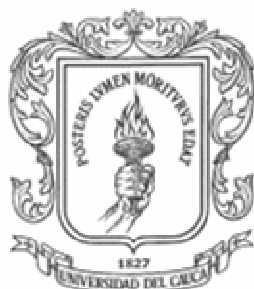


**EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN EN LA
PISCÍCOLA EL DIVISO PARA LA GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS DE
PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN EL DESARROLLO DE LA PISCICULTURA.**



**ÁNGELA MARÍA MONTAÑO FUENTES
JOHANNA CAROLINA SANDOVAL HERRERA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYÁN
2008**

**EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN EN LA
PISCÍCOLA “EL DIVISO” PARA LA GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS DE
PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN EL DESARROLLO DE LA PISCICULTURA.**



**ÁNGELA MARÍA MONTAÑO FUENTES
JOHANNA CAROLINA SANDOVAL HERRERA**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingenieras Ambientales**

**Director
Javier Ernesto Fernández Mera**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYÁN
2008**

Nota de aceptación

Firma del Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, Marzo de 2008

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por su infinita entrega, amor y apoyo.

Al Ingeniero Javier Ernesto Fernández quien nos ofreció la oportunidad de materializar este proyecto y compartió sus conocimientos sin reservas para realizar un buen trabajo.

Al Ingeniero Carlos César Cabezas quien me ofreció su amistad y apoyo de manera incondicional y permanente.

Carolina Sandoval Herrera.

Agradezco al Ingeniero Javier Fernández quien creyó en nosotros para realizar este trabajo, quien además de su apoyo con sus conocimientos y experiencia en este estudio, nos ofreció su amistad. Agradezco a todas las personas que nos apoyaron en la realización de este trabajo, a compañeros y trabajadores de la Universidad del Cauca, de la piscifactoría “El Diviso” y del CREPIC quienes directa e indirectamente permitieron culminar con éxito este proceso.

Agradezco a Dios por que cada día me da la fortaleza y la sabiduría para poder ofrecer lo mejor de mí en cada etapa de mi vida y que permitió que hoy pueda estar culminando un ciclo más de la vida con éxito y me está dando la posibilidad de enfrentarme a nuevos retos.

Ángela María Montaña Fuentes.

Este estudio fue posible gracias al apoyo en la financiación realizada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en el proyecto “Desarrollo y Adaptación de tecnología para el tratamiento de Efluentes Piscícolas”

DEDICATORIA

Este trabajo es fruto del amor de mi familia quienes siempre han creído y confiado en mí, agradezco a mi madre por todo el esfuerzo que ha hecho para hacer de mí la mujer y profesional que ha soñado, a mis hermanos que día a día han estado a mi lado ofreciendo su apoyo, a mi novio y a mis amigos quienes con su amistad han permitido que supere los obstáculos, me han enseñado y me han ayudado a crecer como persona.

Ángela María Montaña Fuentes.

Agradezco a Dios por la posibilidad que me ofrece de concluir satisfactoriamente esta etapa, acompañada de mis papás, hermanos y verdaderos amigos, a quienes dedico el fruto de mi trabajo, pues su constancia, paciencia y permanente apoyo han constituido una herramienta imprescindible para vencer muchos obstáculos y representan un gran motivo de felicidad y progreso.

Carolina Sandoval Herrera.

CONTENIDO

Pág.

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA.....	v
CONTENIDO	vi
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE ANEXOS	x
GLOSARIO	xi
RESUMEN.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	13
1 PROBLEMA	15
2 JUSTIFICACIÓN	17
3 OBJETIVOS.....	19
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
4 MARCO TEÓRICO.....	20
4.1 PARÁMETROS HIDRÁULICOS.....	20
4.1.1 Estanques.....	20
4.1.2 Requerimientos de Agua.....	21
4.1.3 Flujos de Agua.....	23
4.2 PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS.....	24
4.2.1 Temperatura.....	24
4.2.2 Oxígeno disuelto.....	25
4.2.3 Sólidos.....	28
4.2.4 Potencial de Hidrógeno (pH).....	30
4.3 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN POR EFLUENTES PISCÍCOLAS.....	31
5 METODOLOGÍA	33

5.1	CONSIDERACIONES GENERALES.....	33
5.2	OBJETIVO 1.....	34
5.2.1	Descripción del Procedimiento	37
5.2.2	Trabajo de Campo.....	37
5.2.3	Parámetros Físico químicos	39
5.3	OBJETIVO 2.....	39
5.3.1	Análisis de datos	40
6	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	41
6.1	IMPACTO SOBRE EL RECURSO HÍDRICO	41
6.2	COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO	45
6.3	IMPACTO SOBRE LA SEDIMENTABILIDAD DE LAS PARTÍCULAS.....	48
6.4	IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA.....	53
6.5	OXÍGENO DISUELTO	54
6.5.1	Influencia de factores externos	56
6.5.2	Efecto de la acumulación de lodo en el estanque	60
6.5.3	Diferencias de OD por ubicación en el estanque.....	62
6.5.4	Relación de calidad de agua con las condiciones de la trucha	66
6.6	CONSIDERACIONES SOBRE EL MANEJO E IMPLEMENTACION DE PML.....	68
7	CONCLUSIONES.....	70
8	RECOMENDACIONES.....	72
8.1	ASPECTOS HIDRÁULICOS.....	72
8.2	ASPECTOS OPERACIONALES	72
9	BIBLIOGRAFÍA.....	74
	ANEXOS	78

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación del estado del agua para el cultivo de truchas según el contenido de oxígeno disuelto (OD).....	26
Tabla 2. Parámetros físico químicos de medición.....	36
Tabla 3. Resumen de los caudales promedio (m^3/s) reportados en cada periodo de operación.....	1
Tabla 4. Densidad de biomasa en el estanque (kg/m^3).	1
Tabla 5. Valores de velocidad (m/s) para cada Periodo de Operación	1
Tabla 6. Eficiencias de remoción en el estanque para condiciones de reposos y agitación.	1
Tabla 7. Concentración de sólidos suspendidos en el lodo evacuado (g) y caudal de lavado del estanque.....	1
Tabla 8. Parámetros físico químicos e hidráulicos evaluados durante cada Periodo de Operación. 1	
Tabla 9. Concentraciones promedio de OD (mg/l) para cada periodo de operación.	55
Tabla 10. Resultado de la desviación estándar y los Intervalos de confianza para caudal (m^3/s) en los 3 periodos de muestreo.	56
Tabla 11. Promedios de OD por horas dentro del estanque, organizados de mayor a menor para el Periodo de Operación de 5 días.	58
Tabla 12. Resultado de la clasificación del estado del agua para el estanque de estudio en los tres periodos operación.....	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Adaptación de tubería de salida de lodos.....	35
Figura 2. Final de tubería de adaptación salida de lodos	35
Figura 3. Distribución de los puntos de muestreo en el estanque.....	37
Figura 4. Comportamiento de la Velocidad (m/s) en los tres Periodos de Operación.....	46
Figura 5. Comportamiento de la Velocidad en la Sección 1 del estanque (entrada de agua) para cada una de las alturas de medición.....	47
Figura 6. Estanque en reposo	48
Figura 7. Estanque después de alimentación.	49
Figura 8. Curva de sedimentabilidad de SS.	50
Figura 9. Curva de sedimentabilidad de SS.	50
Figura 10. Día vs. Cantidad de oxígeno consumido por día, en el periodo de operación de 3 días	60
Figura 11. Día vs. Cantidad de oxígeno consumido por día, en el periodo de operación de 5 días	61
Figura 12. Día vs. Cantidad de oxígeno consumido por día, en el periodo de operación de 8 días	61
Figura 13. Variación de OD (mg/l) en las secciones transversales en cada uno de los periodos de operación.	62
Figura 14. Entrada de agua al estanque.....	63
Figura 15. Variación de OD (mg/l) en la columna de agua en cada uno de los periodos de operación.....	65

