	0,016	0,007	0,011	0,017
	IC (95%)	3,551	3,648	1,995	3,586	3,753	395,755
		3,698	3,804	2,124	3,685	3,915	422,226
Alcalinidad (mg como CaCO <sub>3</sub> /L)	Promedio (mg/L)	65,14	51,42	46,11	54,46	55,73	119,42
	DE (mg/L)	0,69	0,56	0,56	0,57	0,52	1,02
	CV	0,011	0,011	0,012	0,010	0,009	0,009
	IC (95%)	63,796	50,321	45,020	53,348	54,705	117,417
		66,488	52,523	47,202	55,573	56,759	121,429
OD	Promedio (mg/L)	6,54	6,80	5,35	4,86	5,21	1,39
	DE (mg/L)	0,04	0,03	0,08	0,09	0,09	0,12
	CV	0,006	0,005	0,016	0,018	0,018	0,086
	IC (95%)	6,467	6,733	5,185	4,696	5,030	1,158
		6,610	6,859	5,511	5,034	5,396	1,630

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Parámetro		Puntos de muestreo						
		A	B	C	D	E	G	
pH	Promedio	6,98	7,13	6,99	6,95	6,98	6,88	
	DE	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	
	CV	0,011	0,010	0,010	0,010	0,010	0,007	
	IC (95%)		6,830	6,983	6,851	6,810	6,844	6,785
			7,125	7,269	7,121	7,086	7,111	6,973
Temperatura	Promedio (°C)	16,91	16,82	16,77	16,76	16,69	16,48	
	DE (°C)	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	
	CV	0,007	0,007	0,007	0,007	0,008	0,007	
	IC (95%)		16,681	16,576	16,529	16,512	16,440	16,243
			17,140	17,063	17,006	17,003	16,944	16,708

**ANEXO 3. DATOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS**

Oxígeno (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
1	20/06/2009			5.65			
2	21/06/2009			5.31			
3	22/06/2009			5.3			
4	23/06/2009			5.55			
5	24/06/2009			5.4			
6	25/06/2009			5.46			
7	26/06/2009			5.18			
8	27/06/2009			5.71			
9	28/06/2009			5.61			
10	29/06/2009			5.78			
11	30/06/2009			5.65			
12	01/07/2009			5.7			
13	02/07/2009			5.4			
14	03/07/2009			5.46			
15	04/07/2009			6.56			
16	05/07/2009			6.58			
17	06/07/2009			6.55			
18	07/07/2009			6.42			
19	08/07/2009			6.57			
20	09/07/2009			6.34			
21	10/07/2009			6.38			
22	11/07/2009			6.49			
23	12/07/2009			5.33			
24	13/07/2009			5.49			
25	14/07/2009			5.31			
26	15/07/2009			5.43			
27	16/07/2009			5.36			
28	17/07/2009			5.9			
29	18/07/2009			6.09			
30	19/07/2009			5.79			
31	20/07/2009			5.8			
32	21/07/2009			5.2			
33	22/07/2009			5.4			
34	23/07/2009			5.45			

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Oxigeno (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
35	24/07/2009			5.21			
36	25/07/2009			5.67			
37	26/07/2009			5.78			
38	27/07/2009	6.81	7.26	5.88	5.37	5.42	2.94
39	28/07/2009	6.45	6.94	5.33	5.23	5.53	2.65
40	29/07/2009	6.54	6.81	5.14	5.07	5.61	1.99
41	30/07/2009	6.83	7.06	5.27	5.03	5.57	3.06
42	31/07/2009	6.81	6.93	5.27	4.67	5.34	4.33
43	01/08/2009	6.57	6.89	5.2	4.45	5.23	4.35
44	02/08/2009	6.32	7.10	5.66	4.69	5.74	4.54
45	03/08/2009	6.34	7.01	5.79	4.45	5.41	2.67
46	04/08/2009	6.55	7.06	5.73	4.68	5.71	2.36
47	05/08/2009	6.51	6.77	5.69	4.76	5.86	1.47
48	06/08/2009	6.55	6.94	5.46	4.56	5.51	2.05
49	07/08/2009	6.64	7.04	5.08	4.45	5.02	1.58
50	08/08/2009	6.68	7.01	6.08	4.94	5.81	4.35
51	09/08/2009	6.89	7.09	5.75	5.03	6	4.96
52	10/08/2009	6.88	7.10	6.41	5.44	6.1	5.37
53	11/08/2009	6.39	6.91	5.92	4.64	5.5	0.09
54	12/08/2009	6.45	6.89	5.92	5.01	5.6	0.85
55	13/08/2009	6.89	6.66	5.79	4.85	5.7	0.24
56	14/08/2009	6.86	7.05	6.26	5.63	5.53	0.59
85	12/09/2009	6.68	6.90	4.94	5.02	5.66	5.18
86	13/09/2009	6.66	6.89	5.23	4.96	5.9	3.23
87	14/09/2009	6.41	6.92	5.12	4.87	5.2	1.6
88	15/09/2009	6.57	6.84	5.52	5.47	5.99	1.2
89	16/09/2009	6.61	6.79	6.01	5.46	5.36	0.42
90	17/09/2009	6.56	6.82	5.09	5.28	5.94	1.12
91	18/09/2009	6.67	7.16	4.91	4.51	5.33	2.25
92	19/09/2009	6.85	7.14	5.17	4.93	5.35	0.93
93	20/09/2009	6.79	6.87	5.52	5.12	5.4	0.87
94	21/09/2009	6.56	6.72	5.15	4.89	5.32	0.98
95	22/09/2009	6.48	6.65	5.2	5.08	5.11	0.89
96	23/09/2009	6.39	6.59	4.58	4.32	4.78	1.17
97	24/09/2009	6.23	6.55	4.79	4.38	3.94	0.89
98	25/09/2009	6.31	6.51	5.65	5.25	4.85	0.98
99	26/09/2009	6.4	6.59	5.5	4.07	4	0.98

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Oxigeno (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
100	27/09/2009	6.73	6.59	5.52	5.45	5.33	1.03
101	28/09/2009	6.25	6.23	5.29	5.21	4.59	0.81
102	29/09/2009	6.63	6.74	6.2	5.89	5.56	0.93
103	30/09/2009	6.36	6.57	5.91	5.28	5.07	0.86
104	01/10/2009	6.09	6.39	4.58	4.39	4.32	0.81
105	02/10/2009	6.15	6.91	5.01	4.93	5.32	0.64
106	03/10/2009	6.22	6.84	4.73	4.99	5.15	0.45
107	04/10/2009	6.07	6.2	3.88	3.51	4	0.22
108	05/10/2009	5.72	6.47	5.71	4.13	4.01	1.69
109	06/10/2009	5.57	6.12	5.14	4.81	4.14	2.64
110	07/10/2009	5.96	6.21	4.83	4.56	4.79	1.4
111	08/10/2009	6.34	6.63	5.44	4.81	3.74	0.98
112	09/10/2009	6.04	6.63	4.68	4.05	3.85	0.91
113	10/10/2009	6.7	6.53	4.55	4.71	4.11	0.81
114	11/10/2009	6.21	6.88	5.82	4.36	5.31	0.57
115	12/10/2009	6.41	6.91	5.39	4.58	5.59	0.41
116	13/10/2009	6.37	6.63	5.57	4.66	5.74	1.09
117	14/10/2009	6.41	6.8	5.35	4.46	5.39	1.05
118	15/10/2009	6.5	6.89	4.97	4.36	4.91	0.91
119	16/10/2009	6.54	6.86	5.99	4.84	5.69	0.85
120	17/10/2009	6.75	6.94	5.63	4.92	5.88	0.78
121	18/10/2009	6.74	6.95	6.28	5.31	5.97	0.64
122	19/10/2009	6.26	6.77	5.81	4.54	5.39	0.12
123	20/10/2009	6.32	6.75	5.91	5.01	5.48	0.23
124	21/10/2009	6.75	6.52	5.67	5.4	5.58	0.63
125	22/10/2009	6.72	6.99	6.13	5.51	5.41	0.57
126	23/10/2009	6.54	6.79	5.38	5.12	5.54	0.14
127	24/10/2009	6.52	6.75	5.62	5.16	5.78	0.96
128	25/10/2009	6.55	6.69	5.14	4.8	5.9	0.58
129	26/10/2009	6.49	6.68	5.02	4.45	5.58	0.83
130	27/10/2009	6.5	6.46	4.96	4.63	4.65	0.78
131	28/10/2009	6.59	6.83	5.29	4.95	4.69	0.48
132	29/10/2009	6.56	6.76	4.66	4.38	4.69	0.71
133	30/10/2009	6.23	6.53	5.42	4.96	4.08	1.36
134	31/10/2009	6.58	6.69	4.27	4.09	4.61	1.33
135	01/11/2009	6.21	6.66	4.49	3.81	4.34	0.28
136	02/11/2009	7.28	7.17	7.18	6.87	6.3	3.5

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Oxigeno (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
137	03/11/2009	6.72	6.89	4.85	4.22	4.98	1.43
138	04/11/2009	6.83	6.68	5.23	4.88	5.14	0.97
139	05/11/2009	6.65	6.9	5.59	4.35	4.32	0.79
140	06/11/2009	6.69	6.58	5.23	4.48	4.58	0.93
141	07/11/2009	6.77	7.07	4.65	4.52	4.72	0.64
142	08/11/2009	6.82	7.12	4.98	4.41	4.28	0.73
143	09/11/2009	6.48	6.91	5.56	5.17	4.73	0.91
144	10/11/2009	6.89	6.66	5.79	4.85	5.7	0.24
145	11/11/2009	6.86	7.05	6.26	5.63	5.53	0.59
146	12/11/2009	6.68	6.90	4.94	5.02	5.66	5.18
147	13/11/2009	6.66	6.89	5.23	4.96	5.9	3.23
148	14/11/2009	6.41	6.92	5.12	4.87	5.2	1.6
149	15/11/2009	6.57	6.84	5.52	5.47	5.99	1.2
150	16/11/2009	6.61	6.79	6.01	5.46	5.36	0.42

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

pH							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
1	20/06/2009			6.9			
2	21/06/2009			7.53			
3	22/06/2009			7.11			
4	23/06/2009			7.14			
5	24/06/2009			7.15			
6	25/06/2009			6.9			
7	26/06/2009			7.05			
8	27/06/2009			7.11			
9	28/06/2009			7.12			
10	29/06/2009			7.26			
11	30/06/2009			7.14			
12	01/07/2009			7.17			
13	02/07/2009			7.13			
14	03/07/2009			7.06			
15	04/07/2009			7			
16	05/07/2009			7.28			
17	06/07/2009			7.23			
18	07/07/2009			7.11			
19	08/07/2009			7.35			
20	09/07/2009			7.4			
21	10/07/2009			7.02			
22	11/07/2009			6.49			
23	12/07/2009			6.9			
24	13/07/2009			7.07			
25	14/07/2009			7.29			
26	15/07/2009			7.05			
27	16/07/2009			7.06			
28	17/07/2009			7.08			
29	18/07/2009			7.28			
30	19/07/2009			7.53			
31	20/07/2009			7.43			
32	21/07/2009			7.51			
33	22/07/2009			7.22			
34	23/07/2009			6.9			
35	24/07/2009			7.08			
36	25/07/2009			7.24			
37	26/07/2009			7.12			

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

pH							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
38	27/07/2009	7.00	7.12	7.07	6.89	7.01	7.02
39	28/07/2009	7.21	7.10	7.09	7.05	7.08	7.12
40	29/07/2009	7.35	7.00	7.01	6.98	7.01	7.05
41	30/07/2009	7.19	7.30	6.81	6.63	6.68	6.87
42	31/07/2009	6.67	6.75	6.59	6.39	6.37	6.45
43	01/08/2009	6.45	6.57	6.5	6.35	6.41	6.49
44	02/08/2009	6.32	6.24	6.44	6.82	6.87	6.79
45	03/08/2009	6.89	6.96	7.1	6.97	6.7	7.18
46	04/08/2009	7.01	7.09	7.14	7.04	7.06	7.15
47	05/08/2009	7.12	7.13	7.15	7.08	7.04	7.18
48	06/08/2009	7.42	7.07	7.08	7.05	7.08	7.12
49	07/08/2009	7.26	7.37	6.88	6.70	6.75	6.94
50	08/08/2009	6.74	6.82	6.66	6.45	6.43	6.51
51	09/08/2009	6.51	6.64	6.57	6.41	6.47	6.55
52	10/08/2009	6.38	6.30	6.50	6.89	6.94	6.86
53	11/08/2009	6.96	7.03	7.17	7.04	6.77	7.25
54	12/08/2009	6.99	7.01	7.05	6.95	6.99	7.15
55	13/08/2009	6.04	6.09	5.81	5.91	6.07	7.05
56	14/08/2009	5.92	6.08	5.78	5.87	5.92	6.86
85	12/09/2009	6.83	7	6.65	6.65	6.69	6.67
86	13/09/2009	6.38	6.88	6.54	6.55	6.62	7.08
87	14/09/2009	6.42	6.76	6.68	6.42	6.58	6.85
88	15/09/2009	6.3	5.8	5.8	5.81	5.79	6.83
89	16/09/2009	7.42	7.56	6.98	7.1	7.18	6.27
90	17/09/2009	7.37	7.61	7.25	7.29	7.31	6.7
91	18/09/2009	7	7.35	7.09	7.1	7.14	7.1
92	19/09/2009	7.18	7.22	7.12	7.12	7.16	6.94
93	20/09/2009	7.12	7.56	7.4	7.4	7.35	6.72
94	21/09/2009	7.11	7.46	7.29	7.3	7.33	6.79
95	22/09/2009	7.87	7.5	7.3	7.31	7.35	6.86
96	23/09/2009	6.7	7.26	7.12	7.15	7.19	6.87
97	24/09/2009	7.89	7.27	7.07	7.07	7.01	6.88
98	25/09/2009	6.82	7.22	6.96	6.96	7.03	6.74
99	26/09/2009	6.5	7.07	6.9	6.9	6.88	6.88
100	27/09/2009	6.85	7.29	7.16	7.18	7.2	6.41
101	28/09/2009	6.81	7.32	7.13	7.14	7.16	6.34
102	29/09/2009	7.1	7.52	7.37	7.39	7.4	6.9

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

pH							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
103	30/09/2009	7.12	7.39	7.34	7.21	7.41	6.42
104	01/10/2009	7.5	7.49	7.25	7.26	7.16	6.49
105	02/10/2009	7.31	7.74	7.59	7.61	7.62	7.1
106	03/10/2009	7.33	7.61	7.56	7.42	7.63	6.61
107	04/10/2009	7.05	7.27	6.96	6.96	7.01	6.75
108	05/10/2009	6.92	6.58	6.85	6.82	6.91	6.21
109	06/10/2009	6.45	6.89	6.71	6.71	6.53	7.07
110	07/10/2009	6.33	6.68	6.64	6.46	6.53	6.6
111	08/10/2009	6.07	6.34	6.16	6.19	6.34	6.41
112	09/10/2009	7.12	6.68	7.01	6.28	6.61	6.54
113	10/10/2009	7.09	7.42	7.38	7.19	7.43	6.31
114	11/10/2009	6.89	6.96	7.1	6.97	6.7	7.18
115	12/10/2009	7.01	7.09	7.14	7.04	7.06	7.15
116	13/10/2009	7.12	7.13	7.15	7.08	7.04	7.18
117	14/10/2009	7.42	7.07	7.08	7.05	7.08	7.12
118	15/10/2009	7.26	7.37	6.88	6.70	6.75	6.94
119	16/10/2009	6.74	6.82	6.66	6.45	6.43	6.51
120	17/10/2009	6.51	6.64	6.57	6.41	6.47	6.55
121	18/10/2009	6.38	6.30	6.50	6.89	6.94	6.86
122	19/10/2009	6.96	7.03	7.17	7.04	6.77	7.25
123	20/10/2009	6.99	7.01	7.05	6.95	6.99	7.15
124	21/10/2009	6.04	6.09	5.81	5.91	6.07	7.05
125	22/10/2009	5.92	6.08	5.78	5.87	5.92	6.86
126	23/10/2009	6.83	7	6.65	6.65	6.69	6.67
127	24/10/2009	6.38	6.88	6.54	6.55	6.62	7.08
128	25/10/2009	7.67	7.82	7.63	7.64	7.57	7.54
129	26/10/2009	7.53	7.71	7.5	7.51	7.53	7.41
130	27/10/2009	7.32	7.62	7.49	7.47	7.47	7.15
131	28/10/2009	7.55	7.68	7.44	7.42	7.42	7.23
132	29/10/2009	7.27	7.48	7.3	7.27	7.28	6.81
133	30/10/2009	7.07	7.28	7.11	7.13	7.15	7.2
134	31/10/2009	7.19	7.32	7.05	7.03	7.06	7.14
135	01/11/2009	7.1	7.16	6.97	6.96	6.95	7.09
136	02/11/2009	7.23	7.64	7.49	7.46	7.35	7.54
137	03/11/2009	7.11	7.4	7.22	7.22	7.25	7.01
138	04/11/2009	7.04	7.36	7.14	7.2	7.23	7.05
139	05/11/2009	7.41	7.39	7.14	6.97	7	7.16

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

pH							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
140	06/11/2009	7.71	7.14	7.31	7.01	7.41	7.16
141	07/11/2009	7.58	7.69	7.45	7.29	7.26	6.94
142	08/11/2009	7.46	7.33	7.21	7.18	7.23	6.91
143	09/11/2009	6.72	7.07	7.01	6.98	7.04	7.12
144	10/11/2009	6.82	7.22	6.96	6.96	7.03	6.74
145	11/11/2009	6.5	7.07	6.9	6.9	6.88	6.88
146	12/11/2009	6.85	7.29	7.16	7.18	7.2	6.41
147	13/11/2009	6.81	7.32	7.13	7.14	7.16	6.34
148	14/11/2009	7.1	7.52	7.37	7.39	7.4	6.9
149	15/11/2009	7.12	7.39	7.34	7.21	7.41	6.42
150	16/11/2009	7.5	7.49	7.25	7.26	7.16	6.49

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Temperatura (°C)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
1	20/06/2009			18.9			
2	21/06/2009			17.5			
3	22/06/2009			17.7			
4	23/06/2009			17.5			
5	24/06/2009			17.8			
6	25/06/2009			17.8			
7	26/06/2009			17.4			
8	27/06/2009			17.5			
9	28/06/2009			17			
10	29/06/2009			16.5			
11	30/06/2009			16.7			
12	01/07/2009			17.5			
13	02/07/2009			17.4			
14	03/07/2009			17.1			
15	04/07/2009			17.3			
16	05/07/2009			17.1			
17	06/07/2009			17.7			
18	07/07/2009			17.5			
19	08/07/2009			17.8			
20	09/07/2009			18.2			
21	10/07/2009			18.4			
22	11/07/2009			16.7			
23	12/07/2009			16.9			
24	13/07/2009			17.6			
25	14/07/2009			17.1			
26	15/07/2009			17.3			
27	16/07/2009			17.8			
28	17/07/2009			17.6			
29	18/07/2009			17.3			
30	19/07/2009			17.3			
31	20/07/2009			16.5			
32	21/07/2009			16.9			
33	22/07/2009			16.8			
34	23/07/2009			17.1			
35	24/07/2009			16.9			
36	25/07/2009			17.6			
37	26/07/2009			17.8			

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Temperatura (°C)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
38	27/07/2009	17.60	17.30	17.2	17.1	17.2	16.7
39	28/07/2009	17.80	17.30	18.3	17.2	17.3	16.9
40	29/07/2009	17.90	17.40	17.3	17.3	17.4	17.1
41	30/07/2009	17.30	16.90	17	16.8	17.4	16.7
42	31/07/2009	17.40	17.50	17.5	17.5	17.2	17.5
43	01/08/2009	17.90	17.80	17.8	17.9	17.7	17.6
44	02/08/2009	18.00	18.00	18	18	18	18
45	03/08/2009	18.50	18.20	18.4	18.4	18.4	17.5
46	04/08/2009	18.30	19.30	19	19	18.5	18.2
47	05/08/2009	18.70	18.70	18.7	18.7	19	17.5
48	06/08/2009	18.90	18.80	18.6	18.6	18.9	17
49	07/08/2009	18.30	18.10	18.1	18.1	17.6	17.4
50	08/08/2009	17.50	17.30	17.4	17.4	17	17.3
51	09/08/2009	17.20	16.90	16.9	16.8	16.7	16.8
52	10/08/2009	17.50	17.10	17	17	16.9	16.9
53	11/08/2009	19.10	17.50	17.2	17	17	17.1
54	12/08/2009	17.80	17.70	17.6	17.6	17.6	17
55	13/08/2009	17.20	16.90	16.7	16.7	17.3	16.7
56	14/08/2009	17.20	16.90	16.8	16.5	16.6	16.7
85	12/09/2009	17.90	17.80	17.7	17.5	17.4	17.5
86	13/09/2009	17.40	17.00	17.1	17.1	17	16.9
87	14/09/2009	17.30	17.30	17.2	17	17	16.8
88	15/09/2009	17.3	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5
89	16/09/2009	17.5	17.5	17.2	17.5	17.2	17.2
90	17/09/2009	17.4	17.5	17.5	17.4	17.4	17.3
91	18/09/2009	17.5	17.9	17.6	17.5	17.5	17.2
92	19/09/2009	17.8	17.9	17.7	17.7	17.9	17
93	20/09/2009	17.6	17.6	17.6	17.7	17.5	17.3
94	21/09/2009	18.5	18	18	18	17.8	17.7
95	22/09/2009	18	18	17.9	17.7	17.8	17.5
96	23/09/2009	18.4	18.2	18.1	18.1	18	17.7
97	24/09/2009	17.8	17.5	17.4	17.4	17.4	17.3
98	25/09/2009	17.7	17.8	17.7	17.6	17.5	17.3
99	26/09/2009	17.8	17.7	17.5	17.5	17.5	17.4
100	27/09/2009	17.7	17.7	17.9	17.9	17.8	17.5
101	28/09/2009	17.9	17.8	17.7	17.8	17.8	17.4
102	29/09/2009	17.8	17.6	17.5	17	16.8	16.8

