

GENERACIÓN DE CONTAMINACIÓN DISUELTA A PARTIR DE LOS SÓLIDOS  
SUSPENDIDOS TOTALES ACUMULADOS EN UN ESTANQUE CONVENCIONAL DE  
TRUCHA CONSTRUIDO EN CONCRETO Y SU EFECTO EN EL CRECIMIENTO DE LOS  
PECES



ZULY PATRICIA GARCÉS QUIRÁ  
ERICK ALEXANDER MAMIÁN ASTUDILLO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2011

GENERACIÓN DE CONTAMINACIÓN DISUELTA A PARTIR DE LOS SÓLIDOS  
SUSPENDIDOS TOTALES ACUMULADOS EN UN ESTANQUE CONVENCIONAL DE  
TRUCHA CONSTRUIDO EN CONCRETO Y SU EFECTO EN EL CRECIMIENTO DE LOS  
PECES

ZULY PATRICIA GARCÉS QUIRÁ  
ERICK ALEXANDER MAMIÁN ASTUDILLO

Proyecto de grado para aspirar al título de Ingeniero Ambiental

Director de Trabajo:  
MSc. JAVIER ERNESTO FERNÁNDEZ

Codirector de Trabajo:  
Qco. DARWIN HOYOS MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2011

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente de Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Popayán, Mayo de 2011

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por darnos la vida y permitirnos culminar con éxito nuestra carrera.

Al Ingeniero Javier Ernesto Fernández por brindarnos la oportunidad de realizar este trabajo, por compartir con nosotros su experiencia y conocimiento.

Al Químico Darwin Hoyos Martínez por coordinar la investigación, por su apoyo y dedicación en todo el proceso.

Al Piscicultor Henry Guañarita propietario de la Estación piscícola “Chiliglo”, por su acogida y generosidad.

A nuestros familiares, profesores y amigos, por creer en nosotros y estar siempre a nuestro lado.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE ANEXOS .....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
3. JUSTIFICACIÓN .....	4
4. OBJETIVOS .....	6
4.1 OBJETIVO GENERAL .....	6
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
5. MARCO TEÓRICO .....	7
5.1 LA ACUICULTURA EN COLOMBIA.....	7
5.2. REQUERIMIENTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN CULTIVO DE TRUCHA .....	8
5.2.1 Características de los estanques. ....	8
5.2.2 Requerimiento hídrico.....	9
5.2.3 Características fisicoquímicas del agua. ....	9
5.2.4 Tasas de crecimiento.....	11
5.3 FUENTES DE INGRESO DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES A UN SISTEMA DE CULTIVO DE TRUCHA.....	12
5.3.1 Aporte de sólidos por afluente .....	12
5.3.2 Aporte de sólidos por alimentación y metabolismo de los peces.....	13
5.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN UN CULTIVO DE TRUCHA.....	13
5.4.1 Características físicas.....	13
5.4.2 Características químicas.....	14
5.5 DISOLUCIÓN Y DEGRADACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN UN CULTIVO DE TRUCHA.....	15
5.5.1 Disolución de los sólidos suspendidos totales.....	15
5.5.2 Degradación química .....	15
5.5.3 Degradación microbiológica.....	16
5.5.4 Degradación de materia orgánica. Transformación del fósforo y nitrógeno .....	16
5.5.5 Efecto de la degradación de sólidos suspendidos totales en el estanque. ....	18

5.6 IMPACTO GENERADO POR EL CULTIVO DE TRUCHA EN LAS FUENTES HÍDRICAS RECEPTORAS.....	19
5.6.1 Impacto generado por el cultivo de trucha sobre el ecosistema acuático .....	20
5.6.2 Impacto generado sobre la calidad del agua para uso humano .....	21
6. METODOLOGÍA.....	22
6.1 Localización .....	22
6.2 Descripción del estanque .....	22
6.3 Condiciones iniciales de operación del estanque .....	22
6.4 Desarrollo del primer objetivo .....	22
6.5 Desarrollo del segundo objetivo .....	26
6.5.1 Colecta de muestra de peces y proceso de pesaje.....	27
6.5.2 Muestreo para el seguimiento de calidad del agua. ....	27
6.6 Análisis estadístico.....	27
7. RESULTADOS y ANÁLISIS.....	28
7.1 Objetivo 1 .....	28
7.1.1 Parámetros influyentes en las tasas de transferencia. ....	28
7.1.2 Sólidos suspendidos totales.....	31
7.1.3 Nutrientes. ....	38
7.2 Objetivo 2.....	56
7.2.1 Cálculo y control caudales .....	56
7.2.2 Condiciones físico químicas del agua durante los periodos de operación.....	57
8. CONCLUSIONES.....	62
9. RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIAS .....	64
ANEXOS .....	74
Anexo A. Datos puntuales y promedio corrido de los parámetros medidos para el desarrollo del objetivo 1. ....	74
Anexo B. Tratamiento y presentación de resultados para el desarrollo del objetivo 1..	85

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones operacionales de cultivo .....	23
Tabla 2. Parámetros a medir y procedimiento estándar .....	23
Tabla 3. Parámetros medidos, tratamiento y procedimiento estándar.....	25
Tabla 4. Procedimiento estándar para la determinación de nutrientes en tejido animal y alimento.....	26
Tabla 5. Estadísticos descriptivos de temperatura (°C) Afl – Efl. Ensayo 1 y 2 .....	30
Tabla 6. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de sólidos suspendidos totales (mgL <sup>-1</sup> ). Ensayos 1 y 2.....	31
Tabla 7. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de nitrógeno (mgL <sup>-1</sup> ). Ensayos 1 y 2. ....	39
Tabla 8. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de fósforo (mgL <sup>-1</sup> ). Ensayos 1 y 2. ....	45
Tabla 9. Estadísticos descriptivos de caudales de operación.....	56
Tabla 10. Parámetros físico químicos registrados en los 4 periodos de operación. ....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interacciones físicas, químicas y biológicas en un estanque de cultivo de trucha (Tomado de Moriarty, 1997). .....	17
Figura 2. Secciones y puntos para muestreo puntual .....	24
Figura 3. Montaje de muestreo compuesto .....	24
Figura 4. Temperatura a diferentes horas del día. Ensayo 1 y 2 .....	30
Figura 5. Porcentajes de acumulación de sólidos suspendidos totales. Ensayo 1 y 2.....	32
Figura 6. Tasas de acumulación de sólidos suspendidos totales. Ensayo 1 y 2.....	33
Figura 7. Tasas de generación de sólidos disueltos ( $\text{g SD h}^{-1} \text{Ton}^{-1}$ pez) para el ensayo 1. ....	34
Figura 8. Tasas de degradación y disolución de sólidos disueltos ( $\text{g SD h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$ pez) para el ensayo 1. ....	36
Figura 9. Tasa de generación de sólidos disueltos (SD).Ensayo 1 y 2.....	37
Figura 10. Porcentajes de acumulación de nitrógeno en la fracción sólida. Ensayos 1 y 2. ....	40
Figura 11. Porcentajes de nitrógeno sólido y disuelto. Ensayos 1 y 2. ....	41
Figura 12. Tasas de disolución de nitrógeno. Ensayos 1 y 2. ....	41
Figura 13. Porcentajes de nitrógeno amoniacal y orgánico. Ensayos 1 y 2.....	43
Figura 14. Tasas de generación de nitrógeno amoniacal. Ensayos 1 y 2.....	44
Figura 15. Porcentajes de acumulación de fósforo fracción sólida. Ensayos 1 y 2.....	45
Figura 16. Porcentajes de fósforo sólido y disuelto. Ensayos 1 y 2. ....	46
Figura 17. Tasas de disolución de fósforo. Ensayos 1 y 2. ....	47
Figura 18. Concentración de oxígeno en las diferentes secciones del estanque. Ensayos 1 y 2. ....	48
Figura 19. Consumo total de oxígeno en las secciones del estanque ensayo 1.....	49
Figura 20. Consumo total de oxígeno en las secciones del estanque ensayo 2.....	50
Figura 21. Consumo de oxígeno ( $\text{g O}_2 \text{ h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$ pez) en diferentes horas del día ensayo 1. ....	51
Figura 22. Consumo de oxígeno ( $\text{g O}_2 \text{ h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$ pez) en diferentes horas del día ensayo 2. ....	51



Figura 23. Porcentajes promedio de consumo en las secciones estanque a diferentes horas. Ensayos 1 y 2. ....	53
Figura 24. Tasas de consumo de oxígeno por degradación y oxidación $O_2$ $h^{-1}$ $Ton^{-1}$ pez. Ensayos 1 y 2. ....	54
Figura 25. Ingreso y consumos de oxígeno en los cuatro periodos de operación. ....	59
Figura 26. Concentración de oxígeno en las secciones del estanque en los periodos de operación. ....	60
Figura 27. Tasa de crecimiento para diferentes porcentajes de ingreso de caudal. ....	61

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Datos puntuales y promedio corrido de los parámetros medidos para el desarrollo del objetivo 1.

Tabla A. 1. Caudal ( $Ls^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido. Ensayos 1 y 2. ....	74
Tabla A. 2. Temperatura ( $^{\circ}C$ ) y pH. Datos puntuales ensayos 1 y 2. ....	75
Tabla A. 3. Sólidos suspendidos totales ( $mgL^{-1}$ ). Datos promedio corrido ensayos 1 y 2.	76
Tabla A. 4. Sólidos disueltos ( $mgL^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido. Ensayo 1 y 2.	77
Tabla A. 5. Nitrógeno total ( $mgL^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2...	78
Tabla A. 6. Nitrógeno disuelto ( $mgL^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2. .....	78
Tabla A. 7. Nitrógeno amoniacal ( $mgL^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2. ....	79
Tabla A. 8. Fósforo total ( $mgL^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2. ....	79
Tabla A. 9. Concentraciones fracción sólida de nitrógeno ( $mgL^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2. ....	80
Tabla A. 10. Concentraciones fracción sólida de fósforo ( $mgL^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2. ....	81
Tabla A. 11. Fósforo disuelto ( $mgL^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2. .....	82
Tabla A. 12. Oxígeno disuelto ( $mgL^{-1}$ ). Datos puntuales ensayo 1. ....	83
Tabla A. 13. Oxígeno disuelto ( $mgL^{-1}$ ). Datos puntuales ensayo 2. ....	84
Anexo B. Tratamiento y presentación de resultados para el desarrollo del objetivo 1.	
Cálculo B. 1. Determinación de las tasas de acumulación. ....	85
Cálculo B. 2. Determinación de tasas de transferencia. ....	85
Cálculo B. 3. Determinación de tasas de consumo de oxígeno disuelto. ....	85
Cálculo B. 4. Determinación del consumo de oxígeno disuelto por secciones del estanque. .....	85
Cálculo B. 5. Porcentajes de consumo en cada sección del estanque. ....	86

Tabla B. 1. Tasas de acumulación de sólidos suspendidos totales, nitrógeno y fósforo (g Ton <sup>-1</sup> pez h <sup>-1</sup> ). Ensayos 1 y 2. ....	87
Tabla B. 2. Tasas de generación, degradación y disolución de sólidos disueltos (g Ton <sup>-1</sup> pez h <sup>-1</sup> ). Ensayos 1 y 2. ....	88
Tabla B. 3. Tasas de generación de nitrógeno y fósforo sólido a la fracción disuelta fósforo (g Ton <sup>-1</sup> pez h <sup>-1</sup> ). Ensayos 1 y 2. ....	89
Tabla B. 4. Consumo de oxígeno en las diferentes secciones del estanque (g O <sub>2</sub> h <sup>-1</sup> Ton <sup>-1</sup> pez). ....	90
Tabla B. 5. Consumo de oxígeno en cada sección del estanque (g O <sub>2</sub> h <sup>-1</sup> Ton <sup>-1</sup> pez). ....	91
Tabla B. 6. Porcentajes de consumo de oxígeno en cada sección del estanque. Ensayos 1 y 2. ....	92
Figura B. 1. Tasas de generación de sólidos disueltos por degradación y disolución de la materia orgánica. Ensayo 2. ....	93
ANEXO C. Resultados obtenidos en el desarrollo del segundo objetivo.	
Figura C. 1. Consumo de oxígeno por la trucha arcoíris, en mg Kg <sup>-1</sup> de peso hora <sup>-1</sup> , en temperaturas comprendidas entre 5 y 20°C y de 1 a 1000 gramos de peso. (Tomado de Blanco, 1995. Según Liao 1970). ....	94
Calculo C. 1. Cálculo de caudales .....	95
Tabla C. 1. Caudales teóricos en los 4 periodos de operación.....	95
Tabla C. 2. Parámetros puntuales obtenidos en los 4 periodos de operación. ....	96
Tabla C. 3. Concentraciones promedio de sólidos suspendidos totales y disueltos. Periodos 1, 2 ,3 y 4. ....	96
Tabla C. 4. Concentraciones promedio de nutrientes en cada periodo de operación. ....	96
Tabla C. 5. Resultados de los pesajes y las tasas de crecimiento absoluta obtenidas en los 4 periodos de operación. ....	97

## 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, se ha implementado con gran éxito la piscicultura, centrándose en la tilapia, cachama y trucha (Instituto Colombiano de Desarrollo Rural. INCODER, 2004). La cría de trucha se ha ido posicionando como uno de los cultivos más importantes y ha tenido buena acogida en las zonas altas del país, generando desarrollo económico y social. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este tipo de cultivos demandan altas cantidades de agua, además de generar contaminación particulada y soluble sobre fuentes receptoras, impidiendo su posterior utilización.

La mayoría de los contaminantes generados en las piscícolas, son eliminados en fase soluble, lo que dificulta el tratamiento de sus efluentes por métodos tradicionales; por tanto se han buscado otras formas de reducir estos residuos, como son el manejo de herramientas de producción más limpia y eficiencia en las dietas alimenticias de los cultivos (Hankins *et al.*, 1990).

En el presente estudio se determinó el comportamiento de los sólidos acumulados en el interior de un estanque de trucha y su paso a la fracción disuelta, además se buscó determinar si las tasas de crecimiento de los peces de un cultivo de trucha podrían verse afectadas por la disminución de oxígeno al reducir los caudales de ingreso, con el fin de que se puedan generar alternativas económicamente viables para minimizar los impactos generados por la contaminación sobre los ecosistemas y mejorar los sistemas de producción de las truchícolas.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia la acuicultura ha crecido significativamente en los últimos años, gracias a que las políticas del gobierno nacional para el desarrollo de esta actividad, se han visto fortalecidas, al emprenderse programas como la creación de la cadena del cultivo de camarón, el acuerdo sectorial de competitividad y la cadena productiva de piscicultura (tilapia, trucha y cachama), entre otros (Ministerio de agricultura y desarrollo rural. MADR, 2005).

La piscicultura se ha convertido en uno de los renglones más representativos de la actividad acuícola, pasando de 22423 Ton en 1995 a aproximadamente 63052 Ton en 2007 (MAVDR, 2008). En 2008 los principales cultivos piscícolas fueron tilapia con aproximadamente 31356 Ton, Cachama con 12189 Ton, y trucha con 4617 toneladas anuales (Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura. INPA, 2008) presentando un crecimiento anual del 14% (Centro de investigación de la Acuicultura de Colombia CENIACUA, 2008).

El cultivo de trucha ha tenido mayor participación en el mercado desde el 2003 (MADR, 2005), implementándose en departamentos como Antioquia, Boyacá, Cundinamarca, Nariño y Cauca, que cuentan con la cantidad y calidad del agua requerida por este tipo de cultivo (Food and Agriculture Organization. FAO, 2000), con parámetros como: concentración de oxígeno superior a  $5.5 \text{ mgL}^{-1}$  (Pillay, 2004), temperaturas del agua en un rango entre 9 a  $17^{\circ}\text{C}$  y pH entre 6 y 9 unidades, entre otros (Blanco, 1995).

Sin embargo, la truchicultura impacta significativamente el recurso hídrico ya que exige importantes volúmenes para su desarrollo. Se ha establecido que para producir una tonelada de pez por año se requieren entre 500 y  $650 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  (Stevenson, 1985 citado por Fernández *et al.*, 2010); que al compararlo con el consumo urbano, estimado en  $0.125 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$  por habitante (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. IDEAM, 2010), significaría el abastecimiento diario de aproximadamente 4600 personas.

Además del alto uso de agua; diariamente se descarga a los ríos contaminantes como nitrógeno, fósforo, materia orgánica, partículas en suspensión y patógenos, asociados a residuos piscícolas (Gál *et al.*, 2003). Un estudio realizado en el departamento del Cauca a 10 estaciones piscícolas estableció que la producción de 77840 Kg de trucha al mes genera una demanda bioquímica de oxígeno de 7891 Kg y cargas de 17708, 768 y 1896 Kg para sólidos suspendidos, fósforo y nitrógeno total, respectivamente; lo que equivale a la contaminación generada por 13300 personas respecto a la DBO<sub>5</sub>, 32800 para Sólidos suspendidos y 17700 para nitrógeno y fósforo total (Fernández *et al.*, 2010). Estos contaminantes, aparte de generar fenómenos como eutrofización, reducen la calidad del recurso y su potencial uso aguas abajo en actividades ganaderas y recreativas, además de generar mayores costos de tratamiento para consumo humano.

Si bien es cierto que las políticas desarrolladas por el gobierno nacional impulsan el rápido crecimiento de las actividades piscícolas y con estas la economía del país, este aumento conlleva a la utilización de técnicas de cultivo más intensivas, las cuales tienen mayor impacto ambiental que las tradicionales (Tucker y Hargreaves, 2008). En este sentido, si la producción de alimentos por piscicultura continúa en forma positiva durante los próximos años, se deberán tener en cuenta los posibles efectos adversos de la intensificación de la actividad sobre el bienestar de los peces y sobre el ambiente, con el fin de contribuir con la calidad alimentaria, la integridad ambiental y el desarrollo económico y social (Nuñez y Somoza, 2010).

### 3. JUSTIFICACIÓN

El cultivo de trucha se realiza por lo general en sistemas de un paso, donde el agua ingresa y sale de las unidades de cultivo (Summerfelt *et al.*, 2004). Lo que exige grandes volúmenes de agua (Piedrahita, 2003). En el interior de los estanques de cultivo se presenta acumulación de sólidos provenientes de materiales arrastrados por el agua, residuos de alimento no consumido por los peces y sus productos de excreción, los cuales aumentan el consumo de oxígeno, reduciendo la calidad del agua, lo que afecta directamente el crecimiento del pez (Blanco, 1995).

Los sólidos están compuestos por materia orgánica, la cual contiene fósforo y nitrógeno, en sus fases suspendida y disuelta (Losordo y Westers, 1994), que posteriormente pasarán a las fuentes hídricas, incrementando los nutrientes en las mismas, lo que conduce a una mayor proliferación de microorganismos, disminución de oxígeno, y potenciales problemas de eutrofización (Camargo J y Alonso A, 2006).

Esta contaminación localizada adquiere mayor complejidad ya que, al estar los cultivos por encima de los 2000 msnm, impacta directamente los ecosistemas de bosque andino, los cuales son de vital importancia pues se consideran reguladores del recurso hídrico y comprenden grandes redes hídricas que drenan hacia las partes medias y bajas de las cuencas, donde se asienta gran parte de la población del país (Tobón, 2009).

Es fundamental adoptar medidas que permitan tener mayor control de dicha contaminación sin afectar el desarrollo normal del cultivo, los aspectos primordiales a tener en cuenta son la alimentación y las herramientas de producción más limpia (Hankins *et al.*, 1990), ya que los efluentes de los cultivos piscícolas se caracterizan por tener contaminantes en bajas concentraciones, debido a los altos volúmenes de agua que se requieren, lo que hace inviable su tratamiento con sistemas tradicionales, principalmente por sus elevados costos (Brinker, 2005).

Si se tiene en cuenta que los sólidos acumulados en el interior de los estanques de cultivo, tienden a pasar de la fracción sólida a la disuelta por procesos de degradación y disolución de la materia orgánica (Blanco, 1995), sería conveniente retirar estos sólidos antes de que inicien los fenómenos de transferencia y de esta manera evitar que se genere contaminación disuelta la cual tiene mayores costos para su tratamiento (True *et al.*, 2004).

Por esto, es necesario realizar estudios que permitan analizar el comportamiento de los diferentes parámetros físico químicos del agua dentro de los estanques para cultivo de trucha, tales como materia orgánica, sólidos, nitrógeno y fósforo, con el fin de determinar el efecto de los contaminantes generados en un estanque convencional sobre la generación de contaminación disuelta y el crecimiento de los peces, y de esta manera, poder generar herramientas que permitan establecer estrategias económicamente viables con el de minimizar los impactos negativos sobre los ecosistemas y mejorar los sistemas de producción.



## 4. OBJETIVOS

### 4.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar el efecto de los sólidos suspendidos totales acumulados en un estanque convencional de trucha construido en concreto sobre la generación de contaminación disuelta y el crecimiento de los peces según las condiciones operacionales del cultivo.

### 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las tasas de transferencia de contaminantes desde los sólidos suspendidos totales acumulados a la fracción disuelta en el interior de un estanque convencional para cultivo de trucha.
- Determinar el efecto de la reducción de oxígeno disuelto, por la disminución de caudal y el consumo en procesos de degradación de la materia orgánica, sobre las tasas de crecimiento en biomasa de los peces.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1 LA ACUICULTURA EN COLOMBIA

La producción nacional de peces de cultivo concierne principalmente a las especies de tilapia, trucha y cachama, cuya participación conjunta, durante los últimos 12 años, ha sido del 96.3% del total de la piscicultura y del 65.3% de la producción acuícola.

En particular, la producción de tilapia ha participado con el 49% de la actividad piscícola, mientras la cachama y la trucha han constituido el 31 y 16%, de manera respectiva. El 4% restante se ha destinado a otras especies como el bocachico, la carpa, el yamú etc., las cuales se producen como acompañantes de la producción de tilapia, trucha y cachama (Martínez y Gonzales, 2005). Con respecto a su dinámica, entre 1989 y 2002 la producción creció a ritmos acelerados pasando de 2650 Ton a 28530 Ton. El crecimiento anual en este lapso fue del 16.4%, cifra significativa si se tiene en cuenta que la población colombiana creció a una tasa inferior al 2% anual y las producciones de carne de ganado, pollo y cerdo presentaron ritmos de crecimiento anual del 0.7%, 2.8%, y -2.8%, respectivamente (Martínez y Acevedo, 2004 citados por Martínez y Gonzales, 2005).

La trucha arcoíris es un pez que habita espacios acuáticos con cauces que presentan marcados desniveles topográficos que originan rápidos, saltos y cascadas, características comunes en los ríos de alta montaña. Se introdujo a Colombia en 1939 para repoblar las aguas frías de ríos, quebradas y lagunas andinas. Las regiones aptas para el desarrollo de estos peces en el país, se encuentran a alturas entre 2000 y 3000 metros sobre el nivel del mar, con temperaturas entre 9 y 17°C. La producción de trucha se orientó originalmente con fines deportivos, posteriormente, por su aceptación en el mercado se constituyó en un pez de cultivo. Actualmente, se desarrollan proyectos comerciales intensivos caracterizados por tener producciones que varían entre 50 y 80 Ton mensuales (Martínez y Gonzales, 2005).

## 5.2. REQUERIMIENTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN CULTIVO DE TRUCHA

La elección del sitio para la implementación de un cultivo de trucha básicamente se limita a poseer altos caudales de agua con óptima calidad físico química y superficies que permitan la construcción de los estanques.

### 5.2.1 Características de los estanques.

Los estanques para cultivo de trucha generalmente están contruidos en tierra o en concreto. Los estanques en tierra requieren menores inversiones para su construcción, sin embargo, presentan erosión permanente de las paredes debido al flujo del agua; por otro lado, en el lecho de los estanques se almacenan microorganismos que aceleran los procesos de degradación de los sólidos que se acumulan al interior. Los estanques hechos en concreto tienen mayor resistencia a la erosión, son capaces de albergar mayor cantidad de peces por unidad de volumen, poseen mejor eficiencia hidráulica y facilitan el manejo de los peces (Blanco, 1995).

Las geometrías típicas de los estanques para cultivo de trucha son: circulares y rectangulares; en los estanques circulares la inyección tangencial del agua y las altas velocidades del flujo generan mezcla completa, obteniéndose homogeneidad en las propiedades del agua (Levenspiel, 1979 citado por Oca *et al.*, 2007), además por su forma hacen que los peces tengan una mejor distribución (Ross *et al.*, 1995), sin embargo, presentan altos costos de construcción, baja capacidad de carga, dificultad de manejo y elevación de la temperatura del agua (Blanco, 1995).

Los estanques tipo rectangular poseen mayor capacidad de carga que los circulares y son más fáciles de operar y mantener (Blanco 1995 y Oca y Masal, 2007). Según Blanco (1995), las dimensiones de un estanque rectangular para cultivo de trucha deben tener una relación largo-ancho aproximado de 10:1, con pendiente de fondo del 3 al 4%. La profundidad óptima de la lámina de agua es de 0.8 a 1 m, ya que facilita la manipulación de los peces.

Para determinar la densidad se debe tener en cuenta: volumen del estanque, peso individual del pez y oxigenación del agua; la capacidad estándar para un estanque es de 20 a 25 Kg de pez por metro cuadrado a una temperatura de 10°C. Blanco (1995), establece que con esta densidad se tiene un máximo aprovechamiento del oxígeno presente. Para mantener cargas con densidades límite, se debe inyectar un caudal que garantice determinados recambios de agua para mantener el nivel de oxígeno requerido (Blanco, 1995).

### 5.2.2 Requerimiento hídrico.

El agua es el factor que condiciona los rendimientos de producción debido a las altas exigencias que presenta el cultivo de trucha, se estima que se requieren entre 500 y 650 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> del recurso para la producción una tonelada de pez por año (Stevenson, 1985 citado por Fernández *et al.*, 2010). Estudios realizados en sistemas con recirculación para la misma producción de trucha el consumo de agua es de 10 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>, siendo necesario realizar tratamientos de tipo físico, biológico y químico, además de pequeños suministros de agua fresca para mantener la calidad de agua (Piedrahita, 2003 y Summerfelt *et al.*, 2004).