LISTA DE ANEXOS

	Pág
ANEXO 1. FORMATO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN CAMPO.....	79
ANEXO 2.FORMATO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN LABORATORIO	82
ANEXO 3. VALORES DE VELOCIDAD (M/S) PARA CADA PERIODO DE OPERACIÓN.....	85
ANEXO 4. ANÁLISIS DE SEDIMENTABILIDAD DE PARTÍCULAS	88
ANEXO 5. CONCENTRACIONES PROMEDIO DE OD PARA CADA PERIODO DE OPERACIÓN.	91
ANEXO 6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA.....	94
ANEXO 7. VARIACIÓN DE LA CANTIDAD DE OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA (OD) EN EL ÚLTIMO DÍA DE CADA PERIODO DE OPERACIÓN EN CADA UNA DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES (S1, S2, S3) Y EN CADA ALTURA (H1, H2, H3) DEL ESTANQUE DE ESTUDIO.....	96
ANEXO 8. JERARQUIZACIÓN DE RESULTADOS POR LA PRUEBA DE TUKEY DE MAYOR A MENOR PARA LAS SECCIONES TRANSVERSALES.....	101

GLOSARIO

Capacidad de Carga: capacidad de carga es la cantidad de organismos que pueden soportar el medio, sin sufrir un decremento significativo en cuanto a su calidad, ya que si ésta es inferior al rango óptimo, representa una subutilización de las instalaciones.

Bentónicos: Conjunto de organismos, animales o plantas, que viven en el fondo del mar, de los lagos y de los ríos.

Raceways: estanques rectangulares que, en general, presentan cerca de 30 m de largo por 2,5 de ancho y menos de 1m de profundidad y que se abastecen con gran flujo de agua.

Estiaje: caudal mínimo.

Ppm: equivalente a 1 mg por litro.

Cuantía del Caudal: cantidad de caudal a utilizar para el buen desarrollo de la producción.

RESUMEN

En la piscifactoría “El Diviso”, ubicada en la vereda “San Ignacio” (Cauca), se lleva a cabo el cultivo intensivo de trucha arco iris (*Oncorhynchus Mykiss*) a nivel industrial. En la piscícola se realizó un estudio a escala real, sobre un estanque destinado para el cultivo de los peces en la fase de engorde en la última batería de la planta, con el objetivo de evaluar los parámetros de diseño y operación con los que actualmente cuenta, para generar algunas alternativas de producción más limpia en el desarrollo de la piscicultura. Para ello se realizó la evaluación de diversos parámetros hidráulicos (caudal y velocidad) y físico químicos (DBO, DQO, OD, SS, Turbiedad) dentro del estanque de estudio y en su correspondiente sedimentador. El comportamiento de los parámetros se evaluó en tres periodos de operación, cada uno de 3, 5 y 8 días respectivamente, para estimar la calidad del recurso hídrico y el proceso de deterioro que sufre éste durante el desarrollo del actividad productiva.

Mediante la información recolectada en el trabajo de campo, laboratorio y la revisión bibliográfica, fue posible determinar en cada uno de los periodos de operación la incidencia e importancia del caudal, la velocidad de flujo, la acumulación de sedimentos en el estanque y factores ambientales, sobre la calidad del agua y el desarrollo de los peces, evidenciando que bajo las condiciones actuales de operación en el estanque, se producen alteraciones en el entorno del pez y deterioro en la calidad del agua, a causa de los procesos de sedimentación del material que se genera al interior del mismo. Sin embargo, la sedimentación de los sólidos, favorece la reducción de la carga contaminante en el efluente final, si estos son extraídos del estanque en el menor tiempo posible (menos de 3 días), lo cual permite recomendar la implementación de un sistema de almacenamiento y extracción del lodo, para evitar su resuspensión por el contacto de los peces con ese material durante la etapa de alimentación y así desarrollar un proceso de producción piscícola ambientalmente favorable.

INTRODUCCIÓN

La trucha arco iris fue introducida al país en los años veinte con fines comerciales, principalmente en la cordillera central y oriental, en lagos, lagunas y ríos de aguas frías donde se adaptó con facilidad, pero debido a su voracidad pudo ser una de las causas de la extinción de una gran variedad de especies nativas de dichas zonas (Ortega *et al.* 2002).

En el departamento del Cauca por ejemplo, el Río las Piedras (río afluente de la piscifactoría El Diviso) y sus tributarios poseen una baja riqueza de especies, en donde se reporta a la trucha arco iris como la principal especie presente en la zona, especialmente en la parte media y alta de la Cuenca donde su pesca y cultivo representa una fuente económica para la gente de la región. Sin embargo su cultivo constituye un problema ecológico, por el desplazamiento de las especies nativas (Ortega *et al.* 2002) y por los efectos negativos generados sobre el ambiente, particularmente sobre los cuerpos de agua receptores de las descargas del agua de cultivo sobrecargadas de sedimentos y sustancias contaminantes debido a sistemas de tratamiento deficientes.

La demanda de agua en Colombia destinada a la actividad pecuaria es de 509.336 m³/ año (OJEDA, Eduardo, *et. al.* 2000); para el año 2004 la producción piscícola alcanzó alrededor de 56.530,98 toneladas métricas de carne de pescado continental en estanques, para abastecer fundamentalmente el mercado nacional (Foro Zoe Tecno Campo. 2004). Existen más de 500.000 m² de estanques rurales para diversos usos entre los cuales es primordial el cultivo de peces, que en la mayoría de los casos se lleva a cabo sin la previa realización de diagnósticos hidráulicos y ambientales que permitan hacer una proyección del efecto ecológico y socioeconómico de dicha actividad y sin las técnicas adecuadas de control y manejo que garanticen la sostenibilidad de la producción de acuerdo a las características y necesidades presentes en cada área de cultivo.

La explotación de truchas en un cultivo industrial requiere una masiva utilización de agua, procurada por la gran demanda de oxígeno que hacen los salmónidos, por ejemplo una producción de cien toneladas necesita probablemente un caudal de quinientos litros por segundo, cifra equivalente al consumo diario de una población española de trescientos mil habitantes. (Cachafeiro, 1984).