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Temperatura (°C)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
103	30/09/2009	18.2	18.2	18	18	17.8	17.8
104	01/10/2009	18.3	18.1	18.1	18	17.8	17.3
105	02/10/2009	18.5	18.7	18.6	18.7	18.5	18.1
106	03/10/2009	18.4	18.9	18.8	18.8	18.8	18.2
107	04/10/2009	18.8	18.8	19	19.9	19.8	18.3
108	05/10/2009	19.4	19.4	19	18.9	18.9	18.5
109	06/10/2009	19.2	19	18.9	18.8	18.8	17.2
110	07/10/2009	19	19.1	18.9	18.8	18.7	18.7
111	08/10/2009	18.9	18.8	18.8	18.7	18.7	18.3
112	09/10/2009	18.9	18.7	18.7	18.8	18.7	18.8
113	10/10/2009	19.2	19	18.9	18.7	18.7	18.7
114	11/10/2009	17.80	17.70	17.6	17.6	17.6	17
115	12/10/2009	17.20	16.90	16.7	16.7	17.3	16.7
116	13/10/2009	17.20	16.90	16.8	16.5	16.6	16.7
117	14/10/2009	17.90	17.80	17.7	17.5	17.4	17.5
118	15/10/2009	17.40	17.00	17.1	17.1	17	16.9
119	16/10/2009	17.30	17.30	17.2	17	17	16.8
120	17/10/2009	17.3	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5
121	18/10/2009	17.5	17.5	17.2	17.5	17.2	17.2
122	19/10/2009	17.4	17.5	17.5	17.4	17.4	17.3
123	20/10/2009	17.5	17.9	17.6	17.5	17.5	17.2
124	21/10/2009	17.8	17.9	17.7	17.7	17.9	17
125	22/10/2009	16.7	16.6	16.6	16.7	16.7	16.5
126	23/10/2009	16.5	16.4	16.4	16.4	16.2	16.2
127	24/10/2009	16	15.8	15.8	15.7	15.6	16.2
128	25/10/2009	16.3	15.8	15.8	15.7	15.5	15.7
129	26/10/2009	16.3	16.2	16.2	16.3	16.3	16.1
130	27/10/2009	16.1	16	16	16	15.8	15.8
131	28/10/2009	15.6	15.4	15.4	15.3	15.2	15
132	29/10/2009	16	15.9	15.9	15.8	15.8	15.7
133	30/10/2009	16.4	16.2	16.3	16.3	16.2	16.1
134	31/10/2009	16.3	16.3	16.4	16.5	16.4	16.2
135	01/11/2009	15.6	15.8	16.1	16.2	16.2	15.8
136	02/11/2009	15	15.1	15.2	15.2	15.1	15.2
137	03/11/2009	15	14.7	14.9	14.9	14.6	13.9
138	04/11/2009	15.6	15.7	15.6	15.8	15.6	15.3
139	05/11/2009	15.7	15.4	14.7	14.8	14.4	14.6

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Temperatura (°C)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
140	06/11/2009	14.8	14.9	14.8	14.8	14.9	14.8
141	07/11/2009	13.8	13.6	13.6	13.7	13.8	13.7
142	08/11/2009	13	13.1	13.2	13.5	13.2	13.4
143	09/11/2009	14.6	14.4	14.5	14.5	14.4	14.4
144	10/11/2009	14.6	14.3	14.5	14.5	14.2	13.5
145	11/11/2009	14.6	14.7	14.6	14.8	14.6	14.3
146	12/11/2009	14.5	14.2	13.5	13.6	13.2	13.4
147	13/11/2009	14.3	14.4	14.3	14.3	14.4	14.3
148	14/11/2009	14	13.8	13.8	13.9	14	13.9
149	15/11/2009	13.4	13.5	13.6	13.9	13.6	13.8
150	16/11/2009	14.7	14.5	14.6	14.6	14.5	14.5

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Nitrógeno amoniacal total (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
1	20/06/2009			0.48			
4	23/06/2009			0.76			
8	27/06/2009			0.65			
11	30/06/2009			0.89			
15	04/07/2009			1.15			
18	07/07/2009			0.92			
22	11/07/2009			1.34			
25	14/07/2009			0.32			
29	18/07/2009			0.05			
32	21/07/2009			0.07			
34	23/07/2009			0.17			
35	24/07/2009			0.03			
36	25/07/2009			0.11			
37	26/07/2009			0.09			
38	27/07/2009	0.70	0.60	0.30	0.30	0.60	2.00
41	30/07/2009	0.50	0.40	0.00	1.10	1.60	4.10
45	03/08/2009	0.24	0.16	0.03	0.22	0.22	1.68
48	06/08/2009	0.21	0.14	0.00	0.23	0.21	0.48
53	11/08/2009	0.36	0.28	0.14	0.36	0.36	0.47
83	10/09/2009	2.84	2.83	2.46	2.99	3.57	4.72
87	13/09/2009	1.04	1.09	0.86	1.12	1.1	2
88	15/09/2009	2.15	2.27	1.92	2.1	2.17	4.5
91	18/09/2009	0.53	0.59	0.07	0.55	0.55	2.25
94	21/09/2009	0.38	0.31	0.01	0.41	0.41	1.71
97	24/09/2009	0.4	0.39	0.01	0.38	0.38	0.45
101	28/09/2009	0.97	0.8	0.15	1.06	1.01	1.14
104	01/10/2009	0.62	0.49	0.03	0.62	0.62	4.5
109	06/10/2009	0.76	0.56	0.06	0.77	0.79	0.89
112	09/10/2009	0.67	0.55	0.18	0.69	0.72	1.59
116	13/10/2009	0.47	0.45	0.11	0.48	0.57	0.93
119	16/10/2009	0.54	0.42	0.06	0.55	0.52	1.63
122	19/10/2009	0.53	0.46	0.03	0.56	0.52	3.1
125	22/10/2009	0.47	0.29	0.12	0.54	0.7	3.09
129	26/10/2009	0.4	0.28	0.09	0.42	0.38	1.49
133	30/10/2009	1.5	0.81	0.21	1.15	1.12	1.34
137	03/11/2009	1.04	0.89	0.24	1.06	1	2.3
139	05/11/2009	0.98	0.57	0.13	1	0.96	2.25

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Nitrógeno amoniaco total (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
143	09/11/2009	0.93	0.62	0.01	0.83	0.96	2.24
146	12/11/2009	0.76	0.52	0.09	0.68	0.81	2.38
150	16/11/2009	0.82	0.61	0.12	0.74	0.86	3.01

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Nitritos N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
38	27/07/2009	0.143	0.123	0.118	0.128	0.130	0.362
41	30/07/2009	0.103	0.095	0.102	0.102	0.105	0.231
45	03/08/2009	0.132	0.109	0.117	0.107	0.109	0.296
48	06/08/2009	0.120	0.112	0.125	0.117	0.111	0.325
53	11/08/2009	0.116	0.131	0.123	0.108	0.108	0.237
83	10/09/2009	0.124	0.115	0.105	0.178	0.132	0.350
86	13/09/2009	0.295	0.282	0.269	0.371	0.388	0.500
88	15/09/2009	0.150	0.146	0.132	0.126	0.131	0.445
91	18/09/2009	0.129	0.171	0.161	0.121	0.126	0.427
94	21/09/2009	0.083	0.126	0.062	0.077	0.080	0.110
97	24/09/2009	0.082	0.145	0.017	0.063	0.072	0.011
101	28/09/2009	0.833	0.919	0.906	0.870	0.868	0.793
104	01/10/2009	0.233	0.304	0.145	0.215	0.219	0.338
109	06/10/2009	0.304	0.398	0.194	0.268	0.279	0.403
112	09/10/2009	0.134	0.153	0.065	0.105	0.315	0.386
116	13/10/2009	0.137	0.167	0.102	0.117	0.279	0.405
119	16/10/2009	0.187	0.215	0.103	0.155	0.177	0.593
122	19/10/2009	0.115	0.164	0.070	0.095	0.108	0.894
125	22/10/2009	0.114	0.165	0.025	0.078	0.100	0.850
129	26/10/2009	0.132	0.174	0.060	0.107	0.120	0.447
133	30/10/2009	0.871	0.957	0.754	0.875	0.900	1.221
137	03/11/2009	0.419	0.518	0.377	0.395	0.410	0.819
139	05/11/2009	0.920	0.966	0.578	0.810	0.825	1.032
143	09/11/2009	0.308	0.468	0.144	0.226	0.276	0.182
146	12/11/2009	0.215	0.301	0.126	0.235	0.243	0.459
150	16/11/2009	0.224	0.333	0.137	0.254	0.261	0.543

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Nitratos N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
38	27/07/2009	36.10	37.60	36.40	34.60	34.80	36.10
41	30/07/2009	43.90	46.30	49.40	47.50	44.80	33.20
45	03/08/2009	34.30	34.20	35.00	33.20	34.90	33.90
48	06/08/2009	44.60	46.00	42.60	43.70	44.30	41.20
53	11/08/2009	71.90	67.70	72.60	68.90	71.50	62.90
83	10/09/2009	32.60	33.80	37.20	34.70	33.40	25.30
86	13/09/2009	37.50	38.90	42.70	39.90	38.40	29.10
88	15/09/2009	50.50	48.80	51.80	52.90	51.20	22.20
91	18/09/2009	31.50	33.40	32.20	33.10	32.20	15.60
94	21/09/2009	33.80	33.50	36.20	32.50	30.80	13.10
97	24/09/2009	44.30	42.80	53.70	49.30	42.90	42.00
101	28/09/2009	56.80	56.60	57.20	50.90	50.20	44.80
104	01/10/2009	47.60	42.60	38.90	40.10	42.90	7.50
109	06/10/2009	53.00	52.00	54.80	52.00	47.70	57.60
112	09/10/2009	63.10	61.80	60.10	59.90	54.30	24.60
116	13/10/2009	64.30	63.50	59.80	63.80	57.40	53.10
119	16/10/2009	63.20	62.30	61.10	63.50	60.20	41.30
122	19/10/2009	81.30	82.60	81.10	82.50	81.90	56.50
125	22/10/2009	75.20	75.60	75.20	75.80	76.10	45.10
129	26/10/2009	78.10	77.80	78.20	78.10	77.90	51.30
133	30/10/2009	79.20	72.60	77.40	80.21	75.40	48.90
137	03/11/2009	58.60	57.40	51.90	55.60	57.40	27.60
139	05/11/2009	66.90	68.20	68.40	70.00	66.10	48.60
143	09/11/2009	78.30	71.50	79.40	76.70	72.80	51.10
146	12/11/2009	82.90	76.20	80.80	82.50	85.40	66.80
150	16/11/2009	82.30	84.60	82.40	80.50	79.90	49.50

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

DQO <sub>T</sub> (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
38	27/07/2009	35	27	30	44	76	203
41	30/07/2009	50	49	47	48	83	207
45	03/08/2009	28	16	4	16	16	88
48	06/08/2009	63	40	41	34	31	198
52	10/08/2009	34	18	25	27	18	165
83	10/09/2009	37	42	53	59	107	209
86	13/09/2009	26	36	33	41	65	83
88	15/09/2009	18	26	29	28	32	180
91	18/09/2009	25	27	31	29	26	146
94	21/09/2009	18	17	6	17	59	144
97	24/09/2009	28	39	17	36	22	172
101	28/09/2009	39	38	36	43	44	188
104	01/10/2009	31	30	19	32	47	210
109	06/10/2009	32	29	35	37	32	87
112	09/10/2009	59	72	47	60	65	214
116	13/10/2009	56	43	46	51	55	189
119	16/10/2009	50	52	42	55	55	230
122	19/10/2009	50	34	56	58	75	325
125	22/10/2009	81	83	78	89	145	687
129	26/10/2009	86	73	69	82	92	169
133	30/10/2009	59	53	47	55	62	474
137	03/11/2009	65	72	60	62	61	394
139	05/11/2009	71	79	76	97	71	270
143	09/11/2009	87	84	82	88	78	290
146	12/11/2009	55	43	45	58	63	257
150	16/11/2009	54	45	41	45	56	490

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

SST (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
38	27/07/2009	2	1	1	0	2	78
41	30/07/2009	3	3	2	2	3	41
45	03/08/2009	1	2	1	2	1	132
48	06/08/2009	2	3	2	2	2	117
53	11/08/2009	2	2	1	2	2	389
83	10/09/2009	1	2	1	2	4	160
86	13/09/2009	2	1	1	2	1	244
88	15/09/2009	3	2	2	2	2	411
91	18/09/2009	1	2	1	1	1	204
94	21/09/2009	2	2	1	2	5	456
97	24/09/2009	2	2	1	3	3	170
101	28/09/2009	2	1	1	2	2	545
104	01/10/2009	0	0	0	1	0	704
109	06/10/2009	3	5	1	2	4	129
112	09/10/2009	2	3	1	3	3	386
116	13/10/2009	2	2	1	3	2	90
119	16/10/2009	3	1	1	2	2	683
122	19/10/2009	2	4	2	3	5	928
125	22/10/2009	5	3	3	5	5	898
129	26/10/2009	6	5	2	4	5	291
133	30/10/2009	8	10	9	8	8	257
137	03/11/2009	5	6	3	5	4	607
139	05/11/2009	8	7	5	9	7	471
143	09/11/2009	5	6	3	7	7	509
146	12/11/2009	9	9	3	8	7	675
150	16/11/2009	8	8	2	7	8	549

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Alcalinidad (mg/L)							
Días	Fecha	Puntos de muestreo					
		A	B	C	D	E	G
38	27/07/2009	38	41	37	36	42	102
41	30/07/2009	48	27	23	24	23	128
45	03/08/2009	66	58	49	62	54	137
48	06/08/2009	97	85	81	84	91	117
53	11/08/2009	50	34	54	33	37	57
83	10/09/2009	45	34	28	36	41	89
86	13/09/2009	36	38	35	34	39	95
88	15/09/2009	45	25	22	23	22	170
91	18/09/2009	62	54	46	58	50	170
94	21/09/2009	90	79	75	78	85	128
97	24/09/2009	87	67	63	64	68	69
101	28/09/2009	112	63	61	70	62	85
104	01/10/2009	96	74	76	90	78	193
109	06/10/2009	55	33	25	32	27	60
112	09/10/2009	16	14	10	17	14	79
116	13/10/2009	30	19	19	25	27	52
119	16/10/2009	66	50	43	61	55	119
122	19/10/2009	53	41	35	42	41	114
125	22/10/2009	40	24	18	25	31	159
129	26/10/2009	88	79	68	72	71	133
133	30/10/2009	44	43	36	58	65	152
137	03/11/2009	55	39	30	43	51	115
139	05/11/2009	95	81	74	89	87	132
143	09/11/2009	93	81	74	80	96	141
146	12/11/2009	87	68	53	80	85	136
150	16/11/2009	90	78	65	84	88	154

**ANEXO 4. PARÁMETROS BIOMÉTRICOS**

Días	Fecha	Población (org)	Peso (g)	Biomasa (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Mortalidad (org)
1	20/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
2	21/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
3	22/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
4	23/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
5	24/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
6	25/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
7	26/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
8	27/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
9	28/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
10	29/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
11	30/06/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
12	01/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
13	02/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
14	03/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
15	04/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
16	05/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
17	06/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
18	07/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
19	08/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
20	09/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
21	10/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
22	11/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
23	12/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
24	13/07/2009	102	406.80	41.49	6.61	0
25	14/07/2009	102	560.04	57.12	9.10	0
26	15/07/2009	102	559.76	57.10	9.09	0
27	16/07/2009	102	559.76	57.10	9.09	0
28	17/07/2009	102	559.76	57.10	9.09	0
29	18/07/2009	102	559.76	57.10	9.09	0
30	19/07/2009	102	559.76	57.10	9.09	0
31	20/07/2009	102	559.76	57.10	9.09	0
32	21/07/2009	102	559.76	57.10	9.09	0
33	22/07/2009	102	559.76	57.10	9.09	0
34	23/07/2009	102	559.76	57.10	9.09	0
35	24/07/2009	181	559.76	101.32	16.13	0
36	25/07/2009	181	559.76	101.32	16.13	0
37	26/07/2009	181	559.76	101.32	16.13	0

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Días	Fecha	Población (org)	Peso (g)	Biomasa (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Mortalidad (org)
38	27/07/2009	178	559.76	99.64	15.87	3
39	28/07/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
40	29/07/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
41	30/07/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
42	31/07/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
43	01/08/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
44	02/08/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
45	03/08/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
46	04/08/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
47	05/08/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
48	06/08/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
49	07/08/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
50	08/08/2009	178	559.76	99.64	15.87	0
51	09/08/2009	178	623.77	111.03	17.68	0
52	10/08/2009	173	623.77	107.91	17.18	5
53	11/08/2009	173	623.77	107.91	17.18	0
54	12/08/2009	173	624.77	108.09	17.21	0
55	13/08/2009	173	625.77	108.26	17.24	0
56	14/08/2009	173	626.77	108.43	17.27	0
57	15/08/2009	173	627.77	108.60	17.29	0
58	16/08/2009	168	644.32	108.25	17.24	168
87	14/09/2009	441	287.37	126.73	20.18	24
88	15/09/2009	417	287.37	119.83	19.08	24
89	16/09/2009	410	287.37	117.82	18.76	7
90	17/09/2009	402	287.37	115.52	18.40	8
91	18/09/2009	396	287.37	113.80	18.12	6
92	19/09/2009	394	287.37	113.22	18.03	2
93	20/09/2009	393	287.37	112.94	17.98	1
94	21/09/2009	390	287.37	112.07	17.85	3
95	22/09/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
96	23/09/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
97	24/09/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
98	25/09/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
99	26/09/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
100	27/09/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
101	28/09/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
102	29/09/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
103	30/09/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
104	01/10/2009	390	287.37	112.07	17.85	0

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Días	Fecha	Población (org)	Peso (g)	Biomasa (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Mortalidad (org)
105	02/10/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
106	03/10/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
107	04/10/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
108	05/10/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
109	06/10/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
110	07/10/2009	390	287.37	112.07	17.85	0
111	08/10/2009	390	318.69	124.29	19.79	0
112	09/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	6
113	10/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
114	11/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
115	12/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
116	13/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
117	14/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
118	15/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
119	16/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
120	17/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
121	18/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
122	19/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
123	20/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
124	21/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
125	22/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
126	23/10/2009	384	318.69	122.38	19.49	0
127	24/10/2009	384	385.72	148.12	23.59	0
128	25/10/2009	384	385.72	148.12	23.59	2
129	26/10/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
130	27/10/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
131	28/10/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
132	29/10/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
133	30/10/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
134	31/10/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
135	01/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
136	02/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
137	03/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
138	04/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
139	05/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
140	06/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
141	07/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
142	08/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
143	09/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

---

<b>Días</b>	<b>Fecha</b>	<b>Población (org)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Biomasa (kg)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Mortalidad (org)</b>
144	10/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
145	11/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
146	12/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
147	13/11/2009	382	385.72	147.35	23.46	0
148	14/11/2009	382	471.32	180.04	28.67	0
149	15/11/2009	382	472.31	180.42	28.73	0
150	16/11/2009	382	472.31	180.42	28.73	383

**ANEXO 5. RESULTADOS DE LA PRUEBA PLAKETT – BURMAN PARA EL CONSUMO DE OXÍGENO**

Prueba No.	Contrastes															rO <sub>2</sub>
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	10.97
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	7.05
3	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	6
4	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	6.89
5	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	18.08
6	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	21
7	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	4.28
8	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	5.29
9	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	6.11
10	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	8.2
11	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	26
12	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	13.56
13	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	12.3
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	14.06
15	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	5.69
16	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	6.47

ANEXO 6. TARJETAS DE VALORACIÓN (García, 2008)

Parámetro	Oxígeno Disuelto (OD)
Descripción	Es la concentración de oxígeno que se encuentra disuelto en el agua, involucrado en el proceso de respiración en organismos acuáticos, así como en la oxidación de diferentes especies químicas y materia orgánica.
Técnica analítica	Se midió con un sensor de LCD marca Hach.
Parámetros relacionados	<b>Temperatura</b> (A mayor temperatura, menor concentración de OD). <b>Caudal</b> (mayor caudal, mayor cantidad de OD disponible). <b>DQO</b> (A mayor concentración, menor concentración de OD)
Interpretación	En la gráfica se identifican cinco zonas de control, dos de color rojo que indican efectos letales, dos de color amarillo que hacen referencia a condiciones de vida de las truchas pero no son las ideales y una zona verde donde se tiene el desarrollo adecuado del cultivo.
< 3.0 mg/L	Condiciones de baja concentración de oxígeno disuelto para el cultivo, esto provoca asfixia en las truchas. Esto es ocasionado por una excesiva biomasa, bajo o nulo caudal y/o por un alto contenido de materia orgánica.
3.0 – 5.0 mg/L	En este rango, la trucha tiene capacidad de sobrevivir pero su desarrollo es bajo, encontrándose incluso nulo crecimiento, debido principalmente al estrés ocasionado a los peces. Caer en este rango, generalmente es debido a un mal manejo del sistema.
> 5.0 mg/L	Este es el intervalo óptimo para es buen desarrollo de la trucha, sin embargo cuanto más se acerque al valor superior es preferible.