### 5.2.3 Características fisicoquímicas del agua.

Las características fisicoquímicas del agua para cultivo de trucha más importantes son: temperatura, oxígeno, pH, sólidos y amoníaco (NH<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Un adecuado control de estos parámetros genera buenos rendimientos en la producción (Klontz, 1991). A continuación se describen los rangos óptimos para cada parámetro y sus implicaciones en el desarrollo de los peces.

Temperatura: La temperatura corporal de la trucha, al igual que todos los peces, depende del medio acuático donde viven, ya que no tienen la capacidad para regularla. Esta incide directamente sobre los aspectos reproductivos de las truchas, el ritmo de crecimiento y especialmente sobre el grado de actividad metabólica (Camacho *et al.*, 2000). Según Blanco (1995), la trucha en condiciones naturales puede vivir en aguas con temperaturas entre 0° y 25° C; sin embargo para que las funciones fisiológicas se desarrollen de forma

óptima la temperatura debe ser aproximadamente 15 °C, temperatura que incrementa la producción cárnica.

Oxígeno: Según Aquino (2008), las ovas y alevinos requieren una concentración de oxígeno disuelto entre 6 y 7 mgL<sup>-1</sup>. En la etapa de crecimiento la concentración mínima de oxígeno es de 5.5 mgL<sup>-1</sup>, este oxígeno es llamado residual. Con concentraciones inferiores a las mencionadas, las truchas presentan dificultad para extraer el oxígeno del agua y transportarlo a través de las branquias, reduciendo las tasas de crecimiento.

Potencial de hidrógeno: Los valores más apropiados de pH, para la producción de trucha, deben estar entre 6.5 a 9.0 unidades. Valores por fuera de este intervalo causan estrés en los peces por tanto la tasa de crecimiento disminuye. Con un pH por debajo de 4.0 se presenta irritación en las branquias de los peces; en estados más avanzados puede generar daños en la estructura del tejido epitelial. Valores por encima de 11 producen daños internos en el tejido y su potencial destrucción en periodos de larga exposición (Aquino, 2008).

Sólidos: Los sólidos en un cultivo de trucha pueden presentarse en forma suspendida y disuelta, las concentraciones presentes deben ser menores a 80 mgL<sup>-1</sup> para sólidos en suspensión y 400 mgL<sup>-1</sup> para sólidos disueltos (Camacho *et al.*, 2000). En mayores cantidades este parámetro reduce el crecimiento de los peces, altera su movilidad e irrita las branquias dificultando el consumo del alimento (Blanco, 1995).

Amoniaco: El nivel aceptable de amoniaco en cultivos de trucha se encuentra en valores menores de 0.012 mg NH<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> (Camacho *et al.*, 2000 citados por Aquino, 2008). Sin embargo, la capacidad tóxica del contaminante depende de la forma química que se encuentre. La forma no ionizada (NH<sub>3</sub>) es mucho más tóxica para los peces que la ionizada conocida como amoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). La presencia de las dos formas de nitrógeno amoniacal está fuertemente ligada a los subproductos metabólicos del cultivo, así como a la degradación del material orgánico presente al interior del estanque (Crab *et al.*, 2007 y Colt, 2006). Por otro lado la presencia de amonio en forma ionizada o molecular depende del potencial de hidrógeno, favoreciendo a la especie no ionizada valores de pH mayores a 9.0 unidades (Stickney, 1991 citado por Molonoy, 2001).

#### 5.2.4 Tasas de crecimiento.

Además del control de los parámetros físico químicos mencionados, el crecimiento óptimo de las truchas también se ve influenciado por factores como la cantidad de alimento ingerido (Mambrini *et al.*, 2006 citado por Sánchez, 2009) y la eficiencia energética de las dietas suministradas (Acevedo *et al.*, 2004). Según Viaplana *et al.*, (2006), citado por Sánchez (2009), el crecimiento de la trucha es mayor con una dieta rica en proteína, gracias a que la energía digerible es superior.

Según Camacho (2000), en niveles óptimos de temperatura y alimentación, la tasa de crecimiento diaria de la trucha alcanza del 1.2 al 4.2% y la talla comercial, que se encuentra en los 250 g, puede obtenerse en un periodo de tiempo de 7 a 10 meses.

El éxito de la producción piscícola también depende del buen manejo que se le dé a los niveles de oxígeno en el agua. Este elemento es fundamental para garantizar la supervivencia de los cultivos por lo que se necesitan cantidades de este gas que suplan las necesidades biológicas de los peces (respiración) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) dada por las bacterias que descomponen los residuos generados por los peces. Cuando los niveles de oxígeno son óptimos, además de incrementar las tasas de crecimiento, se puede lograr una reducción de las tasas de conversión alimenticia y de esta manera aumentar la producción (Mallya, 2007).

En los peces la tasa metabólica se encuentra muy afectada por la concentración de oxígeno en los estanques de cultivo. A medida que disminuye la concentración de oxígeno disuelto, las actividades de respiración y alimentación también disminuyen. Como resultado, la tasa de crecimiento se reduce y la posibilidad de sufrir enfermedades aumenta. Jobling (1995) citado por Mallya (2007) encontró que la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) redujo su apetito cuando la saturación de oxígeno cayó por debajo del 60% (5.5 mg L<sup>-1</sup> aproximadamente).

Cuando en los estanques se presentan bajos niveles de oxígeno disuelto los peces cambian su comportamiento, dejan de alimentarse dando lugar a una disminución en el crecimiento, se reúnen en la entrada de los estanques donde los niveles de oxígeno son

más altos, se entorpecen, no pueden reaccionar a la irritación y pierden su capacidad de escapar de la captura; esto sucede debido a que no tienen la cantidad de oxígeno que les brinde la suficiente energía para nadar y el consumo de oxígeno aumenta. Como respuesta a una baja concentración de oxígeno disuelto en el agua, los peces pueden responder de dos maneras: el flujo de sangre se puede aumentar mediante la apertura de nuevas laminillas secundarias que incrementa el área efectiva de las vías respiratorias y elevar la concentración de glóbulos rojos y así la capacidad de transportar oxígeno de la sangre por unidad de volumen (Svobodova *et al.*, 1993, citados por Mallya 2007).

Aunque las reacciones mencionadas son necesarias y adecuadas para compensar la deficiencia de oxígeno, con el aumento de la ventilación, también aumentará la cantidad de sustancias tóxicas, presentes en el agua, que llegan al organismo de los peces (Boyd, 2004). Así mismo, se presentan situaciones donde el pez sufre de estrés lo que les puede causar enfermedades, tales como la putrefacción de la aleta y manchas blancas en la piel, y en última instancia la muerte (Mallya, 2007). Es por esto que, en los sistemas de acuicultura, los niveles de oxígeno deben ser controlados constantemente, para que en el momento en que se presenten niveles bajos de oxígeno se re-oxigene mediante la inyección de oxígeno puro, por aireación mecánica o con el aumento del caudal.

### 5.3 FUENTES DE INGRESO DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES A UN SISTEMA DE CULTIVO DE TRUCHA

Las fuentes principales de ingreso de sólidos a los estanques de cultivo de trucha provienen del afluente, el alimento y las excretas metabólicas (Cripps *et al.*, 2000). Existen fuentes secundarias como materiales que caen al interior del estanque al ser arrastrados por viento, lluvia, etc (Brinker, 2005).

#### 5.3.1 Aporte de sólidos por afluente

Los sólidos que llegan por medio del afluente generalmente son residuos de suelo (arcillas, limos y arenas), vegetación y organismos planctónicos que han sido arrastrados

por el paso del cuerpo de agua y su cantidad es directamente proporcional al nivel de pluviosidad (Cripps *et al.*, 2000).

#### 5.3.2 Aporte de sólidos por alimentación y metabolismo de los peces

Los sólidos que se acumulan en un estanque de cultivo de trucha tienen como fuentes principales el alimento no consumido y las heces fecales. La cantidad de alimento suministrado depende del peso y tamaño de los peces, por tanto, a mayor talla ingresa más alimento y por ende se acumulan mayores cantidades de sólidos en el estanque. Las tasas de asimilación del alimento para los peces alcanzan un rango entre el 70 y 75 %, indicando que entre el 25 y 30 % de los constituyentes del alimento son expulsados en las heces (Camacho *et al.*, 2000); para el nitrógeno la tasa de bioasimilación es del 30 al 50% y para el fósforo es del 80% (Dosdat *et al.*, 1996; citados por D`Orbcastel, 2007); es así como los sólidos sedimentables pueden contener de un 30 a un 80% de fósforo y 15-32% de nitrógeno total (Heinen *et al.*, 1996; Foy y Rosell, 1991; Bergheim *et al.*, 1993 citados por Stewart, 2006).

### 5.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN UN CULTIVO DE TRUCHA

Los sólidos suspendidos totales presentes en los sistemas de cultivo de trucha, poseen propiedades físicas determinadas, de forma, tamaño y capacidad de sedimentación y las químicas se caracterizan por presencia de materia orgánica biodegradable y nutrientes como fósforo y nitrógeno (Bilotta y Brazier, 2008).

#### 5.4.1 Características físicas

Las partículas que componen los sólidos, no tienen forma definida y su tamaño disminuye con el incremento de la velocidad de flujo del agua (Brinker, 2005 y Cripps, 1995), así como por el movimiento de peces y los sistemas de bombeo (Cripps, 1994, citado por Brinker, 2005).



La capacidad de sedimentación de los sólidos va ligada al tamaño de sus partículas, según la ley de Stokes, las partículas más pequeñas (o agregados de partículas) generalmente permanecen en suspensión en la columna de agua durante períodos más largos que las partículas grandes. Las partículas livianas tienden a ocupar la zona de la superficie del cuerpo de agua, mientras que las partículas pesadas la zona más profunda (Schindl *et al.*, 2005, citados por Bilotta y Brazier, 2008).

Según IDEQ (1997) citado por True (2004) las heces fecales completas y el alimento no consumido superan el tamaño de 814  $\mu\text{m}$  y presentan velocidades de sedimentación entre 2.01 y 4.99  $\text{cms}^{-1}$ , que son mucho mayores a las presentadas por partículas como las del rango entre 1.5 y 814  $\mu\text{m}$  que alcanzan velocidades entre 0.04-0.10  $\text{cm}^{-1}$ . Las bajas velocidades de sedimentación de las partículas pequeñas facilitan el abandono del estanque de cultivo. En un estudio realizado por Maillard (2005) se determinó que el tamaño predominante de las partículas presentes en el efluente truchícola están entre 1.5 y 30  $\mu\text{m}$ . Las partículas sólidas que abandonan el sistema pueden generarse por la fragmentación de los materiales o las heces fecales los cuales ven reducida su capacidad de sedimentación o por fenómenos de re-suspensión desde el fondo del estanque (Blanco, 1995).

#### 5.4.2 Características químicas

Los sólidos suspendidos contenidos en un estanque por su procedencia están compuestos por materia orgánica, nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, además de trazas de metales pesados y pesticidas; los cuales se encuentran encapsulados y pueden ser transferidos al cuerpo de agua si se generan procesos de descomposición in situ (Bilotta y Brazier, 2008). La composición de dichos sólidos está directamente asociada a la composición del alimento. Camacho *et al.* (2000), establecieron que el alimento proporcionado a un cultivo de trucha está compuesto por 12% de proteína, 10% de grasa, 50% de carbohidratos. En el alimento se determinó que el contenido de fósforo y nitrógeno alcanzan los 16.06 mg P y 29.5 mg N por gramo de alimento en base seca (García y Hall, 1996). Respecto a las excretas, Asgard y Hillestad (1998) citados por Cripps *et al.* (2000), establecieron que del alimento consumido, los peces excretan como residuos fecales: 13% de la proteína, 8% de grasa, 40% de carbohidratos (no digerible), el

17% en otras formas de materia orgánica, además de materia seca y cenizas. El 40% del nitrógeno proteínico ingerido es excretado en forma disuelta como nitrógeno amoniacal total (TAN) (Cripps *et al.*, 2000). Dosdat *et al.* (1996) citados por D`Orbcastel, (2007) reportaron que del 80 al 90% del nitrógeno soluble corresponde a los TAN y que el restante a la urea. La composición de los sólidos los convierte en sustrato para la proliferación de microorganismos, que participarán en procesos de degradación y disolución.

## 5.5 DISOLUCIÓN Y DEGRADACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN UN CULTIVO DE TRUCHA

Las partículas sólidas que ingresan a un estanque de cultivo de trucha están expuestas a sufrir cambios físicos, químicos y biológicos facilitando la transferencia de la contaminación desde la fracción sólida a la disuelta.

La degradación de materia orgánica se da por procesos hidrolíticos bióticos o abióticos, reduciendo el tamaño de las moléculas orgánicas complejas, las cuales posteriormente son oxidadas hasta liberar compuestos inorgánicos como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y minerales como fósforo y nitrógeno (Wetzel y Likens, 1991; citados por Álvarez, 2005).

### 5.5.1 Disolución de los sólidos suspendidos totales

Las fuerzas de corte generadas por los peces y el agua hacen que las partículas sólidas presentes al interior de los estanques se desintegren generando partículas de menor tamaño e incrementando el área específica. Por esta razón las partículas más pequeñas se disuelven más rápido en el agua que las grandes, transfiriendo la contaminación a la fracción disuelta y permitiendo la salida del sistema de cultivo con lo que se afectan las fuentes hídricas receptoras de los efluentes truchícolas (Camargo J y Alonso A, 2006 y Cripps *et al.*, 2000).

### 5.5.2 Degradación química

Los fenómenos físicos que ocurren al interior del estanque generan la disolución de los sólidos suspendidos, exponiendo a los materiales que los constituyen a sufrir procesos de oxidación química, dada la facilidad que tiene el oxígeno disuelto para oxidar las

diferentes moléculas especialmente la materia orgánica; estos procesos aumentan el consumo de oxígeno con lo que se disminuye su concentración (Roldan y Ramírez 2008), limitando la disponibilidad para los peces.

### 5.5.3 Degradación microbiológica

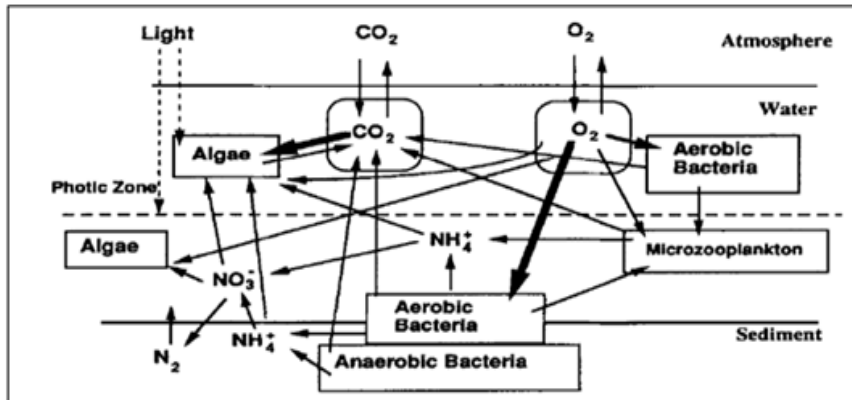
La materia orgánica acumulada al interior de los estanques de cultivo sirve como sustrato para el desarrollo de los microorganismos. Las altas concentraciones de oxígeno disuelto en un cultivo de trucha permiten la proliferación de especies aerobias y facultativas. Según Madigan (2003), estos microorganismos utilizan el oxígeno disuelto en la respiración, incrementando su consumo al reproducirse. La masificación de los microorganismos aerobios disminuye la cantidad de oxígeno disuelto disponible en los estanques, lo cual puede repercutir negativamente en el desarrollo de los peces (Blanco, 1995).

Además del consumo de oxígeno disuelto, la degradación de la materia orgánica por los microorganismos libera nutrientes como nitrógeno y fósforo que son causantes de los fenómenos de eutrofización.

### 5.5.4 Degradación de materia orgánica. Transformación del fósforo y nitrógeno

El proceso de degradación más importante que sufre la materia orgánica es la mineralización de las proteínas, aportadas por el alimento y las heces fecales de los peces. El proceso de mineralización del nitrógeno es realizado por la acción de bacterias heterótrofas, que originan productos tóxicos para el cultivo como son el amoníaco y los nitritos (Blanco, 1995). En la figura 1 se muestran las rutas de transformación de la materia orgánica carbonácea y nitrogenada.

Figura 1. Interacciones físicas, químicas y biológicas en un estanque de cultivo de trucha (Tomado de Moriarty, 1997).



Si los valores de pH y temperatura se incrementan la concentración de NH<sub>3</sub> aumenta, pero la de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> disminuye (Camargo y Alonso, 2006). A la suma de las dos formas se les denomina nitrógeno amoniacal total (TAN). Aunque ambos NH<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pueden ser tóxicos para los peces, la forma no ionizada es más tóxica por no tener carga, lo que le permite atravesar las membranas biológicas con mayor facilidad que los iones NH<sub>4</sub><sup>+</sup> cargados positivamente (Körner *et al.*, 2001).

La eliminación de contaminantes nitrogenados al agua, se da por nitrificación y denitrificación biológica, donde las bacterias nitrosomonas y nitrosococcus, transforman el amoníaco en nitritos; los nitritos resultantes de la oxidación del nitrógeno amoniacal, por la acción de la bacteria nitrobacter en presencia de oxígeno, se transforman en nitratos, los cuales no son tóxicos para los peces, pero en condiciones de ausencia de oxígeno pueden sufrir denitrificación y regresar a nitritos (Blanco, 1995).

La forma de nitrógeno más dañina para los peces es el amoníaco, en pequeñas cantidades provoca estrés, hace que los peces sean susceptibles a enfermedades bacterianas y disminuye su desarrollo; en altas concentraciones puede causar mortalidad (Floyd y Watson, 2005). Los valores tolerados por la trucha están por debajo de concentraciones de 0.012 mgL<sup>-1</sup> (APHA *et al.*, 1981 citados por Camacho *et al.*, 2000), con concentraciones iguales a 2.0 mgL<sup>-1</sup> puede causar muerte inmediata (Floyd y Watson, 2005). La excreta del pez es la principal fuente de amoníaco en los estanques, y es

proporcional al tipo de alimentación y el nivel de proteínas en el alimento (Hargreaves y Tucker, 2004) y (Jiménez-Montealegre *et al.*, 2002).

El fósforo en los estanques puede presentarse de forma particulada (orgánico) o como orto y polifosfato (inorgánico) procedente de las heces y orina de los peces. Este nutriente es el limitante en la masificación de la biota al interior de los sistemas acuáticos (Roldan y Ramírez, 2008). Según Ohle (1985) citado por Roldan y Ramírez (2008), la liberación del fósforo ocurre en la capa superficial del agua; antes de sedimentarse, el fosfato está formado inicialmente por fósforo orgánico disuelto, que es rápidamente descompuesto y asimilado por microorganismos. La parte que se sedimenta es de descomposición lenta, incrementándose en pH ácido y bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Los fosfatos no son tóxicos en un cultivo de truchas, pero estos pueden originar la proliferación de algas, lo cual induce un alto consumo de oxígeno en la noche (Blanco, 1995).

#### 5.5.5 Efecto de la degradación de sólidos suspendidos totales en el estanque.

Los sólidos suspendidos totales presentes en los estanques de cultivo de trucha pueden generar disminución en la visibilidad, reduciendo el consumo de alimento de los peces (Aquino, 2008), por otro lado, los sólidos en suspensión pueden generar enfermedades en las branquias (Cordone and Kelley, 1961, Ellis, 1944 y Kemp, 1949; citados por Bilotta y Brazier, 2008), reduciendo la captación del oxígeno lo que conlleva a la disminución de las tasas de crecimiento (Aquino, 2008).

Además, los sólidos suspendidos acumulados en los estanques, sufren procesos de degradación química y biológica, incrementando la concentración de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, lo que genera un hábitat propicio para la proliferación de microorganismos patógenos que pueden causar enfermedades infecciosas en los peces (Braaten *et al.*, 1986; Liltved y Cripps, 1999; citados por Cripps *et al.*, 2000 ), además de masificar el consumo de materia orgánica y reducir la cantidad de oxígeno disuelto (Welch y Lindell, 1992 citados por Cripps *et al.*, 2000) .

La descomposición biológica de la materia orgánica por parte de bacterias aeróbicas y facultativas, genera una demanda de oxígeno en los estanques de cultivo de trucha por lo que se disminuye el oxígeno disponible para que los peces suplarn sus necesidades

metabólicas y asimilen el alimento ingerido, las bajas concentraciones de oxígeno, hacen que el pez se estrese, situación que se refleja en cambios de comportamiento y tendencia a agruparse al inicio del estanque, donde se encuentran las máximas concentraciones de oxígeno (Blanco, 1995).

Por otro lado, Buryniuk *et al.* (2006) estableció que las tasas de crecimiento en bajas concentraciones de oxígeno pueden verse afectadas por la generación de gases tales como nitrógeno, dióxido de carbono, metano y sulfuro de hidrógeno. Valores entre los 5.5 y los 3.0 mgL<sup>-1</sup> de oxígeno disuelto generan asfixia en la trucha, mientras que valores por debajo de los 3.0 mgL<sup>-1</sup> causan altas tasas de mortalidad (Blanco, 1995).

## 5.6 IMPACTO GENERADO POR EL CULTIVO DE TRUCHA EN LAS FUENTES HÍDRICAS RECEPTORAS

El cultivo de trucha genera dos tipos de efluentes, el principal y el de lavado; el efluente principal tiene un caudal asociado al 85 – 99% del flujo de agua que ingresa al estanque (True *et al.*, 2004); según Cripps y Bergheim (2000), el efluente principal puede tener concentraciones de sólidos suspendidos totales entre 5 y 50 mgL<sup>-1</sup>, que por su bajo valor dificultan el tratamiento del efluente con sistemas convencionales de tratamiento para agua residual doméstica. El efluente de lavado, representa solamente del 1 al 15% del afluente de entrada, los niveles de sólidos suspendidos que contiene dependen de las condiciones operacionales en el proceso de lavado y el tiempo de acumulación de los sólidos. Las concentraciones pueden llegar hasta valores de 422 mgL<sup>-1</sup> según lo reportado por Yasnó y García (2007).

El efluente principal de operación de un estanque truchícola se caracteriza por contener bajas concentraciones de sólidos suspendidos totales, nitrógeno y fósforo, que alcanzan valores de 14, 1.4 y 0.13 mgL<sup>-1</sup> respectivamente (Cripps y Kelly, 1996). Sin embargo, por la alta cantidad de agua que ingresa al cultivo de trucha, las cargas contaminantes generadas son significativas. Estudios realizados, muestran que para la producción de 1.0 Ton de trucha al año, se evacuan alrededor de 83 ton de sólidos suspendidos, 7.0 Ton de nitrógeno total y 4.0 Ton de fósforo (Fernández *et al.*, 2010). Las permanentes descarga

de materia orgánica y nutrientes generan un impacto ambiental variable, que puede alterar el régimen hidrológico, introducir especies impropias en el medio silvestre y la contaminación del recurso hídrico (Midlen y Redding, 1998; Lee *et al.*, 2001, citados por Pulatsu *et al.*, 2004).

#### 5.6.1 Impacto generado por el cultivo de trucha sobre el ecosistema acuático

El vertimiento en las fuentes hídricas de los contaminantes generados por el cultivo de trucha causa efectos adversos sobre las especies acuáticas, debido a la modificación de las condiciones ambientales (Camargo *et al.*, 2010), los contaminantes pueden estar en forma sólida, compuesta por materia orgánica y en forma disuelta, generalmente constituida por nitrógeno y fósforo (Ben-David *et al.*, 1998, Bilbao *et al.*, 1996, Johnston *et al.*, 2004, McConnachie y Petticrew, 2006; citados por Bilotta y Brazier, 2008), al ser depositados sobre fuentes receptoras, generan problemas de eutrofización, provocando crecimiento de fitoplancton, deterioro de sistemas acuáticos y como consecuencia la disminución de especies nativas o propias de sistemas oligotróficos (Figueroa y Marino, 2004). Según Camargo *et al.* (2006), la contaminación por nitrógeno inorgánico, puede inducir la aparición de algas tóxicas y alterar la capacidad de los animales acuáticos para sobrevivir, crecer y reproducirse como consecuencia de la toxicidad directa de compuestos nitrogenados.

El ingreso de sólidos a un cuerpo de agua, con baja capacidad de depuración, puede causar acumulación de sedimentos, generando disminución de oxígeno disuelto por proceso de degradación (Jones, 1990, Camargo, 1994, Boaventura *et al.*, 1997, Selong y Helfrich, 1998, Bartolietal, 2007, Simões *et al.*, 2008, Ruiz-Zarzuela *et al.*, 2009, citados por Camargo *et al.*, 2010), además, la presencia de sólidos y nutrientes masifica la presencia de macrófitas en los cuerpos de agua, que al morir depositan altas cantidades de materia orgánica, generando obstrucción del paso de la luz del sol y altos consumos de oxígeno para su degradación, conllevando a condiciones de anoxia en el agua y generando muerte a la biota silvestre (Heathwaite, 1994; citado por Bilotta y Brazier, 2008).

### 5.6.2 Impacto generado sobre la calidad del agua para uso humano

La contaminación de las aguas superficiales por nutrientes pueden inducir efectos adversos en la salud humana, especialmente la ingestión de nitritos y toxinas de algas, pueden causar diarrea, vómito, gastroenteritis, entre otras (Camargo y Alonso, 2006). Los efluentes de cultivo de trucha, además de su composición fisicoquímica, están conformados por contaminantes bacteriológicos (Boaventura *et al.*, 1997), a los cuales se les puede atribuir, posibles enfermedades.

La acumulación de fitoplancton, la muerte y descomposición del material vegetal en las fuentes receptoras, pueden generar olor y sabor desagradable, reduciendo su uso como recurso recreacional y de consumo (Figueroa y Marino, 2004). Esta problemática, requiere mejoras adicionales en procesos de tratamiento del agua, para su reutilización, por ejemplo, adsorción sobre carbón activado, la coagulación química, encalado, ozonización, ultrafiltración; aumentando gastos en el seguimiento y tratamiento del agua, incluyendo la limpieza y los procedimientos de restauración (Camargo y Alonso 2006).