Los peces reciben del medio exterior una serie de productos alimenticios, los cuales son transformados por ellos con el concurso del oxígeno de la sangre y eliminados al medio en forma de heces, orina y productos de excreción branquial, siendo éstos los responsables de la polución acuática que se observa en un cultivo intensivo. Los productos de excreciones primarios y secundarios presentes en un agua de cultivo, pueden ser orgánicos y minerales, solubles e insolubles, sólidos, líquidos, gaseosos y en estado coloidal. Es el oxígeno el que permite la descomposición de la materia orgánica y el grado de consumo tiene mucha relación con la cantidad de materia orgánica acumulada. La capacidad depuradora del agua está limitada por su contenido de oxígeno y parte de él irá a cumplir esta función, en detrimento del que necesitan las truchas para su respiración.

1 PROBLEMA

En la actualidad, la piscicultura no cuenta con una amplia proyección dentro de la actividad económica de nuestro país, debido a la existencia de diversos problemas que impiden la evolución y tecnificación del proceso, tales como el insuficiente fomento e investigación de la actividad lo cual limita el crecimiento e innovación del proceso productivo, la ausencia de medidas de manejo y control que aseguren una producción de buena calidad sin efectos nocivos sobre los usuarios y el medio, la carencia de personal capacitado para el desarrollo de técnicas acordes con las necesidades de la actividad piscícola a nivel local y nacional (FAO. 2004), los altos niveles de contaminación y deterioro de los recursos como consecuencia de métodos de pesca, conservación y comercialización inapropiados, y los altos niveles de mortalidad generados por deficiencias en el proceso de producción (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural 2005), entre otros.

La piscicultura que se desarrolla a nivel regional, no es ajena a estas situaciones, lo cual genera inconvenientes que requieren del desarrollo de alternativas que permitan su corrección y mitigación, de acuerdo a las características de la zona y de la producción. En el caso de la piscifactoría “El Diviso” ubicada en el departamento del Cauca, la problemática existente se refleja en el impacto ambiental y socioeconómico generado por el efluente sobre el cuerpo de agua receptor, debido a las elevadas cargas de materiales orgánicos contaminantes removidos especialmente durante el lavado de los estanques. De acuerdo al estudio realizado por Salazar y De La Cruz, 2007, se descargan 2050 mg/l de sólidos suspendidos, 794 mg/l O₂ de DBO₅ y 1060 mg/l O₂ de DQO, lo cual es difícilmente controlable con las unidades de tratamiento con las que actualmente cuenta la piscícola y a posibles deficiencias en el proceso de producción.

Los efluentes contienen principalmente materia fecal y orinas producidas por los procesos de digestión y excreción de los peces que varían según el ciclo metabólico y tasa alimenticia; alimento no ingerido, derivados de la alimentación exógena (Flores, 1995), los que se estiman en un 20% para la Acuicultura Europea (Ackefords & Enell, 1992); restos de peces muertos y materia orgánica ajena al cultivo (hojas, madera, insectos muertos, etc.), así mismo se acumulan materias inorgánicas como arena y piedras de pequeño tamaño entre otras (Núñez & Salas, 2000); lo que provoca cambios físicos y químicos en el agua (Hellawell, 1989), modificaciones de la productividad primaria y secundaria, cambios en el sedimento de ríos, poblaciones y comunidades bentónicas de los mismos.

Estos efectos nos dan idea del grado de alteración que se puede producir en la calidad del agua o de otros recursos o actividades asociados a ésta, cuando se carece de técnicas orientadas al máximo aprovechamiento de la materia prima y la energía durante y después de la producción piscícola, minimizando la generación de desechos inherentes a cualquier proceso productivo por lo que surge la necesidad de evaluar las técnicas empleadas en el desarrollo de la piscicultura para identificar aspectos susceptibles de ser modificados a fin de alcanzar procesos más limpios y eficientes que optimicen la producción y disminuyan el impacto ambiental.

Pese a toda la problemática existente, dentro del marco de la Ley 811 de 2003, se está apoyando la consolidación de la cadena productiva piscícola, de manera que se identifiquen e integren los eslabones que la componen con miras a llegar próximamente a un acuerdo departamental de competitividad; por otra parte, la piscicultura en Colombia representa una actividad de gran interés y viabilidad dentro del sector agropecuario, dado que las buenas condiciones hídricas del país la favorecen, proporcionándole un potencial para explotación acuícola que califica como uno de los mayores del mundo. Colombia es un país que de 1996 a 1998 pasa del 1.5% de la producción total al 25%, con un incremento constante año tras año, y que consolida a la acuicultura como la actividad de mayor desarrollo en el Sector Pesquero. Sin embargo, se hace imprescindible desarrollar alternativas de mejor uso y aprovechamiento de los recursos disponibles.

Para lograr este propósito es necesaria la implementación de criterios y correctivos en el diseño y operación de los estanques, ya que el proceso piscícola debe cumplir con algunos aspectos esenciales que garanticen el desarrollo sustentable en la región, de tal forma que los impactos producidos al ambiente sean menores, se alcance un buen nivel en la calidad de vida de la comunidad, se optimice la calidad de la producción y la cadena piscícola sea sustentable y rentable.

2 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de cualquier actividad productiva exige una planeación y ejecución integral de los objetivos y actividades que conforman el proyecto. En el desarrollo de proyectos piscícolas el agua es el recurso esencial y más susceptible a sufrir alteraciones por efecto de las condiciones biológicas, fisicoquímicas y ambientales generadas para el mantenimiento y producción de peces, en donde la ausencia de algunos parámetros esenciales genera impactos al ambiente, disminución de la calidad de vida de las comunidades y de la producción, imposibilitando que la cadena piscícola sea sustentable y rentable, lo cual exige la evaluación y el posible replanteamiento de algunos procedimientos.

En la producción piscícola intensiva, la ganancia de peso y la rapidez de crecimiento de los peces son aspectos primordiales, por lo que se hace uso de alimentos ricos en nutrientes con altos requerimientos de proteína. Según Cachafeiro, 1984, en el proceso de alimentación y nutrición no todo el alimento es consumido, parte de este se queda en el estanque y posteriormente se sedimenta produciendo turbiedad, aumentando la cantidad de sólidos suspendidos y contaminando el agua por los altos contenidos de fósforo y nitrógeno propios del alimento suministrado, que pueden producir limitaciones en la calidad del agua, competencias de oxígeno con los peces y medios propicios para la proliferación de enfermedades.

Las excretas producen contaminación microbiológica, contribuyen en el aumento de sólidos suspendidos y materia orgánica, estas partículas en suspensión causan daños mecánicos sobre las branquias con lo cual impiden el intercambio gaseoso, se convierten en sustrato de hongos y alteran la calidad del agua; un ejemplo de esto es el caso de los desperdicios metabólicos, como el amonio y los nitritos, los cuales son altamente tóxicos y reducen la posibilidad de reuso en otras actividades. También es importante controlar factores como el pH y la temperatura, ya que las variaciones de temperatura estresan a los peces haciéndolos más susceptibles a las enfermedades e incidiendo directamente en los niveles de oxígeno disuelto del cual depende el crecimiento y correcto desarrollo del pez.