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

<b>Parámetro</b>	<b>Temperatura</b>
Descripción	De acuerdo a la biología de la trucha, existe un intervalo de temperatura que hace posible el desarrollo adecuado para rentabilidad del cultivo. Este parámetro no es controlable por el sistema y los principales problemas se presentan en los meses más fríos del año.
Técnica analítica	Se midió con un sensor de temperatura marca HACH
Parámetros relacionados	Ninguno
Interpretación	En la gráfica se identifican cinco zonas de control, dos de color rojo que indican efectos letales, dos de color amarillo que hacen referencia a condiciones de vida de las truchas pero no son las ideales y una zona verde donde se tiene el desarrollo adecuado del cultivo.
< 5.0 °C	Muerte por hipotermia
5.0 – 10.0 °C	Se disminuye su metabolismo por lo que su crecimiento es bajo e incluso puede haber pérdida de peso
10.1 – 18.0 °C	Este es el intervalo óptimo para es buen desarrollo de la trucha, sin embargo cuanto más se acerque al valor superior es preferible.
18.1 – 21.0 °C	En este rango, la trucha tiene capacidad de sobrevivir pero su desarrollo no es óptimo, afectando la salud de los peces por el incremento de la temperatura en el agua, la trucha es un organismo originario de climas templados a fríos por lo que estas temperaturas desencadenan cuadros de hipertermia.
> 21.0 °C	Muerte por hipertermia

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

<b>Parámetro</b>	<b>Caudal</b>
Descripción	Es el flujo que transporta agua en condiciones servidas por la trucha hacia el sistema de tratamiento y de agua con condiciones que permiten la vida de los organismos hacia los estanques de cultivo.
Técnica analítica	El cálculo de caudal se realizó mediante un aforo.
Parámetros relacionados	Ninguno
Interpretación	En la gráfica se identifican cinco zonas de control, dos de color rojo que indican efectos letales, dos de color amarillo que hacen referencia a condiciones de vida de las truchas pero no son las ideales y una zona verde donde se tiene el desarrollo adecuado del cultivo.
< 0,5 L/s	Con este flujo, el transporte de especies químicas tóxicas no es realizado adecuadamente, ocasionando que los parámetros se encuentren en concentraciones críticas que pueden llegar a ser letales.
0,5 – 2,0 L/s	El movimiento del flujo permite un transporte limitado ocasionando principalmente concentraciones altas de SST, nitrógeno amoniacal y bajas concentraciones de OD.
2,0 – 3,0 L/s	Este es el intervalo óptimo para es adecuado arrastre de especies químicas tóxicas y permite una velocidad que evita la acumulación de sólidos en los estanques.
3,0 – 4,0 L/s	El sistema de tratamiento ha sido diseñado para operar a estos caudales sólo en condiciones extremas por lo que pueden presentarse condiciones de lavado de biopelícula en el filtro biológico y/o fluidificación en el filtro de arena.
> 4,0 L/s	El sistema de tratamiento se colapsa y el sistema de bombeo se puede averiar.

EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL

Parámetro	pH
Descripción	Este parámetro es indicativo de la acidez o alcalinidad del agua, ya que representa la concentración de iones hidrogeno en el agua.
Técnica analítica	La medición se realizó con un potenciómetro marca HACH.
Parámetros relacionados	<b>Nitrógeno amoniacal</b> (a mayor concentración de nitrógeno amoniacal, el pH es menor) <b>Nitratos</b> (a mayor concentración de nitratos, el pH es menor)
Interpretación	En la gráfica se identifican cinco zonas de control, dos de color rojo que indican efectos letales, dos de color amarillo que hacen referencia a condiciones de vida de las truchas pero no son las ideales y una zona verde donde se tiene el desarrollo adecuado del cultivo.
< 6,5	Nitritos altamente tóxicos, bacterias responsables de la nitrificación no están presentes
6,5 – 7,5	Nitritos tóxicos, bacterias responsables de la nitrificación son inhibidas
7,6 – 8,5	Este es el intervalo óptimo para es buen desarrollo de la trucha, sin embargo cuanto más se acerque al valor superior, es preferible.
8,6 – 9,0	Intervalo óptimo para la nitrificación, sin embargo, los niveles posibles de nitrógeno amoniacal se pueden volver tóxicos.
> 9,0	Se asocia con crecimiento de microalgas, predomina el amoniaco (altamente tóxico para los peces) e inhibe la nitrificación

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

<b>Parámetro</b>	<b>Demanda química de oxígeno total (DQO<sub>T</sub>)</b>
Descripción	Es la determinación indirecta de la concentración de materia orgánica disuelta en el agua.
Técnica analítica	Este parámetro se determinó de acuerdo con la técnica recomendada en el "Standard Methods"
Parámetros relacionados	OD (A mayor cantidad de OD, menor concentración de DQO <sub>T</sub> ).
Interpretación	En la gráfica se identifican tres zonas de control, una de color rojo que indica efectos letales, una de color amarillo que hace referencia a condiciones de vida de las truchas pero no son las ideales y una zona verde donde se tiene el desarrollo adecuado del cultivo.
< 150 mg/L	Intervalo ideal, ya que cuando la DQO <sub>T</sub> es menor a 150 mg/L, la disponibilidad de OD se encuentra dentro del rango ideal para el desarrollo de la trucha.
150.0 – 190.00 mg/L	La concentración de OD en el agua se ve comprometida hacia la oxidación de la materia orgánica, reduciendo la disponibilidad de OD hacia la trucha.
> 190.0 mg/L	Los rangos de OD se encuentran por debajo de los valores letales.

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

<b>Parámetro</b>	<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b>
Descripción	Es la concentración de sólidos que se encuentran suspendidos en el agua, generalmente son originados por heces fecales, alimento no consumido y bioflocs.
Técnica analítica	Este parámetro se determinó de acuerdo con la técnica recomendada en el "Stándard Methods"
Parámetros relacionados	<b>Caudal</b> (A mayor caudal, menor concentración de SST en el agua).
Interpretación	En la gráfica se identifican tres zonas de control, una de color rojo que indica efectos letales, una de color amarillo que hace referencia a condiciones de vida de las truchas pero no son las ideales y una zona verde donde se tiene el desarrollo adecuado del cultivo.
< 80.0 mg/L	Este es el intervalo óptimo para es buen desarrollo de la trucha, sin embargo cuanto más se acerque al valor inferior, es preferible.
80.0 – 100.0 mg/L	La concentración de SST en el agua hace posible la sobrevivencia de la trucha, sin embargo, se presentan inicios de irritación en branquias.
> 100.0 mg/L	Causa la muerte de truchas por taponamiento de branquias.

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

<b>Parámetro</b>	<b>Nitrógeno amoniacal total</b>
Descripción	Es concentración de $N-NH_3^+$ + $N-NH_4$ disuelta en el agua, conocida como nitrógeno amoniacal por ser la especie dominante al intervalo de pH ideal para el cultivo.
Técnica analítica	Este parámetro se determinó de acuerdo con la técnica recomendada en el "Standard Methods"
Parámetros relacionados	<b>Caudal</b> (A mayor caudal, menor concentración de nitrógeno amoniacal en el agua). <b>pH</b> ( De acuerdo al valor de pH, se tiene predominancia de nitrógeno amoniacal o de amoniaco, siendo este último altamente tóxico). <b>SST</b> (Cuando la retención de sólidos es alta, se incrementa la concentración de nitrógeno amoniacal).
Interpretación	En la gráfica se identifican tres zonas de control, una de color rojo que indica efectos letales, una de color amarillo que hace referencia a condiciones de vida de las truchas pero no son las ideales y una zona verde donde se tiene el desarrollo adecuado del cultivo.
< 0.7 mg/L	Este es el intervalo óptimo para es buen desarrollo de la trucha, sin embargo cuanto más se acerque al valor inferior, es preferible.
0.8 – 1.0 mg/L	Cuando estas concentraciones son puntuales, permiten la sobrevivencia de la trucha pero cuando los peces son sometidos a largos periodos de exposición, estas pueden ser letales
> 1.0 mg/L	Causa la muerte de truchas por envenenamiento.

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

<b>Parámetro</b>	<b>Nitratos</b>
Descripción	Es la especie nitrogenada, resultado final de la nitrificación del nitrógeno amoniacal, el cual es tóxico para los peces a valores muy altos, por lo que no es necesaria su eliminación en el sistema.
Técnica analítica	Este parámetro se determinó de acuerdo con la técnica recomendada en el "Stándard Methods"
Parámetros relacionados	<b>OD</b> (A mayor OD en el biofiltro, mayor concentración de nitratos en el agua). <b>pH</b> ( De acuerdo al valor de pH, se inhibe o estimula la nitrificación) <b>Nitrógeno amoniacal</b> (Los nitratos tienen como fuente de generación al nitrógeno amoniacal).
Interpretación	En la gráfica se identifican tres zonas de control, una de color rojo que indica efectos letales, una de color amarillo que hace referencia a condiciones de vida de las truchas pero no son las ideales y una zona verde donde se tiene el desarrollo adecuado del cultivo.
<b>&lt; 50 mg/L</b>	Este es el intervalo óptimo para es buen desarrollo de la trucha y del sistema bacteriano en los biofiltros, sin embargo cuanto más se acerque al valor inferior, es preferible.
<b>50 – 100 mg/L</b>	Cuando estas concentraciones son puntuales, permiten la sobrevivencia de la trucha pero cuando los peces son sometidos a largos periodos de exposición puede causar intoxicación.
<b>&gt; 100 mg/L</b>	Causa problemas de desequilibrio en el agua, desnitrificación parcial y aparición de zonas anaeróbicas.

**ANEXO 7. MEMORIA DE CÁLCULO DE ESTIMADORES ESTADÍSTICOS CON BASE EN LA TEORÍA DE MUESTREO ESTRATIFICADO.**

**Nitrógeno amoniacal total (mg de N-NH<sub>3</sub>/L)**

Punto de Muestreo A								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,4020	0,0408	43,6572	0,2020	-1,4903	-3,0839E-06
2	121,03	81	1,3880	1,1406	167,9896	1,0680	68,3225	0,000141378
3	130,21	77	0,6840	0,0431	89,0636	0,2077	3,9379	8,14864E-06
4	155,12	92	0,4820	0,0032	74,7678	0,0563	0,3391	7,01661E-07
5	180,21	132	1,0050	0,0694	181,1111	0,2633	4,5593	9,4344E-06
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	556,5894		75,6685	0,000156579
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,801</b>
Desviación estándar								<b>0,0125</b>
Intervalo de confianza al 95 %								0,78
								0,83

Punto de Muestreo B								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,316000	0,03608	34,3176	0,189947361	-1,317272861	-2,7258E-06
2	121,03	81	1,418000	1,18512	171,62054	1,088632169	70,9911487	0,0001469
3	130,21	77	0,558000	0,02287	72,65718	0,151228304	2,088111287	4,32087E-06
4	155,12	92	0,380000	0,00775	58,9456	0,088034084	0,828994835	1,71542E-06
5	180,21	132	0,670000	0,02132	120,7407	0,146013698	1,401642371	2,90038E-06
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	458,28162		73,99262434	0,000153111
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,659</b>
Desviación estándar								<b>0,0124</b>
Intervalo de confianza al 95 %								0,63
								0,68

Punto de Muestreo C								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,0940	0,0166	10,208	0,1288	0,0100	2,06995E-08
2	121,03	81	1,0640	1,2055	128,776	1,0980	72,2138	0,00014943
3	130,21	77	0,0860	0,0056	11,198	0,0750	0,5140	1,06369E-06
4	155,12	92	0,0820	0,0014	12,720	0,0370	0,1465	3,03242E-07
5	180,21	132	0,1333	0,0069	24,028	0,0831	0,4541	9,39586E-07
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	186,93022		73,3384	0,000151757
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,269</b>
Desviación estándar								<b>0,0123</b>
Intervalo de confianza al 95 %								0,24
								0,29

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Punto de Muestro D								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,4420	0,1385	48,0012	0,3722	-5,0573	-1,0465E-05
2	121,03	81	1,4340	1,1983	173,5570	1,0947	71,7825	0,000148538
3	130,21	77	0,7040	0,0608	91,6678	0,2466	5,5540	1,14927E-05
4	155,12	92	0,5100	0,0035	79,1112	0,0592	0,3744	7,74705E-07
5	180,21	132	0,9100	0,0353	163,9911	0,1878	2,3194	4,79951E-06
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	556,3284		74,9729	0,000155139
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,800</b>
Desviación estándar								<b>0,0125</b>
Intervalo de confianza al 95								0,78
%								0,82

Punto de Muestreo E								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,5980	0,3385	64,9428	0,5818	-12,3592907	-2,55748E-05
2	121,03	81	1,5600	1,7416	188,8068	1,3197	104,325456	0,000215878
3	130,21	77	0,7040	0,0533	91,6678	0,2309	4,86921622	1,00757E-05
4	155,12	92	0,5380	0,0132	83,4546	0,1150	1,41410474	2,92617E-06
5	180,21	132	0,9517	0,0119	171,4999	0,1089	0,77949373	1,61299E-06
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	600,3719		99,0290	0,0002
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,864</b>
Desviación estándar								<b>0,0143</b>
Intervalo de confianza al 95								0,84
%								0,89

Punto de Muestreo G								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	1,746000	2,21028	189,6156	1,48670105	-80,6968364	-0,000166984
2	121,03	81	3,036000	2,10713	367,44708	1,45159567	126,221462	0,000261187
3	130,21	77	1,714000	2,59583	223,17994	1,61115797	237,008392	0,000490435
4	155,12	92	2,048000	0,98212	317,68576	0,99101968	105,054504	0,000217387
5	180,21	132	2,253333	0,285026667	406,0732	0,53387889	18,7385297	3,87751E-05
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	1504,00158		406,326051	0,0008408
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>2,164</b>
Desviación estándar								<b>0,0290</b>
Intervalo de confianza al 95								2,11
%								2,22

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia general								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	79,4949	524,0027	8633,1515	22,8911	-19131,222	-0,03958774
2	121,03	81	49,8530	1570,8898	6033,7100	39,6345	94099,558	0,19471775
3	130,21	77	89,0167	82,6047	11590,8590	9,0887	7542,103	0,01560668
4	155,12	92	84,5134	48,6219	13109,7184	6,9729	5200,945	0,01076218
5	180,21	132	86,2670	59,7222	15546,1781	7,7280	3926,322	0,00812463
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	54913,6171		91637,707	0,18962351
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>78,993</b>
							Desviación estándar	<b>0,435</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	78,14
								79,85

Eficiencia percolador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	24,634921	71,4336105	2675,35238	8,45184066	-2608,0254	-0,00539672
2	121,03	81	-0,587335	130,039929	-71,0852051	11,4035051	7789,66175	0,01611894
3	130,21	77	17,04	78,468151	2219,29279	8,85822505	7164,41765	0,01482514
4	155,12	92	21,60	180,259315	3350,06338	13,4260685	19281,8118	0,03989935
5	180,21	132	32,13	128,879595	5790,20282	11,3525149	8472,94093	0,01753283
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	13963,8262		40100,8067	0,08297955
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>20,087</b>
							Desviación estándar	<b>0,288</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	19,52
								20,65

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia filtro de arena								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	76,250000	632,8125	8280,75	25,1558	-23103,845	-0,04780818
2	121,03	81	46,900682	1747,16778	5676,38958	41,7991	104658,977	0,21656808
3	130,21	77	85,82	144,187627	11175,1923	12,0078	13164,837	0,02724165
4	155,12	92	76,25	192,025112	11827,1534	13,8573	20540,365	0,04250364
5	180,21	132	80,95	86,3072471	14588,2409	9,2902	5674,104	0,01174127
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	51547,7261		120934,437	0,25024646
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>74,151</b>
							Desviación estándar	<b>0,500</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	73,17
								75,13

Eficiencia estanque sedimentador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-158,0952	75208,617	-17169,1429	274,2419	-2745850,05	-5,68191553
2	121,03	81	-949,3733	2991280,432	-114902,652	1729,5319	179183908,78	370,780565
3	130,21	77	-1548,0000	1856214,444	-201565,08	1362,4296	169478895,17	350,698235
4	155,12	92	-727,2727	378378,099	-112814,545	615,1245	40473998,70	83,7517845
5	180,21	132	-1805,1231	9830169,892	-325301,237	3135,3102	646265602,17	1337,30047
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	-771752,657		1032656554,77	2136,84914
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>-1110,164</b>
							Desviación estándar	<b>46,226</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	-1200,77
								-1019,56

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

**N – Nitritos (mg de N-NO<sub>2</sub>/L)**

Punto de Muestreo A								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,122800	0,0002347	13,33608	0,01531992	-0,00856885	-1,7731E-08
2	121,03	81	0,156200	0,0066097	18,904886	0,08130006	0,39593475	8,193E-07
3	130,21	77	0,317200	0,0905487	41,302612	0,30091311	8,26741419	1,7108E-05
4	155,12	92	0,137000	0,0008845	21,25144	0,02974054	0,09461238	1,9578E-07
5	180,21	132	0,492833	0,10291177	88,813495	0,32079864	6,76573605	1,4E-05
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	183,608513		15,5151285	3,2105E-05
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,264</b>
Desviación estándar								<b>0,0057</b>
Intervalo de confianza al 95 %								0,25
								0,28

Punto de Muestreo B								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,114000	0,00019	12,3804	0,01378405	-0,00693686	-1,4354E-08
2	121,03	81	0,168000	0,0045155	20,33304	0,06719747	0,27048783	5,5971E-07
3	130,21	77	0,383800	0,1008257	49,974598	0,31753063	9,20574037	1,9049E-05
4	155,12	92	0,177000	0,0004665	27,45624	0,02159861	0,04990014	1,0326E-07
5	180,21	132	0,590500	0,0891403	106,414005	0,29856373	5,86035748	1,2127E-05
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	216,558283		15,379549	3,1824E-05
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,312</b>
Desviación estándar								<b>0,0056</b>
Intervalo de confianza al 95 %								0,30
								0,32

Punto de Muestreo C								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,117000	0,0000815	12,7062	0,00902774	-0,00297555	-6,1572E-09
2	121,03	81	0,145800	0,0060717	17,646174	0,07792111	0,36370744	7,5261E-07
3	130,21	77	0,265400	0,1329563	34,557734	0,36463173	12,1393769	2,512E-05
4	155,12	92	0,072000	0,0010545	11,16864	0,03247307	0,11279678	2,3341E-07
5	180,21	132	0,352667	0,07077347	63,55406	0,26603283	4,65286537	9,6281E-06
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	139,632808		17,265771	3,5728E-05
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,201</b>
Desviación estándar								<b>0,0060</b>
Intervalo de confianza al 95 %								0,19
								0,21

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Punto de Muestreo D								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,112400	0,0001053	12,20664	0,01026158	-0,00384448	-7,95528E-09
2	121,03	81	0,174600	0,0133363	21,131838	0,1154829	0,79887206	1,65309E-06
3	130,21	77	0,304200	0,1068137	39,609882	0,32682365	9,75246579	2,01805E-05
4	155,12	92	0,110400	0,0008328	17,125248	0,02885827	0,08908218	1,84335E-07
5	180,21	132	0,465833	0,089312567	83,947825	0,29885208	5,87168282	1,21501E-05
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	174,021433		16,5082584	3,41601E-05
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,250</b>
Desviación estándar								<b>0,0058</b>
Intervalo de confianza al 95								0,24
%								0,26

Punto de Muestreo E								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,112600	9,93E-05	12,22836	0,00996494	-0,00362542	-7,50199E-09
2	121,03	81	0,171400	0,0151288	20,744542	0,12299919	0,90624653	1,87527E-06
3	130,21	77	0,350600	0,0922583	45,651626	0,30374051	8,42350667	1,74305E-05
4	155,12	92	0,156800	0,0055757	24,322816	0,07467061	0,59641632	1,23415E-06
5	180,21	132	0,485833	0,089173367	87,552025	0,2986191	5,86253138	1,21312E-05
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	190,499369		15,7850755	3,26636E-05
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,274</b>
Desviación estándar								<b>0,0057</b>
Intervalo de confianza al 95								0,26
%								0,29

Punto de Muestreo G								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	0,290200	0,0031837	31,51572	0,05642429	-0,11623619	-2,40524E-07
2	121,03	81	0,366400	0,0234273	44,345392	0,15305979	1,40334391	2,9039E-06
3	130,21	77	0,386200	0,0772167	50,287102	0,27787893	7,05015579	1,45887E-05
4	155,12	92	0,637800	0,0508187	98,935536	0,22543003	5,43592772	1,12484E-05
5	180,21	132	0,709333	0,149271467	127,82896	0,38635666	9,81356532	2,0307E-05
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	352,91271		23,5867565	4,88075E-05
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,508</b>
Desviación estándar								<b>0,0070</b>
Intervalo de confianza al 95								0,49
%								0,52