## 6. METODOLOGÍA

### 6.1 LOCALIZACIÓN

El trabajo propuesto se llevó a cabo en la Piscícola Chiliglo ubicada en el corregimiento de Coconuco, municipio de Puracé, zona centro del Departamento del Cauca, entre los 2° 20' de latitud norte y 76° 28' de longitud, al oeste. La altura de la estación piscícola sobre el nivel del mar es de 2850 metros, la temperatura media es de 14°C, con precipitaciones anuales entre 1700 y 1800 mm (Plan de Desarrollo, 2008).

### 6.2 DESCRIPCIÓN DEL ESTANQUE

Se utilizó un estanque convencional rectangular hecho en concreto. Las dimensiones del estanque son: 15 m de largo, 2 m de ancho y 1 m de alto. La altura promedio de la columna de agua es de 0.7 m.

### 6.3 CONDICIONES INICIALES DE OPERACIÓN DEL ESTANQUE

Para dar inicio al estudio se utilizó un estanque totalmente limpio cubierto con poli sombra, garantizando un 80% de reducción en la radiación solar, con el fin de evitar el crecimiento de algas.

### 6.4 DESARROLLO DEL PRIMER OBJETIVO

Para establecer las tasas de transferencia de contaminantes desde los sólidos acumulados hacia la fracción disuelta en el estanque, se realizaron muestreos por 6 días consecutivos. Se hicieron dos ensayos de medición para comprobar los datos obtenidos. Las condiciones operacionales del cultivo fueron las descritas en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones operacionales de cultivo

CARACTERÍSTICA	ENSAYO 1	ENSAYO 2
Caudal promedio inicial de entrada ( $L s^{-1}$ )	4.80	4,7
Número de peces (unidades)	1680	1642
Peso promedio inicial de los peces (g)	112	114
Alimentación de los peces (g por ración)	689	654
Raciones diarias de alimento	5	5
Densidad de cultivo ( $Kg L^{-1}$ )	8.96	8.94

Colecta de muestra.

La toma de las muestras se realizó utilizando dos métodos denominados muestreo puntual y muestreo compuesto.

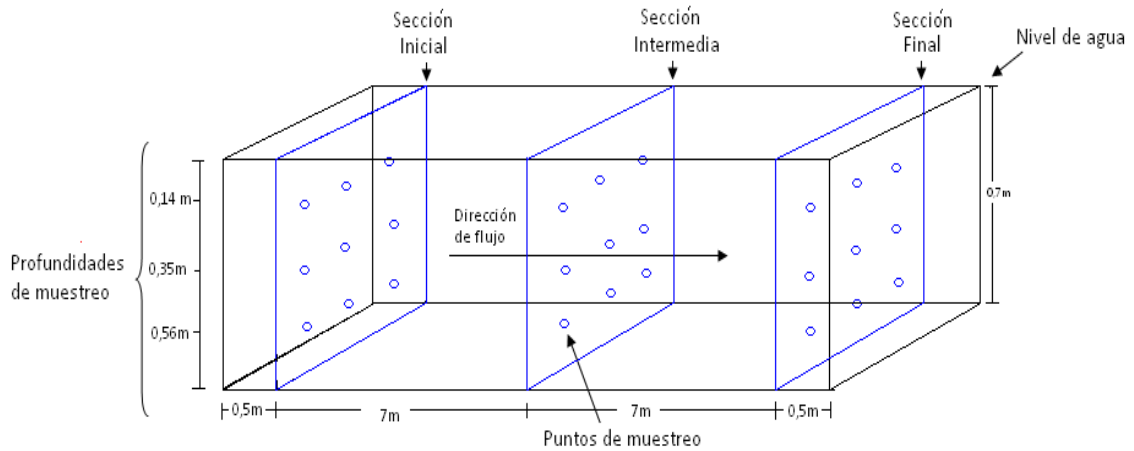
Muestreo puntual: Para obtener las características instantáneas del cuerpo de agua en el estanque, se realizaron mediciones de los parámetros citados en la tabla 2, utilizando sondas y electrodos que permiten su medición in situ. Las metodologías usadas están apoyadas en los procesos descritos por la American Water Works Association (AWWA, 1998).

Tabla 2. Parámetros a medir y procedimiento estándar

Parámetro	Procedimiento Standard Methods
Oxígeno disuelto ( $mg L^{-1}$ )	4500 – O G
Temperatura agua °C	--
Ph	4500 H
Sólidos disueltos ( $mgL^{-1}$ )	--

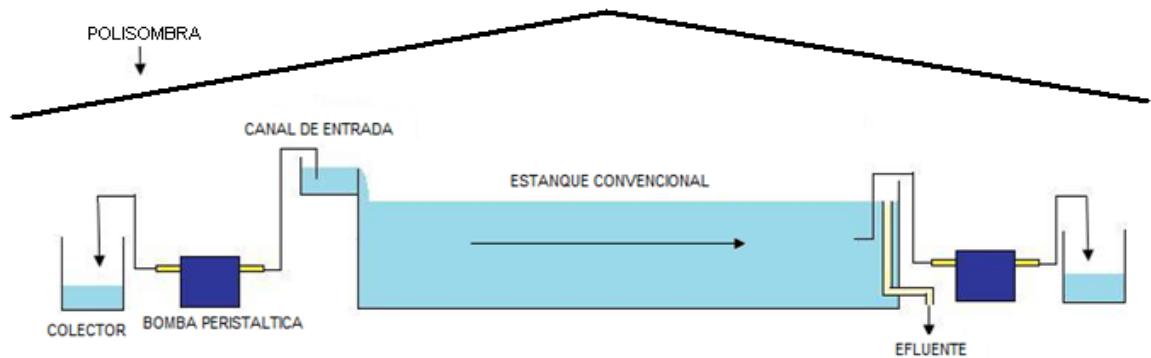
Las lecturas se realizaron a diferentes profundidades a lo largo y ancho del estanque. Se midió en tres secciones denominadas inicio, intermedio y final, cada una de estas secciones estuvo integrada por nueve puntos de muestreo como lo muestra la figura 2.

Figura 2. Secciones y puntos para muestreo puntual



Muestreo compuesto: Para obtener una muestra representativa tanto del afluente como del efluente del estanque se realizó muestreo compuesto con el fin de establecer cómo varían las concentraciones de nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos y disueltos, por la degradación y disolución, con el paso del tiempo. Se usaron dos bombas peristálticas para recolección de agua a la entrada y salida del estanque (figura 3), las cuales extrajeron un caudal aproximado de  $39 \text{ ml min}^{-1}$  para obtener una muestra compuesta de 28 L aproximadamente, en 12 horas.

Figura 3. Montaje de muestreo compuesto



La muestra compuesta fue homogeneizada para posteriormente tomar el volumen requerido para realizar los análisis de laboratorio. Dichas muestras, fueron almacenadas a 4 °C por un periodo máximo de 24 horas. Se realizaron análisis a dos tipos de muestra una no filtrada y otra filtrada a través de una membrana de celulosa con tamaño de poro de 0.45 µm. En la tabla 3 se encuentran los parámetros medidos, así como los procedimientos establecidos por la American Water Works Association (AWWA, 1998) que se utilizaron.

Tabla 3. Parámetros medidos, tratamiento y procedimiento estándar.

Parámetro	Muestra		Procedimiento Standard Methods
	Filtrada	No Filtrada	
Fósforo (mgL <sup>-1</sup> )	X	X	4500 – P C
Nitrógeno total(mgL <sup>-1</sup> )	X	X	4500 - N <sub>org</sub> B
Nitrógeno amoniacal(mgL <sup>-1</sup> )	X		4500 – NH <sub>3</sub> F
Temperatura °C		X	--
pH		X	4500 H
Sólidos disueltos (mgL <sup>-1</sup> )		X	--
Sólidos suspendidos (mgL <sup>-1</sup> )		X	2540 D

#### Balance de masa

Para realizar el balance de masa se estableció la cantidad de sólidos totales y de nutrientes de ingreso (alimento y afluente) y egreso del sistema.

Los sólidos de ingreso por alimento se determinaron teniendo en cuenta los gramos por ración suministrados al cultivo (tabla 1), mientras que la cuantificación de sólidos en afluente y efluente se realizó de acuerdo con el procedimiento estándar descrito en la tabla 3.

Los nutrientes aportados por el alimento se establecieron tomando una muestra en base seca, la cual fue diluida en agua destilada para posteriormente aplicar los Standard Methods descritos en la tabla 4; este procedimiento se realizó por triplicado y el promedio de los resultados fue el dato utilizado para los balances de masa. La determinación de nitrógeno y fósforo en afluente y efluente se realizó de acuerdo con lo descrito en el muestreo compuesto.

Tabla 4. Procedimiento estándar para la determinación de nutrientes en tejido animal y alimento.

Parámetro	Procedimiento Standard Methods
Fósforo ( $\text{mgL}^{-1}$ )	4500 – P C
Nitrógeno total( $\text{mgL}^{-1}$ )	4500 - N <sub>org</sub> B

Para establecer la cantidad de nutrientes que se acumularon en el fondo del estanque, se determinó lo acumulado en el tejido animal; se tomó una muestra del cultivo (2 peces por ensayo), se trituró y se sometió a secado para eliminar la humedad, luego se procesó con el método utilizado para el alimento.

#### Porcentaje de humedad tejido animal y alimento

Se tomaron muestras de tejido y alimento, se trituraron y se llevaron a 105 °C por dos horas y se encontró la diferencia de pesos antes y después de este proceso.

### 6.5 DESARROLLO DEL SEGUNDO OBJETIVO

Para determinar el efecto causado por la reducción de ingreso de oxígeno en las tasas de crecimiento en biomasa de los peces, se establecieron 4 periodos de 15 días, el primero contó con el 100% del caudal de abastecimiento, posteriormente este se fue reduciendo en un 10, 15 y 20%, teniendo en cuenta el peso adquirido por los peces en el periodo inmediatamente anterior y la variación en los requerimientos de oxígeno debido al aumento de biomasa. Los cálculos de caudal se realizaron considerando los consumos de oxígeno disuelto teóricos reportados por Liao (1970) citado por Blanco (1995) (Ver Anexo C. Cálculo C.1).

Para garantizar que la calidad del agua al interior del estanque no afectara las tasas de crecimiento de los peces, se realizó el lavado del estanque al inicio de cada periodo de operación.

#### 6.5.1 Colecta de muestra de peces y proceso de pesaje

Se realizó la captura de alrededor de 50 peces que representaron entre el 2 y 3 % del cultivo para establecer el peso promedio de la población al interior del estanque. Este proceso se llevó a cabo al inicio y al final de cada periodo con el fin de determinar las tasas de crecimiento absolutas para cada caudal, las cuales se determinaron utilizando el método sugerido por Soriano y Hernández (2002).

#### 6.5.2 Muestreo para el seguimiento de calidad del agua.

Con el fin de conocer la calidad del agua con la que se determinó la tasa de crecimiento de los peces, se realizaron mediciones de los mismos parámetros fisicoquímicos establecidos en el objetivo 1 para muestra no filtrada, con una periodicidad de tres días.

### 6.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para realizar caracterización del comportamiento de los diferentes parámetros físico químicos tenidos en cuenta en este estudio se utilizó estadística descriptiva. Los resultados obtenidos están presentados numérica y gráficamente, se tuvieron en cuenta medidas de tendencia central, de dispersión y distribución de frecuencias.

Para obtener una generalización del estudio realizado se usaron herramientas de la estadística inferencial como son: estimación y prueba de hipótesis (prueba t) y modelos de regresión.

## 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 7.1 Objetivo 1

En el estudio se establecieron las tasas de transferencia de contaminantes desde los sólidos suspendidos totales acumulados, a la fracción disuelta en el interior de un estanque para cultivo de trucha.

Para determinación de las tasas de transferencia, al igual que para el tratamiento de algunos parámetros como caudal, sólidos suspendidos totales y nutrientes, se utilizó el método denominado promedio corrido, donde los datos a utilizar se generan promediando toda la información puntual disponible en un tiempo definido, con los valores obtenidos se realizan la caracterización y el posterior análisis. Los datos puntuales y el promedio corrido de cada uno de los parámetros se muestran en el anexo A.

Se realizó control sobre algunas variables como son caudal, cantidad de alimento suministrado y horario de alimentación; sin embargo, algunos parámetros como temperatura del agua y pH no fueron controlados y estuvieron definidos por las condiciones ambientales de la zona.

#### 7.1.1 Parámetros influyentes en las tasas de transferencia.

- Caudal

El ingreso permanente de agua al estanque para cultivo de trucha influye en la preservación de las condiciones físico químicas y microbiológicas óptimas para el desarrollo de los peces (Blanco, 1995). Mantener un caudal controlado garantiza el ingreso del oxígeno requerido en el sistema. Como se muestra en la tabla 1, en el estanque de cultivo se albergaron 1680 y 1642 peces con pesos promedio de 112 y 114 g para los ensayos 1 y 2 respectivamente. La cantidad de oxígeno que se requiere para peces con estas características es de  $228 \text{ mg O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  según lo sugerido por Liao (1970) citado por Blanco (1995) para temperaturas entre 5 y 20 °C.

En el primer ensayo, el estanque tuvo un ingreso de caudal de  $4.72 \text{ Ls}^{-1} \pm 0.03$  (Intervalo de confianza IC 95%) y desviación estándar de 0.064, en el segundo periodo el flujo fue de  $4.71 \text{ Ls}^{-1} \pm 0.01$  (IC 95%) y desviación estándar de 0.016 lo que demuestra que el flujo de agua fue constante a lo largo de los periodos de estudio (Ver Anexo A. Tabla A.1); garantizando que las condiciones iniciales de operación cumplieran con una concentración mayor o igual a  $5.5 \text{ mgL}^{-1}$  al final del estanque, de tal manera que los peces suplan sus necesidades de oxígeno y el sistema pueda asimilar las fluctuaciones de consumo que se presentan a diferentes horas del día, ya sea por incremento de temperaturas o por procesos metabólicos (Blanco, 1995).

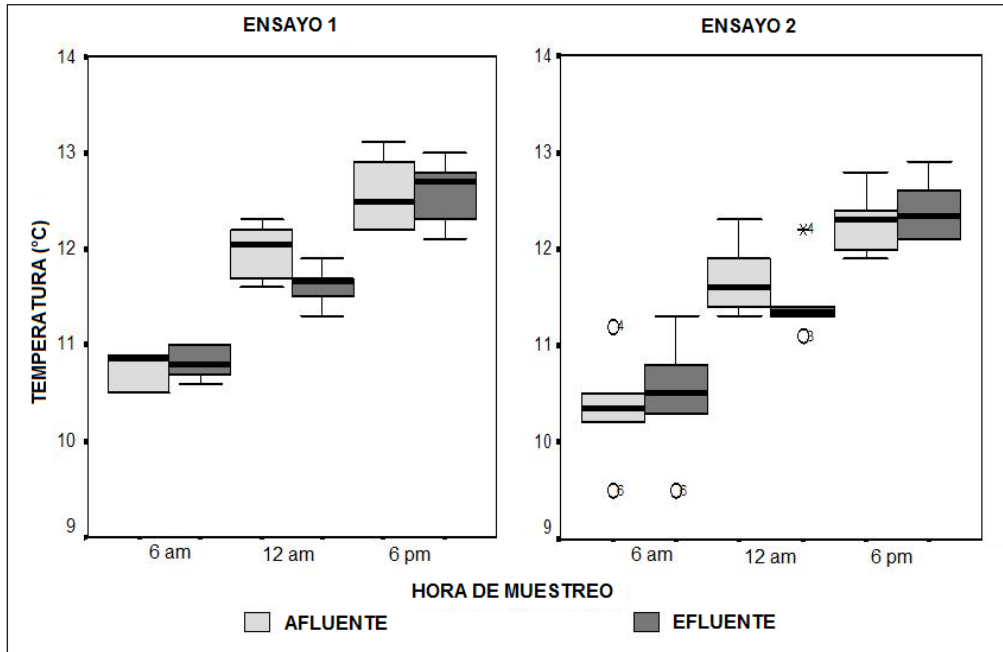
- Temperatura

Los valores de temperatura se encontraron en un rango entre 11 y  $12^{\circ}\text{C}$  (Ver anexo A. Tabla A.2), condiciones en las que el crecimiento y desarrollo de la trucha son adecuados (Aquino, 2008), sin embargo, la temperatura óptima de crecimiento es de aproximadamente  $15^{\circ}\text{C}$ , según Blanco (1995).

La figura 4 muestra la temperatura de afluente y efluente a diferentes horas del día, para los ensayos 1 y 2. Se observa que en ambos casos, las temperaturas más altas se dieron en las últimas horas del día, debido a la irradiación solar; es posible que esto cause un incremento en los fenómenos de degradación de la materia orgánica (Lonborg *et al.*, 2009). Las temperaturas más bajas se dieron sobre las 6 de la mañana, esto se puede presentar debido a que en la noche y las primeras horas del día la temperatura del agua de abastecimiento disminuye (Argumedo y Rojas, 2000).



Figura 4. Temperatura a diferentes horas del día. Ensayo 1 y 2



Al realizar el análisis estadístico (prueba t pareada) de la totalidad de los datos, se encontró que no hay diferencias significativas entre las temperaturas del afluente y efluente en el transcurso de los dos ensayos como se muestra en la Tabla 4, esto indica que los procesos que ocurren al interior del estanque, asociados a metabolismo del pez y degradación de materia orgánica, no causan efectos considerables sobre la temperatura del agua.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de temperatura (°C) Afl – Efl. Ensayo 1 y 2

ENSAYO	PARAMETRO	PROMEDIO	INT. CONFIANZA 95%	DESV. ESTANDAR	P-VALUE. PRUEBA tAfl-Efl
1	Temp. Aflu.	11.81	± 0.40	0.82	0.247
	Temp. Eflu.	11.73	± 0.39	0.80	
2	Temp. Aflu.	11.51	± 0.46	0.95	0.757
	Temp. Eflu.	11.49	± 0.44	0.91	

- Potencial de Hidrógeno

Los valores de pH encontrados en este estudio están en el intervalo de 6.5 – 8.3 (Ver Anexo A. Tabla A.2), los cuales son apropiados para la producción de trucha; según lo reportado por Blanco (1995) y Aquino (2008).

Los factores que inciden en los cambios de pH al interior de un estanque, están asociados a los productos de oxidación de materia orgánica (Roldan, 2008) y respiración de peces y algas (Blanco, 1995). En la comparación estadística (prueba t pareada) realizada entre afluente y efluente no se encontraron diferencias significativas,  $p \text{ value} > 0.05$  para ambos ensayos; por tanto, se evidencia que los procesos de oxidación y respiración que se dan en el estanque no generan cambios en las características de calidad de agua por este parámetro.

#### 7.1.2 Sólidos suspendidos totales.

Las concentraciones promedio de los sólidos suspendidos totales en el efluente fueron de 1.85 mg SST L<sup>-1</sup> para el ensayo 1 y 3.62 mg SST L<sup>-1</sup> para el ensayo 2, dichas concentraciones se encuentran cercanas al  $2.4 \pm 1.6$  mg SST L<sup>-1</sup>, establecido por Boaventura *et al.* (1997) para una granja de capacidad media (55 toneladas producción de trucha anual). Los estadísticos descriptivos de las concentraciones medidas en el afluente y el efluente se resumen en la tabla 5 (Datos puntuales, anexo A.1).

Tabla 6. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de sólidos suspendidos totales (mgL<sup>-1</sup>). Ensayos 1 y 2.

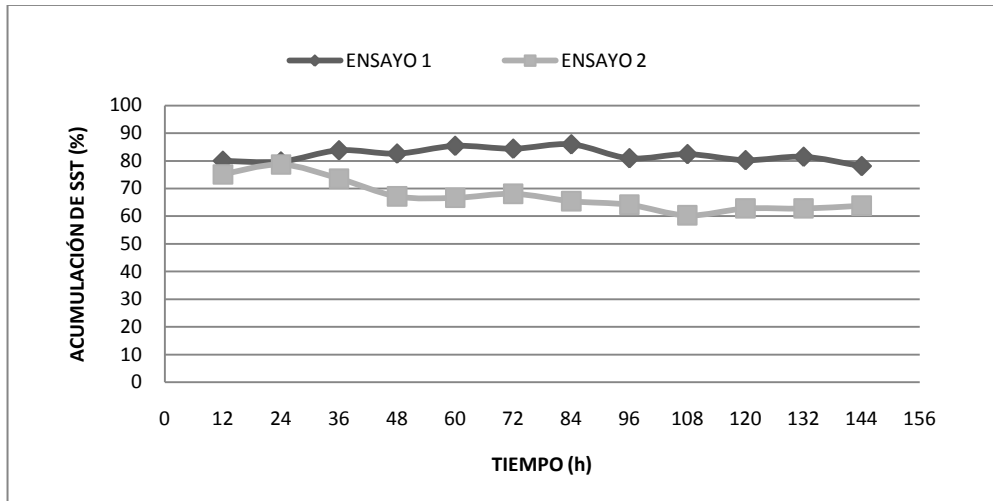
ENSAYO	PARÁMETRO	PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	DESV. ESTANDAR	N° DATOS
1	SST. Aflu.	1.88	2.55	0.4	0.635	13
	SST. Eflu.	1.85	3.20	1.35	0.485	
2	SST. Aflu.	3.82	4.76	1.60	0.911	
	SST. Eflu.	3.62	4.76	2.27	0.794	

- Acumulación de Sólidos Suspendidos Totales en el estanque

La cantidad de sólidos suspendidos totales que ingresaron al sistema, fue determinada teniendo en cuenta la cantidad de sólidos aportados por afluente y el alimento suministrado. Se pudo establecer que la mayor parte de sólidos que ingresaron al sistema fueron aportados por el alimento, con porcentajes de 75.36% y 62.23% para los ensayos 1 y 2 respectivamente (Ver Anexo A. Tabla A.3).

Se determinaron los porcentajes de retención de sólidos suspendidos totales en los dos periodos de estudio; en el primer periodo se presentó una retención promedio del 82.07% y en el segundo del 67.39% (figura 5), valores cercanos a los obtenidos por Montañó y Sandoval (2008), quienes reportan un 77% de retención, para un estanque en operación normal.

Figura 5. Porcentajes de acumulación de sólidos suspendidos totales. Ensayo 1 y 2.

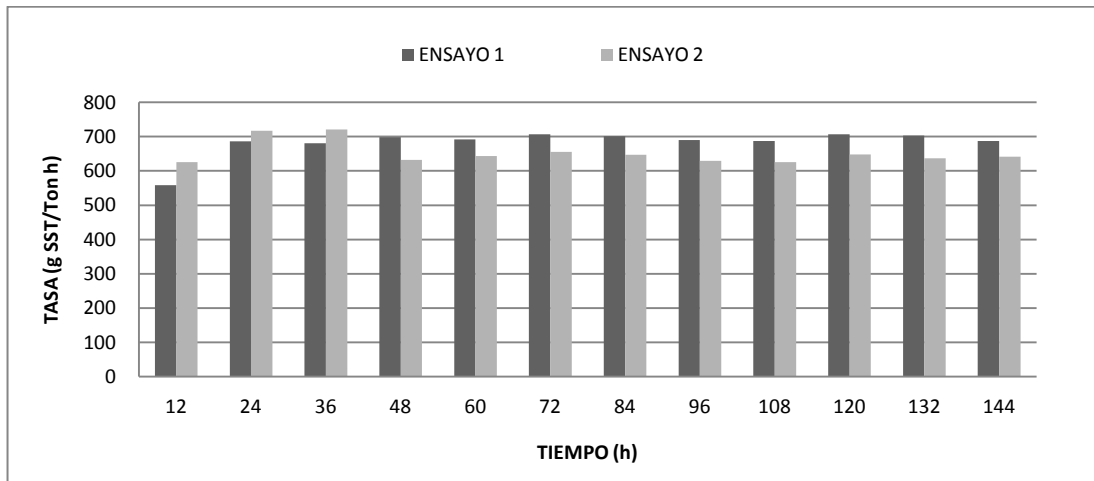


La diferencia encontrada entre los porcentajes de retención para los dos periodos de muestreo, puede estar asociada a la cantidad y características de los sólidos de ingreso; como se observó, el segundo periodo de estudio presentó una menor retención de sólidos que el primero; sin embargo, su contribución por afluente fue superior. La mayor cantidad de sólidos que ingresaron por la fuente de agua se pueden relacionar con factores ambientales ya que en el segundo ensayo se presentó una mayor cantidad de lluvia, por

tanto, el afluente tiende a tener más partículas en suspensión a causa de la turbulencia (Cripps *et al.*, 2000); por otro lado, la lluvia causa un incremento en la velocidad de flujo de la fuente de abastecimiento, conllevando a la disminución del tamaño de las partículas como lo afirman Brinker (2005) y Cripps (1994); al poseer menor tamaño, éstas tienden a permanecer por más tiempo en la columna de agua (Schindl *et al.*, 2005; citados por Bilotta y Brazier, 2008) y pueden ser arrastradas más fácilmente por la corriente, sin permitir que sean retenidas dentro del sistema.

Se calcularon las tasas de acumulación de los sólidos suspendidos totales (Ver Anexo B. Cálculo B.1), como se puede observar en la figura 6, la magnitud de dichas tasas es similar en todo el proceso de evaluación para ambos periodos de muestreo (Ver Anexo B. Tabla B.1); presentaron diferencias significativas entre ellas ( $p$  value < 0.05), con valores promedio de  $683.33 \pm 25.48$  y  $652.00 \pm 20.55$  g SST  $h^{-1}Ton^{-1}$  pez, para los ensayos 1 y 2 respectivamente. La menor tasa de acumulación se presentó en el ensayo 2, esto podría estar asociado a la cantidad y propiedades de los sólidos suspendidos totales que ingresaron por afluente.

Figura 6. Tasas de acumulación de sólidos suspendidos totales. Ensayo 1 y 2.