Dentro de la zona de crecimiento de los peces en el estanque se observan ciclos de resuspensión y sedimentación de sólidos debido a variaciones en las velocidades de flujo y a la turbulencia generada por el movimiento de los peces. El rompimiento de las partículas puede ser producto de abrasión mecánica, lo cual genera que partículas grandes se rompan por su frágil naturaleza y lo cual

incrementa la porción de pequeñas partículas afectando la cinética de disolución de nutrientes generando una mayor disolución de éstos en la descarga. (True., et al. 2004). La eliminación por sedimentación de las materias en suspensión de las aguas de cultivo, se dificulta enormemente cuando éstas están constituidas por partículas procedentes de la fragmentación de las heces y otros productos, ya que para la sedimentación de partículas tan pequeñas, se requieren velocidades de sedimentación demasiado bajas (inferiores a 10 cm/s), lo cual provocaría la acumulación de lodos en el fondo de los estanques, deteriorando la calidad del agua de cultivo.

Todos éstos aspectos provocan alteraciones significativas tanto en el proceso productivo como en la calidad del agua, por lo que es necesario implementar estrategias que permitan contrarrestar el deterioro que sufre este recurso en el desarrollo del proceso, y al final de éste, facilitando su reuso en actividades posteriores, mediante una herramienta que garantice la eficiencia en el uso de las materias primas e insumos para reducir o eliminar los residuos, antes de que estos se generen.

La Producción Más Limpia representa una forma efectiva desde el punto de vista económico, y más coherente desde el punto de vista ambiental, con relación a los métodos tradicionales de tratamiento “al final del proceso”. Para la implementación de Producción Más Limpia en el proceso piscícola se debe hacer una evaluación de las condiciones actuales, y así obtener los criterios sobre los que se debe trabajar e identificar aspectos susceptibles de ser modificados, a fin de alcanzar procesos más limpios y eficientes que optimicen la producción y disminuyan el impacto ambiental.

El tipo de estanque usado en Colombia ha intentado utilizar estos conceptos, sin embargo, estudios realizados previamente mostraron que aún existen limitaciones con la calidad del agua efluente. Esto indica la necesidad de evaluar el tipo de estanque como una alternativa para la remoción de sólidos, sin embargo es necesario mirar aspectos como la acumulación de los lodos y su impacto sobre el oxígeno disuelto.

En nuestro país la construcción de los estanques para uso piscícola se hace con base en la densidad de producción, tomando en cuenta los parámetros físicos del entorno y estableciendo los aspectos hidráulicos y de construcción; sin embargo no es usual encontrar unidades eficientes de tratamiento que permitan remover o eliminar algunas de las sustancias que alteran la calidad del agua, por lo que es necesario generar nuevas propuestas de diseño y operación en las que se considere además de la densidad de producción, la calidad del agua utilizada durante el proceso, para que al final de este la alteración sea mínima y asimilable por el cuerpo receptor del efluente.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar alternativas de Producción Más Limpia en el proceso de cultivo de peces en estanques piscícolas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar los parámetros de diseño y operación con los que actualmente cuentan los estanques piscícolas para identificar los aspectos que puedan representar inconvenientes en el correcto y eficiente funcionamiento de estos.
2. Generar recomendaciones sobre los criterios de diseño, operación y mantenimiento que puedan ser implementados en el proceso de cultivo de peces en estanques piscícolas para alcanzar una Producción Más Limpia y rentable.

4 MARCO TEÓRICO

Algunos aspectos a tener en cuenta para el inicio de la producción piscícola, están relacionados con la calidad del agua y aspectos sanitarios e hidráulicos requeridos desde el momento de adquisición de la semilla hasta la fase final de cultivo.

Existen factores de tipo físico que afectan a los peces en los cultivos como las variaciones altas de temperatura, haciéndolos más susceptibles a las enfermedades a causa del estrés; se requiere de especial cuidado en las actividades relacionadas con la limpieza e higiene de los estanques en los cuales se han depositado sedimentos, residuos de comida y detritus, para evitar disminuciones significativas del oxígeno disuelto y pérdida de la calidad del agua a causa de su permanencia prolongada en el interior de los estanques. Por otro lado, además de los estanques de cultivo, todas las instalaciones de una piscifactoría deben contar con los parámetros de diseño correspondientes a los requerimientos de la producción.

4.1 PARÁMETROS HIDRÁULICOS

En los estanques es necesario que se cumpla una serie de requisitos fundamentales, tal como conseguir una corriente uniforme de agua en toda su longitud y especialmente de fondo, que permita arrastrar los residuos sin afectar la actividad normal de los peces. Estos requisitos deben ser tales, que favorezcan la dispersión u ocupación por los peces de toda la lámina de agua, sin que existan cortos circuitos o lugares en que los peces no tengan tendencia a ocuparlos, lo que origina diferencias en la uniformidad del consumo de oxígeno.

4.1.1 Estanques.

El estanque es una unidad hidráulica; el concepto hidráulico debe considerar, en primer lugar, la cuantía del caudal que es capaz de recibir en condiciones máximas, sin modificar los niveles de agua, y garantizar su desagüe en idénticas condiciones, así como modificar la cuantía del caudal a voluntad dentro de los máximos y mínimos establecidos. Una concepción hidráulica de los estanques tiene en cuenta la dimensión, es decir, su longitud y ancho, la profundidad y la forma, así como el desnivel del fondo necesario para establecer una corriente determinada, tanto en superficie como en profundidad. Especial atención merece

el estudio de la disposición y situación de los puntos de captación y vertido para cada estanque, pues ello va a influir notablemente en la dinámica y comportamiento hidráulico del agua que por ellos circula.

Los raceways son estructuras rectangulares, siendo su longitud aproximadamente 10 veces su ancho. En ellos el agua entra en el estanque procedente del canal de alimentación, por un extremo o cabecera y sale por el opuesto, estando la uniformidad de la corriente en el estanque influida por la situación de estas estructuras. El nivel de la lámina de agua es mantenido y regulado en la mayoría de estos estanques rectangulares por la especial disposición del punto de salida del agua. Normalmente, la altura del desagüe no ocupa la totalidad de la profundidad, por lo que poseen un desagüe accesorio, que se sitúa en el fondo al final del estanque, próximo al rebosadero natural. Su instalación permite limpiar los fondos, pues la corriente creada al abrirlo y la acción manual de cepillos, etc.; arrastra el material sedimentado, transportándolo, por conductos especiales al tanque de sedimentación. Para impedir que los peces se escapen se dispone tanto a la entrada como a la salida de una rejilla o parrilla, cuyos orificios o separación de las varillas deben ser inferiores al tamaño de los peces. La rejilla de salida se sitúa en posición anterior al desagüe y, por tanto, su dimensión será la que corresponda a la sección transversal en ese punto. (Cachafeiro. 1984).