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia general								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-4,3506	101,1445	-472,4760	10,0571	-3692,76505	-0,00764134
2	121,03	81	9,0167	557,7442	1091,2915	23,6166	33410,03411	0,06913451
3	130,21	77	43,1264	1230,9370	5615,4883	35,0847	112388,8672	0,23256334
4	155,12	92	53,0868	261,1511	8234,8230	16,1602	27934,56977	0,05780427
5	180,21	132	32,9490	314,6432	5937,7456	17,7382	20685,61199	0,04280419
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	20406,8725		190726,318	0,39466497
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>29,355</b>
							Desviación estándar	<b>0,628</b>
							Intervalo de confianza al 95	28,12
							%	30,59

Eficiencia Percolador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	6,583	138,636	714,868	11,774	-5061,566	-0,01047376
2	121,03	81	-14,007	710,571	-1695,240	26,657	42564,671	0,08807796
3	130,21	77	-32,545	699,776	-4237,702	26,453	63891,999	0,13221004
4	155,12	92	-31,207	165,906	-4840,823	12,880	17746,482	0,03672233
5	180,21	132	-29,852	400,096	-5379,574	20,002	26303,558	0,05442926
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	-15438,4704		145445,145	0,30096583
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>-22,208</b>
							Desviación estándar	<b>0,549</b>
							Intervalo de confianza al 95	-23,28
							%	-21,13

Eficiencia filtro de arena								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-3,228621	61,1463453	-350,628188	7,81961286	-2232,43961	-0,00461953
2	121,03	81	15,907245	384,451695	1925,2539	19,6074398	23029,45477	0,04765425
3	130,21	77	50,15	972,210753	6530,44025	31,1802943	88766,25478	0,18368168
4	155,12	92	59,74	290,3855	9266,80608	17,0407013	31061,68765	0,06427514
5	180,21	132	45,80	370,664433	8254,42873	19,2526474	24368,61982	0,05042535
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	25626,3008		164993,5774	0,34141688
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>36,863</b>
							Desviación estándar	<b>0,584</b>
							Intervalo de confianza al 95	35,72
							%	38,01

Eficiencia estanque sedimentador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	3,733511	66,2138203	405,459278	8,1371875	-2417,45201	-0,00500237

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

2	121,03	81	-20,449080	1350,94399	-2474,95212	36,7551899	80924,34973	0,16745464
3	130,21	77	-82,91	11608,0239	-10796,3199	107,74054	1059853,333	2,19312672
4	155,12	92	-78,25	6126,77057	-12137,7968	78,2736901	655362,7295	1,35612492
5	180,21	132	-48,30	1182,47533	-8704,57942	34,3871391	77739,56515	0,16086444
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	-33708,189		1871462,525	3,87256835
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>-48,489</b>
							Desviación estándar	<b>1,968</b>
							Intervalo de confianza al 95	-52,35
							%	-44,63

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

**N – Nitratos (mg de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L)**

Punto de muestreo A								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	46,1600	227,9880	5012,9760	15,0993	-8323,7917	-0,0172242
2	121,03	81	37,1800	60,5470	4499,8954	7,7812	3626,8910	0,00750503
3	130,21	77	52,9600	55,3230	6895,9216	7,4379	5051,1841	0,01045228
4	155,12	92	72,4200	67,4470	11233,7904	8,2126	7214,6083	0,014929
5	180,21	132	74,7000	95,6520	13461,6870	9,7802	6288,4567	0,01301254
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	41104,270		13857,348	0,02867465
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>59,128</b>
							Desviación estándar	<b>0,169</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	58,80
								59,46

Punto de muestreo B								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	46,3600	170,0330	5034,6960	13,0397	-6207,8674	-0,01284578
2	121,03	81	37,6800	43,9970	4560,4104	6,6330	2635,5117	0,0054536
3	130,21	77	51,1600	71,6680	6661,5436	8,4657	6543,5400	0,01354038
4	155,12	92	72,3600	81,1630	11224,4832	9,0091	8681,7687	0,01796496
5	180,21	132	71,7500	80,8470	12930,0675	8,9915	5315,1304	0,01099846
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	40411,2007		16968,0834	0,03511161
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>58,131</b>
							Desviación estándar	<b>0,187</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	57,76
								58,50

Punto de muestreo C								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	47,2000	234,1600	5125,9200	15,3023	-8549,1301	-0,01769049
2	121,03	81	40,0200	57,4120	4843,6206	7,5771	3439,0980	0,00711644
3	130,21	77	52,9400	67,6430	6893,3174	8,2245	6176,0434	0,01277992
4	155,12	92	71,0800	98,7270	11025,9296	9,9361	10560,5385	0,02185265
5	180,21	132	73,3833	135,0017	13224,4105	11,6190	8875,4248	0,01836568
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	41113,1981		20501,9745	0,0424242
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>59,141</b>
							Desviación estándar	<b>0,206</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	58,74
								59,54

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Punto de muestreo D								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	45,580000	206,217	4949,988	14,36026	-7528,93729	-0,015579433
2	121,03	81	38,620000	72,212	4674,1786	8,497764	4325,64874	0,008950952
3	130,21	77	50,440000	50,088	6567,7924	7,077288	4573,21024	0,009463224
4	155,12	92	72,740000	74,663	11283,4288	8,640775	7986,48276	0,016526219
5	180,21	132	74,251667	102,9068	13380,89285	10,1443	6765,41063	0,013999487
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	40856,28065		16121,8151	0,033360449
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>58,772</b>
							Desviación estándar	<b>0,183</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	58,41
								59,13

Punto de muestreo E								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	46,0600	225,8030	5002,1160	15,0267	-8244,0178	-0,01705913
2	121,03	81	37,2000	69,4600	4502,3160	8,3343	4160,7982	0,008609831
3	130,21	77	47,6000	23,9600	6197,9960	4,8949	2187,6321	0,00452681
4	155,12	92	70,7000	123,3950	10966,9840	11,1083	13199,2023	0,027312763
5	180,21	132	72,8333	99,5947	13125,2950	9,9797	6547,6597	0,013548901
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	39794,7070		17851,2745	0,036939174
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>57,245</b>
							Desviación estándar	<b>0,192</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	56,87
								57,62

Punto de muestreo G								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	41,4600	153,4630	4502,5560	12,3880	-5602,9004	-0,011593935
2	121,03	81	21,0600	44,2730	2548,8918	6,6538	2652,0446	0,005487806
3	130,21	77	35,3000	379,9400	4596,4130	19,4920	34689,8558	0,071782809
4	155,12	92	49,4600	37,9480	7672,2352	6,1602	4059,1866	0,008399568
5	180,21	132	48,7500	155,8510	8785,2375	12,4840	10246,1241	0,021202036
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	28105,3335		46044,3107	0,095278285
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>40,429</b>
							Desviación estándar	<b>0,309</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	39,82
								41,03

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia general								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-2,5706	27,6756	-279,1689	5,2608	-1010,4316	-0,00209086
2	121,03	81	-8,2559	55,6991	-999,2117	7,4632	3336,4896	0,006904111
3	130,21	77	-11,0722	159,4564	-1441,7147	12,6276	14558,9327	0,030126418
4	155,12	92	-0,7804	4,7934	-121,0512	2,1894	512,7361	0,001060991
5	180,21	132	-0,5598	46,0141	-100,8768	6,7834	3025,1074	0,006259775
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	-2942,0233		20422,8344	0,042260436
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>-4,232</b>
							Desviación estándar	<b>0,206</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	-4,64
								-3,83

Eficiencia Percolador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-1,3256	20,6068	-143,9627	4,5395	-752,3510	-0,00155682
2	121,03	81	-1,8384	14,7726	-222,5052	3,8435	884,9071	0,001831115
3	130,21	77	3,6379	15,8903	473,6866	3,9863	1450,8446	0,003002195
4	155,12	92	0,1843	1,5984	28,5858	1,2643	170,9711	0,000353786
5	180,21	132	3,7350	28,4529	673,0794	5,3341	1870,5791	0,00387074
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	808,8840		3624,9510	0,007501016
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>1,164</b>
							Desviación estándar	<b>0,087</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	0,99
								1,33

Eficiencia filtro de arena								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-1,137933	40,2574	-123,5795	6,3449	-1469,7878	-0,003041393
2	121,03	81	-6,088447	31,7317	-736,8848	5,6331	1900,7919	0,003933259
3	130,21	77	-4,10	169,4634	-533,2287	13,0178	15472,6027	0,032017051
4	155,12	92	1,92	5,7833	297,3302	2,4049	618,6255	0,001280105
5	180,21	132	-1,97	55,5313	-354,6583	7,4519	3650,7996	0,007554504
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	-1451,0211		20173,0319	0,041743526
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>-2,087</b>
							Desviación estándar	<b>0,204</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	-2,49
								-1,69

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia estanque sedimentador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	3,289665	11,0568	357,2576	3,3252	-403,6795	-0,000835323
2	121,03	81	3,716044	33,9772	449,7528	5,8290	2035,3059	0,004211605
3	130,21	77	4,31	32,7918	561,5981	5,7264	2994,0085	0,006195423
4	155,12	92	-2,60	7,4839	-403,7218	2,7357	800,5290	0,001656514
5	180,21	132	-1,58	15,1506	-285,2243	3,8924	996,0452	0,00206109
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	679,6623		6422,2091	0,013289309
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>0,978</b>
Desviación estándar								<b>0,115</b>
Intervalo de confianza al 95 %								0,75
								1,20

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

**Demanda Química de Oxígeno (mg de DQO/L)**

Punto de muestreo A								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	42,0000	203,5000	4561,2000	14,2653	-7429,7402	-0,01537417
2	121,03	81	24,8000	60,7000	3001,5440	7,7910	3636,0560	0,007524
3	130,21	77	37,8000	156,7000	4921,9380	12,5180	14307,2601	0,02960564
4	155,12	92	64,6000	306,8000	10020,7520	17,5157	32817,4988	0,06790839
5	180,21	132	65,1667	155,3667	11743,6850	12,4646	10214,2825	0,02113615
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	34249,1190		53545,3572	0,1108
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>49,267</b>
							Desviación estándar	<b>0,333</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	48,61
								49,92

Punto de muestreo B								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	30,000	202,500	3258,000	14,230	-7393,230	-0,01529862
2	121,03	81	29,600	93,300	3582,488	9,659	5588,864	0,01156489
3	130,21	77	41,600	309,300	5416,736	17,587	28240,176	0,05843666
4	155,12	92	57,000	420,500	8841,840	20,506	44979,655	0,09307522
5	180,21	132	62,667	320,267	11293,160	17,896	21055,316	0,04356921
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	32392,224		92470,780	0,19134736
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>46,596</b>
							Desviación estándar	<b>0,437</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	45,74
								47,45

Punto de muestreo C								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	29,400	277,300	3192,840	16,652	-10124,162	-0,02094966
2	121,03	81	30,400	278,800	3679,312	16,697	16700,699	0,03455832
3	130,21	77	30,800	159,200	4010,468	12,617	14535,519	0,03007797
4	155,12	92	58,200	231,200	9027,984	15,205	24730,788	0,05117477
5	180,21	132	58,500	296,300	10542,285	17,213	19479,673	0,04030878
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	30452,889		65322,517	0,13517017
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>43,806</b>
							Desviación estándar	<b>0,368</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	43,09
								44,53

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Punto de muestreo D								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	33,800	167,200	3670,680	12,931	-6104,435	-0,012631748
2	121,03	81	34,800	255,200	4211,844	15,975	15287,010	0,031633009
3	130,21	77	41,600	121,300	5416,736	11,014	11075,116	0,022917447
4	155,12	92	67,000	297,500	10393,040	17,248	31822,705	0,065849889
5	180,21	132	67,500	414,700	12164,175	20,364	27263,653	0,056415963
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	35856,475		79344,049	0,164184561
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>51,579</b>
Desviación estándar								<b>0,405</b>
Intervalo de confianza al 95 %								50,79
								52,37

Punto de muestreo E								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	44,800	1042,700	4865,280	32,291	-38068,748	-0,078774661
2	121,03	81	57,800	1037,700	6995,534	32,213	62160,385	0,128626854
3	130,21	77	42,000	264,500	5468,820	16,263	24149,779	0,049972504
4	155,12	92	84,400	1386,800	13092,128	37,240	148341,940	0,306960088
5	180,21	132	65,167	62,967	11743,685	7,935	4139,622	0,008566012
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	42165,447		200722,978	0,415350797
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>60,655</b>
Desviación estándar								<b>0,644</b>
Intervalo de confianza al 95 %								59,39
								61,92

Punto de muestreo G								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	172,200	2491,700	18700,920	49,917	-90971,419	-0,188244772
2	121,03	81	152,400	2223,300	18444,972	47,152	133180,286	0,275586475
3	130,21	77	174,200	2666,200	22682,582	51,635	243433,420	0,503730395
4	155,12	92	720,000	531694,000	111686,400	729,174	56873752,231	117,6873646
5	180,21	132	362,500	10924,700	65326,125	104,521	718223,378	1,486200809
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	236840,999		57877617,897	119,7646375
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>340,695</b>
Desviación estándar								<b>10,944</b>
Intervalo de confianza al 95 %								319,25
								362,14

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia general								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	21,5506	2850,1219	2340,3920	53,3865	-104057,3241	-0,21532309
2	121,03	81	35,9346	1760,3466	4349,1598	41,9565	105448,4172	0,21820165
3	130,21	77	23,7602	607,0625	3093,8122	24,6386	55426,9381	0,11469351
4	155,12	92	27,3080	124,9136	4236,0241	11,1765	13361,6444	0,0276489
5	180,21	132	11,5033	280,7515	2073,0030	16,7556	18457,4703	0,03819356
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	16092,3910		88637,1459	0,18341452
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>23,149</b>
Desviación estándar								<b>0,428</b>
Intervalo de confianza al 95 %								22,31
								23,99

Eficiencia Percolador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	30,2562	333,3388	3285,8243	18,2576	-12170,1245	-0,02518332
2	121,03	81	-19,7728	444,3155	-2393,1006	21,0788	26615,4220	0,0550746
3	130,21	77	-9,2309	426,9199	-1201,9608	20,6620	38979,2893	0,08065882
4	155,12	92	12,7723	249,4613	1981,2370	15,7943	26684,1447	0,0552168
5	180,21	132	5,0110	192,2794	903,0257	13,8665	12641,0359	0,02615776
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	2575,026		92749,767	0,19192466
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>3,704</b>
Desviación estándar								<b>0,438</b>
Intervalo de confianza al 95 %								2,85
								4,56

Eficiencia filtro de arena								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	5,3163	1785,5989	577,3531	42,2563	-65191,8225	-0,13489973
2	121,03	81	4,0991	1302,7097	496,1132	36,0931	78035,0148	0,16147581
3	130,21	77	22,4745	915,6086	2926,4085	30,2590	83598,2806	0,17298773
4	155,12	92	-8,1897	1084,0775	-1270,3803	32,9253	115960,5994	0,23995423
5	180,21	132	6,4006	56,1734	1153,4512	7,4949	3693,0114	0,00764185
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	3882,9456		216095,0838	0,44715989
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>5,586</b>
Desviación estándar								<b>0,669</b>
Intervalo de confianza al 95 %								4,27
								6,90

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia estanque sedimentador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-67,9442	17363,9263	-7378,7435	131,7723	-633953,1280	-1,31182259
2	121,03	81	-41,7993	6411,1405	-5058,9723	80,0696	384040,6264	0,7946852
3	130,21	77	-46,6008	1872,6007	-6067,8918	43,2736	170975,0173	0,35379412
4	155,12	92	-15,6673	103,8700	-2430,3122	10,1917	11110,6746	0,02299103
5	180,21	132	-15,6580	115,3165	-2821,7356	10,7386	7581,2608	0,0156877
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	-23757,6554		60245,5489	0,12466454
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>-34,175</b>
Desviación estándar								<b>0,353</b>
Intervalo de confianza al 95								-34,87
%								-33,48

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

**Sólidos Suspendidos Totales (mg de SST/L)**

Punto de muestreo A								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	2,000	0,500	217,200	0,707	-18,255	-3,7774E-05
2	121,03	81	1,800	0,700	217,854	0,837	41,931	8,6768E-05
3	130,21	77	1,800	1,200	234,378	1,095	109,564	0,00022672
4	155,12	92	3,600	3,300	558,432	1,817	352,991	0,00073044
5	180,21	132	7,167	2,967	1291,505	1,722	195,038	0,00040359
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	2519,369		681,270	0,00140973
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>3,624</b>
							Desviación estándar	<b>0,038</b>
							Intervalo de confianza	3,55
							al 95 %	3,70

Punto de muestreo B								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	2,200	0,700	238,920	0,837	-25,557	-5,2884E-05
2	121,03	81	1,800	0,200	217,854	0,447	11,980	2,4791E-05
3	130,21	77	2,200	3,700	286,462	1,924	337,823	0,00069905
4	155,12	92	3,000	2,500	465,360	1,581	267,418	0,00055336
5	180,21	132	7,667	2,667	1381,610	1,633	175,315	0,00036277
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	2590,206		766,979	0,00158709
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>3,726</b>
							Desviación estándar	<b>0,040</b>
							Intervalo de confianza	3,65
							al 95 %	3,80

Punto de muestreo C								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	1,400	0,300	152,040	0,548	-10,953	-2,2665E-05
2	121,03	81	1,200	0,200	145,236	0,447	11,980	2,4791E-05
3	130,21	77	0,800	0,200	104,168	0,447	18,261	3,7786E-05
4	155,12	92	1,800	0,700	279,216	0,837	74,877	0,00015494
5	180,21	132	4,167	6,567	750,875	2,563	431,713	0,00089333
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	1431,535		525,878	0,00108819
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>2,059</b>
							Desviación estándar	<b>0,033</b>
							Intervalo de confianza	1,99
							al 95 %	2,12

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Punto de muestreo D								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	1,600	0,800	173,760	0,894	-29,208	-6,0439E-05
2	121,03	81	1,800	0,200	217,854	0,447	11,980	2,47908E-05
3	130,21	77	2,200	0,700	286,462	0,837	63,912	0,000132252
4	155,12	92	3,400	1,300	527,408	1,140	139,057	0,000287747
5	180,21	132	7,333	1,867	1321,540	1,366	122,720	0,000253942
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	2527,024		308,463	0,000638294
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>3,635</b>
							Desviación estándar	<b>0,025</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	3,59
								3,68

Punto de Muestreo E								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	2,000	0,500	217,200	0,707	-18,255	-3,77744E-05
2	121,03	81	2,600	3,300	314,678	1,817	197,677	0,000409048
3	130,21	77	2,400	2,300	312,504	1,517	209,998	0,000434544
4	155,12	92	3,800	2,700	589,456	1,643	288,811	0,000597629
5	180,21	132	6,833	2,167	1231,435	1,472	142,443	0,000294754
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	2665,273		820,674	0,0016982
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>3,834</b>
							Desviación estándar	<b>0,041</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	3,75
								3,91

Punto de muestreo G								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	151,40	18897,30	16442,04	137,47	-689936,26	-1,427667027
2	121,03	81	295,00	17121,00	35703,85	130,85	1025583,45	2,122212947
3	130,21	77	386,80	59776,70	50365,23	244,49	5457822,56	11,29372916
4	155,12	92	578,00	139109,50	89659,36	372,97	14880136,39	30,79107617
5	180,21	132	511,33	20735,07	92147,38	144,00	1363187,06	2,820807239
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	284317,86		22036793,19	45,60015848
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>408,990</b>
							Desviación estándar	<b>6,753</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	395,75
								422,23

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia general								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	26,667	638,889	2896,000	25,276	-23325,693	-0,048267245
2	121,03	81	31,000	1805,000	3751,930	42,485	108123,248	0,223736602
3	130,21	77	71,667	333,333	9331,717	18,257	30434,504	0,06297732
4	155,12	92	52,000	70,000	8066,240	8,367	7487,695	0,015494092
5	180,21	132	38,393	981,824	6918,777	31,334	64548,128	0,133567749
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	30964,663		187267,882	0,387508519
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>44,543</b>
							Desviación estándar	<b>0,623</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	43,32
								45,76

Eficiencia Percolador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-20,000	3250,000	-2172,000	57,009	-118656,785	-0,245533374
2	121,03	81	-23,333	5222,222	-2824,033	72,265	312821,954	0,64731427
3	130,21	77	16,667	3888,889	2170,167	62,361	355069,208	0,734735404
4	155,12	92	-8,667	4542,222	-1344,373	67,396	485868,227	1,005394387
5	180,21	132	-5,972	329,005	-1076,254	18,138	21629,776	0,044757929
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	-5246,494		1056732,381	2,186668615
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>-7,547</b>
							Desviación estándar	<b>1,479</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	-10,45
								-4,65

Eficiencia filtro de arena								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	33,333	416,667	3620,000	20,412	-15212,408	-0,031478638
2	121,03	81	30,000	750,000	3630,900	27,386	44926,557	0,092965347
3	130,21	77	59,333	1435,556	7725,793	37,889	131071,262	0,271222326
4	155,12	92	32,000	870,000	4963,840	29,496	93061,356	0,192569424
5	180,21	132	46,706	579,375	8416,951	24,070	38089,863	0,078818356
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	28357,485		291936,630	0,604096815
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>40,792</b>
							Desviación estándar	<b>0,777</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	39,27
								42,32