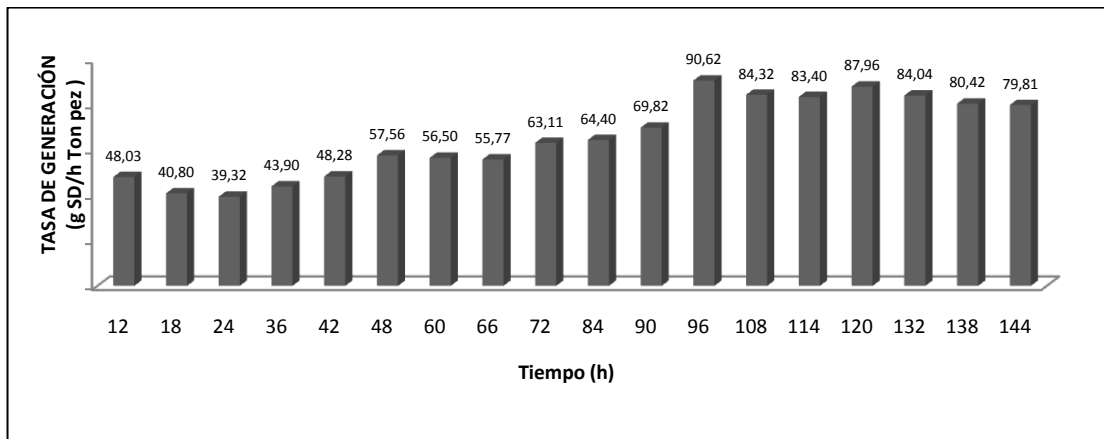
- Disolución y degradación de sólidos suspendidos totales

Los sólidos que se acumulan al interior del estanque, por su composición y características físicas pueden sufrir procesos hidrolíticos, bióticos o abióticos, facilitando su degradación y disolución, fenómeno que se puede ver reflejado en el incremento de la cantidad de sólidos y nutrientes en fracción disuelta y el aumento en el consumo de oxígeno (Wetzel y Likens, 1991; citado por Álvarez, 2005).

- Incremento de los sólidos disueltos por procesos de degradación y disolución.

Para establecer el paso de los sólidos suspendidos totales de la fracción sólida a la disuelta, se determinó la tasa de generación de sólidos disueltos en los dos ensayos (Ver Anexo B. Cálculo B.2). La figura 7 muestra que en las 144 horas (6 días) de evaluación, hay variaciones en la magnitud de las tasas de generación de sólidos disueltos.

Figura 7. Tasas de generación de sólidos disueltos ( $\text{g SD h}^{-1} \text{Ton}^{-1} \text{pez}$ ) para el ensayo 1.



Uno de los factores de contribución relativamente constante y permanente de sólidos disueltos al interior del sistema es el metabolismo de los peces, los cuales excretan materiales líquidos y gases fácilmente solubilizados en el agua que atraviesa el estanque (Floyd y Watson, 2005; Cho *et al.*, 1994 citados por True *et al.*, 2004 y Coloso *et al.*, 2003).

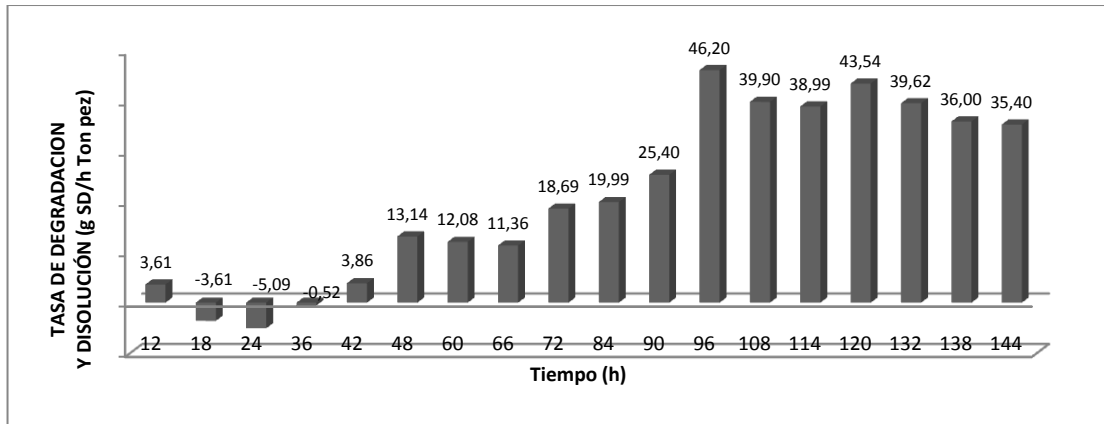
En el periodo comprendido entre las 0 y 24 horas los valores no presentan grandes modificaciones dado que las tasas están definidas por el metabolismo de los peces y no por la degradación de los sólidos, además en este periodo de tiempo la cantidad de sólidos acumulados es mínimo y por ende las contribuciones en las tasas son considerablemente menores que el aporte por el metabolismo.

A partir de la hora 36 se observa que las tasas inician un incremento paulatino y posteriormente se hacen relativamente constantes hacia la hora 96. El incremento de los sólidos disueltos en este periodo de tiempo puede deberse a los procesos de conversión de materiales orgánicos por factores químicos y microbiológicos y serán profundizados con base en lo encontrado en las determinaciones de oxígeno disuelto y nutrientes que se discutirán más adelante.

Por otra parte, se establecieron las tasas de generación de sólidos disueltos especialmente asociadas a los procesos de disolución y degradación de los sólidos suspendidos totales acumulados al interior del estanque (Ver Anexo B. Tabla B.2). Para calcular dichas tasas se omitió la contribución hecha por el metabolismo de los peces, es decir, a las tasas totales mostradas en la figura 7, se le sustrajo una tasa promedio de  $44.42 \text{ g SD h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$  pez determinada por las tasas encontradas en las primeras 24 horas de iniciado el muestreo, tiempo durante el cual, se asume que los sólidos disueltos generados están asociados principalmente al metabolismo de los peces, el cual presenta modificaciones en el transcurso del día por los horarios de alimentación que se realizan casi en su totalidad durante las horas de la mañana y la tarde. Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo B. Tabla B.2.

La figura 8 muestra el incremento en las tasas de generación de sólidos disueltos asociadas principalmente a los procesos de degradación y disolución. Se observa que en las primeras horas del muestreo (0-36 h) las tasas obtenidas son muy cercanas a cero e incluso hay valores de magnitud negativa, debido a que el cálculo de las tasas base comprende la actividad metabólica de los peces. A partir de la hora 42 se observa que las tasas de generación de sólidos disueltos, por efecto de la degradación y disolución, tienen un marcado crecimiento hasta la hora 96, esto posiblemente debido a la masificación de los procesos de oxidación tanto químicos como microbiológicos.

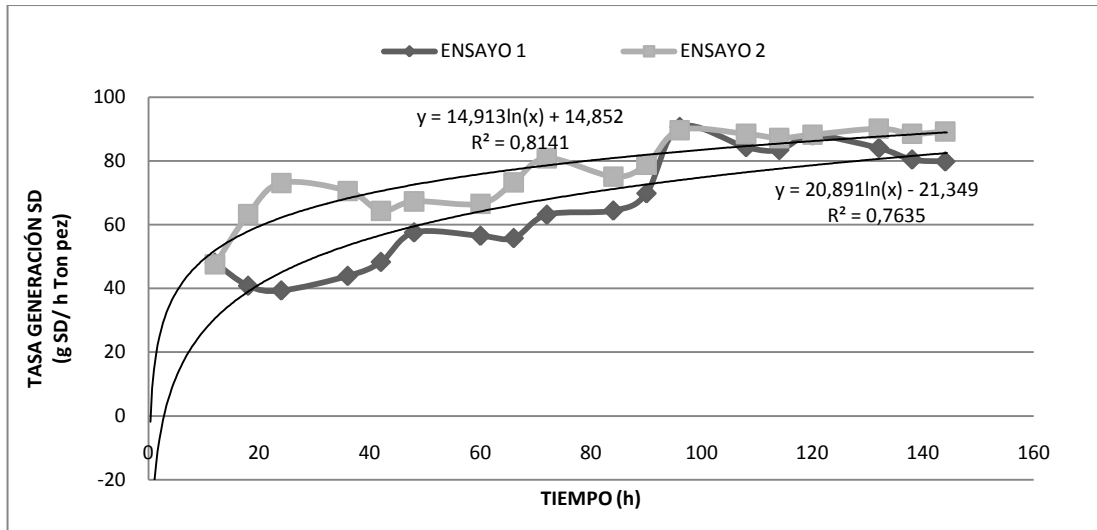
Figura 8. Tasas de degradación y disolución de sólidos disueltos ( $\text{g SD h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$  pez) para el ensayo 1.



En el segundo ensayo, se observaron las mismas tendencias en el incremento en las tasas de generación de sólidos disueltos, las cuales se masifican y posteriormente se estabilizan hacia la hora 96 (Ver Anexo B. Figura B.1). Los valores promedio de las tasas de generación de sólidos disueltos por degradación y disolución de la materia orgánica fue de  $37.01 \text{ g SD h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$  pez en el ensayo 1 y  $33.38 \text{ g SD h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$  pez en el ensayo 2, lo que evidencia similitud en los fenómenos que sufren los sólidos acumulados en los estanques de trucha.

La similitud en las tendencias del incremento en las tasas de generación de sólidos disueltos en los dos ensayos se muestra en la figura 9, donde la función logarítmica presenta los mayores coeficientes de correlación de Pearson, indicando que existe una alta dependencia entre la tasa de degradación y disolución de los sólidos con el tiempo. En la figura 9, se muestra como desde las 0 hasta las 96 horas se presentan los incrementos en las tasas y desde las 96 a las 144 horas, hay una estabilización con promedios de  $84.37 \pm 3,57$  y  $88.80 \pm 0,91 \text{ h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$  pez para los ensayos 1 y 2 respectivamente, que no representan grandes modificaciones.

Figura 9. Tasa de generación de sólidos disueltos (SD).Ensayo 1 y 2.



Henze *et al.* (2002) citado por Torres (2005) establecieron que 50% de la materia orgánica que se metaboliza se convierte en células bacterianas y considerando que el material que se deposita al interior del estanque de cultivo proviene principalmente de los residuos de alimento y las heces fecales que se caracterizan por poseer cantidades considerables de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, puede servir como sustrato para la proliferación de microorganismos que permitan la degradación del material acumulado. Al analizar los coeficientes de correlación de Pearson que fueron 81.41 y 76.35 % en los ensayos 1 y 2 respectivamente para un ajuste logarítmico, la aparición de los sólidos disueltos se podría comparar con masificación de los microorganismos en los estanques de cultivo, donde al inicio se observa un crecimiento rápido que posteriormente tiende a estabilizarse, lo cual es un comportamiento típico en la reproducción de la microbiota.

Después de la hora 96 se evidencia una estabilización en las tasas de generación quizá por el establecimiento de un equilibrio entre la cantidad de sustrato que ingresa al sistema y la proliferación de microorganismos, como lo establecen Avnimelech *et al.*(1994).



La masificación de los microorganismos al interior del sistema, aumenta la degradación de la materia orgánica, lo que trae consecuencias secundarias como son la liberación de nutrientes como fósforo y nitrógeno, así como un marcado incremento en el consumo de oxígeno al interior del estanque.

### 7.1.3 Nutrientes.

Para obtener un desarrollo eficiente del cultivo de peces es necesaria la inclusión de dietas ricas en materia orgánica como fuente de energía y nutrientes, entre ellos nitrógeno y fósforo. Las mediciones realizadas muestran que la masa corporal de las truchas se constituye en un 75.02% de agua y un 24.98% en tejido seco. El tejido seco se caracteriza por contener 13.6% de nitrógeno y 1.73% de fósforo que junto con el carbono constituyen los elementos más abundantes en el cuerpo del animal.

Por otro lado, los análisis de laboratorio indican que el alimento utilizado en el desarrollo de la investigación contiene 9.08% de humedad, 9.8% de nitrógeno y 1.3% de fósforo, estos dos últimos en base seca. El porcentaje de nitrógeno obtenido en el alimento se encuentra por encima del 6.87% reportado por Alpaslan y Pulatsü (2008) mientras que el contenido de fósforo presentó un valor similar al reportado por Alpaslan y Pulatsü (2008).

El contenido de nutrientes en el alimento utilizado en los cultivos de trucha, es mayor al requerido por los peces, esto debido a la incompleta biodigestibilidad; según lo reportado Kubitza (1998) los peces retienen entre un 70 a 75% del alimento suministrado, el resto es aportado directa o indirectamente al agua como carga de nutrientes y sedimentos, generando residuos tanto líquidos como sólidos que son transferidos al estanque. En el caso de los residuos líquidos estos son rápidamente solubilizados y abandonan el sistema, mientras que los sólidos que están en mayor proporción se sedimentan almacenándose al interior del estanque, quedando expuestos a sufrir modificaciones químicas o biológicas.

- Nitrógeno

Se realizó la cuantificación de las diferentes formas de nitrógeno presentes en el estanque, tales como nitrógeno orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos. El estudio arrojó concentraciones de nitritos y nitratos por debajo del límite de detección del método utilizado, esto concuerda con estudios que muestran que las concentraciones de estos compuestos son bajas en efluentes de trucha (Boaventura *et al.*, 1997). Por tanto, para los análisis de nitrógeno se tuvo en cuenta únicamente la forma orgánica y la amoniacal (Ver Anexo A. Tablas A.5, 6 y 7), los estadísticos descriptivos obtenidos para las concentraciones de estos parámetros se registran en la tabla 6.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de nitrógeno ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Ensayos 1 y 2.

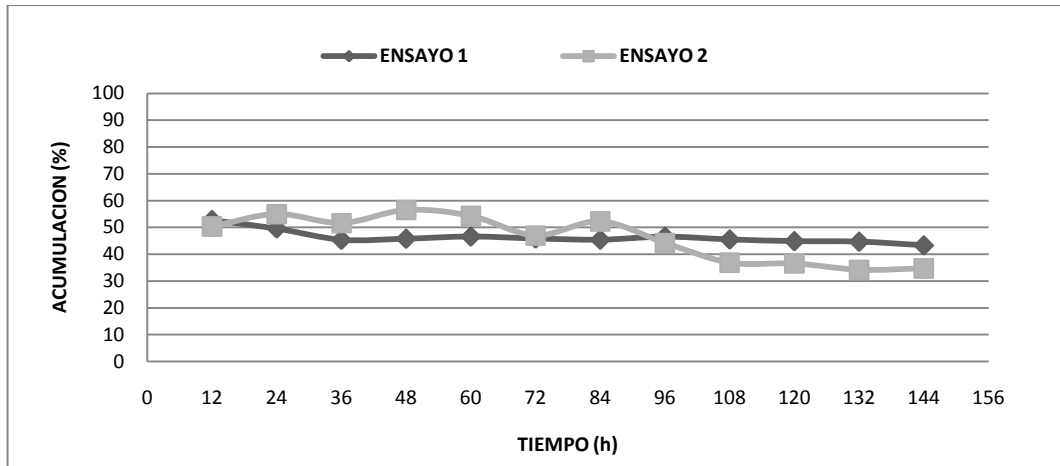
ENSAYO	PARÁMETRO	PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	DESV. ESTANDAR	Nº DATOS
1	N Total. Aflu.	0.110	0.154	0.046	0.032	13
	N Total. Eflu.	0.210	0.296	0.106	0.055	
	N disuelto. Aflu.	0.056	0.099	0.027	0.027	
	N disuelto. Eflu.	0.188	0.261	0.092	0.050	
	N amoniacal. Afl.	0.020	0.044	0.015	0.008	
	N amoniacal. Efl.	0.139	0.156	0.082	0.023	
2	N Total. Aflu.	0.214	0.271	0.136	0.036	
	N Total. Eflu.	0.334	0.463	0.137	0.107	
	N disuelto. Aflu.	0.116	0.167	0.022	0.046	
	N disuelto. Eflu.	0.234	0.339	0.096	0.086	
	N amoniacal. Afl.	0.013	0.025	0.00	0.010	
	N amoniacal. Efl.	0.076	0.111	0.042	0.028	

- Acumulación de nitrógeno orgánico fracción sólida.

En los dos ensayos realizados se estableció la cantidad de nitrógeno orgánico en la fracción sólida que se acumuló, tanto en la biomasa del pez como en el estanque, en el transcurso de los 6 días de estudio. La figura 10 muestra los porcentajes de acumulación en el estanque en ambos ensayos, se puede observar que estos tienden a disminuir con el transcurso del tiempo; según Blanco (1995), el nitrógeno acumulado en los estanques piscícolas tiende a sufrir procesos de degradación y disolución, es probable que estos

fenómenos causen que la retención de nitrógeno en su fracción sólida disminuya. Sin embargo, se requieren más estudios para verificar que existe dicha disminución.

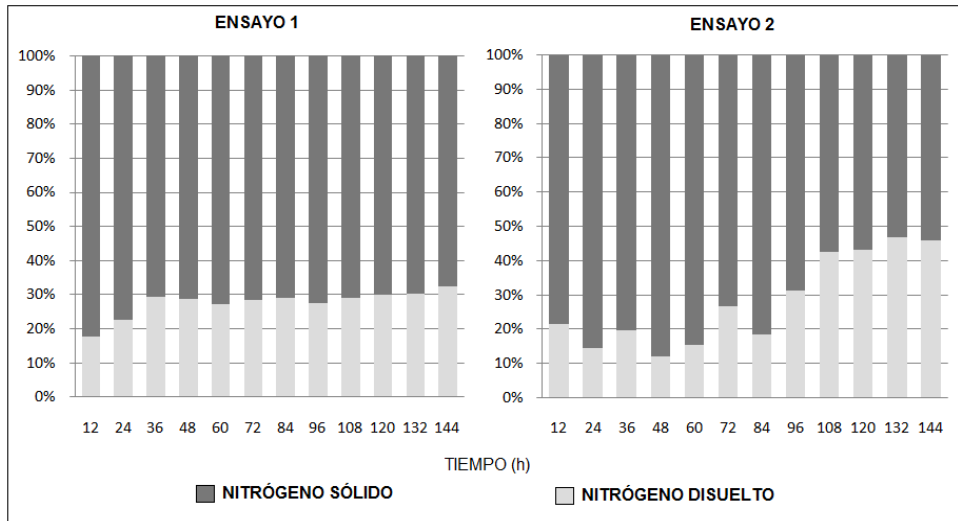
Figura 10. Porcentajes de acumulación de nitrógeno en la fracción sólida. Ensayos 1 y 2.



- Disolución de nitrógeno

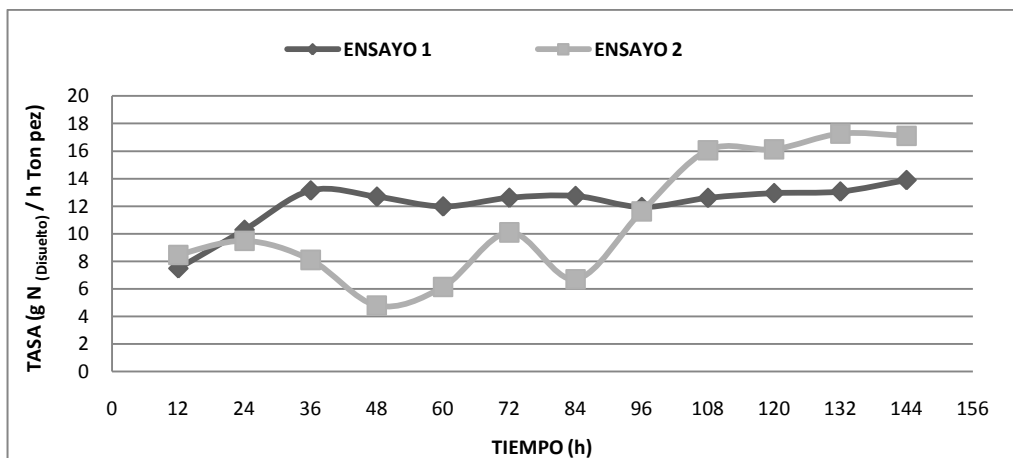
Para establecer el paso del nitrógeno de la fracción sólida a la disuelta se establecieron los porcentajes del contenido de nitrógeno en el estanque en sus dos estados. La figura 11 muestra que los porcentajes de nitrógeno en su fracción sólida disminuyen con el transcurso del tiempo (Ver Anexo A, Tabla A.9), mientras que la cantidad de nitrógeno soluble aumenta, en ambos periodos de estudio. Esto indicaría que en el interior del estanque se podrían estar presentando fenómenos de disolución y degradación del nitrógeno.

Figura 11. Porcentajes de nitrógeno sólido y disuelto. Ensayos 1 y 2.



Con el fin de determinar la velocidad con la que el nitrógeno se disuelve, se establecieron las tasas de disolución en el transcurso de los dos periodos de muestreo (Ver Anexo B. Cálculo B.2). Los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo B. Tabla B.3, los valores promedio fueron de  $12.12 \pm 1.08$  y  $10.99 \pm 2.89 \text{ g N}_{(\text{Disuelto})} \text{ h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$  pez respectivamente, lo que indica similitud en la magnitud de las tasas; la desviación estándar para el primer periodo fue de 1.70 y para el segundo de 4.54, esto muestra que los datos obtenidos en este último estuvieron más dispersos como se puede observar en la figura 12.

Figura 12. Tasas de disolución de nitrógeno. Ensayos 1 y 2.



En el ensayo 1, la tasa de disolución se incrementa en las primeras horas de muestreo alcanzando el máximo valor en la hora 24, posteriormente disminuye hasta estabilizarse. Este comportamiento concuerda con lo descrito por Stewart (2006), quien asegura que la degradación de los nutrientes presentes en los sólidos generados en un cultivo de trucha Arcoíris, ocurre de manera continua durante un periodo de 7 días y que la mayor degradación se produce durante el primer día.

Las tasas de disolución, en el segundo periodo de muestreo, fueron irregulares desde el inicio del estudio hasta la hora 84, posteriormente se incrementan hasta lograr una estabilización en las últimas horas de muestreo (108-144); esto se puede deber a las condiciones ambientales dadas en este periodo de estudio, puesto que se presentaron mayores precipitaciones lo que influye, indirectamente, en la calidad y cantidad de sólidos que se acumulan dentro del estanque, así como también en la velocidad con la que estos sufren procesos de degradación y disolución (McMillan *et al.*, 2003 citados por Brinker *et al.*, 2005).

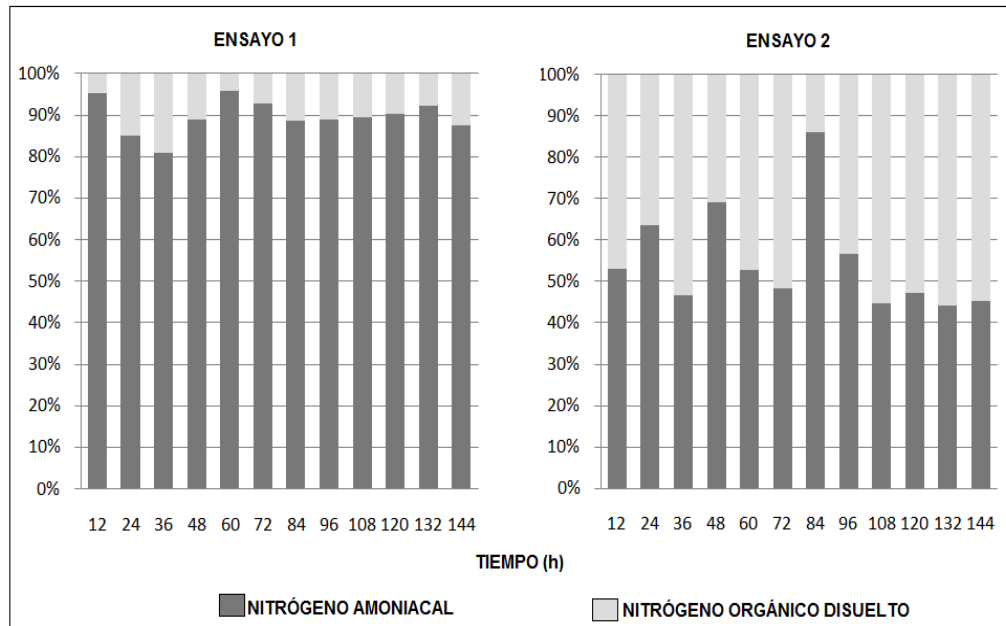
Según los resultados encontrados se puede inferir que las tasas de disolución del nitrógeno tienden a estabilizarse con el transcurso del tiempo; según Stewart *et al.*, (2006) esto se debe a posibles procesos de absorción de nutrientes por parte de microorganismos y/o precipitación química; al respecto, García y Hall (1996) aseguran que después del séptimo día habrá mayor liberación de nutrientes disueltos asociados a la muerte de bacterias y la degradación celular.

- Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno disuelto en los estanques de cultivo de trucha está compuesto por nitrógeno orgánico soluble y nitrógeno amoniacal. La cantidad de este último depende de la actividad propia del pez; autores como Hargreaves (2004), aseguran que parte del nitrógeno suministrado a un cultivo piscícola es utilizado en la formación de proteínas, incluyendo músculo, y como fuente de energía, mientras que entre un 68 y 86% es excretado en forma de amoniaco y urea. La tasa a la cual los peces excretan amoniaco está directamente relacionada con el tipo de alimentación y la cantidad de proteína contenida en el alimento (Hargreaves, 2004).

Para determinar la composición del nitrógeno disuelto que se genera en el sistema, se establecieron los porcentajes de nitrógeno orgánico soluble y amoniacal contenidos en este, en los dos ensayos. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 13.