Los raceways, ofrecen ventajas de mayor producción, observación, manejo y mantenimiento más accesible de la calidad de agua, por efectos de su alta renovación. Un estanque modelo debe tener una longitud no superior a 30 m, 3 m de ancho y 1m de profundidad y recibir un caudal equivalente a cuatro recambios en una hora (Wester & Pratt, 1977), si se quieren conseguir estos efectos hidrodinámicos de auto-limpieza.

En profundidades superiores se suelen conseguir mejores transformaciones pero tiene el inconveniente de que el manejo se complica. Por otra parte, no se conseguirán velocidades importantes de la corriente de fondo y la capacidad del volumen del estanque aumentaría, en detrimento de los recambios horarios. El óptimo industrial sitúa la profundidad de lámina de agua en 0.80 a 1 m, láminas menos espesas traen una mala utilización de las instalaciones y un rendimiento por metro cúbico de caudal más bajo. (Cachafeiro. 1984).

4.1.2 Requerimientos de Agua.

Las Piscifactorías bien concebidas en origen, con caudales horarios dos o tres veces superiores a la capacidad de los estanques, con reoxigenación natural de las aguas hasta conseguir niveles aceptables de polución, con favorables

condiciones hidrodinámicas y adecuada disposición para la funcionalidad del trabajo, son siempre instalaciones en las que el manejo de la truchas se facilita y, lo que es muy importante, se evitan riesgos imprevistos.

Las granjas piscícolas en general utilizan más agua por unidad de producción que cualquier otro proceso productivo (Warrer-Hasen 1982, citado por Marine Laboratorios, 1989), sin embargo, en años recientes, los desarrollos realizados en el diseño y geometría de los estanques ha permitido un uso más eficiente del agua (Oca et al, 2004, Bergheim and Brinker, 2003). Un reporte del Norwegian Directorate of Fisheries donde se comparan las cantidades de agua usada y la producción de peces, entre el año 1985 y el 2000, en granjas productoras de Salmón, mostró que aunque se incrementó la producción de biomasa en más de 15 veces, el consumo de agua se redujo de más de 1000 m³ por kg de pez producido en 1985 a un rango entre 100 a 200 m³ para el 2000 (Bergheim and Brinker, 2003).

En el cultivo de trucha, debido a los requerimientos de oxígeno disuelto, las necesidades de recursos son grandes. Stevenson (1985) reporta que para cultivos intensivos se requiere de 500 a 650 m³ diarios por tonelada de producción a una temperatura de 15°C. Esto muestra los grandes flujos de agua que se requiere en cultivos comerciales. Un estudio realizado en cinco granjas productoras de trucha arco iris, ubicadas al sur del Idaho, U.S.A., reportó caudales de entrada a la granja en el rango de 58 a 510 m³/min, con producciones anuales de entre 454 y 3175 mil toneladas, lo cual genera flujos de 67 a 84 m³/día por tonelada diaria de pez producido (True et al., 2004), valores que están por debajo de los reportados por Bergheim and Brinker, (2003) y Stevenson (1985).

Los flujos de agua menores pueden generar la sedimentación del material sólido en la zona de cría de estanques tipo canal ("raceways"). Para evitar este fenómeno la velocidad de flujo dentro del estanque debe estar entre 0.1-0.4 m/s (Broersen and Wester, 1986).

Velocidades de flujo en estanques tipo canal, 70% por debajo del valor mínimo recomendado para evitar sedimentación fueron reportadas por True et al., 2004 A, B, mostrando que el flujo de agua no sólo debe considerar la cantidad de oxígeno requerida por el pez, también debe ser capaz de arrastrar los sólidos que se generan durante la producción.

4.1.3 Flujos de Agua.

La velocidad de flujo debe ser la necesaria para los peces de acuerdo a su tamaño y, además, tiene que ser uniforme en todo el estanque, sin que se establezcan circuitos de corrientes rápidas o cortos circuitos, que faciliten la salida del agua todavía con concentraciones altas de oxígeno, que no pueden ser utilizadas por los peces y disminuyen los rendimientos productivos del estanque. Los cortos circuitos dan origen a otros espacios, en el estanque donde el agua circula de forma lenta, que se conocen con el nombre de espacios muertos, que no son ocupados por los peces, pues, generalmente se encuentran en mínimos de concentración de oxígeno. Cuando la velocidad de flujo es homogénea en todo el estanque, la carga de peces se distribuye regularmente, sin acumulo. (Cachafeiro. 1984)

En los tanques rectangulares pueden encontrarse dos tipos de flujo:

- Flujo pistón: no hay mezcla difusión a lo largo de la trayectoria del flujo y la máxima concentración de residuos se encuentra a la salida.
- Flujo mezclado: el flujo de salida del tanque tiene igual composición que el flujo en cualquier punto del tanque; provee grandes condiciones de uniformidad debido a la intensa mezcla.

En tanques rectangulares es muy usual tener desviación de esos dos tipos de flujo, existiendo cortos circuitos y zonas muertas con bajas tasas de renovación. Este fenómeno puede contribuir a bajas eficiencias en el uso del agua como a la realización de tratamientos más difíciles. (Oca, Masaló, Reig. 2004).

Algunos autores han evaluado el comportamiento hidráulico de los estanques rectangulares (Burley and Klapsis, 1985. Watten. Et al., 2000). En los estudios se usaron métodos como la medición directa de velocidades en varios puntos del estanque. También se analizó el tipo de configuración utilizada para la estructura de entrada del agua al estanque. Encontraron que el uso de cascadas (flujo vertical) tiende a formar un vórtice o remolino muy próximo a la entrada del estanque, creando así un área semicircular de intensa mezcla alrededor de la cascada, que ocupa todo el ancho del estanque, con considerables zonas muertas que aparecen en el centro del remolino. Esta configuración presenta una distribución muy heterogénea de velocidades en el estanque, lo cual podría producir también una distribución heterogénea de los sólidos en el fondo del mismo. Esta sedimentación de sólidos no excluye su existencia en el efluente, debido a la existencia de corrientes internas en el flujo atribuidas a los remolinos horizontales formados a todo el largo del tanque y también a la gran penetración

de la corriente de entrada. Estos espacios muertos, así como la presencia de turbulencias, disminuyen los rendimientos hidráulicos de los estanques destinados a salmicultura y, en consecuencia, no contribuyen a un aprovechamiento y rendimiento de la explotación.

En los estanques concebidos para albergar cargas elevadas de peces, como son todos aquellos construidos en hormigón, hay que considerar todos aquellos factores que intervienen en favorecer la corriente de fondo. En estas condiciones es necesario que la corriente tenga la suficiente fuerza como para arrastrar las deyecciones de los peces que en salmicultura significan el 12-45% del alimento distribuido (dependiendo del concentrado), que son materia orgánica (Cachafeiro. 1984).