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia estanque sedimentador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-20,000	7000,000	-2172,000	83,666	-255568,460	-0,528841114
2	121,03	81	-60,000	3000,000	-7261,800	54,772	179706,229	0,371861389
3	130,21	77	-260,000	133000,000	-33854,600	364,692	12143366,907	25,12795082
4	155,12	92	-123,333	5222,222	-19131,467	72,265	558605,839	1,155908419
5	180,21	132	-89,259	3744,033	-16085,411	61,189	246144,239	0,509339822
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	-78505,278		12872254,755	26,63621934
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>-112,930</b>
							Desviación estándar	<b>5,161</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	-123,05
								-102,81

### Alcalinidad (mg como CaCO<sub>3</sub>/L)

Punto de muestreo A								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	59,800	533,200	6494,280	23,091	-19467,015	-0,04028258
2	121,03	81	55,600	458,300	6729,268	21,408	27453,122	0,05680802
3	130,21	77	73,200	1454,700	9531,372	38,141	132819,217	0,27483932
4	155,12	92	55,400	515,800	8593,648	22,711	55173,618	0,11416932
5	180,21	132	77,333	484,267	13936,240	22,006	31837,180	0,06587984
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	45284,808		227816,121	0,47141393
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>65,142</b>
Desviación estándar								<b>0,687</b>
Intervalo de confianza al 95 %								63,80
								66,49

Punto de muestreo B								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	49,000	537,500	5321,400	23,184	-19624,007	-0,04060744
2	121,03	81	46,000	450,500	5567,380	21,225	26985,885	0,05584119
3	130,21	77	50,200	654,700	6536,542	25,587	59776,408	0,12369375
4	155,12	92	42,600	571,300	6608,112	23,902	61110,290	0,12645392
5	180,21	132	65,000	370,000	11713,650	19,235	24324,938	0,05033496
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	35747,084		152573,515	0,31571638
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>51,422</b>
Desviación estándar								<b>0,562</b>
Intervalo de confianza al 95 %								50,32
								52,52

Punto de muestreo C								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	48,800	467,200	5299,680	21,615	-17057,369	-0,03529637
2	121,03	81	41,200	436,700	4986,436	20,897	26159,237	0,05413062
3	130,21	77	47,000	786,500	6119,870	28,045	71810,211	0,14859499
4	155,12	92	36,600	421,300	5677,392	20,526	45065,229	0,0932523
5	180,21	132	55,333	362,267	9971,620	19,033	23816,525	0,04928291
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	32054,998		149793,832	0,30996445
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>46,111</b>
Desviación estándar								<b>0,557</b>
Intervalo de confianza al 95 %								45,02
								47,20

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Punto de muestreo D								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	47,800	609,200	5191,080	24,682	-22241,758	-0,046024287
2	121,03	81	45,800	485,200	5543,174	22,027	29064,487	0,060142382
3	130,21	77	54,600	875,800	7109,466	29,594	79963,615	0,165466612
4	155,12	92	45,000	448,500	6980,400	21,178	47974,733	0,099272858
5	180,21	132	72,333	319,467	13035,190	17,874	21002,721	0,04346038
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	37859,310		155763,799	0,322317945
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>54,461</b>
Desviación estándar								<b>0,568</b>
Intervalo de confianza al 95 %								53,35
								55,57

Punto de muestreo E								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	49,400	664,300	5364,840	25,774	-24253,447	-0,050187022
2	121,03	81	47,400	544,300	5736,822	23,330	32604,700	0,067468051
3	130,21	77	49,800	769,200	6484,458	27,734	70230,660	0,145326464
4	155,12	92	45,000	328,000	6980,400	18,111	35085,201	0,072600886
5	180,21	132	78,667	289,867	14176,520	17,025	19056,726	0,039433584
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	38743,040		132723,841	0,274641964
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>55,732</b>
Desviación estándar								<b>0,524</b>
Intervalo de confianza al 95 %								54,70
								56,76

Punto de muestreo G								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	108,200	989,700	11750,520	31,459	-36133,729	-0,074770579
2	121,03	81	130,400	1527,300	15782,312	39,081	91488,441	0,189314633
3	130,21	77	97,200	2959,200	12656,412	54,399	270185,349	0,559087459
4	155,12	92	115,400	1561,300	17900,848	39,513	167007,695	0,345584645
5	180,21	132	138,333	205,867	24929,050	14,348	13534,308	0,028006188
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	83019,142		506082,063	1,047222347
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>119,423</b>
Desviación estándar								<b>1,023</b>
Intervalo de confianza al 95 %								117,42
								121,43

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia Percolador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	18,470	398,685	2005,790	19,967	-14555,919	-0,030120182
2	121,03	81	17,692	338,647	2141,233	18,402	20285,665	0,041976595
3	130,21	77	28,431	170,585	3702,005	13,061	15574,984	0,032228907
4	155,12	92	26,756	142,518	4150,325	11,938	15244,701	0,03154546
5	180,21	132	15,696	82,329	2828,580	9,074	5412,589	0,011200128
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	14827,933		41962,020	0,086830907
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>21,330</b>
							Desviación estándar	<b>0,295</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	20,75
								21,91

Eficiencia filtro de arena								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-2,8059	999,6081	-304,7206	31,6166	603,0969	0,001247973
2	121,03	81	11,4840	25,8630	1389,9061	5,0856	1549,2502	0,003205823
3	130,21	77	11,8512	188,6987	1543,1422	13,7368	17228,8505	0,035651209
4	155,12	92	13,5116	79,0539	2095,9255	8,8912	8456,1599	0,01749811
5	180,21	132	15,8942	39,1057	2864,3008	6,2535	2570,9283	0,005319955
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	7588,5541		30408,2859	0,062923069
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>10,916</b>
							Desviación estándar	<b>0,251</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	10,42
								11,41

Eficiencia estanque sedimentador								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	1,4019	561,5796	152,2452	23,6977	-20503,1458	-0,042426622
2	121,03	81	-12,0693	203,3339	-1460,7521	14,2595	12180,1212	0,025204005
3	130,21	77	-26,5525	679,5911	-3457,3998	26,0690	62049,0523	0,128396477
4	155,12	92	-27,6421	219,0098	-4287,8473	14,7990	23426,8383	0,048476542
5	180,21	132	-35,4995	395,4705	-6397,3645	19,8864	25999,4440	0,053799968
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	-15451,1186		103152,3099	0,213450371
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>-22,226</b>
							Desviación estándar	<b>0,462</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	-23,13
								-21,32

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Eficiencia general								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	-2,759	605,299	-299,582	24,603	-22099,339	-0,045729583
2	121,03	81	12,346	137,719	1494,198	11,735	8249,659	0,017070803
3	130,21	77	9,502	120,755	1237,224	10,989	11025,382	0,022814533
4	155,12	92	22,449	206,214	3482,220	14,360	22058,101	0,045644249
5	180,21	132	31,239	135,923	5629,594	11,659	8936,026	0,018491085
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	11543,655		28169,828	0,058291087
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>16,606</b>
							Desviación estándar	<b>0,241</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	16,13
								17,08

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

**Oxígeno disuelto (mg de O<sub>2</sub>/L)**

Punto de muestreo A								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	6,629	0,039	719,961	0,197	-1,419	-0,00013374
2	121,03	81	6,603	0,019	799,101	0,139	1,156	0,00010894
3	130,21	77	6,231	0,088	811,345	0,297	8,039	0,00075772
4	155,12	92	6,536	0,021	1013,846	0,146	2,286	0,00021552
5	180,21	132	6,663	0,062	1200,799	0,248	4,053	0,00038202
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	4545,052		14,115	0,00133047
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>6,538</b>
							Desviación estándar	<b>0,036</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	6,47
								6,61

Punto de muestreo B								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	6,975	0,019	757,456	0,138	-0,698	-6,5783E-05
2	121,03	81	6,858	0,029	829,963	0,170	1,732	0,00016324
3	130,21	77	6,553	0,059	853,218	0,243	5,397	0,00050871
4	155,12	92	6,768	0,021	1049,889	0,144	2,211	0,00020836
5	180,21	132	6,847	0,034	1233,938	0,186	2,266	0,0002136
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	4724,464		10,907	0,00102813
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>6,796</b>
							Desviación estándar	<b>0,032</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	6,73
								6,86

Punto de muestreo C								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	5,665	0,145	615,190	0,380	-5,276	-0,00049733
2	121,03	81	5,203	0,129	629,759	0,359	7,731	0,00072872
3	130,21	77	5,191	0,335	675,858	0,579	30,581	0,00288256
4	155,12	92	5,493	0,206	852,065	0,454	22,015	0,00207511
5	180,21	132	5,244	0,278	944,936	0,527	18,273	0,00172243
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	3717,810		73,324	0,00691148
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>5,348</b>
							Desviación estándar	<b>0,083</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	5,19
								5,51

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Punto de muestreo D								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	4,892	0,122	531,283	0,349	-4,437	-0,00041827
2	121,03	81	4,993	0,115	604,242	0,340	6,913	0,0006516
3	130,21	77	4,703	0,330	612,398	0,575	30,167	0,0028435
4	155,12	92	4,853	0,132	752,788	0,364	14,142	0,00133303
5	180,21	132	4,890	0,489	881,227	0,700	32,171	0,00303241
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	3381,938		78,955	0,00744227
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>4,865</b>
Desviación estándar								<b>0,086</b>
Intervalo de confianza al 95 %								4,70
								5,03

Punto de muestreo E								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	5,589	0,067	606,960	0,258	-2,433	-0,00022931
2	121,03	81	5,445	0,132	659,008	0,364	7,934	0,00074783
3	130,21	77	4,614	0,412	600,816	0,642	37,593	0,0035435
4	155,12	92	5,428	0,190	841,937	0,436	20,312	0,00191464
5	180,21	132	5,079	0,442	915,267	0,665	29,031	0,0027364
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	3623,988		92,437	0,00871307
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>5,213</b>
Desviación estándar								<b>0,093</b>
Intervalo de confianza al 95 %								5,03
								5,40

Punto de muestreo G								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	2,655	2,690	288,304	1,640	-98,218	-0,00925802
2	121,03	81	1,653	1,791	200,103	1,338	107,277	0,01011192
3	130,21	77	0,948	0,278	123,425	0,527	25,376	0,00239192
4	155,12	92	0,668	0,086	103,565	0,294	9,225	0,00086957
5	180,21	132	1,407	1,670	253,596	1,292	109,809	0,01035058
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	968,994		153,469	0,01446597
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>1,394</b>
Desviación estándar								<b>0,120</b>
Intervalo de confianza al 95 %								1,16
								1,63

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

**pH**

Punto de muestreo A								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	6,813	0,192	739,844	0,438	-7,016	-0,00066128
2	121,03	81	6,975	0,223	844,184	0,472	13,349	0,00125826
3	130,21	77	6,956	0,180	905,713	0,424	16,411	0,00154686
4	155,12	92	6,935	0,287	1075,791	0,535	30,667	0,00289068
5	180,21	132	7,129	0,102	1284,697	0,319	6,700	0,00063157
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	4850,230		60,112	0,00566609
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>6,977</b>
Desviación estándar								<b>0,075</b>
Intervalo de confianza al 95 %								6,83
								7,12

Punto de muestreo B								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	6,825	0,159	741,156	0,398	-5,789	-0,00054564
2	121,03	81	7,163	0,263	866,978	0,513	15,745	0,0014841
3	130,21	77	7,149	0,142	930,864	0,377	12,992	0,00122466
4	155,12	92	7,043	0,295	1092,485	0,543	31,595	0,00297816
5	180,21	132	7,338	0,030	1322,341	0,174	1,995	0,00018806
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	4953,824		56,539	0,00532934
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>7,126</b>
Desviación estándar								<b>0,073</b>
Intervalo de confianza al 95 %								6,98
								7,27

Punto de muestreo C								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	6,758	0,179	733,876	0,423	-6,546	-0,00061705
2	121,03	81	6,935	0,205	839,343	0,453	12,306	0,00115991
3	130,21	77	7,067	0,115	920,242	0,339	10,485	0,00098827
4	155,12	92	6,894	0,303	1069,365	0,550	32,399	0,00305392
5	180,21	132	7,178	0,028	1293,607	0,168	1,867	0,00017594
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	4856,434		50,509	0,004761
$\bar{y}_{est}$ (promedio)								<b>6,986</b>
Desviación estándar								<b>0,069</b>
Intervalo de confianza al 95 %								6,85
								7,12

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Punto de muestreo D								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	6,709	0,144	728,600	0,380	-5,269	-0,00049663
2	121,03	81	6,933	0,228	839,141	0,478	13,675	0,00128904
3	130,21	77	6,987	0,139	909,825	0,373	12,684	0,00119558
4	155,12	92	6,874	0,276	1066,326	0,526	29,555	0,00278582
5	180,21	132	7,137	0,025	1286,199	0,158	1,647	0,0001552
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	4830,091		52,292	0,00492901
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>6,948</b>
							Desviación estándar	<b>0,070</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	6,81
								7,09

Punto de muestreo E								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	6,718	0,123	729,623	0,351	-4,497	-0,00042389
2	121,03	81	6,974	0,222	844,083	0,471	13,269	0,00125076
3	130,21	77	7,033	0,140	915,719	0,374	12,742	0,00120103
4	155,12	92	6,885	0,241	1067,959	0,491	25,772	0,00242927
5	180,21	132	7,176	0,025	1293,207	0,160	1,675	0,00015785
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	4850,591		48,961	0,00461502
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>6,978</b>
							Desviación estándar	<b>0,068</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	6,84
								7,11

Punto de muestreo G								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	6,926	0,067	752,188	0,259	-2,444	-0,0002304
2	121,03	81	6,807	0,047	823,811	0,216	2,797	0,00026367
3	130,21	77	6,684	0,094	870,283	0,306	8,572	0,00080795
4	155,12	92	7,022	0,081	1089,201	0,284	8,632	0,00081368
5	180,21	132	6,917	0,105	1246,453	0,324	6,908	0,00065119
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	4781,935		24,465	0,00230609
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>6,879</b>
							Desviación estándar	<b>0,048</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	6,78
								6,97

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

**Temperatura (°C)**

Punto de muestreo A								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	17,900	0,349	1943,940	0,591	-12,738	-0,00120067
2	121,03	81	17,717	0,169	2144,248	0,411	10,111	0,00095303
3	130,21	77	18,342	0,411	2388,326	0,641	37,568	0,00354114
4	155,12	92	16,871	0,518	2616,966	0,720	55,458	0,00522742
5	180,21	132	14,772	0,840	2662,102	0,916	55,209	0,00520399
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	11755,582		145,608	0,01372492
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>16,910</b>
							Desviación estándar	<b>0,117</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	16,68
								17,14

Punto de muestreo B								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	17,663	0,490	1918,219	0,700	-17,898	-0,00168709
2	121,03	81	17,683	0,118	2140,214	0,343	7,061	0,00066558
3	130,21	77	18,284	0,485	2380,787	0,696	44,258	0,00417176
4	155,12	92	16,788	0,697	2604,191	0,835	74,594	0,00703118
5	180,21	132	14,700	0,845	2649,087	0,919	55,534	0,00523457
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	11692,498		163,548	0,015416
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>16,820</b>
							Desviación estándar	<b>0,124</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	16,58
								17,06

Punto de muestreo C								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	17,658	0,489	1917,647	0,699	-17,862	-0,00168367
2	121,03	81	17,592	0,101	2129,119	0,318	6,040	0,00056934
3	130,21	77	18,195	0,486	2369,137	0,697	44,381	0,00418333
4	155,12	92	16,729	0,596	2595,066	0,772	63,748	0,00600883
5	180,21	132	14,678	0,923	2645,082	0,961	60,681	0,00571979
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	11656,052		156,988	0,01479763
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>16,767</b>
							Desviación estándar	<b>0,122</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	16,53
								17,01

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ACUÍCOLA CON RECIRCULACIÓN Y DEL CULTIVO DE TRUCHA ARCO IRIS ALIMENTADO POR COSECHA PLUVIAL**

Punto de muestreo D								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	17,558	0,547	1906,787	0,740	-19,971	-0,0018825
2	121,03	81	17,558	0,101	2125,085	0,318	6,040	0,00056934
3	130,21	77	18,189	0,635	2368,451	0,797	58,018	0,00546873
4	155,12	92	16,682	0,615	2587,767	0,784	65,816	0,00620381
5	180,21	132	14,767	0,864	2661,101	0,929	56,771	0,00535122
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	11649,191		166,674	0,01571059
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>16,757</b>
							Desviación estándar	<b>0,125</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	16,51
								17,00

Punto de muestreo E								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	17,563	0,491	1907,359	0,701	-17,939	-0,00169091
2	121,03	81	17,500	0,109	2118,025	0,330	6,535	0,00061596
3	130,21	77	18,153	0,567	2363,654	0,753	51,776	0,00488039
4	155,12	92	16,624	0,686	2578,642	0,828	73,343	0,0069133
5	180,21	132	14,628	0,935	2636,072	0,967	61,474	0,00579452
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	11603,752		175,189	0,01651326
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>16,692</b>
							Desviación estándar	<b>0,129</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	16,44
								16,94

Punto de muestreo G								
Estrato	$N_h$	$n_h$	$\bar{y}_h$	$s_h^2$	$\hat{t}_h$	$s_h$	$\hat{V}(\bar{t}_{est})$	$\hat{V}(\bar{y}_{est})$
1	108,60	108	17,189	0,198	1866,777	0,445	-7,217	-0,00068023
2	121,03	81	17,300	0,087	2093,819	0,295	5,228	0,00049277
3	130,21	77	17,753	0,455	2311,570	0,674	41,530	0,00391458
4	155,12	92	16,547	0,530	2566,780	0,728	56,708	0,0053453
5	180,21	132	14,506	0,808	2614,046	0,899	53,095	0,00500472
N	695,17			$\hat{t}_{est}$	11452,992		149,344	0,01407714
							$\bar{y}_{est}$ (promedio)	<b>16,475</b>
							Desviación estándar	<b>0,119</b>
							Intervalo de confianza al 95 %	16,24
								16,71

**ANEXO 8. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE PARÁMETROS LIMITANTES**

# Nitrogen, Ammonia

Method 10031

Salicylate Method

Test 'N Tube™ Vials

HR (0.4 to 50.0 mg/L NH<sub>3</sub>-N)

Scope and Application: For water, wastewater, and seawater



## Test Preparation

### Before starting the test:

Small sample sizes (such as 0.1 mL) may not be representative of the entire sample. Mix the sample well before testing or repeat the test, sampling from different portions of the sample.

Good safety habits and laboratory techniques should be used throughout the procedure. Consult the Material Safety Data Sheet (MSDS) for information specific to the reagent used.

### Collect the following items:

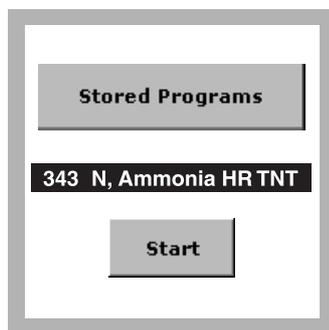
Quantity

High Range Test 'N Tube AmVer™ Nitrogen Ammonia Reagent	2
Funnel, micro (for adding reagent)	1
Pipet, TenSette®, 0.1–1.0 mL	1
Pipet Tips, for TenSette Pipet	varies

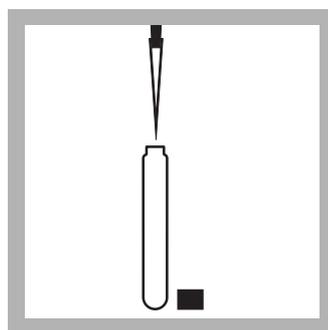
**Note:** Reorder information for consumables and replacement items is on page 5.

## Test 'N Tube

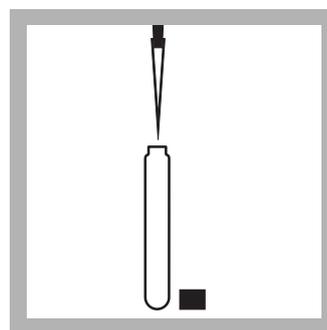
## Method 10031



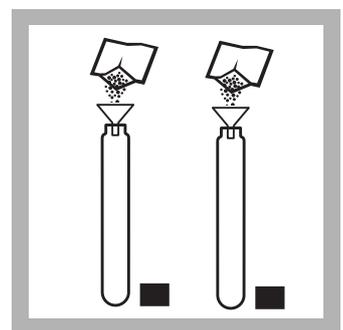
1. Select the test.



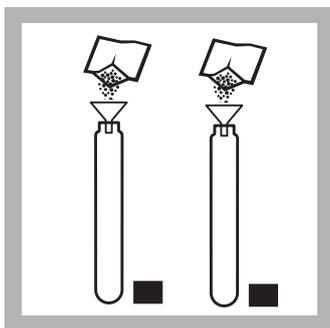
**2. Prepared Sample:**  
Add 0.1 mL of sample to one AmVer™ Diluent Reagent Test 'N Tube for High Range Ammonia Nitrogen.



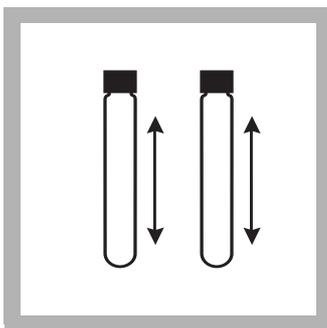
**3. Blank Preparation:**  
Add 0.1 mL of ammonia-free water to one AmVer™ Diluent Reagent Test 'N Tube for High Range Ammonia Nitrogen.