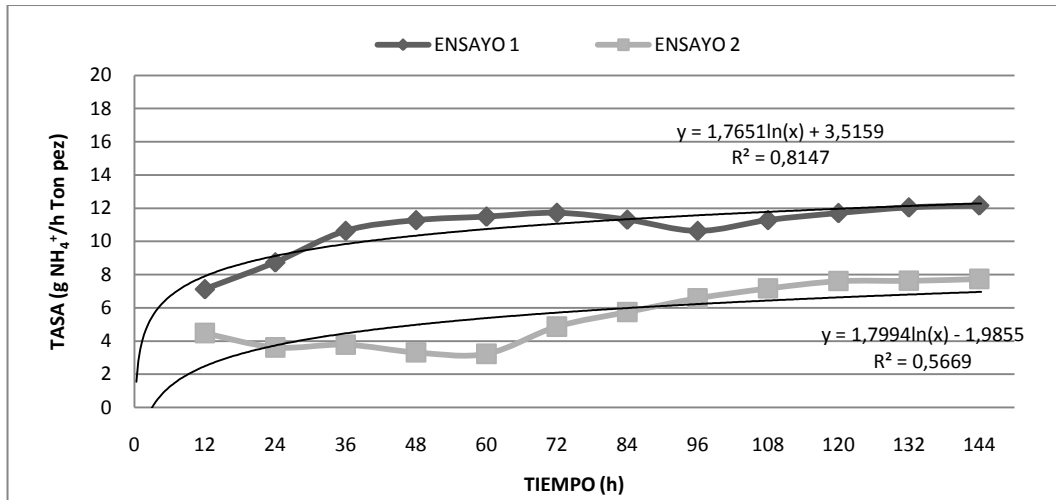
Figura 13. Porcentajes de nitrógeno amoniacal y orgánico. Ensayos 1 y 2.



Se evidencia que en el primer ensayo, alrededor del 89.7% del nitrógeno disuelto está conformado por nitrógeno amoniacal, mientras que en el segundo lo hace el 54.8%. Para dar una explicación a este fenómeno se establecieron las tasas de generación de nitrógeno amoniacal en el sistema (Ver Anexo B, Tabla B.3).

Se pudo encontrar que las tasas de generación de nitrógeno amoniacal promedio en los dos ensayos fueron de  $10.84 \pm 0.938 \text{ g NH}_4^+ \text{ h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$  pez en el primero y  $5.48 \pm 1.15 \text{ g NH}_4^+ \text{ h}^{-1}\text{Ton}^{-1}$  pez en el segundo (Figura 14).

Figura 14. Tasas de generación de nitrógeno amoniacal. Ensayos 1 y 2.



Como se puede observar la tasa de generación de nitrógeno amoniacal presentada en el primer ensayo es el doble a la obtenida en el segundo, lo cual explica el mayor porcentaje de nitrógeno amoniacal contenido en la fracción disuelta, que presentó el primer ensayo (Ver figura 13). Sin embargo, no se pueden explicar las causas de la diferencia en la generación de nitrógeno amoniacal, mediante las pruebas realizadas para el cumplimiento del objetivo de este estudio.

- Fósforo

Las concentraciones promedio de fósforo total encontradas son de 0.108 y 0.164 mgPL<sup>-1</sup> en los ensayos 1 y 2 respectivamente, valores cercanos a los encontrados por Cripps y Kelly (1996) citados por Cripps y Bergheim (2000), quienes reportan concentraciones de 0.13 mgPL<sup>-1</sup> en efluentes de cultivos de trucha. Las concentraciones promedio de fósforo total y disuelto, tanto para el afluente como para el efluente, en los dos ensayos están registradas en la tabla 7.

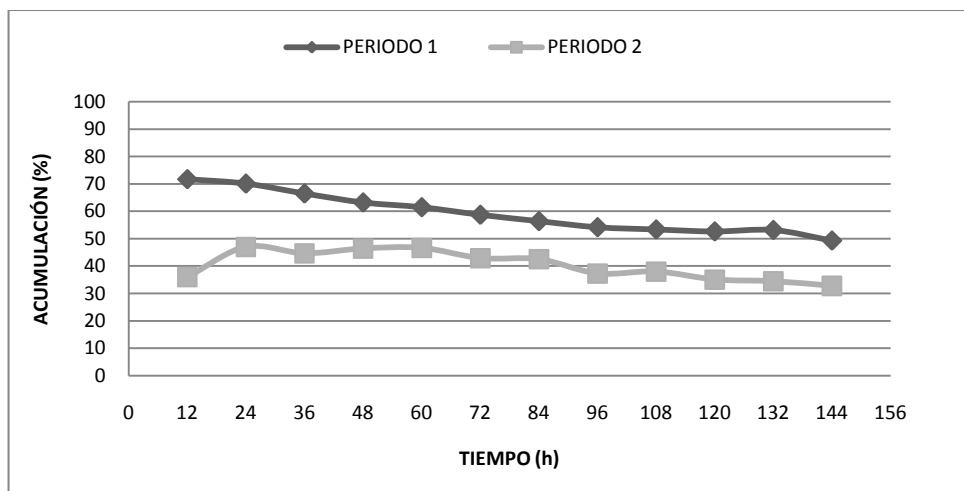
Tabla 8. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de fósforo ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Ensayos 1 y 2.

ENSAYO	PARÁMETRO	PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	DESV. ESTANDAR	Nº DATOS
1	P Total. Aflu.	0.107	0.131	0.090	0.014	13
	P Total. Eflu.	0.108	0.147	0.082	0.024	
	P disuelto. Aflu.	0.084	0.109	0.068	0.015	
	P disuelto. Eflu.	0.091	0.123	0.064	0.022	
2	P Total. Aflu.	0.142	0.183	0.086	0.034	
	P Total. Eflu.	0.164	0.206	0.099	0.038	
	P disuelto. Aflu.	0.124	0.167	0.069	0.033	
	P disuelto. Eflu.	0.137	0.184	0.078	0.040	

- Acumulación de fósforo fracción sólida

Para determinar la fracción sólida del fósforo, se discriminó la parte soluble como se especifica en el Anexo A. Tabla A.10. La figura 15 muestra los porcentajes de acumulación de fósforo en el sistema en la fracción sólida, se puede observar que el porcentaje de fósforo acumulado en el fondo del estanque varió de un periodo a otro, mostrando promedios de 59.3% en el primero y 40.3% en el segundo, es posible que esto se presentara debido a la menor acumulación de sólidos suspendidos totales que se presentó en el segundo periodo de muestreo.

Figura 15. Porcentajes de acumulación de fósforo fracción sólida. Ensayos 1 y 2.



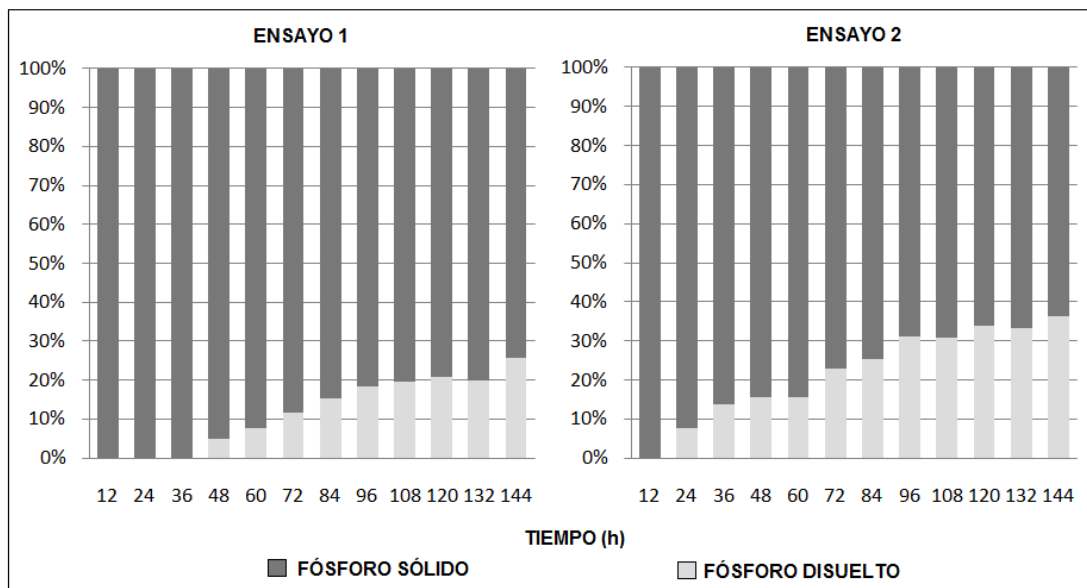


El fósforo sólido acumulado en el estanque tiende a disminuir con el paso del tiempo gracias a los procesos de degradación y disolución (Roldan y Ramírez, 2008). Por lo que el fósforo presente en los estanques piscícolas se encuentra como material particulado y soluble (Lall, 1991; citado por García y Hall, 1996). La proporción del estado en que este se encuentre depende de la concentración y disponibilidad del fósforo en el ambiente, así como también al régimen alimenticio dentro de las granjas (Cornell y Whoriskey, 1993).

- Disolución de fósforo.

La figura 16, muestra la variación en los porcentajes de la fracción sólida y disuelta del fósforo en el interior del estanque en el transcurso de los 6 días de estudio. En los ensayos realizados, se puede observar que inicialmente el 100% del fósforo se encuentra en forma sólida y posteriormente la forma soluble se incrementa paulatinamente. Esto coincide con lo descrito por Cho *et al.*, (1994), quienes afirman que la forma sólida es la más predominante en este tipo de estanques pero que en el interior del mismo se presentan procesos físicos, químicos y biológicos, que causan el paso del fósforo a su fase disuelta.

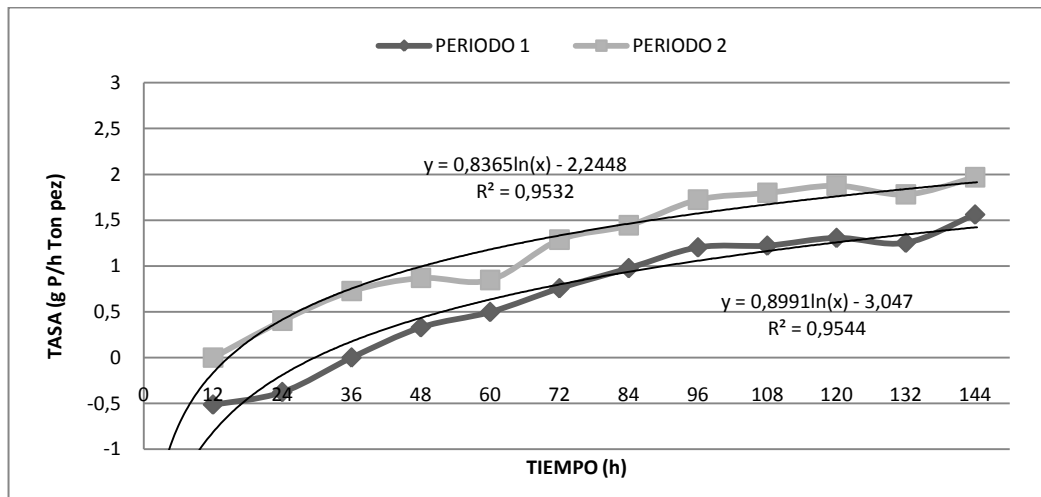
Figura 16. Porcentajes de fósforo sólido y disuelto. Ensayos 1 y 2.



El estado del fósforo, sólido o soluble, determina el impacto generado por los efluentes piscícolas sobre las fuentes receptoras (Foy y Rosell, 1991). Para determinar la celeridad con la cual el fósforo se solubiliza, se determinaron las tasas de disolución en ambos periodos de estudio (ver Anexo B, Tabla B.2). Las tasas máximas obtenidas fueron de 1.56 g P h<sup>-1</sup>Ton<sup>-1</sup>pez en el primer periodo de estudio y 1.97 g P h<sup>-1</sup>Ton<sup>-1</sup>pez en el segundo, valores inferiores a los sugeridos por García y Hall (1996), quienes suponen una tasa de 2.16 g P h<sup>-1</sup>Ton<sup>-1</sup>pez, asumiendo una acumulación de fósforo sólido del 58% en el estanque.

En la figura 17 se puede observar que las tasas de disolución presentaron comportamientos similares, mostrando un tendencia logarítmica con coeficientes de correlación de Pearson de 95.44 y 95.32% para los ensayos 1 y 2 respectivamente. Eso sugiere que al igual que los parámetros anteriormente mostrados, la disolución del fósforo tiende a estabilizarse después del tercer día.

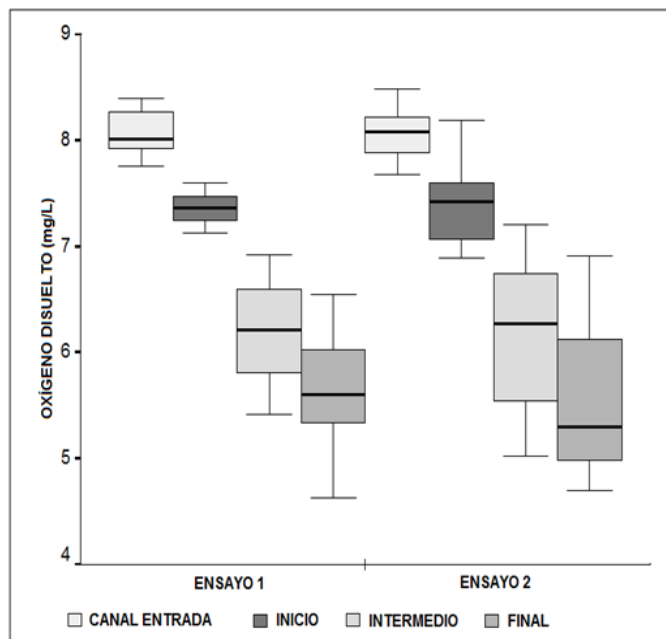
Figura 17. Tasas de disolución de fósforo. Ensayos 1 y 2.



#### 7.1.4 Oxígeno disuelto.

Las concentraciones promedio de oxígeno disuelto al interior del estanque fueron de  $6.39 \pm 0.15$  y  $6.38 \pm 0.25$   $\text{mgL}^{-1}$  para los ensayos 1 y 2 respectivamente, con un intervalo de confianza del 95% de confianza (Ver Anexo A. Tablas A. 12 y 13). En la figura 18, se muestran las concentraciones registradas en las diferentes secciones del estanque.

Figura 18. Concentración de oxígeno en las diferentes secciones del estanque. Ensayos 1 y 2.



El caudal suministrado al cultivo fue calculado para garantizar un ingreso de oxígeno suficiente para suplir las necesidades metabólicas del pez y la demanda bioquímica generada por la degradación y disolución de la materia orgánica en el inicio de los dos periodos de muestreo y de esta manera poder establecer el consumo de este gas en el transcurso de los seis días de estudio. El cálculo para determinar dicho consumo se encuentra resumido en el Anexo B. Cálculo B.3

- Consumo de oxígeno

Al realizar pruebas t pareadas a los consumos de oxígeno entre afluente y efluente del estanque, se encontró que existen diferencias significativas entre ellos ( $P < 0.05$ ), esto sugiere que los procesos metabólicos de los peces y la degradación de la materia orgánica dentro del sistema generan consumos importantes de este gas.

Las figuras 19 y 20, muestran el consumo de oxígeno en las diferentes secciones del estanque. Se puede observar que este se hace más evidente en el final del estanque en ambos periodos de muestreo, esto se debe a que la demanda de oxígeno generada agota este gas a medida que el agua atraviesa el sistema. Sin embargo, esta no es la zona del estanque en la cual se origina el mayor consumo de oxígeno, este fenómeno se explicará más adelante.

Figura 19. Consumo total de oxígeno en las secciones del estanque ensayo 1.

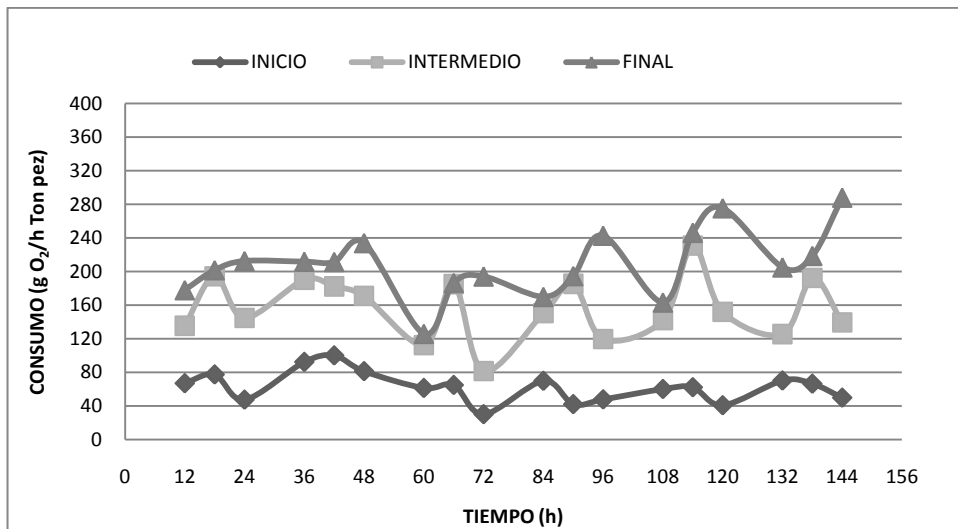
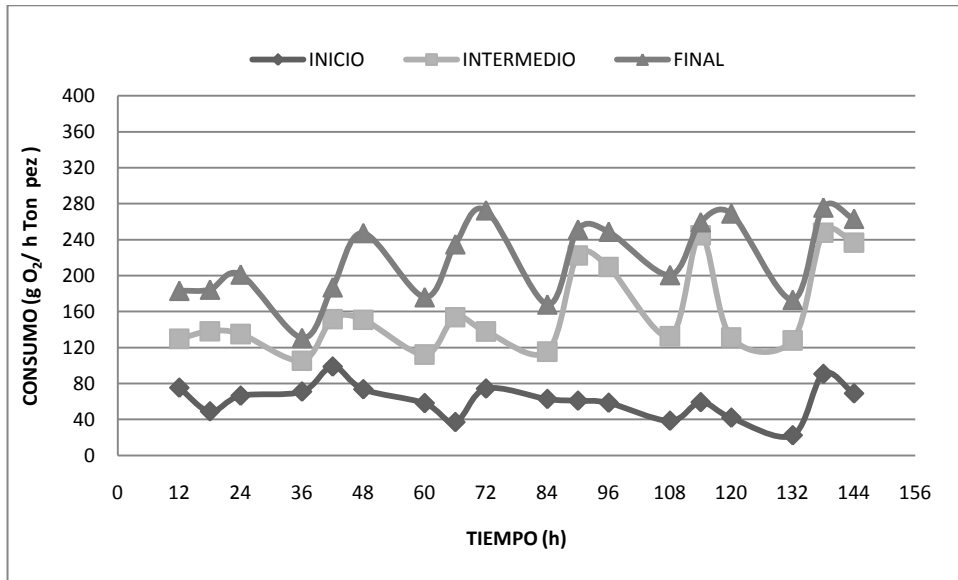


Figura 20. Consumo total de oxígeno en las secciones del estanque ensayo 2.



Se puede observar que el consumo de oxígeno se masifica en ambos ensayos. En el primer ensayo la masificación inicia en el tercer día, mientras que en el segundo se evidencia después del segundo día. Esto hace que en la sección final del estanque, los niveles de oxígeno disminuyan y se generen condiciones desfavorables para los peces obligándolos a desplazarse a zonas donde la cantidad de oxígeno disponible es mayor y puedan desarrollar eficientemente las actividades tanto físicas como metabólicas, lo que se puede evidenciar con la masificación en los consumos que se presentan en el intermedio del estanque a partir del cuarto día en ambos periodos de estudio.

- Consumo de oxígeno a diferentes horas del día por secciones del estanque

Se determinó la demanda de oxígeno a diferentes horas del día en cada sección del estanque como se muestra en las figuras 21 y 22. Estadísticamente (prueba t pareada) se pudo establecer que el consumo se incrementa sobre las 12 am en la sección intermedia y en la sección final en horas de la tarde presentando diferencias significativas con  $p$  value  $< 0,05$  con respecto a los consumos presentados en las primeras horas del día (6 am).

Figura 21. Consumo de oxígeno ( $\text{g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{Ton}^{-1} \text{pez}$ ) en diferentes horas del día ensayo 1.

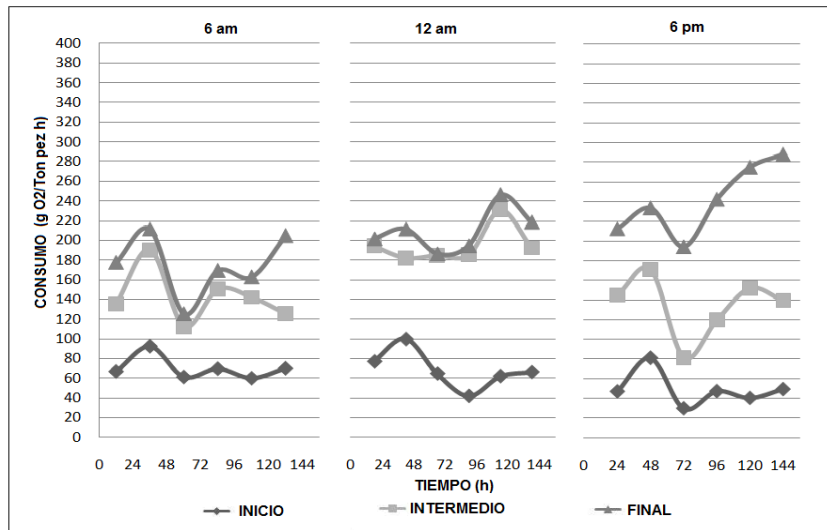
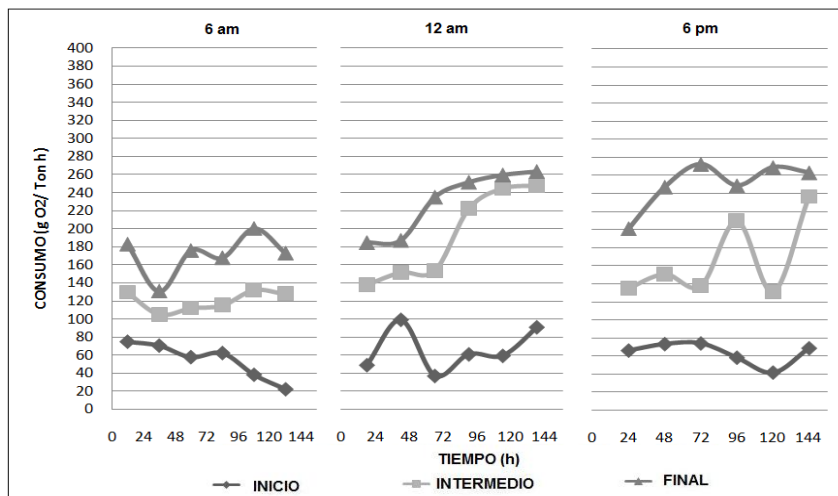


Figura 22. Consumo de oxígeno ( $\text{g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{Ton}^{-1} \text{pez}$ ) en diferentes horas del día ensayo 2.



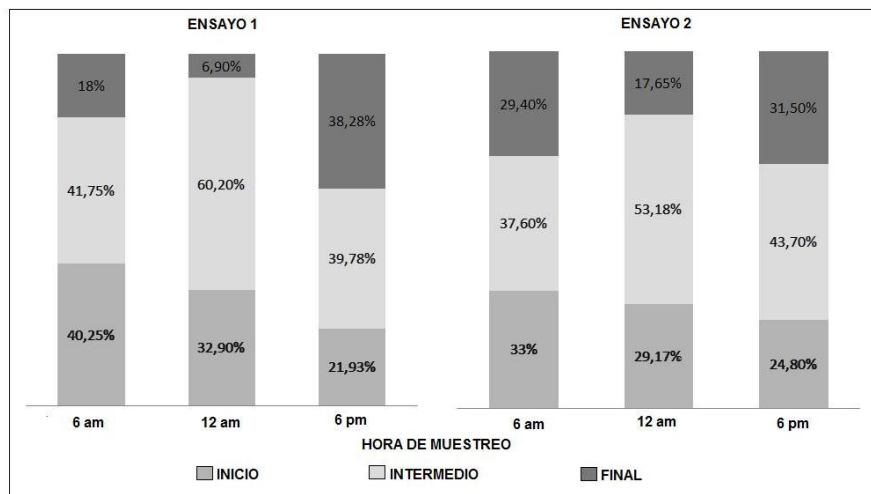
El incremento en los consumos en el intermedio del estanque sobre las 12 del día se atribuye a la alimentación del cultivo ya que en esta hora recibe una de las raciones de alimento y los peces necesitan más oxígeno para desarrollar sus actividades físicas principalmente en la ingestión del alimento (Blanco, 1995).

En la sección final del estanque el consumo de oxígeno aumenta a las 6 pm, se puede decir que este fenómeno se debe a: la temperatura, la cual aumenta a esta misma hora (ver figura 4), y a la digestión de los peces. El comportamiento que presenta la temperatura repercute en el incremento de los procesos metabólicos, la actividad del pez y sus necesidades energéticas (Westermann, 1996); además la capacidad del agua de transportar el oxígeno se ve reducida (Bartelme, 2005).

El consumo que se presenta a las 6 de la tarde se ve menos influenciado por los procesos de alimentación que al medio día, puesto que la medición se realizó dos horas después de suministrada la última ración de alimento y como lo afirma Blanco (1995), el consumo máximo de oxígeno por alimentación es poco mantenido en el tiempo; la digestión comienza un cuarto de hora después de haber ingerido el alimento, a partir de este momento el pez necesita hasta un 76% más de oxígeno que cuando está en “ayunas”, esta demanda pico disminuye rápidamente hasta alcanzar en el consumo medio al cabo de una hora.

Para establecer la zona del estanque en donde hay mayor demanda de oxígeno se calcularon los consumos generados en cada sección como se muestra en el anexo B. Cálculo B.4, posteriormente se determinaron los respectivos porcentajes (Ver Anexo B. Cálculo B.5, Tabla B.6). En la figura 23 se muestran los porcentajes promedio obtenidos para los dos periodos de estudio, se puede observar que el mayor consumo se origina en la sección intermedia, esto se puede ser debido a que los peces ocupan la mayor parte del tiempo esta sección; también se evidencia que este porcentaje aumenta en horas del mediodía, lo que se puede atribuir las actividades de alimentación, ya que el cultivo recibe una de las raciones de alimento a esta hora y en esta zona del estanque.

Figura 23. Porcentajes promedio de consumo en las secciones estanque a diferentes horas. Ensayos 1 y 2.