Para forzar la corriente de fondo en los estanques y evitar precisamente el estancamiento de agua contaminada y la acumulación de residuos sólidos en el fondo, es muy conveniente proyectar la disposición del desagüe de salida en forma de doble compuerta, ajustando las dimensiones del paso del agua al propio caudal para, de esta forma, originar la corriente necesaria de arrastre. (Cachafeiro. 1984)

4.2 PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS

Entre los factores que determinan la carga, en cuanto al consumo de oxígeno se refiere, se encuentra la temperatura ambiental, la cual modifica los consumos de los peces de tal forma que estos son más elevados a medida que ésta aumenta hasta cierto valor. Al ser mayor el consumo, la cuantía de la carga disminuye y así existen piscifactorías que en verano necesariamente tienen que mantener una carga muy pequeña en relación con la invernal, pues confluyen por una parte, la disminución del oxígeno, y por otra, aumento de los consumos (Cachafeiro. 1984).

4.2.1 Temperatura.

La temperatura mínima para crecimiento en las truchas, está situada cerca de los 3,5°C. A esta temperatura o en su entorno, el apetito de los animales disminuye, operando muy lentamente su sistema digestivo. Las temperaturas óptimas para un crecimiento eficiente, están situadas entre los 13 y 18,5°C (15°C constantes), pudiéndose emplear tasas de alimentación de máximos niveles (1,5% hasta 6% diario del peso corporal). Cuando las temperaturas sobrepasan los 18°C, la reoxigenación disminuye ya que es escasa la ganancia de OD respecto a la tasa de saturación. Por otra parte la concentración de productos tóxicos en aguas

reutilizadas puede ser superior a lo previsto con respecto a la temperatura de entrada. (Sanz, 1999).

Las variaciones térmicas que se observan en las aguas que abastecen a las piscifactorías, son muy mal toleradas por las truchas y especialmente en condiciones de alta densidad de cría, por lo que es habitual trabajando en estas condiciones, la aparición de patología secundaria a esta situación. Otras veces los caudales asignados a los estanques de hormigón descienden notablemente en estiaje y es necesario recurrir a la reoxigenación artificial para mantener estas densidades.

Aparte de la temperatura, las concentraciones de oxígeno y de amoníaco son los principales limitantes una vez iniciado el sistema de cultivo.

4.2.2 Oxígeno disuelto.

Altos niveles de oxígeno disuelto son indispensables para el cultivo de la trucha, por lo que el agua debe ser rica en este elemento. La trucha necesita entre 8 y 9 mg de oxígeno por litro de agua para satisfacer sus necesidades. Los niveles óptimos están sobre las 7 ppm, en condiciones cercanas a la saturación de oxígeno disuelto. En agua fría puede mantenerse más oxígeno que en las aguas cálidas, de tal manera que la cantidad de oxígeno mantenido por el agua es directamente dependiente a la temperatura de la misma.

En la Tabla 1, se indica la clasificación del agua de un sistema de cultivo de truchas según los requerimientos de oxígeno de los peces, definiendo cada categoría de acuerdo a la concentración de OD, desde el estado óptimo con altas concentraciones, hasta el estado rápidamente mortal, con la menor concentración de OD admisible (Alvarado Hermina y Bastardo Hilda de Colmenares. 1983).

Tabla 1. Clasificación del estado del agua para el cultivo de truchas según el contenido de oxígeno disuelto (OD).

RANGO (OD mg/l)	ESTADO
7 - 9	óptimo
6,5 - 7	aceptable
5 - 6.5	crítico
4 - 5	respiración anhelante
3 - 4	insuficiente, mortal
1,5 - 3	rápidamente mortal

Fuente: Producción De Truchas En Venezuela. Hermina Alvarado de Alizo y Hilda Bastardo de Colmenares. FNAIAP DIVULGA N°.09. Marzo - Abril. 1983.

Normalmente, el oxígeno es el factor más crítico. Cada sitio elegido para cultivo tendrá sus propias características, incluidas las del agua de abastecimiento, que influye directamente sobre los animales. La carga de los estanques deberá disminuirse cuando el OD disminuya por debajo de 6 ppm. El oxígeno es un elemento esencial para la supervivencia de los peces, los salmónidos son una de las especies más exigentes, presentando signos de asfixia cuando su concentración en el agua es inferior a 3 mg/l (Yason, 1971).

Los consumos de oxígeno por parte de los peces sometidos a régimen industrial son distintos o variables a lo largo del día. La trucha arco iris presenta un ritmo de actividad que se repite cada 24 horas, con independencia de cualquier influencia externa. Esta variación diaria se manifiesta con aumento de la actividad en las primeras horas de la mañana (2 a 6 horas) y al final de la tarde (16 a 18 horas), lo que va acompañado de un aumento del consumo de O₂. La digestión comienza aproximadamente un cuarto de hora después de la ingestión de alimentos. A partir de este momento necesita un gran aporte de oxígeno que puede alcanzar hasta el 76 % de las necesidades que tiene la trucha en ayuno. Esta demanda disminuye rápidamente para situarse al cabo de una hora en el consumo normal.

Al final del día se observa un descenso del contenido en oxígeno, debido fundamentalmente a su utilización por los vegetales acuáticos en nocturnidad. La actividad metabólica es estable, al haber pasado el período de digestión. Puede apreciarse que las perturbaciones ambientales registran descensos bruscos, de corta duración en la tasa de oxígeno.

Los consumos de oxígeno varían también dependiendo del peso medio individual de los peces, de tal forma que cuanto menor peso individual tengan, mayor es el

consumo, pues mayor es el número de peces que entran en un kilogramo de peso y mayores son las necesidades metabólicas del conjunto.

Los consumos en relación con la alimentación también dependen de la cantidad y del tipo de concentrado ingerido. Para disminuir o amortiguar los consumos máximos, que como sabemos, se producen a los pocos minutos de la ingestión, se acostumbra a repartir las raciones diarias del alimento en el mayor número posible de tomas (Cachafeiro. 1984).

Con débiles concentraciones de O₂, el índice de conversión en relación con la cantidad de alimento ingerido por las truchas aumenta en proporciones considerables, ya que el organismo no dispone del suficiente oxígeno para degradar y asimilar el alimento. Cuando el OD escasea la ración debe ser sensiblemente rebajada, no solamente porque el exceso no va a ser utilizado por las truchas sino que con ello se va a poner en peligro la vida de estas. El oxígeno disuelto (OD) es un factor limitante de gran importancia para el crecimiento microbial (Stewart Nathan, Bordman Gregory Bordman, Helfrich Louis, 2006).

El alimento ingerido por las truchas pasa al aparato digestivo y metabólico de los peces y sufre una serie de transformaciones por los procesos metabólicos, estos consumen oxígeno, estableciéndose en éste momento una gran deplección en este gas (Cachafeiro. 1984).

Se acostumbra en salmonicultura intensiva a establecer unos mínimos a partir de los cuales las aguas ya no pueden ser utilizadas. Este oxígeno que permanece en el agua (5,5 mg/l) se llama *oxigenación residual* y *el oxígeno disponible* es el que consumen las truchas.