**4.** Add the contents of one Ammonia Salicylate Reagent Powder Pillow for 5 mL sample to each vial.



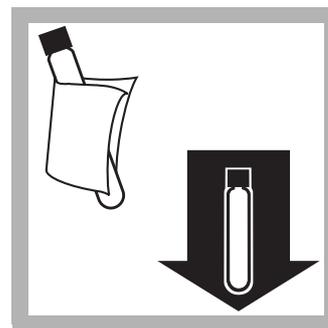
5. Add the contents of one Ammonia Cyanurate Reagent Powder Pillow to each vial.



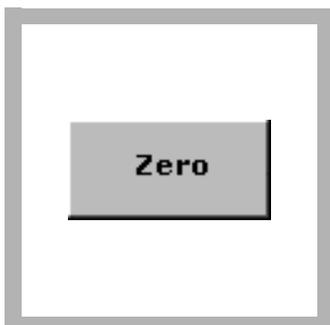
6. Cap the vials tightly and shake thoroughly to dissolve the powder.



7. Press **TIMER>OK**. A 20-minute reaction period will begin.



8. After the waiting period, wipe the blank and insert it into the 16-mm round cell holder.



9. Press **ZERO**.  
The display will show:  
0.0 mg/L NH<sub>3</sub>-N



10. Wipe the sample vial and insert it into the 16-mm round cell holder.  
Results are in mg/L NH<sub>3</sub>-N.

---

## Interferences

In some lab environments, airborne cross contamination of the blank is possible. Complete preparation of the blank before opening or handling any samples or standards to avoid transfer of ammonia. If sample or standard containers have already been opened, move to a separate area of the lab to prepare the blank.

Table 1 Interfering Substances and Levels

Interfering Substance	Interference Levels and Treatments
Acidic or Basic Samples	Adjust to approximately pH 7. Use 1 N Sodium Hydroxide Standard Solution <sup>1</sup> for acidic samples and 1 N Hydrochloric Acid Standard Solution for basic samples.
Calcium	50,000 mg/L as CaCO <sub>3</sub>
Glycine, hydrazine	Will cause intensified colors in the prepared sample.
Magnesium	300,000 mg/L as CaCO <sub>3</sub>
Monochloramine	Monochloramine present in chloraminated drinking water interferes directly at all levels giving high results. Use Method 10200, Free Ammonia and Monochloramine, to determine free ammonia in these sample matrices.
Iron	Eliminate iron interference as follows: <ol style="list-style-type: none"> <li>Determine the amount of iron present in the sample using one of the total iron procedures.</li> <li>Add the same iron concentration to the deionized water in step 3.</li> </ol> The interference will then be successfully blanked out.
Nitrite	600 mg/L as NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N
Nitrate	5000 mg/L as NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
Orthophosphate	5000 mg/L as PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P
Sulfate	6000 mg/L as SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Sulfide	Sulfide will intensify the color. Eliminate sulfide interference as follows: <ol style="list-style-type: none"> <li>Measure about 350 mL of sample in a 500-mL Erlenmeyer flask.</li> <li>Add the contents of one Sulfide Inhibitor Reagent Powder Pillow<sup>1</sup>. Swirl to mix.</li> <li>Filter the sample through folded filter paper<sup>1</sup>. Use the solution in step 2.</li> </ol>
Turbidity and color	Give erroneous high values. Samples with severe interferences require distillation. The manufacturer recommends the distillation procedure using the General Purpose Distillation Set.

<sup>1</sup> See [Optional Reagents and Apparatus on page 5](#).

## Sample Collection, Storage, and Preservation

Collect samples in clean plastic or glass bottles. Best results are obtained with immediate analysis. Preserve samples by reducing the pH to 2 or less with at least 2 mL of Hydrochloric Acid. Store at 4 °C (39 °F) or less. Preserved samples may be stored up to 28 days. Warm samples to room temperature. Neutralize to a pH of 7.0 with 5.0 N Sodium Hydroxide before analysis. Correct the test result for volume additions.

## Accuracy Check

### Standard Additions Method (Sample Spike)

- After reading test results, leave the sample cell (unspiked sample) in the instrument.
- Press **OPTIONS>MORE**. Press **STANDARD ADDITIONS**. A summary of the standard additions procedure will appear.
- Press **OK** to accept the default values for standard concentration, sample volume, and spike volumes. Press **EDIT** to change these values. After values are accepted, the unspiked sample reading will appear in the top row. See the user manual for more information.
- Snap the neck off a Nitrogen, Ammonia PourRite® Ampule Standard, 150-mg/L NH<sub>3</sub>-N.

5. Prepare three sample spikes. Fill three mixing cylinders with 25 mL of sample. Use the TenSette® Pipet to add 0.2, 0.4 mL, and 0.6 mL of standard, respectively, to each sample and mix each thoroughly.
6. Analyze each sample spike as described in the procedure above, starting with the 0.2 mL sample spike. Accept each standard additions reading by pressing **READ**. Each addition should reflect approximately 100% recovery.
7. After completing the sequence, press **GRAPH** to view the best-fit line through the standard additions data points, accounting for matrix interferences. Press **IDEAL LINE** to view relationships between the sample spikes and the "Ideal Line" of 100% recovery.

### Standard Solution Method

1. To check accuracy, prepare a 40.0-mg/L ammonia nitrogen standard solution by pipetting 20.00 mL of 100-mg/L Ammonia Nitrogen standard into a 50-mL, Class A volumetric flask. Dilute to the mark with deionized water.
2. To adjust the calibration curve using the reading obtained with the standard solution, press **OPTIONS>MORE** on the current program menu. Press **STANDARD ADJUST**.
3. Press **ON**. Press **ADJUST** to accept the displayed concentration. If an alternate concentration is used, press the number in the box to enter the actual concentration, then press **OK**. Press **ADJUST**.

## Method Performance

### Precision

Standard: 40.00 mg/L NH<sub>3</sub>-N

Program	95% Confidence Limits of Distribution
343	38.1–41.9 mg/L NH <sub>3</sub> -N

### Sensitivity

Portion of Curve	ΔAbs	ΔConcentration
Entire range	0.010	0.312 mg/L NH <sub>3</sub> -N

## Summary of Method

Ammonia compounds combine with chlorine to form monochloramine. Monochloramine reacts with salicylate to form 5-aminosalicylate. The 5-aminosalicylate is oxidized in the presence of a sodium nitroprusside catalyst to form a blue colored compound. The blue color is masked by the yellow color from the excess reagent present to give a green-colored solution. Test results are measured at 655 nm.

## Consumables and Replacement Items

### Required Reagents

Description	Unit	Cat. No.
Reagent Set, High Range Test 'N Tube™ AmVer™ Nitrogen Ammonia	50 tests	26069-45

### Required Apparatus

Description	Unit	Cat. No.
Funnel, micro (for adding reagent)	each	25843-35
Pipet, TenSette®, 0.1 to 1.0 mL	each	19700-01
Pipet Tips, for TenSette® Pipet 19700-01	50/pkg	21856-96

### Recommended Standards and Apparatus

Description	Unit	Cat. No.
Nitrogen Ammonia Standard Solution, 10-mg/L NH <sub>3</sub> -N	500 mL	153-49
Nitrogen Ammonia Standard Solution, 100-mg/L NH <sub>3</sub> -N	500 mL	24065-49
Nitrogen Ammonia Standard Solution, 150-mg/L NH <sub>3</sub> -N, 10-mL PourRite® Ampules	16/pkg	21284-10
Nitrogen Ammonia Standard Solution, 50-mg/L NH <sub>3</sub> -N, 10-mL Voluette® Ampules	16/pkg	14791-10
Pipet Tips, for TenSette Pipet 19700-01	1000/pkg	21856-28
Wastewater, Effluent Inorganics Standard, for NH <sub>3</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, PO <sub>4</sub> , COD, SO <sub>4</sub> , TOC	500 mL	28332-49
Water, deionized	4L	272-56

### Optional Reagents and Apparatus

Description	Cat. No.
Cylinders, mixing	20886-40
Distillation Set, general purpose	22653-00
Filter Paper	692-57
Hydrochloric Acid Standard Solution, 1 N	134-49
Sodium Hydroxide Standard Solution, 1 N	1045-32
Sulfide Inhibitor Reagent Powder Pillows	2418-99

Method 10019

Diazotization Method

Test 'N Tube™ Vials

LR (0.003 to 0.500 mg/L NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)

Scope and Application: For water, wastewater, and seawater



## Test Preparation

### Before starting the test:

For more accurate results, determine a reagent blank value for each new lot of reagent. Follow the procedure using deionized water in place of the sample. Subtract the reagent blank value from the final results or perform a reagent blank adjust.

### Collect the following items:

Quantity

Test 'N Tube™ NitriVer® 3 Nitrite Reagent Set

1

Pipet, TenSette®, 1.0 to 10.0 mL, plus tips

1

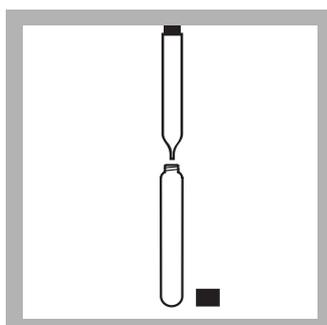
**Note:** Reorder information for consumables and replacement items is on page 3.

## Test 'N Tube

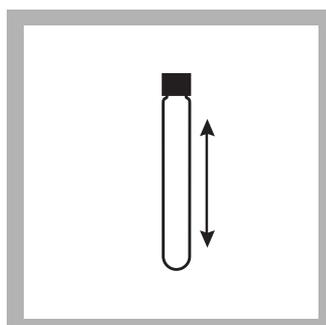
Method 10019



1. Select the test.

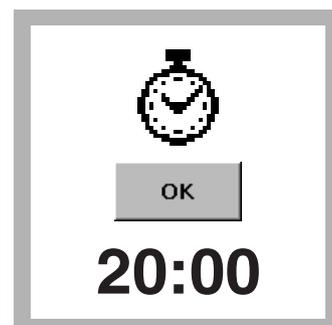


2. Fill a Test 'N Tube NitriVer® 3 Nitrite vial with 5 mL of sample.

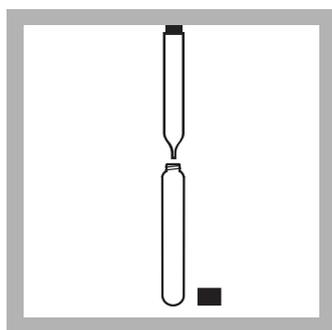


3. **Prepared Sample:** Cap and shake to dissolve the powder.

A pink color will develop if nitrite-nitrogen is present.



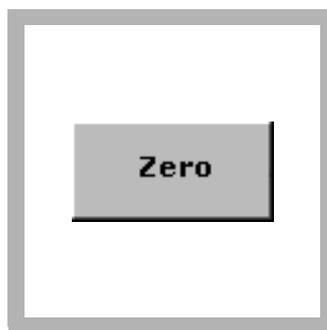
4. Press **TIMER>OK**. A 20-minute reaction period will begin.



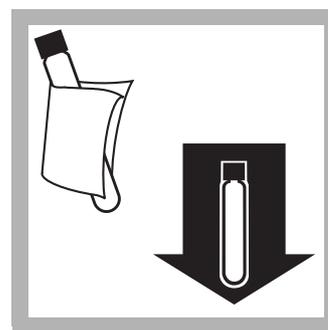
**5. Blank Preparation:**  
When the timer expires, fill an empty Test 'N Tube™ vial with 5 mL of sample.



**6.** Wipe the blank and insert it into the 16-mm round cell holder.



**7. Press ZERO.**  
The display will show:  
0.000 mg/L NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N



**8.** Insert the prepared sample cell into the 16-mm round cell holder.  
Results are in mg/L NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N.

## Interferences

**Table 1 Interfering Substances and Levels**

Interfering Substance	Interference Levels and Treatments
Antimonous ions	Interfere by causing precipitation
Auric ions	Interfere by causing precipitation
Bismuth ions	Interfere by causing precipitation
Chloroplatinate ions	Interfere by causing precipitation
Cupric ions	Cause low results
Ferric ions	Interfere by causing precipitation
Ferrous ions	Cause low results
Lead ions	Interfere by causing precipitation
Mercurous ions	Interfere by causing precipitation
Metavanadate ions	Interfere by causing precipitation
Nitrate	Very high levels of nitrate (>100 mg/L nitrate as N) appear to undergo a slight amount of reduction to nitrite, either spontaneously or during the course of the test. A small amount of nitrite will be found at these levels.
Silver ions	Interfere by causing precipitation
Strong oxidizing and reducing substances	Interfere at all levels

## Sample Collection, Storage, and Preservation

Collect samples in clean plastic or glass bottles. Store at 4 °C (30 °F) or lower if the sample is to be analyzed within 24 to 48 hours. Warm to room temperature before running the test.

## Accuracy Check

### Standard Solution Method

Preparing nitrite standards is difficult. Use the standard preparation instructions in *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Method 4500-NO<sub>2</sub> B. Prepare a 0.300-mg/L standard. Perform the nitrite test on the standard solution.

## Method Performance

### Precision

Standard: 0.300 mg/L NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N

Program	95% Confidence Limits of Distribution
345	0.294–0.306 mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N

### Sensitivity

Portion of Curve	ΔAbs	ΔConcentration
Entire range	0.010	0.003 mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N

## Summary of Method

Nitrite in the sample reacts with sulfanilic acid to form an intermediate diazonium salt. This couples with chromotropic acid to produce a pink colored complex directly proportional to the amount of nitrite present. Test results are measured at 507 nm.

## Consumables and Replacement Items

### Required Reagents

Description	Quantity/Test	Unit	Cat. No.
Test 'N Tube™ NitriVer® 3 Nitrite Reagent Set	1	50/pkg	26083-45

### Required Apparatus

Description	Quantity/Test	Unit	Cat. No.
Pipet, TenSette®, 1.0 to 10.0 mL	1	each	19700-10
Pipet Tips, for TenSette Pipet 19700-10	varies	50/pkg	21997-96

### Recommended Standards and Apparatus

Description	Unit	Cat. No.
Handbook, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater	each	22708-00
Pipet Tips, for TenSette Pipet 19700-10	250/pkg	21997-25
Sodium Nitrite, ACS	454 g	2452-01
Water, deionized	4 L	272-56

Method 10020

Chromotropic Acid Method

Test 'N Tube™ Vials

HR (0.2 to 30.0 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)

Scope and Application: For water and wastewater



## Test Preparation

### Before starting the test:

For more accurate results, determine a reagent blank value for each new lot of reagent. Follow the procedure using deionized water (nitrate-free) in place of the sample. Subtract the reagent blank value from the final results or perform a reagent blank adjust.

This test is technique-sensitive. Invert the vials as described here to avoid low results: Hold the vial in a vertical position with the cap pointing up. Turn the vial upside-down. Wait for all of the solution to flow down to the cap. Pause. Return the vial to an upright position. Wait for all the solution to flow to the bottom of the vial. This process equals one inversion.

### Collect the following items:

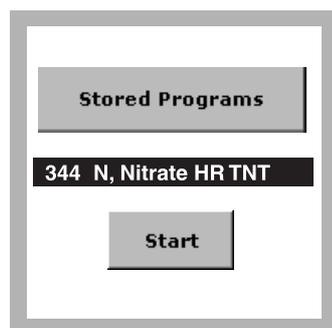
Quantity

Test 'N Tube™ NitraVer® X Reagent Set	1
Funnel, micro, poly	1
Pipet, TenSette®, 0.01 to 1.0 mL, plus tips	1
Test Tube Rack	1-3

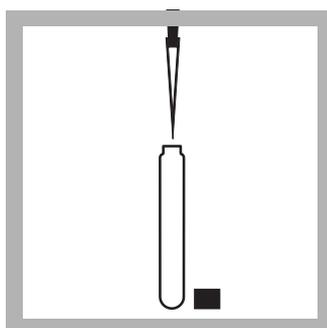
**Note:** Reorder information for consumables and replacement items is on page 4.

## Test 'N Tube

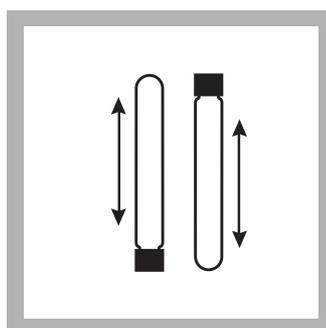
## Method 10020



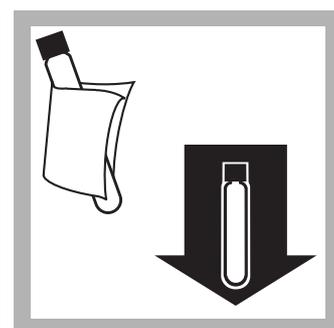
1. Select the test.



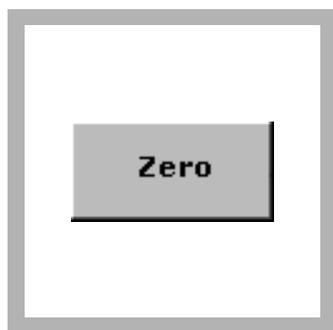
**2. Blank Preparation:**  
Remove the cap from a NitraVer X Reagent A Test 'N Tube vial and add 1.00 mL of sample.



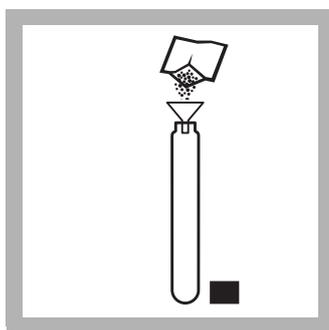
3. Cap the tube and invert ten times to mix.



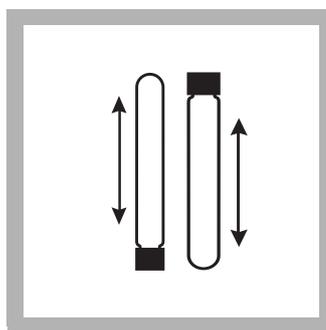
4. Wipe the blank and insert it into the 16 mm round cell holder.



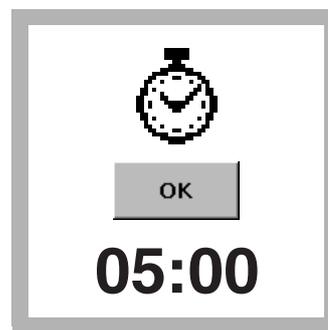
**5. Press ZERO.**  
The display will show:  
0.0 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N



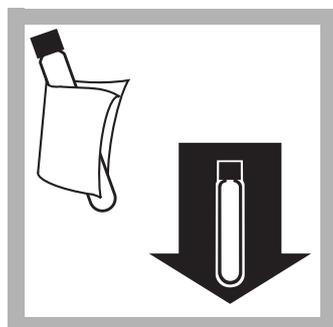
**6. Prepared Sample:**  
Remove the vial from the instrument. Using a funnel, add the contents of one NitraVer X Reagent B Powder Pillow to the vial.



**7. Cap and invert ten times to mix.**  
Some solid matter will not dissolve.



**8. Press TIMER>OK.**  
A five-minute reaction period will begin. Do not invert the vial again.  
A yellow color will develop if nitrate is present.



**9. Within five minutes** after the timer expires, wipe the prepared sample and insert it into the cell holder.

Results are in mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N.

## Interferences

**Table 1 Interfering Substances and Levels**

Interfering Substance	Interference Levels and Treatments
Barium	A negative interference at concentrations greater than 1 mg/L.
Chloride	Does not interfere below 1000 mg/L.
Nitrite	A positive interference at concentrations greater than 12 mg/L. Remove nitrite interference up to 100 mg/L by adding 400 mg (one full 0.5 g measuring spoon) of Urea <sup>1</sup> to 10 mL of sample. Swirl to dissolve. Proceed with the nitrate test as usual.
Copper	Positive at all levels.

<sup>1</sup> See [Optional Reagents and Apparatus on page 4](#).

## Sample Collection, Preservation, and Storage

Collect samples in clean plastic or glass bottles. Store at 4 °C (39 °F) or lower if the sample is to be analyzed within 24 to 48 hours. Warm to room temperature before running the test. For longer storage periods (up to 14 days), adjust sample pH to 2 or less with Concentrated Sulfuric Acid, ACS\* (about 2 mL per liter). Sample refrigeration is still required.

Before testing the stored sample, warm to room temperature and neutralize with 5.0 N Sodium Hydroxide Standard Solution\*. Do not use mercury compounds as preservatives. Correct the test result for volume additions.

## Accuracy Check

### Standard Additions Method (Sample Spike)

1. After reading test results, leave the sample cell (unspiked sample) in the instrument. Verify the chemical form.
2. Press **OPTIONS>MORE**. Press **STANDARD ADDITIONS**. A summary of the standard additions procedure will appear.
3. Press **OK** to accept the default values for standard concentration, sample volume, and spike volumes. Press **EDIT** to change these values. After values are accepted, the unspiked sample reading will appear in the top row. See the user manual for more information.
4. Snap the neck off a High Range Nitrate Nitrogen Voluette® Ampule Standard, 500 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N.
5. Prepare three sample spikes. Fill three mixing cylinders\* with 25 mL of sample. Use the TenSette® Pipet to add 0.1 mL, 0.2 mL, and 0.3 mL of standard, respectively, to each sample and mix thoroughly.
6. Analyze each sample spike as described in the procedure above, starting with the 0.1 mL sample spike. Accept each standard additions reading by pressing **READ**. Each addition should reflect approximately 100% recovery.
7. After completing the sequence, press **GRAPH** to view the best-fit line through the standard additions data points, accounting for the matrix interferences. Press **IDEAL LINE** to view the relationship between the sample spikes and the "Ideal Line" of 100% recovery.