La disminución en las concentraciones de oxígeno afecta directamente el cultivo ya que se pueden presentar condiciones en las que los peces sufrirán de estrés por asfixia, situación que los obliga a aglomerarse en lugares del estanque en donde el agua presenta mejores condiciones fisicoquímicas (Blanco, 1995). Según los resultados obtenidos, se puede inferir que los peces se ubican la mayor parte del tiempo en el inicio y el intermedio del estanque, lo que indica que los consumos de oxígeno dados en estas secciones son en su mayoría por actividad metabólica del pez, mientras que al final del estanque el consumo se asocia, en mayor porcentaje, a fenómenos de degradación de materia orgánica, ya que en esta zona se facilita la sedimentación y acumulación de sólidos, gracias al funcionamiento hidráulico del estanque y a la baja turbulencia del agua.

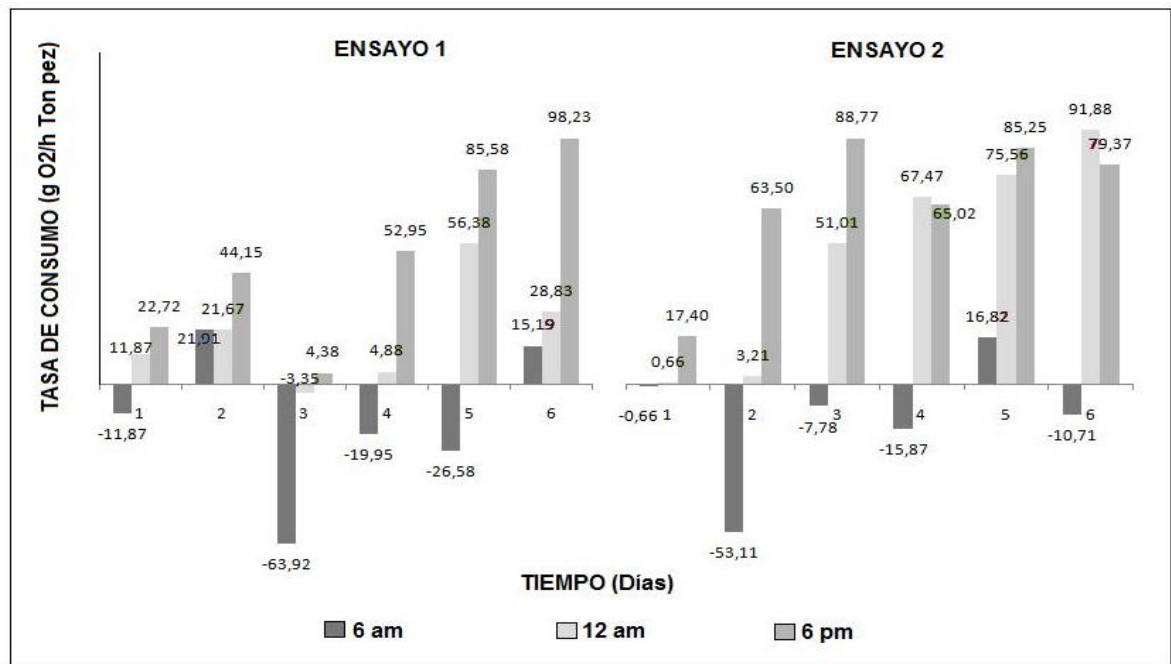
- Consumo de oxígeno por degradación y disolución

Para establecer la demanda de oxígeno generada por la degradación de materia orgánica, se calculó la tasa de consumo total, como se muestra en el Ver Anexo B. Cálculo B.3; posteriormente, se discriminó la tasa base asociada al consumo por el metabolismo de los peces, la cual fue estimada como el consumo promedio generado en las primeras 24 h de muestreo. Para el primer ensayo la tasa base fue de  $189.75 \text{ g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1}$  pez y para el segundo fue de  $183.86 \text{ O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1}$  pez. Los resultados se encuentran registrados en el Anexo B. Tabla B.4.



La figura 24, muestra las tasas de consumo de oxígeno asociados a la degradación de la materia orgánica. Se puede observar que el consumo se masifica en horas de la tarde, esto se puede presentar gracias al incremento de la temperatura (figura 4); lo que podría acelerar las tasas de degradación de materia orgánica (Lonborg *et al.*, 2009).

Figura 24. Tasas de consumo de oxígeno por degradación y oxidación  $O_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1}$  pez. Ensayos 1 y 2.



Los menores consumos de oxígeno se presentaron a las 6 de la mañana, lo que concuerda con lo descrito por Westerman (1996), quien afirma que los menores consumos de oxígeno en un cultivo de trucha se presentan en las primeras horas de la mañana ya que es el periodo más alejado al último suministro de alimento y se presentan las temperaturas más bajas del día lo que influyen en la disminución de las actividades físicas y el metabolismo del pez; de igual forma las actividades microbianas se ven influenciadas por la disminución de la temperatura (Kirchman *et al.*, 2005) y la falta de luminosidad, por los que los procesos de degradación y oxidación de la materia orgánica se ven reducidos.

Se puede observar que en los dos periodos se obtuvieron tasas negativas, lo que indica que hubo entrada de oxígeno atmosférico para suplir un posible déficit de este gas al interior del estanque y encontrar un punto de equilibrio, es decir, se dieron procesos de aireación en el sistema (Domenech *et al.*, 2006). Las mayores tasas de aireación que se presentaron en los dos ensayos, podrían estar asociadas a un cambio en el tipo de microorganismos que colonizan el estanque; sin embargo, se deben realizar estudios microbiológicos que permitan dar una explicación confiable de este fenómeno.

De acuerdo con lo anterior se puede inferir que la materia orgánica acumulada en este tipo de estanques se descompondrá de forma aeróbica consumiendo el oxígeno disuelto disponible en el sistema. Bajo este tipo de descomposición, el 50% de la materia orgánica que se metaboliza se convierte en células bacterianas (Henze *et al.*, 2002 citados por Torres, 2005), por lo tanto con altas cargas de contaminantes en los sistemas de acuicultura intensiva, se espera que la cantidad de biomasa de los microorganismos se masifique.

Los resultados obtenidos muestran que la degradación de la materia orgánica tiende a estabilizarse con el transcurso del tiempo, fenómeno asociado al crecimiento microbiano en el interior de la estructura, ya que el incremento de la microbiota depende de la cantidad y calidad de los sustratos presentes en el sistema (Torres, 2005).

## 7.2 Objetivo 2

Este estudio buscó establecer el efecto generado sobre las tasas de crecimiento de los peces ocasionado por la variación en el ingreso de oxígeno mediante la reducción del caudal. Para esto, se establecieron cuatro periodos de operación cada uno con una duración de 15 días. El periodo 1 contó con la totalidad del caudal necesario para que el cultivo se desarrolle en óptimas condiciones. En los tres periodos restantes el caudal se redujo en 10, 15 y 20% respectivamente. En el transcurso de los cuatro periodos, se realizaron pesajes de peces cada 15 días, para determinar las tasas de crecimiento. Además se realizaron muestreos, con una periodicidad de 3 días, con el fin de mantener el control de la calidad del agua, se tuvieron en cuenta los mismos parámetros estudiados en el objetivo 1 para muestras no filtradas (Tabla 3).

### 7.2.1 Cálculo y control caudales

Para el cálculo de los caudales a suministrar al cultivo se tuvo en cuenta el peso promedio de los peces al inicio de cada periodo de operación para de esta manera establecer el ingreso de oxígeno de acuerdo con los requerimientos del cultivo según lo reportado por Blanco (1995) y hacer las respectivas reducciones. Los caudales calculados fueron de 4.8, 4.7, 5.5 y 7 L s<sup>-1</sup> para los periodos 1, 2, 3 y 4 respectivamente (Ver anexo C, cálculo 1).

En la tabla 8, se muestran los estadísticos descriptivos de los valores obtenidos en el control de los caudales, como se puede observar las desviaciones estándar, de los caudales registrados en cada periodo de operación, están por debajo de 0.093, lo que indica que no se presentaron variaciones que pudiesen afectar, el suministro de oxígeno requerido.

Tabla 9. Estadísticos descriptivos de caudales de operación.

PERIODO	Media	Int. Confianza 95%	Desv. típ.
1	4.812	±0.0169	0.07219
2	4.712	±0.0152	0.05424
3	5.518	±0.0179	0.06841
4	7.033	±0.0249	0.09294

### 7.2.2 Condiciones físico químicas del agua durante los periodos de operación.

Teniendo en cuenta que los niveles de toxicidad en el agua dependen del tamaño y la especie de los peces (FAO, 2000), se realizó el monitoreo a los distintos parámetros físico químicos que pudiesen afectar la tasa de crecimiento de los peces; los datos se encuentran registrados en el Anexo B. Los resultados promedio de dichos parámetros se encuentran resumidos en la tabla 9.

En los 4 periodos de operación la calidad del agua fue adecuada para el desarrollo normal del cultivo. Los valores de pH se encuentran en el rango de 6.5 a 8.1, cabe mencionar que en el tercer periodo se registraron valores inferiores a 6.5 (Anexo C. Tabla 2); según Smith y Stearly (1988) citados por Blanco (1995) esta situación tiende a disminuir el rendimiento del cultivo; sin embargo, Boyd (1982) citado por Blanco (1995) afirma que la disminución de pH en cortos periodos de tiempo no causa efectos adversos sobre la tasa de crecimiento de los peces. Por lo anterior se espera que las tasas de crecimiento no se vean afectadas por deficiencia en la calidad del agua de suministro.

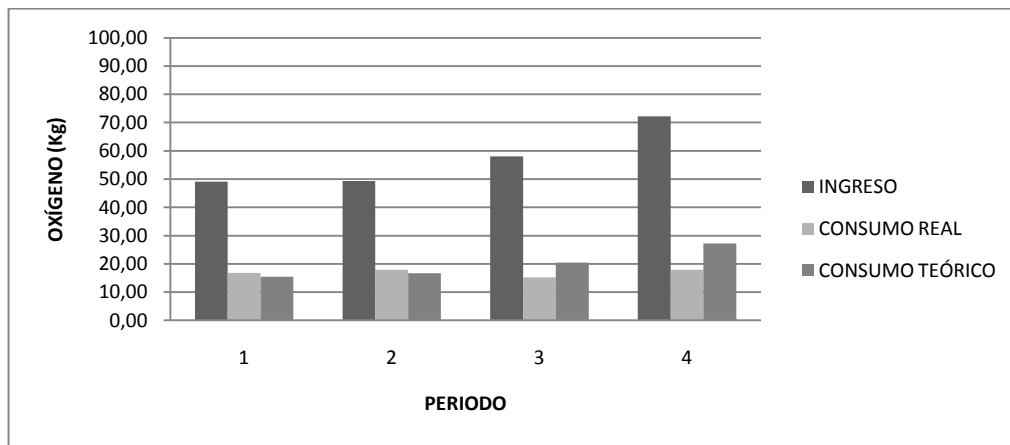
Tabla 10. Parámetros físico químicos registrados en los 4 periodos de operación.

PARÁMETRO	PERIODO								Valor Aceptable	Referencia
	1		2		3		4			
	Media	Int. Confianza 95%	Media	Int. Confianza 95%	Media	Int. Confianza 95%	Media	Int. Confianza 95%		
Temperatura (°C)	12.33	±0.555	11.50	±0.439	11.22	±0.341	11.41	±1.059	11 – 18	Blanco (1995)
Sólidos suspendidos totales (mgL <sup>-1</sup> )	11.13	±2.821	11.63	±5.038	4.57	±2.738	4.30	±1.999	<80	Camacho (2000)
Sólidos disueltos (mgL <sup>-1</sup> )	71.71	±8.308	73.91	±5.614	75.30	±3.241	83.95	±1.086	<400	
Nitrógeno total (mgL <sup>-1</sup> )	0.103	±0.059	0.1579	±0.133	0.0946	±0.903	0.1055	±0.050	---	
Nitrógeno amoniacal NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mgL <sup>-1</sup> )	0.072	±0.034	0.0929	±0.040	0.0718	±0.026	0.0781	±0.022	<1.0	Roque <i>et al.</i> , (2008)
Fósforo total (mgL <sup>-1</sup> )	0.136	±0.062	0.1307	±0.082	0.0985	±0.028	0.1090	±0.035	---	
Oxígeno disuelto (mgL <sup>-1</sup> )	6.52	±0.364	6.56	±0.383	6.93	±0.384	6.88	±0.287	>5.5	Blanco (1995)

### 7.2.3 Efecto en las tasa de crecimiento por la disminución en el ingreso de oxígeno.

La cantidad de oxígeno que ingresó al sistema y los consumos generados en cada uno de los periodos de operación, se calcularon con el fin de establecer posibles efectos en las tasas de crecimiento por la reducción del caudal de entrada (Ver anexo B.1). Los resultados se muestran en la figura 25.

Figura 25. Ingreso y consumos de oxígeno en los cuatro periodos de operación.

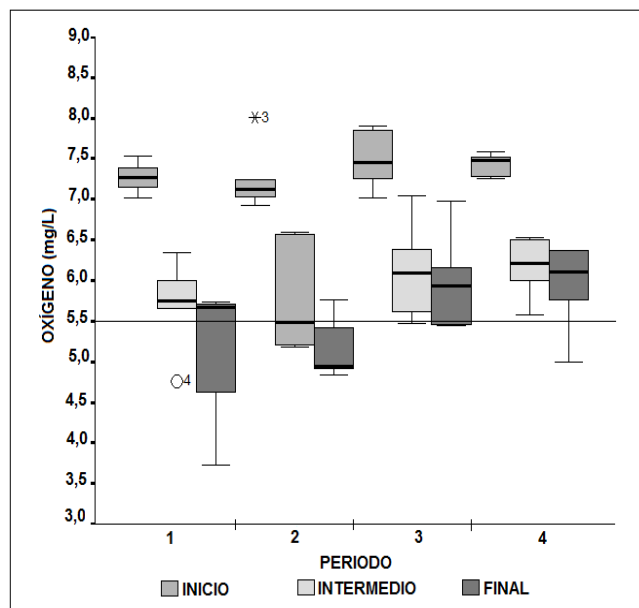


El ingreso de oxígeno aumentó de un periodo a otro, esto se debe a que, como se indicó anteriormente, el cálculo de la cantidad de oxígeno a suministrar al cultivo y los respectivos caudales, se establecieron de acuerdo con el incremento de la biomasa presentado en cada periodo de operación, según los consumos determinados por Liao (1972) citado por Blanco (1995) para temperaturas de 11°C. Por tanto al aumentar la cantidad de biomasa, el oxígeno requerido será mayor.

Al comparar el consumo real obtenido y el teórico, se puede observar que en los periodos 1 y 2, el real fue superior al reportado por Liao (1972) citado por Blanco (1995), mientras que en los dos últimos periodos el teórico fue mayor al experimental. Estos resultados sugieren que posiblemente los consumos establecidos por Liao (1972) citado por Blanco (1995) no se ajustan a las condiciones propias de la región donde se realizó este estudio.

Por otro lado, la cantidad de oxígeno remanente en los 4 periodos de operación fue superior al 63.3%, con lo que se podría inferir que los niveles de oxígeno en el estanque fueron los adecuados para el cultivo; sin embargo, se realizó el respectivo análisis en las diferentes secciones del estanque para determinar las concentraciones promedio de oxígeno en cada una de estas, como se puede observar en la figura 26.

Figura 26. Concentración de oxígeno en las secciones del estanque en los periodos de operación.



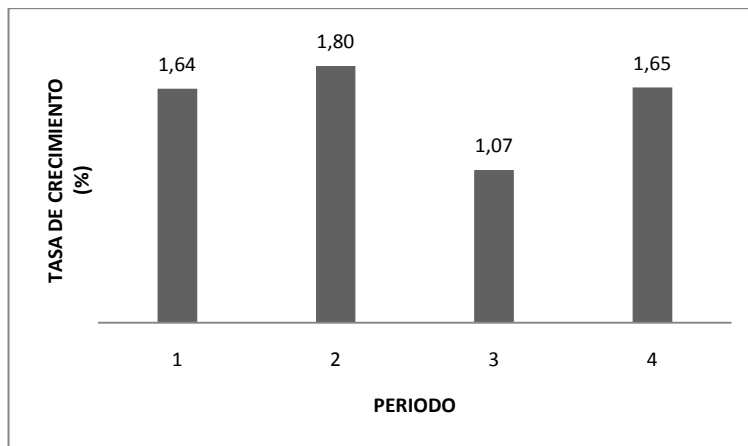
Se encontraron concentraciones de oxígeno por debajo de  $5.5 \text{ mgL}^{-1}$  en los 4 periodos de operación (Ver anexo B.1), con mayores deficiencias en los periodos 1 y 2, en la sección final del estanque, esta situación se pudo presentar debido a que, como se indicó anteriormente, el consumo de oxígeno real estuvo por encima al teórico (Figura 25), lo significa que al cultivo no se le suministró el oxígeno suficiente para suplir la demanda lo cual generó este déficit.

Al tener concentraciones de oxígeno inferiores a  $5.5 \text{ mgL}^{-1}$  al final del estanque, los peces tienden a ocupar las zonas iniciales del mismo, donde las concentraciones son superiores a dicho valor, sin embargo esto no implica que los peces sufran efectos directos; si se tiene en cuenta que las deficiencias no superan el 50% del tiempo de operación y que los

peces pueden tolerar niveles bajos de oxígeno por cortos periodos de tiempo, al regular su metabolismo de acuerdo a la cantidad de oxígeno disponible en el agua (Verheyen y Declair, 1994) por tanto se espera que las tasas de crecimiento no se vean afectadas.

Para establecer si hubo un efecto en el crecimiento de los peces con la reducción en el ingreso de oxígeno, se determinó la tasa de crecimiento absoluta en cada periodo de operación (Ver Anexos C, Tabla 5). Los resultados se muestran en la figura 27.

Figura 27. Tasa de crecimiento para diferentes porcentajes de ingreso de caudal.



Las tasas de crecimiento obtenidas en los periodos de operación fueron similares entre sí, estas tasas se aproximan al 1.67% reportado por Martínez *et al.* (2003) y al 1.33% reportado por Blanco (1995), para una temperatura media de 11°C. En el periodo 3, se obtuvo el menor crecimiento, este fenómeno se presentó debido a limitantes con el suministro de alimento.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la reducción realizada en el ingreso de oxígeno no afectó las tasas de crecimiento de los peces, a pesar de que en los periodos 1 y 2 se presentaron concentraciones puntuales de oxígeno por debajo del mínimo requerido (Ver figura 26). Esto indica que es posible utilizar caudales por debajo del 100% requerido por el cultivo, que se encuentra establecido en la literatura (Liao, 1972 citado por Blanco, 1995), siempre y cuando se realicen controles periódicos de los niveles de oxígeno en el estanque.



## 8. CONCLUSIONES

Los sólidos suspendidos totales que se acumularon en el estanque convencional para cultivo de trucha utilizado en este estudio sufrieron procesos de degradación y disolución, fenómeno que se pudo observar con el incremento de sólidos y nutrientes en su fracción disuelta a partir de cierto periodo de tiempo.

Las tasas de degradación y disolución de los contaminantes contenidos en los sólidos suspendidos totales, presentan un comportamiento logarítmico; sobre el tercer día tienden a estabilizarse, esto se evidencia con las tasas de consumo de oxígeno generadas por la degradación de materia orgánica, las cuales muestran la misma tendencia; es posible que este fenómeno esté asociado al equilibrio entre la cantidad de biomasa de microorganismos y el sustrato presente al interior del estanque.

La demanda de oxígeno generada en los procesos de degradación de la materia orgánica acumulada al interior del estanque no afectó las tasas de crecimiento de los peces; los niveles de oxígeno presentados en el estudio estuvieron en su mayoría por encima de los límites tolerables por este tipo de cultivo.

Es posible la reducción de los caudales de ingreso a la piscifactoría, siempre y cuando se realicen controles periódicos de las concentraciones de oxígeno en el interior de los estanques, con el fin de garantizar niveles óptimos del mismo y que las tasas de crecimiento no se vean afectadas, logrando así disminuir las cargas contaminantes generadas por este tipo de cultivo.

La baja concentración de los nutrientes en los grandes volúmenes de agua que atraviesan el sistema, hace inviable cualquier tipo de tratamiento convencional, por lo que se requiere que estos sean retenidos al interior del estanque y retirados antes de que se masifiquen las tasas de transferencia desde la fracción sólida a la disuelta.

## 9. RECOMENDACIONES

Para reducir la contaminación disuelta sobre las fuentes receptoras, generada por los efluentes de cultivos de trucha, se recomienda realizar una extracción de sólidos con una frecuencia mayor a la que se maneja actualmente, la cual está entre una a dos semanas. Según los resultados obtenidos en este estudio, en principio la periodicidad de extracción podrían ser de 3 días; sin embargo, se requieren estudios que permitan determinar el tiempo preciso para realizar esta operación.

Realizar estudios que permitan establecer los consumos de oxígeno del pez de acuerdo con las características propias de la región, con el fin de realizar un correcto suministro de este gas y de esta manera realizar un manejo adecuado del recurso hídrico, mediante el control de los caudales de ingreso.

## REFERENCIAS

- Alpaslan, A. y Pulatsü, S. The Effect of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) Cage Culture on Sediment Quality in Kesikköprü Reservoir, Turkey .Ankara University, Faculty of Agriculture, Department of Aquaculture and Fisheries 06110, Ankara, Turkey. 2008.
- Álvarez, S. La descomposición de materia orgánica en humedales: la importancia del componente microbiano. Dirección General para la Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente Madrid España. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. Ecosistemas 14 (2). Pág. 17-29. Mayo 2005.
- Aquino, G. Manual Básico para el Cultivo de Trucha Arco Iris (*Oncorhynchus mykiss*). Global environmental management. Pág. 9-12. 2008.
- Argumedo, E. y Rojas H. Manual de piscicultura con especies nativas. ACUICA. Colombia. Pág. 15-20. 2000.
- Avnimelech, Y., Diab, S. and Kochba, M. Modeling of nitrogen transformation in intensively aerated fish ponds. Aquaculture, Volume 120, Issues 1-2, 15 February 1994, Pages 95-104. 1994.
- Azevedo, P. Lesson S. Cho C. Y. Bureau D. P. Growth, nitrogen and energy utilization of juveniles from four salmonid species: diet, species and size effects. Aquaculture 234. Pages 393–414. 2004.
- Bartelme, T. Metabolismo uso de la energía y los comportamientos de alimentación en el pescado. Advanced acuarist's online magazine. Article Index. En <http://www.advancedaquarist.com/2006/4/aafeature1-es>. Vísitada el 26 de Enero de 2011.

- Bilotta, G.S. and Brazier R.E. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water research* 42. Pages 2849 – 2861. 2008.
- Blanco, M. *La trucha: Cría industrial*. Madrid: Mundi prensa. 503 pág. Segunda edición. ISBN. 84-7114-504-9. 1995.
- Boaventura, R., Pedro, A., Coimbra, J. and Lencastre, E. Trout farm effluents: characterization and impact on the receiving streams. *Environmental Pollution*, Vol. 95, No. 3, pág. 379-387. 1997.
- Boyd, Claude. *Developments in Aquaculture and Fisheries Science, Volume 34*, 2004, Pages 196-214.
- Brinker A., Koppe, W. and Rosch, R. Optimised effluent treatment by stabilised trout faeces. *Aquaculture* 249 (2005) 125– 144. 2005.
- Buryniuk, M. Petrell, R. Baldwin, S and Lo, V. Accumulation and natural disintegration of solid wastes caught on a screen suspended below a fish farm cage. *Aquacultural Engineering*. Vol.35, Issue 1, pág. 78-90. 2006.
- Camacho B., E., M. Moreno R., M. Rodríguez G., C. Luna Romo y M. Vásquez. *Guía para el cultivo de trucha*. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México D.F. Pág. 43-46. 2000.
- Camargo, J. and Alonzo, A., 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems a global assessment. *Environment international*. 32. Pages. 831 -849. 2006.
- Camargo, J. Gonzalo, C and Alonzo, A. Assessing trout farm pollution by biological metrics and indices based on aquatic macrophytes and benthic macroinvertebrates: A case study. *Volume 11, Issue 3, Pages 911-917*. 2010.

- CENIACUA. Centro de investigación de la Acuicultura de Colombia. Situación sector acuícola. Seminario Buenas Prácticas de Acuicultura. Sector acuícola. Neiva, 15 y 16 de mayo de 2008.
- Cho, C.Y., Hynes, J.D., Wood, K.R., Yoshida, H.K. Development of high-nutrient-dense, low-pollution diets and prediction of aquaculture waste using biological approaches. *Aquaculture* 124, 293– 305. 1994.
- Coloso R. King, K. Fletcher, J. Hendrix, M. Subramanyam, M. Weis, P. Ferraris, P. Phosphorus utilization in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed practical diets and its consequences on effluent phosphorus levels. *Aquaculture* 220. Pages 801–820. 2003.
- Colt. Water quality requirements for reuse systems, *Aquac. Eng.* 34, pp. 143–156. 2006.
- Cornell, G.E. and Whoriskey, F.G. The effects of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) cage culture on water quality, zooplankton, benthos and sediments of Lac du Passage, Quebec. *Aquaculture*, 109:101-117. 1993.
- Crab, R. Avnimelech, Y. Defoirdt, T. Bossier, P. and Vers, W. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production, *Aquaculture* Vol 270, Issues 1-4, pp. 1-14. 2007.
- Cripps, S J Serial particle size fractionation and characterization of an aquacultural effluent. *Aquaculture* 133 (1995) 323-339. 1995.
- Cripps, SJ y Kelly, Los Ángeles. La reducción de los desechos de la acuicultura. En: Baird, DJ, Beveridge, MCM, Kelly, Los Ángeles y Muir, JF Editores, 1996. *Acuicultura y Manejo de Recursos Hídricos* de Blackwell, Oxford, pág. 166-201. 1996.