Cuando las truchas se agrupan en la entrada del agua en el estanque se puede sospechar que existe una deficiencia de oxígeno, pero en estas condiciones los peces se encuentran ya en estrés, lo cual tiene funestas consecuencias para la rentabilidad de una piscifactoría.

El registro de datos al final del día, se da fundamentalmente por la utilización por los vegetales acuáticos en nocturnidad. La actividad metabólica de los peces es estable, al haber pasado el periodo de digestión. Las perturbaciones ambientales (visitas de personas o depredadores) son registradas como descensos bruscos de corta duración del oxígeno. El consumo de oxígeno aumenta con la distribución e ingestión de la comida originándose descensos que son máximos a los 15 ó 30 minutos después de la distribución.

Las bajas concentraciones de O₂, colocan al pez en situaciones de estrés. Esta lucha con el medio se manifiesta en forma de movimientos desordenados y los peces aparecen presos de gran agitación.

4.2.3 Sólidos.

Las excreciones sólidas y el alimento no consumido, se depositan en el fondo de los estanques, donde van a sufrir unos procesos de fermentación y degradación orgánica. El resultado final es la aparición de una serie de elementos químicos que se incorporan al agua y, en el último estadio, al sustrato del medio. Estos materiales son de origen orgánico como su proceso de degradación, cuyo resultado final es la mineralización o transformación en sales minerales, este proceso va a dar origen a productos tóxicos para los peces, tales como el amoníaco y los nitritos, así como a un consumo extra de oxígeno, que es robado a los peces.

Los desechos que entran al cuerpo de agua de la piscícola pueden ser divididos en 2 fracciones principales: sólido y soluble. Los desechos sólidos pueden estar en forma de sólidos suspendidos (SS) en la columna de agua o sólidos que se acumulan en el sedimentador. Los desechos solubles están disueltos en la columna de agua, estos desechos están directamente como productos metabólicos de los peces o indirectamente en los subproductos de los sólidos (por descomposición, actividad metabólica, lixiviados). (Woodward.1989), también en forma de coloides y supracoloides, que no tienen posibilidad de ser eliminados por sedimentación (Querellou *et al.*, 1982).

La dinámica inmediata de las excretas eliminadas por un pez tiende hacia una sedimentación, dependiendo de la velocidad de sedimentación y del peso de la propia excreta. Se han establecido velocidades de sedimentación en relación con el tamaño del pez, asegurando velocidades de 3,3 cm/s para truchas de 20 gramos y de 1,7 para alevines de 5 gramos (Warren- Hansen, 1982). En estudios realizados para la evaluación de la incidencia de la velocidad en el arrastre de sólidos, los perfiles de velocidad analizados indican que los valores más altos se observan cerca de la mitad de la profundidad del estanque, reduciéndose en la superficie y bajando mucho más a lo largo del fondo del canal (True. *et al.* 2004). Idealmente con la velocidad de la corriente de agua se podría transportar el material de residuo producido a la zona de quietud donde las partículas son removidas. Boersen y Westers (1986) encontraron que velocidades de 0.1 y 0.4 m/s previenen la sedimentación en el raceway de los residuos sólidos de los salmónidos; se recomienda una velocidad mínima de diseño para el conducto de 0.6 m/s para flujos que contengan sólidos sedimentables (Alley, 2000).

De acuerdo a estudios realizados, en relación a la reducción de la descarga de nutrientes como el fósforo en efluentes piscícolas (True, Jonson, Chen. 2004), en el área de crecimiento de los peces el transporte de los sedimentos es pobre, por lo cual el tiempo de residencia de los sólidos aumenta, mientras que con frecuencia en la zona de quietud o tolva de recolección de lodos, el tiempo de residencia de los sólidos esta determinado por la frecuencia de limpieza de dicha zona.

Las deyecciones de las truchas no se encuentran en su totalidad en estado sólido, sino que una pequeña cantidad de ellas se presentan en forma de coloides y supracoloides, que no tienen posibilidad de ser eliminados por sedimentación (Querellou *et al.*, 1982).

Un factor importante en la caracterización del material suspendido es la distribución de partículas, ya que dependiendo del tamaño de partícula a tratar, se determinan las especificaciones para las alternativas de tratamiento a utilizar. Por ejemplo, Cripps, (1994) evaluó la remoción de material particulado, usando un tambor mecánico, con malla de 60 μm de tamaño de poro, alcanzando remociones de entre el 21 y 80% en DBO_5 y del 19 al 91% en SST, lo cual indica la eficiencia que pueden alcanzar los dispositivos mecánicos de remoción de partícula para tratamiento, siempre y cuando se considere el tamaño de partícula. Las partículas más pequeñas son difíciles de remover, poseen una gran área de superficie, lo cual puede ser importante en la absorción y liberación de nutrientes. (Patterson *et al.*, 1999; Rittmann and McCarty, 2001 citado por Maillard *et al.*, 2005, y Cripps and Bergheim, 2000), sin embargo es importante tener en cuenta que en regiones de baja turbulencia, se incrementa la probabilidad de colisiones entre partículas, algunas de las cuales tendrían la tendencia a aglutinarse y formar grandes partículas, especialmente las de tipo orgánico debido a las características de superficie. Brinker (2005).

La turbidez que presenta el agua de cultivo está originada fundamentalmente por la presencia de partículas en suspensión que son de origen alimenticio y que sufren resuspensión a causa del movimiento brusco de los peces, actividades de limpieza y alimentación.

De acuerdo a algunos estudios realizados en cultivos de trucha en Virginia US (Maillard. *et al.*, 2005), los picos de SST coinciden con las actividades de cosecha, en la cual se remueven los sedimentos sobre el fondo del raceway. Sin embargo estos picos ocurren por cortos periodos de tiempo elevándose en un promedio de 0.7 a 16.1 mg/L., Las posibles causas para que se presenten fluctuaciones picos de SST en el raceway pueden ser, picos en el afluente (corriente de entrada) del

raceway o el movimiento de los peces que resuspenden altas proporciones de sólidos y actividades de alimentación.

La evaluación de cultivos de trucha intensivos y semi-intensivos en Colombia, reportan niveles de 7.5 y 1.2 mg/L (Salazar y De la cruz. 2007) y 7 a 34 mg/L (Yasnó y García. 2007) de SST, respectivamente. A pesar que los flujos de agua generados en las actividades de lavado de los estanques no son muy grandes, las concentraciones de SST reportadas en el efluente alcanzan rangos de 2050 mg/L (Salazar y De la cruz. 2007) y 4.2 y 422 mg/L durante un periodo de 14 min/día (Yasnó y García. 2007).

Las operaciones de sedimentación en el raceway son diseñadas para ocurrir primordialmente en la zona de quietud, cuyas eficiencias de captura dependen de las tasas de llenado. El llenado corresponde a las más bajas velocidades de sedimentación de las partículas que podrían ser removidas. La tasa de llenado recomendada para la zona de quietud es 0.94 cm/s (IDEQ, 1997), el cual podría corresponder a un diámetro de partícula de 420 μ , de acuerdo a la ecuación de Stokes (True, et al., 2004).