### Standard Solution Method

1. To test accuracy, use a 10.0-mg/L Nitrate Nitrogen Standard Solution in place of the sample and perform the procedure as described above.
2. To adjust the calibration curve using the reading obtained with the 10.0-mg/L Nitrate Nitrogen Standard Solution, press **OPTIONS>MORE** on the current program menu. Press **STANDARD ADJUST**.
3. Press **ON**. Press **ADJUST** to accept the displayed concentration (the value depends on the selected chemical form). If an alternate concentration is used, press the number in the box to enter the actual concentration, then press **OK**. Press **ADJUST**.

\* See [Optional Reagents and Apparatus on page 4](#).

# Nitrate HR (0.2 to 30.0 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)

## Method Performance

### Precision

Standard: 10.0 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N

Program	95% Confidence Limits of Distribution
344	9.5–10.5 mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N

### Sensitivity

Portion of Curve	ΔAbs	ΔConcentration
Entire range	0.010	0.2 mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N

## Summary of Method

Nitrate in the sample reacts with chromotropic acid under strongly acidic conditions to yield a yellow product with a maximum absorbance at 410 nm.

## Consumables and Replacement Items

### Required Reagents

Description	Quantity/Test	Unit	Cat. No.
Test 'N Tube™ NitraVer® X Nitrate Reagent Set	1	50/pkg	26053-45

### Required Apparatus

Description	Quantity/Test	Unit	Cat. No.
Funnel, micro, poly	1	each	25843-35
Pipet, TenSette®, 0.1 to 1.0 mL	1	each	19700-01
Pipet Tips, for TenSette Pipet 19700-01	varies	50/pkg	21856-96
Test Tube Rack	1–3	each	18641-00

### Recommended Standards and Apparatus

Description	Unit	Cat. No.
Nitrate Nitrogen Standard Solution, 10-mg/L: N	500 mL	307-49
Nitrate Nitrogen Standard Solution, Voluette® Ampule, 500-mg/L N	16/pkg	14260-10
Pipet Tips, for TenSette Pipet 19700-01	1000/pkg	21856-28
Wastewater Influent Inorganics Standard for NH <sub>3</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, PO <sub>4</sub> , COD, SO <sub>4</sub> , TOC	500 mL	28331-49
Water, deionized	4 L	272-56

### Optional Reagents and Apparatus

Description	Cat. No.
Cylinder, mixing, 25 mL	20886-40
Sodium Hydroxide, 5.0 N	2450-26
Sulfuric Acid ACS, Concentrated	979-49
Urea	11237-26



FOR TECHNICAL ASSISTANCE, PRICE INFORMATION AND ORDERING:  
In the U.S.A. – Call toll-free 800-227-4224  
Outside the U.S.A. – Contact the HACH office or distributor serving you.  
On the Worldwide Web – [www.hach.com](http://www.hach.com); E-mail – [techhelp@hach.com](mailto:techhelp@hach.com)

HACH COMPANY  
WORLD HEADQUARTERS  
Telephone: (970) 669-3050  
FAX: (970) 669-2932

# Oxygen Demand, Chemical

★Method 8000

Reactor Digestion Method<sup>1</sup>

(3 to 150, 20 to 1500, and 200 to 15,000 mg/L COD)

**Scope and Application:** For water, wastewater, and seawater; digestion is required; 3–150 mg/L and 20– 1500 mg/L COD ranges are USEPA approved for wastewater analyses<sup>2</sup>; 200–15,000 mg/L COD range are not USEPA approved.

<sup>1</sup> Jirka, A.M.; Carter, M.J., *Analytical Chemistry*, 1975, 47(8), 1397

<sup>2</sup> *Federal Register*, April 21, 1980, 45(78), 26811-26812



## Test Preparation

### Before starting the test:

Some of the chemicals and apparatus used in this procedure may be hazardous to the health and safety of the user if inappropriately handled or accidentally misused. Please read all warnings and associated MSDS sheets.

Run one blank with each set of samples. Run all tests (the samples and the blank) with the same lot of vials. The lot number appears on the container label. See [Blanks for Colorimetric Determination on page 4](#).

Spilled reagent will affect test accuracy and is hazardous to skin and other materials. Be prepared to wash spills with running water

Wear appropriate eye protection and clothing for adequate user protection. If contact occurs, flush the affected area with running water. Review and follow instructions carefully.

### Collect the following items:

### Quantity

Beaker, 250-mL	1
Blender	1
COD Digestion Reagent vials	varies
DRB200 Reactor	1
Magnetic stirrer and stir bar	1
Opaque shipping container for storage of unused, light-sensitive reagent vials	varies
Pipet, TenSette®, 0.1 to 1.0 mL, with tips (for 200–15,000 mg/L range)	1
Pipet, volumetric, 2.00 mL	2
Pipet Filler, safety bulb	1
Test Tube Rack	2

**Note:** Reorder information for consumables and replacement items is on page 7.

**Note:** For greater accuracy, analyze a minimum of three replicates and average the results.

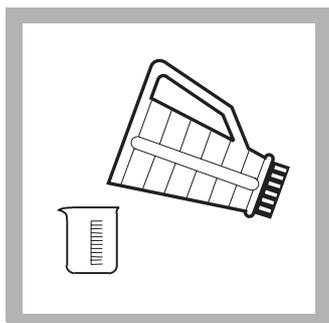
## Digestion Procedure

## Method 8000

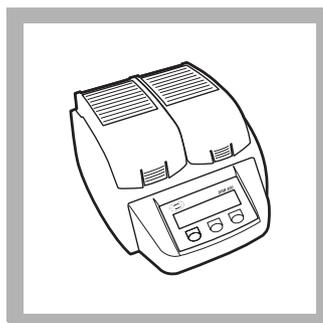


1. Homogenize 100 mL of sample for 30 seconds in a blender. For samples containing large amounts of solids, increase the homogenization time.

If the sample does not contain suspended solids, omit steps 1 and 2.

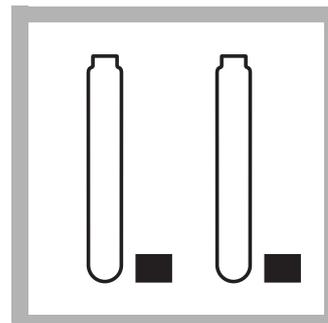


2. For the 200–15,000 mg/L range or to improve accuracy and reproducibility of the other ranges, pour the homogenized sample into a 250-mL beaker and gently stir with a magnetic stir plate.

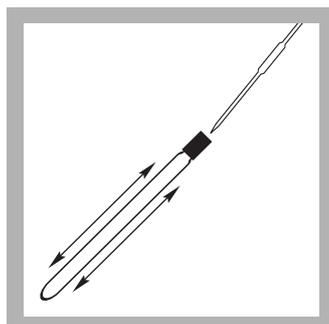


3. Turn on the DRB200 Reactor. Preheat to 150 °C.

See the DRB200 User Manual for selecting pre-programmed temperature applications.

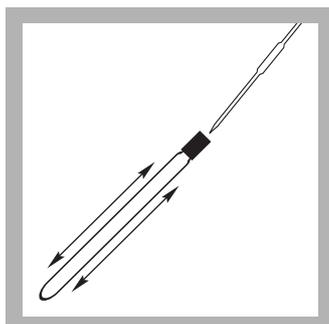


4. Remove the caps from two COD Digestion Reagent Vials. (Be sure to use vials for the appropriate range.)



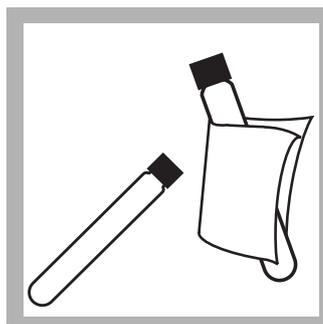
5. **Prepared Sample:** Hold one vial at a 45-degree angle. Use a clean volumetric pipet to add 2.00 mL of sample to the vial.

Use a TenSette® Pipet to add 0.20 mL for the 200–15,000 mg/L range.

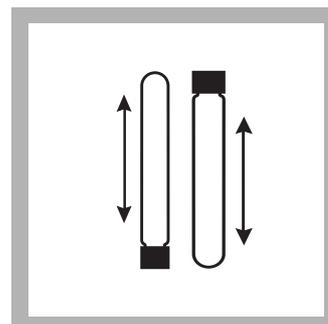


6. **Blank Preparation:** Hold a second vial at a 45-degree angle. Use a clean volumetric pipet to add 2.00 mL of deionized water to the vial.

Use a TenSette Pipet to add 0.20 mL for the 200–15,000 mg/L range.

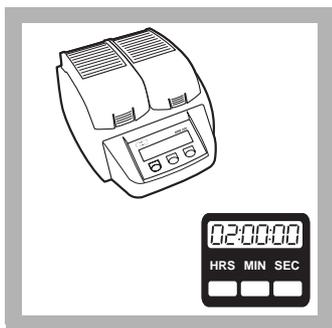


7. Cap the vials tightly. Rinse them with water and wipe with a clean paper towel.

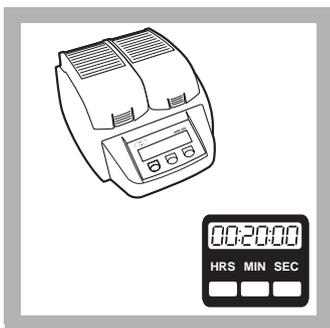


8. Hold the vials by the cap over a sink. Invert gently several times to mix. Insert the vials in the preheated DRB200 Reactor. Close the protective lid.

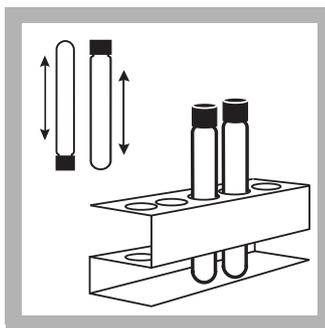
The sample vials will become very hot during mixing.



9. Heat the vials for two hours.



10. Turn the reactor off.  
Wait about 20 minutes for the vials to cool to 120 °C or less.

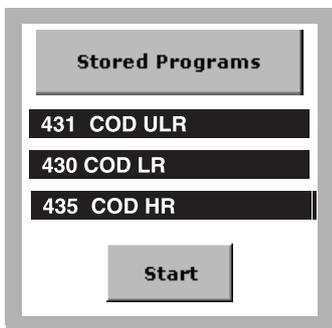


11. Invert each vial several times while still warm. Place the vials into a rack and cool to room temperature.

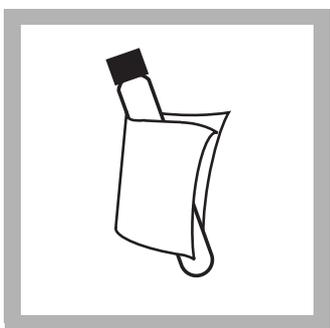
Proceed to [Colorimetric Determination Method 8000](#).

## Colorimetric Determination

## Method 8000



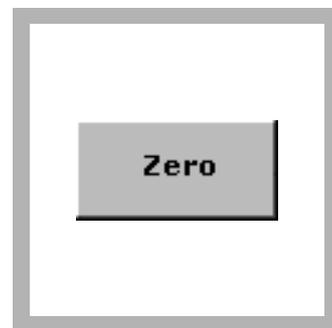
1. Select the ultra-low range, low range, or high range test.



2. Clean the outside of the vials with a damp towel followed by a dry one.

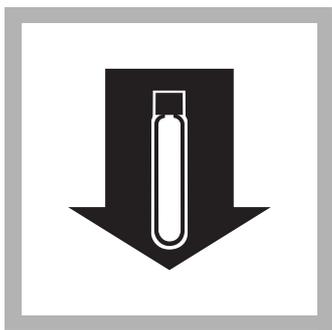


3. Insert the blank into the 16-mm cell holder.



4. Press **ZERO**.

The display will show:  
0.0 mg/L COD



5. Insert the sample vial into the 16-mm cell holder. Results are in mg/L COD.

6. If using High Range Plus COD Digestion Reagent Vials, multiply the result by 10.

For most accurate results with samples near 1500 or 15,000 mg/L COD, repeat the analysis with a diluted sample.

## Blanks for Colorimetric Determination

The blank may be used repeatedly for measurements using the same lot of vials. Store it in the dark. Monitor decomposition by measuring the absorbance at the appropriate wavelength (356, 420, or 620 nm). Zero the instrument in the absorbance mode, using a vial containing 5 mL of deionized water and measure the absorbance of the blank. Record the value. Prepare a new blank when the absorbance has changed by about 0.01 absorbance units.

## Interferences

Chloride is the primary interference when determining COD concentration. Each COD vial contains mercuric sulfate that will eliminate chloride interference up to the level specified in column 1 in [Table 1](#). Samples with higher chloride concentrations should be diluted. Dilute the sample enough to reduce the chloride concentration to the level given in column 3.

If sample dilution will cause the COD concentration to be too low for accurate determination, add 0.50 g of mercuric sulfate ( $\text{HgSO}_4$ ) (Cat. No. 1915-20) to each COD vial before the sample is added. The additional mercuric sulfate will raise the maximum chloride concentration allowable to the level given in column 4 of [Table 1](#).

**Table 1 Interferences and Levels**

Vial Type Used	Maximum $\text{Cl}^-$ concentration in sample (mg/L)	Suggested $\text{Cl}^-$ concentration of diluted samples (mg/L)	Maximum $\text{Cl}^-$ concentration in sample when 0.50 $\text{HgSO}_4$ added
Ultra Low Range (0.7–40.0 mg/L)	2000	1000	N/A
Low Range (3–150 mg/L)	2000	1000	8000
High Range (20–1500 mg/L)	2000	1000	4000
High Range Plus (200–15,000 mg/L)	20,000	10,000	40,000

## Sampling and Storage

Collect samples in glass bottles. Use plastic bottles only if they are known to be free of organic contamination. Test biologically active samples as soon as possible. Homogenize samples containing solids to assure representative samples. Samples treated with sulfuric acid\* to a pH of less than 2 (about 2 mL per liter) and refrigerated at 4 °C can be stored up to 28 days. Correct results for volume additions.

## Accuracy Check

### Standard Solution Method

1. Check the accuracy of the 0.7 to 40.0 mg/L range with a 30 mg/L COD standard solution. Using class A glassware, prepare a 1000 mg/L solution by diluting 850 mg dried (120 °C, overnight) potassium acid phthalate (KHP) in 1000 mL of organic-free deionized water. Prepare a 30 mg/L dilution by diluting 3.00 mL of this solution into a 100.0 mL volumetric flask. Dilute to volume with deionized water, stopper, and invert 10 times to mix. Use 2 mL as the sample volume. The result should be 30 mg/L COD.
  - To adjust the calibration curve using the reading obtained with the 30 mg/L COD standard solution, press **OPTIONS>MORE** on the current program menu. Press **STANDARD ADJUST**.
  - Press **ON**. Press **ADJUST** to accept the displayed concentration. If an alternate concentration is used, press the number in the box to enter the actual concentration, then press **OK**. Press **ADJUST**.
2. Check the accuracy of the 3 to 150 mg/L range with a 100 mg/L standard. Prepare by dissolving 85 mg of dried (120 °C, overnight) potassium acid phthalate (KHP) in 1 liter of deionized water. Use 2 mL as the sample volume. The result should be 100 mg/L COD. Or dilute 10 mL of 1000-mg/L COD Standard Solution to 100 mL to produce a 100-mg/L standard.
  - To adjust the calibration curve using the reading obtained with the 100 mg/L COD standard solution, press **OPTIONS>MORE** on the current program menu. Press **STANDARD ADJUST**.
  - Press **ON**. Press **ADJUST** to accept the displayed concentration. If an alternate concentration is used, press the number in the box to enter the actual concentration, then press **OK**. Press **ADJUST**.
3. Check the accuracy of the 20 to 1,500 mg/L range by using either a 300 mg/L or 1000 mg/L COD Standard Solution. Use 2 mL of one of these solutions as the sample volume; the expected result will be 300 or 1000 mg/L COD respectively. Or, prepare a 500 mg/L standard by dissolving 425 mg of dried (120 °C, overnight) KHP. Dilute to 1 liter with deionized water.
  - To adjust the calibration curve using the reading obtained with the 300 mg/L or 1000 mg/L COD standard solution, press **OPTIONS>MORE** on the current program menu. Press **STANDARD ADJUST**.
  - Press **ON**. Press **ADJUST** to accept the displayed concentration. If an alternate concentration is used, press the number in the box to enter the actual concentration, then press **OK**. Press **ADJUST**.

---

\* See [Optional Reagents on page 8](#).

4. Check the accuracy of the 200 to 15,000 mg/L range by using a 10,000 mg/L COD standard solution. Prepare the 10,000 mg/L solution by dissolving 8.500 g of dried (120 °C, overnight) KHP in 1 liter of deionized water. Use 0.2 mL of this solution as the sample volume; the expected result will be 10,000 mg/L COD.
  - To adjust the calibration curve using the reading obtained with the 10,000 mg/L COD standard solution, press **OPTIONS>MORE** on the current program menu. Press **STANDARD ADJUST**.
  - Press **ON**. Press **ADJUST** to accept the displayed concentration. If an alternate concentration is used, press the number in the box to enter the actual concentration, then press **OK**. Press **ADJUST**.

### Method Performance

#### Precision

Standard: 30 mg/L COD (Ultra Low Range), 80 mg/L COD (Low Range), 800 mg/L COD (High Range), and 10,000mg/L COD (High Range Plus)

Program	Range (mg/L)	95% Confidence Limits of Distribution
430	3–150	77–83 mg/L COD
431	0.5–40.0	28.8–31.2 mg/L COD
435	20–1500	785–815 mg/L COD
435	200–15,000	7850–8150 mg/L COD

#### Sensitivity

Program	Portion of Curve	$\Delta$ Abs	$\Delta$ Concentration
430	Entire range	0.010	3 mg/L COD
431	Entire range	0.010	0.5 mg/L COD
435	Entire range	0.010	23 mg/L COD

### Alternate Reagents

Mercury-free COD2 Reagents can provide a mercury-free testing option for non-reporting purposes. For process control applications, COD2 Reagents will eliminate mercury waste and save on disposal costs. These reagents are fully compatible with test procedures and calibration curves programmed into the spectrophotometer. Determine chloride and ammonia for accurate results.

**Note:** These reagents are not approved for USEPA reporting purposes. Request a copy of the COD Reagent Vial Information Brochure, Lit. No. 1356, for more information about specific applications.

## Summary of Method

The mg/L COD results are defined as the mg of O<sub>2</sub> consumed per liter of sample under conditions of this procedure. In this procedure, the sample is heated for two hours with a strong oxidizing agent, potassium dichromate. Oxidizable organic compounds react, reducing the dichromate ion (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>) to green chromic ion (Cr<sup>3+</sup>). When the 0.7–40.0 or the 3–150 mg/L colorimetric method is used, the amount of Cr<sup>6+</sup> remaining is determined. When the 20–1500 mg/L or 200–15,000 mg/L colorimetric method is used, the amount of Cr<sup>3+</sup> produced is determined. The COD reagent also contains silver and mercury ions. Silver is a catalyst, and mercury is used to complex chloride interferences. Test results for the 0.7 to 40.0 mg/L range are measured at 350 nm. Test results for the 3 to 150 mg/L range are measured at 420 nm. Test results for the 20 to 1500 and the 2000 to 15,000 mg/L COD range are measured at 620 nm.