- Cripps, S J. and Bergheim A. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* 22 pág 33-56. 2000.
- Domenech, X y Peral, J. *Química ambiental de sistemas terrestres*. 1era Edición. Barcelona. Pag. 185. 2006.
- D'Orbcastel, E., Blancheton, J., Boujard, T. Comparison of two methods for evaluating waste of aflow through trout farm. *Aquaculture* 274 (2008) 72–79. 2007.
- FAO. Food and Agriculture Organization. Informe del Taller regional sobre acuicultura rural de pequeña escala en América Latina, Temuco, Chile, 9 -12 de noviembre de 1999. FAO, Informe de Pesca No.631. FAO, Santiago. Pág. 15. 2000.
- Fernández J., de la Cruz C. y Caicedo J. Informe de avance: Inventario y diagnóstico de Piscícolas en el Departamento del Cauca. Proyecto de Efluentes, Unicauca, Univalle, Crepic. 2010.
- Figueruelo, J y Marino, M. *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales*. Editorial Reverté S.A., 2004. 591 pág. ISBN 84-291-7903-8 España. Pág. 517-524. 2004.
- Floyd, R. y Watson, C. *Amonnia*. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida FA-16. 2005.
- Foy, R.H., Rosell, R. Fractionation of phosphorus and nitrogen loadings from a Northern Ireland fish farm. *Aquaculture* 96, 31–42. 1991.
- Gál D., Szabó P., Pekár F. y Váradi L. 2003. Experiments on the nutrient removal and retention of a pond recirculation. System. *Hydrobiology*. Pág. 506–509: 767–772. 2003.

- Garcia-Ruiz, R., Hall, G. Phosphorus fractionation and mobility in the food and faeces of hatchery reared rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 145 (1996) 183-193. 1996.
- Hankins, J.A., Summerfelt, S.T., Durant, M.D. Impacts of feeding and stock management strategies upon fish production within water recycle systems. In: Timmons, M.B. (Ed.), *Aquacultural Engineering and Waste Management*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, NY, pp. 70–86. 1990.
- Hargreaves, J y Tucker, C. Managing Ammonia in Fish Ponds. Southern Regional Aquaculture Center. Publication N° 4603. Pág. 2 – 5. 2004.
- IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Estudio nacional del agua. Balance hídrico y relación demanda-oferta en Colombia. Santa fé de Bogotá. 2010.
- IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Estudio nacional del agua. Santa fé de Bogotá. 2008.
- INCODER. Instituto Colombiano de Desarrollo Rural. Las estadísticas de las pesquerías, fundamento de la evaluación económica, la ordenación, la administración y el desarrollo sostenible de la pesca en las aguas interiores y de las aguas marinas de Colombia. 2004.
- INPA. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura. Estadísticas de la pesca y acuicultura en Colombia. 2008.
- Jiménez - Montealegre, M.C.J. Verdegem, A. van Dam and J.A.J. Verreth, Conceptualization and validation of a dynamic model for the simulation of nitrogen transformations and fluxes in fish ponds, *Ecol. Model.* 147, pp. 123–152. 2002.

- Kirchman, D; Malmstrom, R; Cottrell M. Control of bacterial growth by temperature and organic matter in the Western Arctic College of Marine Studies, University of Delaware, USA. Pages 3386- 3395. 2005.
- Klontz, G.W; M. S.; D.V.M. Manual for rainbow trout production on the family-owned farm. Department of Fish and Wildlife Resources University of Idaho Moscow, Idaho 83843. Pages 7-13. 1991.
- Körner, S.K. Das, S. Veenstra and J.E. Vermaat, The effect of pH variation at the ammonium/ammonia equilibrium in wastewater and its toxicity to Lemnagibba, Aquat. Bot. 71, pp. 71–78. 2001.
- Kubitza, F. Qualidade da agua na producao de peixes. Brasil: 3ª ed, Jundiai-SP, Divisao de biblioteca e documentacao –campus “Luiz de Queiroz”/usp. Pág. 40. 1998.
- Lonborg, C; Davidson, K; Álvarez X; Miller,A. Bioavailability and bacterial degradation rates of dissolved organic matter in a temperate coastal area during an annual cycle. Marine Chemistry 113 pág. 219–226.2009.
- Losordo, T.M. and Westers, H. System carrying capacity and flow estimation. In: Timmons, M.B. 1994.
- Madigan, M. Martinko J. y Parker J. Brock Biología de los Microorganismos 10a Edición. Madrid. ISBN: 9788420536798. Pág. 606- 624. 2003
- MADR. Ministerio de agricultura y desarrollo rural. Acuerdo Sectorial de Competitividad de la Cadena de Piscicultura en Colombia. Pag 5-7. 2005.
- MADR. Ministerio de agricultura y desarrollo rural. Producción acuícola nacional por especies 1997- 2008. 2008.



- Maillard V., Boardman G., Nyland J. y Kuhn D. 2005. Water quality and sludge characterization at raceway-system trout farms. *Aquacultural Engineering* 33. Pages 271–284. 2005.
- Mallya, J. The effects of dissolved oxygen on fish growth in aquaculture. Holar University College. Reykjavik, Iceland. Final project. Pág. 13 -26. 2007.
- Martínez, S. Tomás, A, Pérez, L y Jover, M. Alternativas de diseño de una granja de truchas: volumen de producción y número de lotes anuales con dos perfiles de temperaturas. *Revista AquaTIC*, nº 19. Pág. 35-40. 2003
- Martínez, H. J. y F. A. Gonzáles. La Cadena de la Piscicultura en Colombia: Una Mirada Global de su Estructura y Dinámica. Documento de Trabajo No 72. Pág. 3 - 10. 2005.
- Molonoy, B. Environmental requirements and tolerances of Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Brown trout (*Salmo trutta*) with special reference to Western Australia: A review. Fisheries Research Division WA Marine Research Laboratories PO Box 20 NORTH BEACH Western Australia 6920. Report No. 130, Pages 6-9. 2001.
- Montaña, A. y Sandoval J. Evaluación de parámetros de diseño y operación en la piscifactoría “El Diviso” para la generación de alternativas de producción más limpia en el desarrollo de la piscicultura. Trabajo de grado Universidad del Cauca. Popayán Colombia. Pág. 51. 2008.
- Moriarty, D. The role of microorganisms in aquaculture ponds. *Aquaculture* 151 (1997) 333-349. 1997.
- Nuñez, P. y Somoza, G. Guía de Buenas Prácticas de Producción Acuícola para Trucha Arco-iris. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). Pág. 3 - 4, 6 - 10. 2010.

- Oca, J. and Masal I. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks. *Aquacultural Engineering* 36 (2007) 36–4. 2007.
- Piedrahita, R. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture*: 226.pág.35-44. 2003.
- Pillay, T. *Acuicultura: principios y prácticas*. México. Limusa Noriega. Pág. 387-399. 2004.
- Plan de Desarrollo; 2008-2011. “Alianza por el Cambio”. República de Colombia. Departamento del Cauca. Municipio de Puracé – Coconuco. 2008.
- Pulatsu, S., Köksal, G., Aydın, F., Benli K., TopÇu, A. The Impact of Rainbow Trout Farm Effluents on Water Quality of Karasuv Stream, Turkey. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 4. Pages 9-15. 2004.
- Roldan, A. y Ramírez J. *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Universidad de Antioquia. 2ª edición. ISBN 958714144X, 9789587141443. Pág. 180-190, 249-254. 2008.
- Roque, E; Blanchetonun, T; Aubin, J; Moutounet, Y; Przybyla, C y Belaud, A. Comparison of two methods for evaluating waste of aflow through trout farm. *Aquaculture* 274. Pages 72–79. 2008.
- Ross, R; Watte, B., Kris, W. and Di Lauro, M. Influence of Tank Design and Hydraulic Loading on the Behavior, Growth, and Metabolism of Rainbow Trout (*Oncorhynchusmykiss*). Department of Biology. Mansfield University, Mansfield, Pennsylvania 16933. US. Pages 29-47. 1995.
- Sánchez, J. *Biología de la alimentación de la trucha común (Salmo trutta Linné, 1758) en los ríos de Galicia: Peces. Ictiología*. Universidad Santiago de Compostela 545 páginas. ISBN 978-84-9887-188-3. 2009.

- Soriano M. y Hernández D. Tasa de crecimiento del pez angel *pterophyllum scalare* (perciformes: cichlidae) en condiciones de laboratorio. Universidad de Guanajuato. Acta universitaria. Vol 12, número 002. ISSN (Versión impresa): 0188 – 6266. Pág 28 – 33. 2002.
- Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. - American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) Water Pollution Control Federation (WPCF). 1998.
- Stewart, N., Boardman, G. and Helfrich, L. Characterization of nutrient leaching rates from settled rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) sludge. *Aquacultural Engineering* 35 (2006) 191–198. 2006.
- Summerfelt, S.T.; A partial-reuse system for Coldwater aquaculture, *Aquacultural Engineering*: 31, pág.157-181. 2004.
- Tobón, C. Los bosques andinos y el agua. Serie investigación y sistematización #4. Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION, CONDESAN. Quito. Pág. 12. mayo 2009.
- Torres, B. Organic matter decomposition in simulated aquaculture ponds. PhD thesis, Fish Culture and Fisheries Group, Wageningen Institute of Animal Sciences. Wageningen University, P. O. Box 338, 6700 AH Wageningen, The Netherlands. Pages 12-34. 2005.
- True, B; Johnson, W., Chen, S. Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture I: facility and effluent characterization. *Aquacultural Engineering* 32 (2004) 129–144. 2004.
- Tucker, C.S. y Hargreaves, J.A. Environmental best management practices for aquaculture. Blackwell Publishing. Ames, USA. Pág. 592. 2008.

- Verheyen E.R. Bluse and W. Decler. Metabolic rate, hypoxia tolerance and aquatic surface respiration of some lacustrine and riverine African cichlid fishes (Pisces: Cichlidae). *Comp. Biochem. Physiol.* 107A:403-411. 1994.
- Westerman, P. Temperature regulation of anaerobic degradation of organic matter. *World journal of Microbiology & Biotechnology* 12. 497-503. 1996.
- Yasnó, J. y García, C. Selección y diseño de alternativas para el tratamiento de afluentes y efluentes del proceso de producción caso trucha en el municipio de Silvia Cauca. Trabajo de grado Universidad del Cauca. Popayán Colombia. 2007.

## ANEXOS

Anexo A. Datos puntuales y promedio corrido de los parámetros medidos para el desarrollo del objetivo 1.

Tabla A. 1. Caudal ( $Ls^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido. Ensayos 1 y 2.

TIEMPO (h)	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	CAUDAL ( $Ls^{-1}$ )		CAUDAL ( $Ls^{-1}$ )	
	PUNTUAL	PROMEDIO CORRIDO	PUNTUAL	PROMEDIO CORRIDO
0	4.77	4.77	4.76	4.76
12	4.82	4.79	4.70	4.73
18	4.81	4.80	4.71	4.73
24	4.79	4.80	4.66	4.71
36	4.91	4.82	4.73	4.71
42	4.81	4.82	4.62	4.70
48	4.75	4.81	4.65	4.69
60	3.79	4.68	4.80	4.70
66	4.58	4.67	4.58	4.69
72	4.78	4.68	4.90	4.71
84	4.72	4.69	4.71	4.71
90	4.21	4.65	4.71	4.71
96	4.73	4.65	4.92	4.73
108	4.79	4.66	4.50	4.71
114	4.81	4.67	4.72	4.71
120	4.84	4.68	4.73	4.71
132	4.92	4.70	4.73	4.71
138	4.80	4.70	4.77	4.72
144	4.73	4.70	4.64	4.71

Tabla A. 2. Temperatura (°C) y pH. Datos puntuales ensayos 1 y 2.

TIEMPO (h)	ENSAYO 1		ENSAYO 2		ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	TEMPERATURA (°C)		TEMPERATURA (°C)		pH		pH	
	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.
0	12.9	12.8	12.8	12.9	7.4	7.3	6.5	6.6
12	10.5	10.7	10.4	10.6	7.4	7.5	6.9	6.9
18	11.7	11.3	11.6	11.4	7.5	7.4	6.7	6.9
24	12.3	12.6	12.3	12.3	7.4	7.6	7.0	7.2
36	10.5	10.6	10.3	10.4	7.5	7.5	7.7	7.3
42	12.0	11.6	11.6	11.3	7.5	7.6	6.9	6.7
48	12.7	13.0	12.3	12.4	7.5	7.5	7.0	7.1
60	10.8	10.7	10.2	10.3	7.3	7.5	7.3	6.9
66	12.3	11.7	11.3	11.1	7.8	7.5	6.9	7.1
72	13.1	12.8	12.0	12.1	7.6	7.0	7.1	6.4
84	10.9	11.0	11.2	11.3	7.2	7.4	7.3	7.4
90	11.6	11.5	12.3	12.2	7.7	7.4	7.5	7.5
96	12.2	12.1	12.4	12.6	7.6	7.5	6.8	7.1
108	10.9	10.9	10.5	10.8	7.9	7.5	7.5	7.8
114	12.1	11.9	11.4	11.3	7.7	7.7	7.1	7.5
120	12.2	12.3	11.9	12.1	7.7	7.5	6.7	7.0
132	10.9	11.0	9.5	9.5	7.4	7.7	7.0	7.1
138	12.2	11.7	11.9	11.4	8.1	7.9	7.0	7.2
144	12.5	12.7	12.8	12.4	8.3	7.9	6.6	6.8

Tabla A. 3. Sólidos suspendidos totales ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Datos promedio corrido ensayos 1 y 2.

Tiempo (h)	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	SST ( $\text{mgL}^{-1}$ )		SST ( $\text{mgL}^{-1}$ )	
	AFLUENTE	EFLUENTE	AFLUENTE	EFLUENTE
0	0.80	3.20	1.60	2.80
12	0.40	1.60	2.40	2.40
24	2.27	2.00	3.33	2.27
36	1.70	1.50	4.10	3.00
48	2.08	1.68	3.68	3.60
60	1.73	1.40	3.93	3.73
72	2.06	1.54	3.89	3.54
84	1.80	1.35	4.20	3.95
96	2.22	1.91	4.09	4.04
108	2.00	1.72	4.76	4.76
120	2.55	2.04	4.69	4.44
132	2.33	1.87	4.50	4.37
144	2.52	2.25	4.40	4.22

Tabla A. 4. Sólidos disueltos (mgL<sup>-1</sup>). Datos puntuales y promedio corrido. Ensayo 1 y 2.

TIEMPO (h)	ENSAYO 1				ENSAYO 2			
	SD (mgL <sup>-1</sup> )				SD (mgL <sup>-1</sup> )			
	PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO		PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO	
	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.
0	76.9	77.7	76.90	77.70	89.3	90.1	89.30	90.10
12	78.5	78.8	77.70	78.25	89.9	90.2	89.60	90.15
18	78.5	78.8	77.97	78.43	89.4	90.5	89.53	90.27
24	78.6	79.0	78.13	78.58	88.9	90.1	89.38	90.23
36	78.8	79.5	78.26	78.76	88.7	89.4	89.24	90.06
42	78.3	79.1	78.27	78.82	89.0	89.4	89.20	89.95
48	78.2	79.5	78.26	78.91	89.0	90.0	89.17	89.96
60	79.2	79.9	78.38	79.04	90.2	90.9	89.30	90.08
66	78.5	79.1	78.39	79.04	89.8	91.3	89.36	90.21
72	78.0	79.5	78.35	79.09	88.8	90.5	89.30	90.24
84	79.0	79.9	78.41	79.16	89.3	89.5	89.30	90.17
90	77.1	78.7	78.30	79.13	89.5	90.9	89.32	90.23
96	73.3	77.3	77.92	78.98	88.4	90.9	89.25	90.28
108	74.8	74.8	77.69	78.69	79.5	80.4	88.55	89.58
114	76.0	76.8	77.58	78.56	81.9	82.7	88.11	89.12
120	75.4	77.2	77.44	78.48	83.6	84.8	87.83	88.85
132	67.7	67.9	76.87	77.85	83.8	85.2	87.59	88.64
138	71.4	71.6	76.57	77.51	83.6	84.3	87.37	88.39
144	74.2	75.0	76.44	77.37	84.9	86.1	87.24	88.27



Tabla A. 5. Nitrógeno total ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2.

TIEMPO (h)	ENSAYO 1				ENSAYO 2			
	NITRÓGENO TOTAL ( $\text{mgL}^{-1}$ )				NITRÓGENO TOTAL ( $\text{mgL}^{-1}$ )			
	PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO		PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO	
	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.
0	0.06	0.11	0.06	0.11	0.27	0.14	0.27	0.14
12	0.03	0.14	0.05	0.13	0.00	0.33	0.14	0.23
24	0.29	0.28	0.13	0.18	0.22	0.20	0.16	0.22
36	0.05	0.26	0.11	0.20	0.21	0.25	0.17	0.23
48	0.09	0.21	0.10	0.20	0.46	0.46	0.23	0.28
60	0.05	0.17	0.09	0.20	0.28	0.43	0.24	0.30
72	0.12	0.21	0.10	0.20	0.05	0.71	0.21	0.36
84	0.07	0.27	0.09	0.21	0.43	0.50	0.24	0.38
96	0.31	0.36	0.12	0.23	0.18	0.63	0.23	0.40
108	0.28	0.49	0.13	0.25	0.08	0.70	0.22	0.43
120	0.17	0.38	0.14	0.26	0.23	0.51	0.22	0.44
132	0.30	0.45	0.15	0.28	0.22	0.71	0.22	0.46
144	0.18	0.50	0.15	0.30	0.23	0.38	0.22	0.46

Tabla A. 6. Nitrógeno disuelto ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2.

TIEMPO (h)	ENSAYO 1				ENSAYO 2			
	NITRÓGENO DISUELTO ( $\text{mgL}^{-1}$ )				NITRÓGENO DISUELTO ( $\text{mgL}^{-1}$ )			
	PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO		PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO	
	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.
0	0.06	0.09	0.056	0.092	0.04	0.10	0.045	0.096
12	0.00	0.14	0.028	0.114	0.00	0.14	0.022	0.120
24	0.05	0.23	0.036	0.154	0.18	0.18	0.075	0.141
36	0.00	0.25	0.027	0.177	0.05	0.23	0.069	0.163
48	0.08	0.21	0.038	0.183	0.41	0.31	0.137	0.193
60	0.05	0.17	0.039	0.181	0.23	0.37	0.152	0.223
72	0.00	0.19	0.034	0.182	0.00	0.39	0.130	0.247
84	0.05	0.21	0.035	0.185	0.43	0.23	0.167	0.245
96	0.29	0.35	0.063	0.204	0.03	0.61	0.152	0.285
108	0.24	0.46	0.081	0.229	0.00	0.65	0.137	0.322
120	0.14	0.33	0.087	0.238	0.20	0.39	0.142	0.329
132	0.21	0.38	0.098	0.250	0.11	0.45	0.140	0.339
144	0.12	0.39	0.099	0.261	0.16	0.34	0.141	0.339

Tabla A. 7. Nitrógeno amoniacal ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2.

TIEMPO (h)	ENSAYO 1				ENSAYO 2			
	NITRÓGENO AMONIACAL $\text{NH}_4^+$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )				NITRÓGENO AMONIACAL $\text{NH}_4^+$ ( $\text{mgL}^{-1}$ )			
	PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO		PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO	
	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.
0	0.044	0.082	0.044	0.082	0.000	0.052	0.000	0.052
12	0.000	0.125	0.022	0.104	0.000	0.051	0.000	0.052
24	0.017	0.154	0.020	0.121	0.000	0.023	0.000	0.042
36	0.017	0.201	0.020	0.141	0.016	0.066	0.004	0.048
48	0.020	0.179	0.020	0.148	0.000	0.017	0.003	0.042
60	0.000	0.172	0.016	0.152	0.108	0.140	0.021	0.058
72	0.014	0.164	0.016	0.154	0.000	0.169	0.018	0.074
84	0.019	0.116	0.016	0.149	0.000	0.138	0.015	0.082
96	0.024	0.084	0.017	0.142	0.061	0.211	0.021	0.096
108	0.000	0.198	0.016	0.148	0.067	0.216	0.025	0.108
120	0.020	0.202	0.016	0.153	0.000	0.139	0.023	0.111
132	0.017	0.195	0.016	0.156	0.022	0.114	0.023	0.111
144	0.000	0.158	0.015	0.156	0.000	0.106	0.021	0.111

Tabla A. 8. Fósforo total ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2.

TIEMPO (h)	ENSAYO 1				ENSAYO 2			
	FÓSFORO TOTAL ( $\text{mgL}^{-1}$ )				FÓSFORO TOTAL ( $\text{mgL}^{-1}$ )			
	PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO		PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO	
	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.
0	0.10	0.08	0.10	0.08	0.11	0.14	0.11	0.14
12	0.10	0.09	0.10	0.09	0.11	0.09	0.11	0.12
24	0.12	0.09	0.11	0.09	0.06	0.09	0.09	0.11
36	0.07	0.08	0.10	0.09	0.07	0.07	0.09	0.10
48	0.08	0.09	0.09	0.09	0.28	0.30	0.13	0.14
60	0.08	0.09	0.09	0.09	0.28	0.30	0.15	0.17
72	0.15	0.19	0.10	0.10	0.28	0.30	0.17	0.19
84	0.16	0.19	0.11	0.11	0.28	0.35	0.18	0.21
96	0.13	0.14	0.11	0.12	0.11	0.14	0.17	0.20
108	0.19	0.25	0.12	0.13	0.15	0.17	0.17	0.20
120	0.20	0.21	0.12	0.14	0.09	0.16	0.16	0.19
132	0.20	0.21	0.13	0.14	0.11	0.13	0.16	0.19
144	0.08	0.19	0.13	0.15	0.09	0.14	0.15	0.18

Tabla A. 9. Concentraciones fracción sólida de nitrógeno ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2.

TIEMPO (h)	NITRÓGENO ( $\text{mgL}^{-1}$ )							
	ENSAYO 1				ENSAYO 2			
	PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO		PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO	
	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.
0	0.009	0.014	0.009	0.014	0.227	0.041	0.227	0.041
12	0.027	0.009	0.018	0.012	0.000	0.188	0.113	0.115
24	0.236	0.050	0.091	0.025	0.037	0.020	0.088	0.083
36	0.047	0.013	0.080	0.022	0.154	0.017	0.104	0.066
48	0.013	0.007	0.066	0.019	0.051	0.149	0.094	0.083
60	0.000	0.002	0.055	0.016	0.056	0.054	0.087	0.078
72	0.119	0.023	0.064	0.017	0.052	0.319	0.082	0.113
84	0.020	0.067	0.059	0.023	0.007	0.271	0.073	0.132
96	0.025	0.007	0.055	0.021	0.156	0.015	0.082	0.119
108	0.038	0.031	0.053	0.022	0.081	0.041	0.082	0.111
120	0.023	0.049	0.051	0.025	0.034	0.117	0.078	0.112
132	0.090	0.074	0.054	0.029	0.110	0.254	0.080	0.124
0	0.067	0.108	0.055	0.035	0.076	0.044	0.080	0.118

Tabla A. 10. Concentraciones fracción sólida de fósforo ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2.

TIEMPO (h)	FÓSFORO ( $\text{mgL}^{-1}$ )							
	ENSAYO 1				ENSAYO 2			
	PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO		PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO	
	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.
0	0.020	0.011	0.020	0.011	0.011	0.056	0.011	0.056
12	0.026	0.021	0.023	0.016	0.030	0.001	0.020	0.029
24	0.066	0.039	0.037	0.024	0.013	0.024	0.018	0.027
36	0.004	0.000	0.029	0.018	0.015	0.004	0.017	0.021
48	0.009	0.004	0.025	0.015	0.014	0.017	0.017	0.021
60	0.002	0.002	0.021	0.013	0.000	0.018	0.014	0.020
72	0.008	0.015	0.019	0.013	0.031	0.006	0.016	0.018
84	0.012	0.013	0.018	0.013	0.015	0.055	0.016	0.023
96	0.017	0.000	0.018	0.012	0.025	0.018	0.017	0.022
108	0.065	0.113	0.023	0.022	0.062	0.059	0.022	0.026
120	0.025	0.008	0.023	0.021	0.015	0.053	0.021	0.028
132	0.013	0.015	0.022	0.020	0.014	0.034	0.020	0.029
144	0.022	0.067	0.022	0.024	0.037	0.032	0.022	0.029

Nota: La fracción sólida de nitrógeno y fósforo se calculó como la diferencia entre la concentración total y la fracción disuelta.

Tabla A. 11. Fósforo disuelto ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Datos puntuales y promedio corrido ensayos 1 y 2.

TIEMPO (h)	ENSAYO 1				ENSAYO 2			
	FÓSFORO DISUELTO ( $\text{mgL}^{-1}$ )				FÓSFORO DISUELTO ( $\text{mgL}^{-1}$ )			
	PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO		PUNTUAL		PROMEDIO CORRIDO	
	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.	AFLU.	EFLU.
0	0.08	0.07	0.08	0.07	0,10	0.09	0.10	0.09
12	0.07	0.07	0.08	0.07	0,08	0.09	0.09	0.09
24	0.05	0.05	0.07	0.06	0,05	0.06	0.08	0.08
36	0.07	0.08	0.07	0.07	0,05	0.07	0.07	0.08
48	0.07	0.08	0.07	0.07	0,27	0.28	0.11	0.12
60	0.07	0.09	0.07	0.07	0,28	0.28	0.14	0.15
72	0.14	0.17	0.08	0.09	0.25	0.30	0.15	0.17
84	0.15	0.18	0.09	0.10	0.27	0.29	0.17	0.18
96	0.11	0.14	0.09	0.10	0.08	0.13	0.16	0.18
108	0.13	0.14	0.09	0.11	0.08	0.11	0.15	0.17
120	0.18	0.20	0.10	0.12	0.08	0.11	0.14	0.17
132	0.19	0.20	0.11	0.12	0.09	0.10	0.14	0.16
144	0.06	0.12	0.11	0.12	0.06	0.11	0.13	0.16

Tabla A. 12. Oxígeno disuelto ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Datos puntuales ensayo 1.

TIEMPO (h)	OXÍGENO DISUELTO ( $\text{mgL}^{-1}$ )				
	CANAL ENTRADA	INICIO	INTERMEDIO	FINAL	PROMEDIO TOTAL
0	7.76	7.16	5.82	5.74	6.24
12	8.26	7.50	6.72	6.24	6.82
18	8.00	7.12	5.78	5.70	6.20
24	7.87	7.33	6.21	5.43	6.32
36	8.39	7.36	6.26	6.02	6.55
42	8.01	6.87	5.93	5.60	6.13
48	7.77	6.83	5.79	5.06	5.90
60	8.36	7.48	6.74	6.54	6.92
66	7.93	7.16	5.72	5.70	6.19
72	7.75	7.41	6.81	5.52	6.58
84	8.27	7.46	6.52	6.30	6.76
90	8.06	7.51	5.64	5.52	6.23
96	7.91	7.36	6.52	5.09	6.33
108	8.29	7.60	6.66	6.42	6.89
114	8.05	7.34	5.41	5.24	6.00
120	7.92	7.46	6.19	4.79	6.15
132	8.32	7.54	6.92	6.03	6.83
138	8.10	7.34	5.90	5.60	6.28
144	7.97	7.39	6.35	4.63	6.12

Tabla A. 13. Oxígeno disuelto ( $\text{mgL}^{-1}$ ). Datos puntuales ensayo 2.

TIEMPO (h)	OXÍGENO DISUELTO ( $\text{mgL}^{-1}$ )				
	CANAL ENTRADA	INICIO	INTERMEDIO	FINAL	PROMEDIO TOTAL
0	7.67	7.19	5.63	5.06	5.96
12	8.48	7.60	6.97	6.35	6.97
18	8.17	7.60	6.57	6.03	6.73
24	7.78	7.00	6.19	5.42	6.20
36	8.42	7.60	7.20	6.91	7.24
42	8.06	6.89	6.26	5.84	6.33
48	7.84	6.97	6.06	4.93	5.99
60	8.48	7.82	7.20	6.47	7.16
66	8.11	7.67	6.27	5.30	6.41
72	7.93	7.10	6.39	4.88	6.12
84	8.17	7.44	6.83	6.22	6.83
90	8.05	7.34	5.46	5.13	5.98
96	7.77	7.12	5.44	5.00	5.85
108	8.26	7.79	6.65	5.82	6.75
114	8.11	7.42	5.27	5.10	5.93
120	8.08	7.59	6.56	4.96	6.37
132	8.44	8.18	6.96	6.44	7.19
138	8.07	7.03	5.23	4.91	5.72
144	7.81	7.00	5.02	4.70	5.57

Anexo B. Tratamiento y presentación de resultados para el desarrollo del objetivo 1.

Cálculo B. 1. Determinación de las tasas de acumulación.

$$\text{Tasa de acumulación} = \frac{\left( \frac{\text{Concentración Afluyente} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) - \text{Concentración Efluyente} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{1000} \right) * Q \left( \frac{\text{L}}{\text{s}} \right) * \frac{3600\text{s}}{\text{h}}}{\text{Biomasa (Ton)}}$$

Donde,

Biomasa = Peso indiv. Trucha (Ton) \* N° de truchas en el estanque (Tabla 1).

Nota: La biomasa utilizada para los cálculos realizados fue el promedio encontrado entre el peso de los peces al inicio y al final del periodo de muestreo, las cuales fueron de 0.19765 y 0.19706 Ton para los ensayos 1 y 2 respectivamente.

Cálculo B. 2. Determinación de tasas de transferencia.

$$\text{Tasa de transferencia} = \frac{\left( \frac{\text{Concentración Efluyente} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) - \text{Concentración Afluyente} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{1000} \right) * Q \left( \frac{\text{L}}{\text{s}} \right) * \frac{3600\text{s}}{\text{h}}}{\text{Biomasa (Ton)}}$$

Cálculo B. 3. Determinación de tasas de consumo de oxígeno disuelto.

$$\text{Tasas de consumo de oxígeno} = \frac{\left( \frac{\text{OD Afluyente} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) - \text{OD Efluyente} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{1000} \right) * Q \left( \frac{\text{L}}{\text{s}} \right) * \frac{3600\text{s}}{\text{h}}}{\text{Biomasa (Ton)}}$$

Cálculo B. 4. Determinación del consumo de oxígeno disuelto por secciones del estanque.

Consumo por sección =  $T_i - T_e$

Donde,

$T_i$  = Tasa de ingreso de oxígeno disuelto en cada sección en  $\text{g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1}$  pez.

$T_e$  = Tasa de egreso de oxígeno en cada sección en  $\text{g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1}$  pez.



Ejemplo = Consumo sección inicio ensayo 1.

$$T_i = \frac{\left( \frac{\text{Concentracioni} \left( \frac{mg}{L} \right)}{1000} \right) * Q \left( \frac{L}{s} \right) * \frac{3600s}{h}}{\text{Biomasa} (Ton)}$$

$$T_i = \frac{\left( \frac{8.26 \frac{mg}{L}}{1000} \right) * 4.82 \left( \frac{L}{s} \right) * \frac{3600s}{h}}{0.19765 Ton} \quad T_i = 725.74 \text{ g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1} \text{ pez.}$$

$$T_e = \frac{\left( \frac{7.50 \frac{mg}{L}}{1000} \right) * 4.82 \left( \frac{L}{s} \right) * \frac{3600s}{h}}{0.19765 Ton} \quad T_e = 658.97 \text{ g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1} \text{ pez.}$$

$$\text{Consumo por sección} = T_i - T_e$$

$$\text{Consumo sección inicio} = 725.74 - 658.97$$

$$\text{Consumo sección inicio} = 66.78 \text{ g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1} \text{ pez}$$

Cálculo B. 5. Porcentajes de consumo en cada sección del estanque.

$$\% \text{ Consumo sección} = \frac{\text{Consumo sección}}{\text{Consumo total}} * 100$$

Nota: En el anexo B. Tablas B.5 y B.6, se muestran los resultados obtenidos para los consumos en cada una de las secciones del estanque y los respectivos porcentajes discriminado por horas. Ensayos 1 y 2.

Tabla B. 1. Tasas de acumulación de sólidos suspendidos totales, nitrógeno y fósforo ( $\text{g Ton}^{-1} \text{pez h}^{-1}$ ). Ensayos 1 y 2.

HORA	TASA DE ACUMULACIÓN ( $\text{g Ton}^{-1} \text{pez h}^{-1}$ )					
	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES		NITRÓGENO		FÓSFORO	
	ENSAYO		ENSAYO		ENSAYO	
	1	2	1	2	1	2
0	0	0	0	0	0	0
12	558.55	625.69	58.09	52.76	10.34	7.95
24	686.62	717.42	60.51	56.07	10.78	7.47
36	680.91	720.40	56.98	56.48	10.19	7.59
48	698.36	632.56	56.49	57.46	9.76	7.47
60	691.50	642.92	56.36	56.00	9.42	7.29
72	706.98	655.39	56.43	48.62	8.98	7.24
84	701.59	647.33	55.30	49.50	8.68	6.67
96	689.83	629.55	55.94	46.49	8.57	6.52
108	687.24	625.69	55.06	42.73	8.09	6.52
120	706.92	647.70	54.28	42.24	8.12	6.17
132	703.44	637.21	54.11	40.32	8.14	6.18
144	687.14	641.62	52.83	40.97	7.52	6.08

Tabla B. 2. Tasas de generación, degradación y disolución de sólidos disueltos ( $\text{g Ton}^{-1}$  pez  $\text{h}^{-1}$ ). Ensayos 1 y 2.

HORA	TASAS DE GENERACIÓN DE SÓLIDOS DISUELTOS ( $\text{g Ton}^{-1}$ pez $\text{h}^{-1}$ )		TASAS DE DEGRADACIÓN Y DISOLUCIÓN DE SÓLIDOS DISUELTOS ( $\text{g Ton}^{-1}$ pez $\text{h}^{-1}$ )	
	ENSAYO		ENSAYO	
	1	2	1	2
0	0.00	0.00	0	0
12	48.03	47.54	3.61	-7.88
18	40.80	63.30	-3.61	7.88
24	39.32	73.12	-5.09	17.70
36	43.90	70.60	-0.52	15.18
42	48.28	64.36	3.86	8.94
48	57.56	67.33	13.14	11.91
60	56.50	66.59	12.08	11.17
66	55.77	73.29	11.36	17.87
72	63.11	80.89	18.69	25.47
84	64.40	75.10	19.99	19.68
90	69.82	78.87	25.40	23.45
96	90.62	89.66	46.20	34.24
108	84.32	88.51	39.90	33.09
114	83.40	87.22	38.99	31.80
120	87.96	88.24	43.54	32.82
132	84.04	90.16	39.62	34.74
138	80.42	88.56	36.00	33.14
144	79.81	89.26	35.40	33.84

Nota: La tasa de degradación y disolución fue obtenida de sustraer una tasa promedio de 44.42 y 55.42  $\text{g SD h}^{-1} \text{Ton}^{-1}$  pez ensayos 1 y 2 (determinada por las tasas encontradas en las primeras 24 horas de iniciado el muestreo) a las tasas de generación total de sólidos disueltos para ambos ensayos.

Tabla B. 3. Tasas de generación de nitrógeno y fósforo sólido a la fracción disuelta fósforo ( $\text{g Ton}^{-1} \text{pez h}^{-1}$ ). Ensayos 1 y 2.

TIEMPO (h)	TASA DE GENERACIÓN ( $\text{g h}^{-1} \text{Ton}^{-1} \text{pez}$ )					
	NITRÓGENO DISUELTO		NITRÓGENO AMONIACAL		FÓSFORO DISUELTO	
	ENSAYO		ENSAYO		ENSAYO	
	1	2	1	2	1	2
0	0	0	0	0	0	0
12	7.48	8.46	7.13	4.48	-0.51	0.00
24	10.29	9.48	8.74	3.62	-0.38	0.40
36	13.15	8.10	10.63	3.79	0.00	0.73
48	12.69	4.79	11.27	3.31	0.33	0.87
60	11.98	6.14	11.49	3.23	0.50	0.85
72	12.61	10.10	11.72	4.87	0.76	1.29
84	12.74	6.69	11.31	5.75	0.98	1.44
96	11.94	11.62	10.63	6.58	1.20	1.72
108	12.61	16.06	11.28	7.17	1.22	1.80
120	12.95	16.13	11.70	7.61	1.31	1.88
132	13.07	17.26	12.04	7.63	1.25	1.78
144	13.90	17.11	12.16	7.74	1.56	1.97

Tabla B. 4. Consumo de oxígeno en las diferentes secciones del estanque ( $\text{g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1}$  pez).

TIEMPO (h)	CONSUMO ( $\text{g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1}$ pez)					
	SECCIÓN					
	INICIO		INTERMEDIO		FINAL	
	ENSAYO		ENSAYO		ENSAYO	
	1	2	1	2	1	2
0	0	0	0	0	0	0
12	66.78	75.28	135.31	129.67	177.87	183.20
18	77.24	48.97	201.62	138.12	194.32	184.52
24	47.20	66.39	144.81	135.06	212.46	201.26
36	92.21	70.94	190.29	105.31	211.65	130.75
42	99.96	98.79	182.28	151.60	211.41	187.06
48	81.17	73.59	170.88	150.95	233.89	247.36
60	61.11	58.11	112.24	112.23	125.83	176.08
66	64.67	37.06	186.40	153.70	184.91	234.87
72	29.82	74.30	181.52	137.85	194.12	272.63
84	69.60	62.72	150.29	115.40	169.80	167.99
90	41.84	60.85	185.26	222.48	194.63	251.32
96	47.51	58.53	119.53	209.53	242.70	248.88
108	59.88	38.49	142.14	132.47	163.16	200.68
114	61.99	59.17	230.84	244.94	246.12	259.42
120	40.52	41.94	152.00	131.20	275.32	269.11
132	70.01	22.36	125.47	127.94	204.94	173.15
138	66.25	90.62	192.25	247.73	218.58	275.74
144	49.58	68.98	139.44	236.69	287.98	263.23

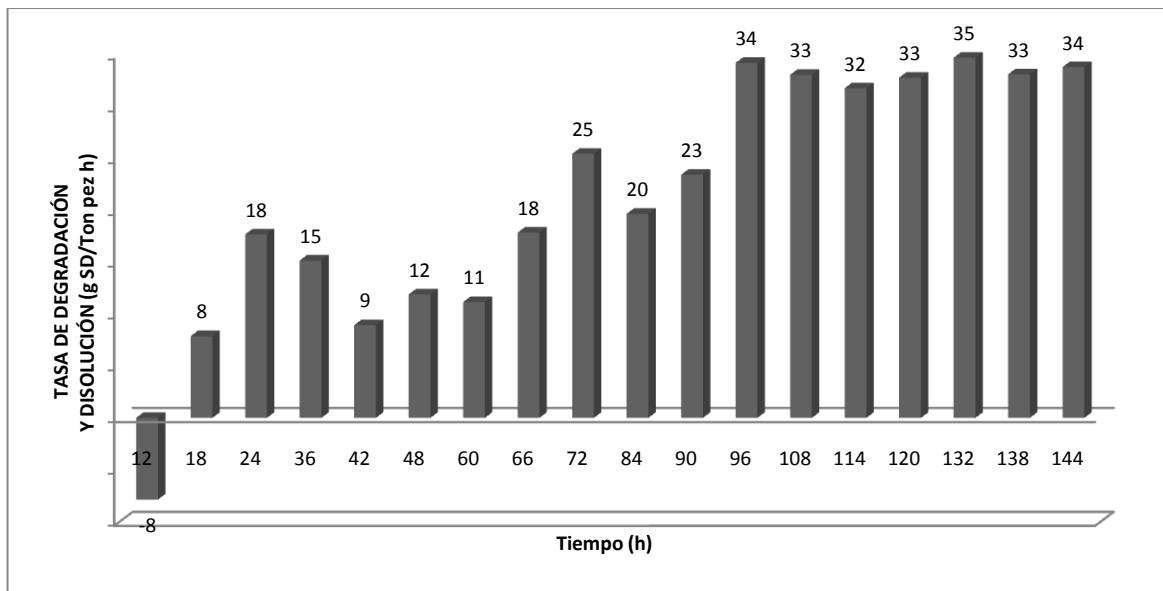
Tabla B. 5. Consumo de oxígeno en cada sección del estanque ( $\text{g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1} \text{ pez}$ ).

TIEMPO (h)	CONSUMO ( $\text{g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ Ton}^{-1} \text{ pez}$ )					
	SECCIÓN					
	INICIO		INTERMEDIO		FINAL	
	ENSAYO		ENSAYO		ENSAYO	
	1	2	1	2	1	2
0	0	0	0	0	0	0
12	66.78	75.28	54.39	135.42	53.53	49.68
18	77.24	48.97	89.15	54.39	46.39	53.53
24	47.20	66.39	68.66	89.15	66.20	46.39
36	92.21	70.94	34.37	68.66	25.44	66.20
42	99.96	98.79	52.82	34.37	35.46	25.44
48	81.17	73.59	77.36	52.82	96.42	35.46
60	61.11	58.11	54.12	77.36	63.85	96.42
66	64.67	37.06	116.65	54.12	81.17	63.85
72	29.82	74.30	63.56	116.65	134.77	81.17
84	69.60	62.72	52.68	63.56	52.59	134.77
90	41.84	60.85	161.63	52.68	28.85	52.59
96	47.51	58.53	151.01	161.63	39.35	28.85
108	59.88	38.49	93.98	151.01	68.20	39.35
114	61.99	59.17	185.76	93.98	14.48	68.20
120	40.52	41.94	89.26	185.76	137.91	14.48
132	70.01	22.36	105.58	89.26	45.21	137.91
138	66.25	90.62	157.11	105.58	28.01	45.21
144	49.58	68.98	167.70	157.11	26.54	28.01

Tabla B. 6. Porcentajes de consumo de oxígeno en cada sección del estanque. Ensayos 1 y 2.

HORA DEL DÍA	HORA DE MUESTREO	PORCENTAJES DE CONSUMO					
		ENSAYO 1			ENSAYO 2		
		SECCIÓN			SECCIÓN		
		INICIO	INTERMEDIO	FINAL	INICIO	INTERMEDIO	FINAL
6 am	12	37.5	38.5	23.9	41.1	29.7	29.2
	36	43.6	46.3	10.1	54.3	26.3	19.5
	60	48.6	40.6	10.8	33.0	30.7	36.3
	84	40.9	47.5	11.5	37.3	31.4	31.3
	108	36.7	50.4	12.9	19.2	46.8	34.0
	132	34.2	27.1	38.8	12.9	61.0	26.1
12 am	18	38.3	58.1	3.6	26.5	48.3	25.1
	42	47.3	38.9	13.8	52.8	28.2	19.0
	66	34.7	64.5	0.8	15.8	49.7	34.6
	90	21.5	73.7	4.8	24.2	64.3	11.5
	114	25.2	68.6	6.2	22.8	71.6	5.6
	138	30.3	57.6	12.0	32.9	57.0	10.2
6 pm	0	29.8	66.2	4.1	18.5	59.6	21.9
	24	22.2	45.9	31.8	33.0	34.1	32.9
	48	34.7	38.4	26.9	29.7	31.3	39.0
	72	15.4	26.6	58.00	27.3	23.3	49.4
	96	19.6	29.7	50.6	23.5	60.7	15.8
	120	14.7	40.5	44.8	15.6	33.2	51.2
	144	17.2	31.2	51.6	26.2	63.7	10.1

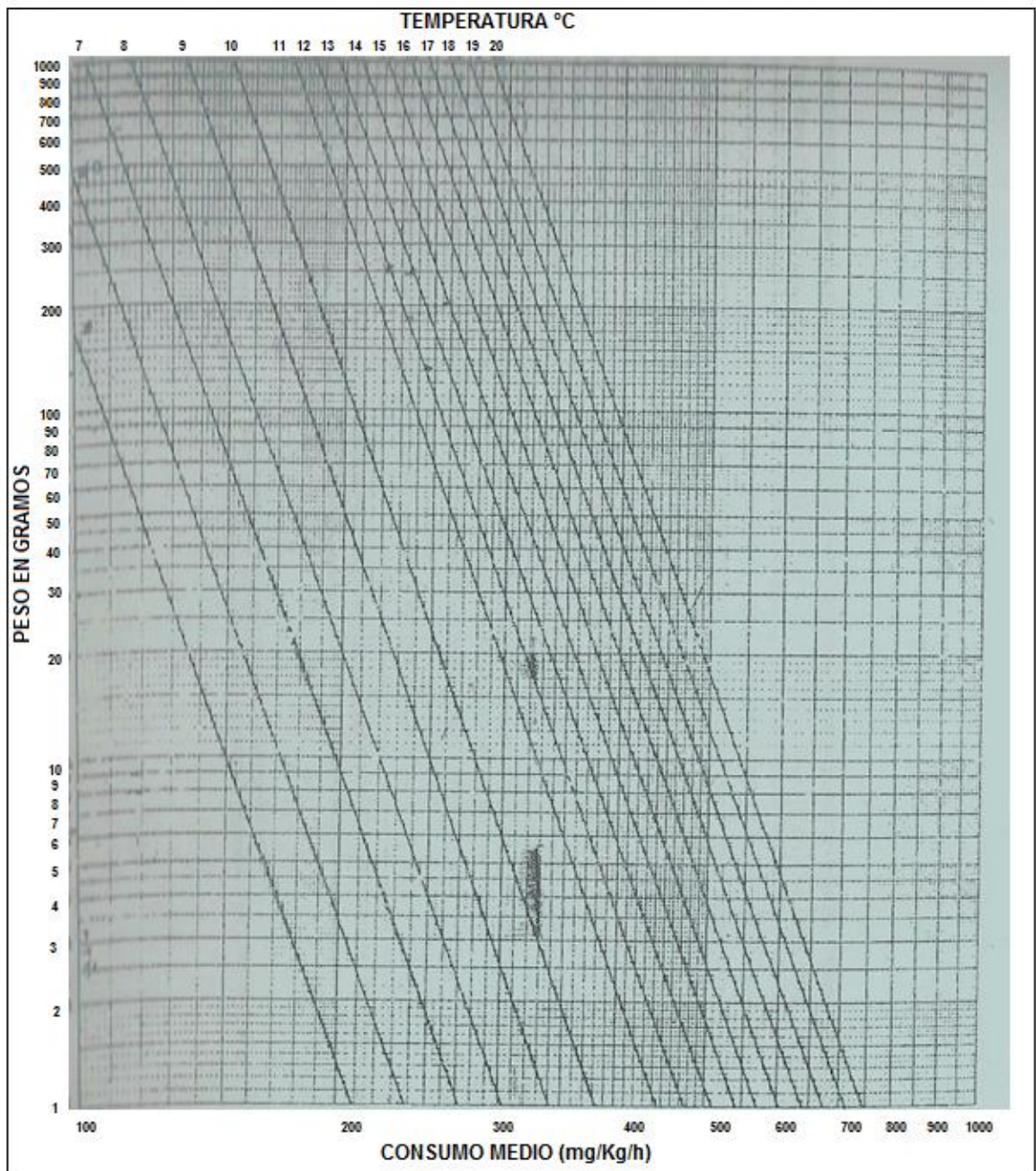
Figura B. 1. Tasas de generación de sólidos disueltos por degradación y disolución de la materia orgánica. Ensayo 2.





Anexo C. Resultados obtenidos en el desarrollo del segundo objetivo.

Figura C. 1. Consumo de oxígeno por la trucha arcoíris, en  $\text{mg Kg}^{-1}$  de peso hora<sup>-1</sup>, en temperaturas comprendidas entre 5 y 20°C y de 1 a 1000 gramos de peso. (Tomado de Blanco, 1995. Según Liao 1970).



### Calculo C. 1. Cálculo de caudales

El cálculo de caudales se realizó por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Biomasa (Kg)} * \text{Consumo de Oxígeno} \frac{\text{mg}}{\text{Kg} * \text{h}}}{3600 \text{ s} * \text{Oxígeno disponible} \frac{\text{mg}}{\text{L}}} * \%$$

Donde,

Biomasa= Peso indiv. Trucha (kg) \* N° de truchas en el estanque.

Consumo de oxígeno= Interpolación de la fig. B.1.

Oxígeno disponible= (Oxígeno entrada – Oxígeno residual) mgL<sup>-1</sup>.

Oxígeno residual= 5.5 mg/L. Según Blanco, 1995.

Ejemplo para el cálculo de caudal al 100%.

$$\text{Caudal 1} = \frac{189.00 \text{ Kg} * 228 \frac{\text{mg}}{\text{Kg} * \text{h}}}{3600 \text{ s} * 2.5 \frac{\text{mg}}{\text{l}}} * 1$$

$$\text{Caudal 1} = 4.8 \text{ L s}^{-1}$$

El cálculo de caudales con su respectiva reducción, se realizó de la misma manera; los resultados obtenidos se muestran en la tabla B.1.

Tabla C. 1. Caudales teóricos en los 4 periodos de operación.

Periodo	%	Biomasa (Kg)	Caudal (L s <sup>-1</sup> )
1	100	189.00	4.8
2	90	230.41	4.7
3	85	275.87	5.5
4	80	302.9	7.0

Tabla C. 2. Parámetros puntuales obtenidos en los 4 periodos de operación.

DÍA	CAUDAL (L s <sup>-1</sup> )				pH				TEMPERATURA (°C)			
	ENSAYO				ENSAYO				ENSAYO			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	4.77	4.74	5.47	6.95	7.35	8.0	6.35	7.8	12.85	12.05	11.3	12.2
3	4.80	4.68	5.50	7.03	7.65	7.15	7.9	7.5	12.0	11.85	11.2	10.5
6	4.83	4.74	5.50	7.03	8.0	7.1	7.2	8.1	11.95	10.9	11.5	10.55
9	4.81	4.72	5.55	7.03	8.1	7.35	7.9	8.05	13,1	11.3	11.6	10.5
12	4.87	4.73	5.58	6.99	7.65	7.6	7.65	8.05	12.3	11.6	11.05	12.05
15	4.79	4.68	5.55	7.11	7.05	7.55	7.95	7.5	11.8	11.3	10.7	12.7

Tabla C. 3. Concentraciones promedio de sólidos suspendidos totales y disueltos. Periodos 1, 2, 3 y 4.

DIA	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mgL <sup>-1</sup> )				SÓLIDOS DISUELTOS (mgL <sup>-1</sup> )			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	2.0	47.0	5.4	3.0	77.3	80.5	74.9	80.6
3	1.4	5.6	9.4	5.6	78.8	75.9	59.65	83.6
6	5.8	4.6	2.2	6.4	71.5	65.4	78.05	84.8
9	48.8	3.0	2.8	5.6	57.05	76.9	78.25	83.6
12	3.8	6.2	3.6	1.4	75.55	70.15	80.15	86.1
15	5.0	3.4	4.0	3.8	70.25	74.6	80.8	85.0

Tabla C. 4. Concentraciones promedio de nutrientes en cada periodo de operación.

DIA	NITRÓGENO TOTAL (mgL <sup>-1</sup> )				NITRÓGENO AMONIACAL NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mgL <sup>-1</sup> )				FOSFORO TOTAL (mgL <sup>-1</sup> )			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	0.120	0.350	0.106	0.060	0.063	0.095	0.083	0.111	0.086	0.263	0.067	0.136
3	0.078	0.040	0.158	0.144	0.057	0.026	0.060	0.080	0.182	0.079	0.135	0.156
6	0.052	0.125	0.055	0.081	0.047	0.083	0.049	0.093	0.082	0.188	0.080	0.115
9	0.301	0.266	0.019	0.151	0.130	0.142	0.062	0.059	0.257	0.102	0.125	0.081
12	0.018	0.032	0.124	0.149	0.049	0.109	0.059	0.055	0.091	0.081	0.083	0.070
15	0.050	0.134	0.105	0.048	0.088	0.103	0.117	0.070	0.118	0.072	0.100	0.095

Tabla C. 5. Resultados de los pesajes y las tasas de crecimiento absoluta obtenidas en los 4 periodos de operación.

<b>PERIODO</b>	<b>PESO INICIAL (g)</b>	<b>PESO FINAL (g)</b>	<b>TASA DE CRECIMIENTO (%)</b>
1	112.5	137.15	1.64
2	137.15	164.21	1.80
3	164.21	180.23	1.07
4	180.23	205.3	1.65