## Consumables and Replacement Items

### Required Reagents

Description	Quantity/Test	Unit	Cat. No.
Select the appropriate COD Digestion Reagent Vial:			
Ultra Low Range, 0.7 to 40 mg/L COD	1–2 vials	25/pkg	24158-25
Low Range, 3 to 150 mg/L COD	1–2 vials	25/pkg	21258-25
High Range, 20 to 1500 mg/L COD	1–2 vials	25/pkg	21259-25
High Range Plus, 200 to 15,000 mg/L COD	1–2 vials	25/pkg	24159-25
Water, deionized	varies	4 L	272-56

### Alternate Reagents<sup>1</sup>

Description	Quantity/Test	Unit	Cat. No.
Select the appropriate COD Digestion Reagent Vial:			
COD2, Low Range, 0 to 150 mg/L COD	1–2 vials	25/pkg	25650-25
COD2, High Range, 0 to 1500 mg/L COD	1–2 vials	25/pkg	25651-25
COD2, High Range, 0 to 1500 mg/L COD	1–2 vials	150/pkg	25651-15
COD2, High Range Plus, 0 to 15,000 mg/L COD	1–2 vials	25/pkg	28343-25

<sup>1</sup> These reagents are not approved for USEPA reporting purposes. Request a copy of the COD Reagent Vial Information Brochure, Lit. No. 1356, for more information about specific applications

### Required Apparatus

Description	Quantity/Test	Unit	Cat. No.
Blender, 2-speed, 120 VAC	1	each	26161-00
Blender, 2-speed, 240 VAC	1	each	26161-02
DRB200 Reactor, 110 V, 15 x 16 mm	1	each	LTV082.53.40001
DRB200 Reactor, 220 V, 15 x 16 mm	1	each	LTV082.52.40001

## Oxygen Demand, Chemical (3 to 150, 20 to 1500, and 200 to 15,000 mg/L COD)

### Recommended Standards

Description	Unit	Cat. No.
COD Standard Solution, 300-mg/L	200 mL	12186-29
COD Standard Solution, 1000-mg/L	200 mL	22539-29
Oxygen Demand Standard (BOD, COD, TOC)	16 10-mL ampules	28335-10
Pipet Filler, safety bulb	1	each
Pipet, TenSette®, 0.1 to 1.0 mL	1	each
Pipet Tips, for TenSette Pipet 19700-01	1	50/pkg
Pipet, Volumetric, Class A, 2.00 mL	1	each
Potassium Acid Phthalate, ACS	500 g	315-34
Stirrer, Electromagnetic, 120 VAC, with electrode stand	1	each
Stirrer, Electromagnetic, 230 VAC, with electrode stand	1	each
Test Tube Rack	1-2	each

### Optional Reagents

Description	Unit	Cat. No.
COD Digestion Reagent Vials, 3 to 150 mg/L COD	150/pkg	21258-15
COD Digestion Reagent Vials, 200 to 1500 mg/L COD	150/pkg	21259-15
Mercuric Sulfate, 28 g	—	1915-20
Sulfuric Acid, 500 mL	—	979-49



FOR TECHNICAL ASSISTANCE, PRICE INFORMATION AND ORDERING:  
In the U.S.A. – Call toll-free 800-227-4224  
Outside the U.S.A. – Contact the HACH office or distributor serving you.  
On the Worldwide Web – [www.hach.com](http://www.hach.com); E-mail – [techhelp@hach.com](mailto:techhelp@hach.com)

HACH COMPANY  
WORLD HEADQUARTERS  
Telephone: (970) 669-3050  
FAX: (970) 669-2932

# Suspended Solids

Method 8006

Photometric Method<sup>1</sup>  
(5 to 750 mg/L)

Scope and Application: For water and wastewater

<sup>1</sup> Adapted from *Sewage and Industrial Wastes*, 31, 1159 (1959).



## Test Preparation

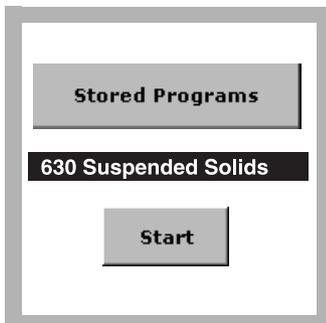
Collect the following items:

Quantity

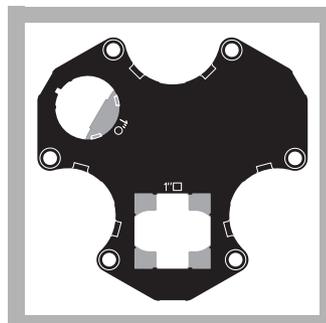
Beaker, 600-mL, polypropylene	1
Blender	1
Cylinder, 500-mL polypropylene, graduated	1
Pipet, serological, 25-mL	1
Pipet Filler, safety bulb	1
Sample Cells, 1-inch square, 10 mL	2

**Note:** Reorder information for consumables and replacement items is on page 3.

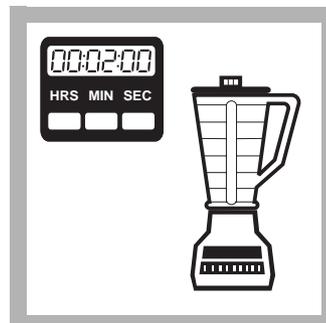
## Method 8006



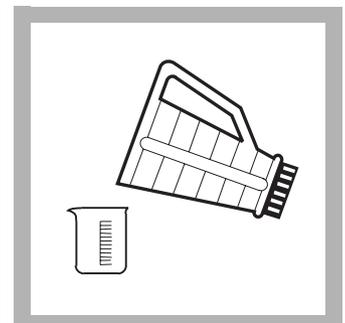
1. Select the test.



2. Insert the Multi-cell Adapter with the 1-inch square cell holder facing the user.



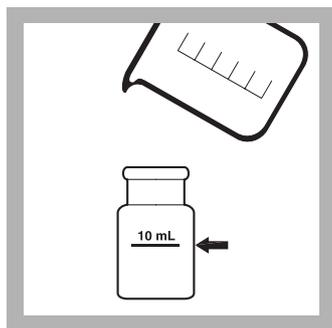
3. Blend 500 mL of sample in a blender at high speed for exactly two minutes.



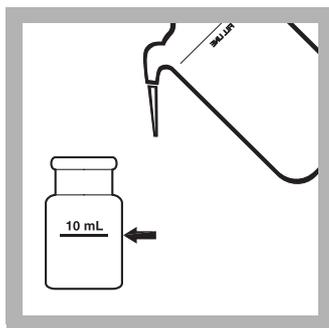
4. Pour the blended sample into a 600-mL beaker.

## Suspended Solids (5 to 750 mg/L)

---



**5. Prepared Sample:**  
Stir the sample and immediately pour 10 mL of the blended sample into a sample cell.

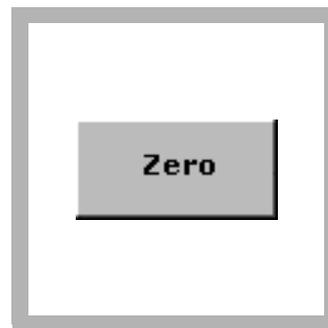


**6. Blank Preparation:**  
Fill a second sample cell with 10 mL of tap water or deionized water.

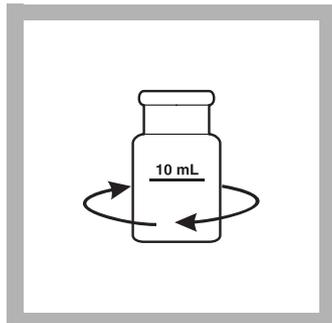
Remove gas bubbles in the water by swirling or tapping the bottom of the cell on a table.



**7.** Insert the blank into the cell holder with the fill line facing the user.



**8. Press ZERO.**  
The display will show:  
0 mg/L TSS



**9.** Swirl the prepared sample to remove any gas bubbles and uniformly suspend any residue.



**10.** Insert the prepared sample into the cell holder with the fill line facing the user.

Results are in mg/L TSS.

---

## Interferences

Samples that absorb strongly at 810 nm, such as blue dyes, may give false, high-bias readings. A user-entered calibration is advised for these samples.

Calibration for this test is based on parallel samples using the gravimetric technique on sewage samples from a municipal sewage plant. For most samples, this calibration will provide satisfactory results. When higher accuracy is required, run parallel spectrophotometric and gravimetric determinations with portions of the same sample. The new calibration should be made on your particular sample using a gravimetric technique as a basis.

## Sampling and Storage

Collect samples in clean plastic or glass bottles. Analyze samples as soon as possible after collection. The sample may be stored seven days by cooling to 4 °C (39 °F).

## Summary of Method

This method of determining suspended solids is a simple, direct measurement which does not require the filtration or ignition/weighing steps that gravimetric procedures do. The USEPA specifies the gravimetric method for solids determinations, while this method is often used for checking in-plant processes. Test results as mg/L total suspended solids (TSS) are measured at 810 nm.

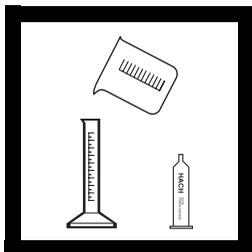
## Consumables and Replacement Items

### Required Apparatus

Description	Quantity/Test	Unit	Cat. No.
Beaker, 600-mL, polypropylene	1	each	1080-52
Blender, 1.2-L, 120 VAC	1	each	26161-00
Blender, 1.2 L, 240 VAC	1	each	26161-02
Cylinder, 500-mL graduated, polypropylene	1	each	1081-49
Pipet, serological, 25-mL	1	each	2066-40
Pipet Filler, safety bulb	1	each	14651-00
Sample Cells, 1-inch square, 10 mL, matched pair	2	2/pkg	24954-02

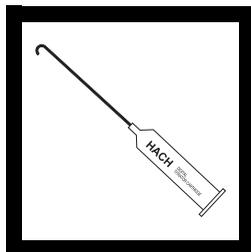
# ALKALINITY (10 to 4000 mg/L as CaCO<sub>3</sub>)

## Phenolphthalein and Total Method



**1.** Select the sample volume and Sulfuric Acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) Titration Cartridge corresponding to the expected alkalinity concentration as mg/L calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) from *Table 1*.

**Note:** See *Sampling and Storage* following these steps.

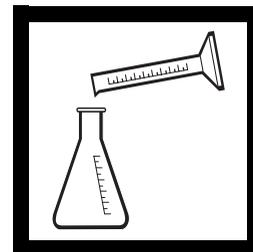


**2.** Insert a clean delivery tube into the titration cartridge. Attach the cartridge to the titrator body. See *General Description, Step-by-Step* for assembly instructions, if necessary.



**3.** Turn the delivery knob to eject a few drops of titrant. Reset the counter to zero and wipe the tip.

**Note:** For added convenience use the *TitraStir® Stir Plate*. See *General Description, Step 3 in Step-by-Step*.



**4.** Use a graduated cylinder or pipet to measure the sample volume from *Table 1*. Transfer the sample into a clean 250-mL Erlenmeyer flask. Dilute to about the 100-mL mark with deionized water, if necessary.

**Table 1**

Range (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	Sample Volume (mL)	Titration Cartridge (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Catalog Number	Digit Multiplier
10-40	100	0.1600	14388-01	0.1
40-160	25	0.1600	14388-01	0.4
100-400	100	1.600	14389-01	1.0
200-800	50	1.600	14389-01	2.0
500-2000	20	1.600	14389-01	5.0
1000-4000	10	1.600	14389-01	10.0

## ALKALINITY, continued

---



**5.** Add the contents of one Phenolphthalein Indicator Powder Pillow and swirl to mix.

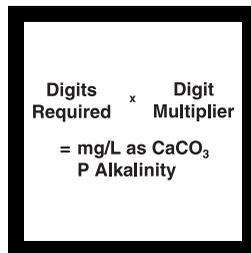
**Note:** A solution of one pH 8.3 Buffer Powder Pillow and one Phenolphthalein Powder Pillow in 50 mL of deionized water is recommended as a comparison for determining the proper end point color.

**Note:** Four drops of Phenolphthalein Indicator Solution may be substituted for the Phenolphthalein Indicator Powder Pillow.



**6.** If the solution turns pink, titrate to a colorless end point. Place the delivery tube tip into the solution and swirl the flask while titrating with sulfuric acid. Record the number of digits required.

**Note:** If the solution is colorless before titrating with sulfuric acid, the Phenolphthalein (P) Alkalinity is zero; proceed with step 8.



**7.** Calculate:

Digits Required x  
Digit Multiplier =  
mg/L CaCO<sub>3</sub> P Alkalinity



**8.** Add the contents of one Bromcresol Green-Methyl Red Indicator Powder Pillow to the flask and swirl to mix.

**Note:** Four drops of Methyl Purple Indicator Solution may be substituted for the Bromcresol Green-Methyl Red Indicator Powder Pillow. Titrate from green to a gray end point (pH 5.1).

**Note:** Four drops of Bromcresol Green-Methyl Red Indicator Solution may be substituted for the Bromcresol Green-Methyl Red Indicator Powder Pillow.

# ALKALINITY, continued



$$\begin{array}{l} \text{Total} \\ \text{Digits} \\ \text{Required} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Digit} \\ \text{Multiplier} \end{array} \\ = \text{mg/L as CaCO}_3 \\ \text{Total (T or M) Alkalinity}$$

**9.** Continue the titration with sulfuric acid to a light greenish blue-gray (pH 5.1), a light violet-gray (pH 4.8), or a light pink (pH 4.5) color, as required by the sample composition; see Table 2. Record the number of digits required.

**Note:** A solution of one Bromcresol Green-Methyl Red Powder Pillow and one pillow of the appropriate pH buffer in 50 mL of deionized water is recommended as a comparison for judging the proper end point color. If the pH 3.7 end point is used, use a Bromphenol Blue Powder Pillow instead of a Bromcresol Green-Methyl Red and titrate to a green end point.

**10.** Calculate:  
Total Digits Required x Digit Multiplier = mg/L as CaCO<sub>3</sub> Total (T or M) Alkalinity

**Note:** Carbonate, bicarbonate and hydroxide concentrations may be expressed individually using the relationships shown in Table 3.

**Note:** meq/L Alkalinity = mg/L as CaCO<sub>3</sub> ÷ 50.

**Table 2**

Sample Composition	End Point
Alkalinity about 30 mg/L	pH 4.9
Alkalinity about 150 mg/L	pH 4.6
Alkalinity about 500 mg/L	pH 4.3
Silicates or Phosphates present	pH 4.5
Industrial waste or complex system	pH 4.5

## ALKALINITY, continued

---

### Sampling and Storage

Collect samples in clean plastic or glass bottles. Fill completely and cap tightly. Avoid excessive agitation or prolonged exposure to air. Samples should be analyzed as soon as possible after collection but can be stored at least 24 hours by cooling to 4 °C (39 °F) or below. Warm to room temperature before analyzing.

### Alkalinity Relationship Table

Total alkalinity primarily includes hydroxide, carbonate and bicarbonate alkalinities. The concentration of these alkalinities in a sample may be determined when the phenolphthalein and total alkalinities are known (see *Table 3*).

**Table 3 Alkalinity Relationship**

Row	Result of Titration	Hydroxide Alkalinity is equal to:	Carbonate Alkalinity is equal to:	Bicarbonate Alkalinity is equal to:
1	Phenolphthalein Alkalinity = 0	0	0	Total Alkalinity
2	Phenolphthalein Alkalinity equal to Total Alkalinity	Total Alkalinity	0	0
3	Phenolphthalein Alkalinity less than one half of Total Alkalinity	0	2 times the Phenolphthalein Alkalinity	Total Alkalinity minus two times Phenolphthalein Alkalinity
4	Phenolphthalein Alkalinity equal to one half of Total Alkalinity	0	Total Alkalinity	0
5	Phenolphthalein Alkalinity greater than one half of Total Alkalinity	2 times the Phenolphthalein minus Total Alkalinity	2 times the difference between Total and Phenolphthalein Alkalinity	0

To use the table follow these steps:

- a. Does the phenolphthalein alkalinity equal zero? If yes, use Row 1.
- b. Does the phenolphthalein alkalinity equal total alkalinity? If yes, use Row 2.

## ALKALINITY, continued

---

- c. Multiply the phenolphthalein alkalinity by 2.
- d. Select Row 3, 4, or 5 based on comparing the result of *step c* with the total alkalinity.
- e. Perform the required calculations in the appropriate row, if any.
- f. Check your results. The sum of the three alkalinity types will equal the total alkalinity.

### For example:

A sample has 170 mg/L as CaCO<sub>3</sub> phenolphthalein alkalinity and 250 mg/L as CaCO<sub>3</sub> total alkalinity. What is the concentration of hydroxide, carbonate and bicarbonate alkalinities?

The phenolphthalein alkalinity does not equal 0 (it is 170 mg/L), see *step a*.

The phenolphthalein alkalinity does not equal total alkalinity (170 mg/L vs. 250 mg/L), see *step b*.

The phenolphthalein alkalinity multiplied by 2 = 340 mg/L, see *step c*.

Because 340 mg/L is greater than 250 mg/L, select Row 5, see *step d*.

The hydroxide alkalinity is equal to: (see *step e*).

$$340 - 250 = 90 \text{ mg/L hydroxide alkalinity}$$

The carbonate alkalinity is equal to:

$$250 - 170 = 80$$
$$80 \times 2 = 160 \text{ mg/L carbonate alkalinity}$$

The bicarbonate alkalinity equals 0 mg/L.

Check: (see *step f*).

$$90 \text{ mg/L hydroxide alkalinity} + 160 \text{ mg/L carbonate alkalinity} + 0 \text{ mg/L bicarbonate alkalinity} = 250 \text{ mg/L}$$

The above answer is correct; the sum of each type equals the total alkalinity.

## ALKALINITY, continued

---

### Accuracy Check

#### Standard Additions Method

This accuracy check should be performed when interferences are suspected or to verify analytical technique.

1. Snap the neck off an Alkalinity Standard Solution Voluette<sup>®</sup> Ampule, 0.500 N.
2. Use a TenSette<sup>®</sup> Pipet to add 0.1 mL of standard to the sample titrated in Steps 6 or 9. Resume titration back to the same end point. Record the number of digits needed.
3. Repeat, using two more additions of 0.1 mL. Titrate to the end point after each addition.
4. Each 0.1 mL addition of standard should require 25 additional digits of 1.600 N titrant or 250 digits of 0.1600 N titrant. If these uniform increases do not occur, refer to *Appendix A, Accuracy Check and Standard Additions*.

### Interferences

- Highly colored or turbid samples may mask the color change at the end point. Use a pH meter for these samples.
- Chlorine may interfere with the indicators. Add one drop of 0.1 N Sodium Thiosulfate to eliminate this interference.

### Summary of Method

The sample is titrated with sulfuric acid to a colorimetric end point corresponding to a specific pH. Phenolphthalein alkalinity is determined by titration to a pH of 8.3, as evidenced by the color change of phenolphthalein indicator, and indicates the total hydroxide and one half the carbonate present. M (methyl orange) or T (total) alkalinity is determined by titration to a pH between 3.7 and 5.1, and includes all carbonate, bicarbonate and hydroxide.

## ALKALINITY, continued

---

### REQUIRED REAGENTS

(varies with sample characteristics)

Description	Unit	Cat. No
Alkalinity Reagent Set (about 100 tests) .....		22719-00
Includes: (1) 942-99, (1) 943-99, (1) 14388-01, (1) 14389-01		
Bromcresol Green-Methyl Red Powder Pillows .....	100/pkg .....	943-99
Phenolphthalein Powder Pillows .....	100/pkg .....	942-99
Sulfuric Acid Titration Cartridge, 1.600 N .....	each .....	14389-01
Sulfuric Acid Titration Cartridge, 0.1600 N .....	each .....	14388-01
Water, deionized .....	4L .....	272-56

### REQUIRED APPARATUS

Digital Titrator .....	each .....	16900-01
Flask, Erlenmeyer, 250-mL .....	each .....	505-46
<b>Select one or more based on sample concentration:</b>		
Cylinder, graduated, 10-mL .....	each .....	508-38
Cylinder, graduated, 25-mL .....	each .....	508-40
Cylinder, graduated, 50-mL .....	each .....	508-41
Cylinder, graduated, 100-mL .....	each .....	508-42

### OPTIONAL REAGENTS

Alkalinity Standard Solution Voluette® Ampules, 0.500 N Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , 10-mL .....	16/pkg .....	14278-10
Bromcresol Green-Methyl Red Indicator Solution .....	100 mL MDB .....	23292-32
Bromphenol Blue Indicator Solution .....	100 mL MDB .....	14552-32
Bromphenol Blue Powder Pillows .....	100/pkg .....	14550-99
Buffer Powder Pillows, pH 3.7 .....	25/pkg .....	14551-68
Buffer Powder Pillows, pH 4.5 .....	25/pkg .....	895-68
Buffer Powder Pillows, pH 4.8 .....	25/pkg .....	896-68
Buffer Powder Pillows, pH 5.1 .....	25/pkg .....	897-68
Buffer Powder Pillows, pH 8.3 .....	25/pkg .....	898-68
Methyl Purple Indicator Solution .....	100 mL MDB .....	21934-32
Phenolphthalein Indicator Solution, 5 g/L .....	100 mL MDB* .....	162-32
Sodium Thiosulfate Standard Solution, 0.1 N .....	100 mL MDB .....	323-32

---

\* Contact Hach for larger sizes.

## ALKALINITY, continued

---

### OPTIONAL APPARATUS

Description	Unit	Cat. No
Bottle, wash, poly, 500-mL.....	each.....	620-11
Clamp, 2-prong extension, 38-mm .....	each.....	21145-00
Clamp Holder.....	each.....	326-00
Deminerlizer Assembly, 473-mL.....	each.....	21846-00
Delivery Tubes, with 180° hook .....	5/pkg.....	17205-00
Delivery Tubes, 90° with hook for TitraStir® Stir Plate .....	5/pkg.....	41578-00
Pipet, TenSette® 0.1 to 1.0 mL .....	each.....	19700-01
Pipet Tips for 19700-01 TenSette® Pipet.....	50/pkg.....	21856-96
Pipet, volumetric, Class A, 10-mL .....	each.....	14515-38
Pipet, volumetric, Class A, 20-mL .....	each.....	14515-20
Pipet, volumetric, Class A, 25-mL .....	each.....	14515-40
Pipet, volumetric, Class A, 50-mL .....	each.....	14515-41
Pipet, volumetric, Class A, 100-mL .....	each.....	14515-42
Pipet Filler, safety bulb .....	each.....	14651-00
<i>sensio</i> <sup>TM</sup> Basic Portable pH Meter with electrode .....	each.....	51700-10
Support Ring Stand.....	each.....	563-00
TitraStir® Stir Plate, 115 Vac.....	each.....	19400-00
TitraStir® Stir Plate, 230 Vac.....	each.....	19400-10
Voluette® Ampule Breaker Kit .....	each.....	21968-00