El contenido de materia orgánica se determina precisamente por el grado de consumo de oxígeno que realizan las bacterias para transformar la materia orgánica, llamada Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).

Con el estudio realizado en Virginia, US. (Maillard et al., 2005), se reportaron valores de 1.3 mg/L. Para el caso de los cultivos en Colombia, en las actividades de lavado de los estanque los niveles de DBO₅ del efluente sufrieron incrementos de 1.0 hasta 135 mg/L (Yasnó y García. 2007). y 793 mg/L (Salazar y De la cruz. 2007).

4.2.4 Potencial de Hidrógeno (pH).

El dióxido de carbono procedente de la respiración de los peces (especialmente en explotaciones con gran densidad de peces por metro cuadrado de estanque), contribuye a una acidificación que puede agravar la condición sanitaria al sufrir los efectos de una concentración de amoníaco total superior a la prevista. Por otra parte el CO₂ disuelto en el agua en estado libre es competitivo con el oxígeno que respiran los peces, pudiéndose dar el caso de que en aguas muy recicladas y bien oxigenadas, los peces no consigan el OD necesario para su metabolismo.

Para el cultivo de la trucha los valores adecuados de pH están comprendidos entre 6 y 9. En aguas ácidas es necesario realizar un encalado que aumentará las

reservas alcalinas y estabilizará el pH. Las sustancias alcalinas disueltas en el agua, son indispensables para la vida piscícola; se requieren entre 20 y 200 mg. de CO_3Ca /litro; en cuanto al Anhídrido Carbónico (CO_2), el contenido debe ser menor a 2 mg/litro de agua. (Cachafeiro. 1984).

4.3 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN POR EFLUENTES PISCÍCOLAS

El vertido de las aguas polucionadas de las piscifactorías a los ríos, da origen a una serie de contaminantes que tienen importancia cuando estas aguas vuelven a ser empleadas para otros usos. Los efectos de la polución sobre el ecosistema acuático no difieren mucho de los de otras actividades y son considerados como importantes los siguientes:

- Incremento del contenido en materia orgánica.
- Baja concentración del oxígeno disuelto.
- Enriquecimiento nutricional.
- Crecimiento de flora acuática y algas.
- Depósito de sólidos por sedimentación.
- Presencia de drogas y productos químicos que se usan como tratamientos preventivos y curativos.
- Cambios de la fauna de los fondos de los cauces.
- Olor y sabor.

(Water y Quality institue, 1982).

Se calcula que la producción anual de MES (materias en suspensión), en una piscifactoría de 100 ton de truchas/año, alimentados con concentrados de compuestos secos es de 45000 Kg. (Cachafeiro 1984).

En los periodos secos el caudal o flujo puede decrecer, pero las sustancias contaminantes pueden permanecer constantes o incrementarse con la altas temperaturas del agua. Por esto, las concentraciones de contaminantes pueden ser hasta cierto punto más altas en los meses de verano. (Maillard et al., 2005).

La acumulación de lodo en Raceways puede provocar deterioro de la calidad del agua e impactar directamente en la producción del pez (Hebert and Merkens, 1961; Chapman et al., 1967; Bullock et al., 1994) La materia orgánica y los nutrientes asociados con los sólidos generados de las piscícolas pueden contaminar las aguas receptoras (Van Rijn et al., 1995; Selong and Helfrich, 1998; Kamps and Neill, 1999; Fries and Bowles, 2002). Los porcentajes de nutrientes sedimentados son importantes para establecer porcentajes de limpieza para minimizar la eutrofización aguas abajo.

La trucha arcoíris produce entre 18–30 % de sólidos suspendidos y heces fecales por unidad de alimento (Bergheim et al., 1991; Beveridge et al., 1991; Heinen et al., 1996): Adicionalmente la generación de sólidos suspendidos puede resultar de sobre alimentación en porcentajes de 150 y 200 g/Kg. de alimento. Tanto como un 50 % de sobre alimentación puede producir gran cantidad de sólidos suspendidos que se acumulan en los Raceways y aguas abajo del río.

En el estado de Virginia (US) se llevó a cabo un estudio (Stewart et al., 2006) de cultivos de Trucha arco iris durante un periodo de evaluación de 7 días, en donde se expone que la degradación de nutrientes del lodo producido en los estanques ocurre continuamente en dicho periodo, pero que los más altos porcentajes de degradación de nutrientes ocurren durante el primer día. Esto sucede cuando el estanque está en reposo y cuando es continuamente agitado y aireado. El estudio indica la importancia del uso de una zona de reposo (QZ) al final del estanque de trucha, aislado de los peces, para así remover sólidos en suspensión y disminuir la liberación de nutrientes. Microorganismos aeróbicos toman los nutrientes disueltos y estos, por la precipitación química pueden ser los responsables del descenso de la concentración de nutrientes en estado de reposo desde el día 2 al 7. Mediante este estudio se concluyó que la remoción diaria del lodo permite obtener una reducción considerable en la degradación de nutrientes en los raceways, en donde los materiales sólidos están constituidos principalmente de Carbono orgánico (C), Fósforo (P), y Nitrógeno (N).

Adicionalmente, con las QZ o Trampas de sedimentos (tolvas de recolección de lodos) que han sido estudiadas se estima que entre 290 y 655 Kg. de lodo puede ser producido por cada tonelada de trucha producida en estanques, con una relación de conversión de 1.41 y 1.82:1 (Philips and Beveridge 1986).

5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de los objetivos propuestos se llevo a cabo el estudio a escala real en la planta de la piscícola El Diviso ubicada en el departamento del Cauca.

5.1 CONSIDERACIONES GENERALES

La piscifactoría El Diviso se encuentra en la vereda San Ignacio, y forma parte de la subcuenca del Río Las Piedras. Está ubicada a una altura de 2167 msnm., y sus coordenadas geográficas son: N 02° 22` 59.8`` y W 76° 29` 43.4``.

Se encuentra en una zona montañosa que presenta formas ligeramente onduladas y quebradas, con disecciones profundas, correspondientes a un modelado volcánico estructural con subpaisaje de Lavas Volcánicas, Mesas y Colinas.

Presenta clima frío y húmedo, el cual cubre la mayor extensión de la subcuenca, en la franja altitudinal de 2000 a los 3000 msnm; con rangos promedio anual de temperatura, precipitación, humedad relativa, brillo solar, tensión de vapor y nubosidad de: 18,4°C, 172,9 mm, 84 mm, 123horas, 17,5 M bares, 5.8 horas respectivamente.

La piscifactoría tiene una caudal asignado de 385 l/s según la concesión de agua. El caudal con el que opera la piscifactoría en verano es de 250 l/s y en invierno oscila entre 500 y 600 l/s. Los datos de campo recopilados por la fundación río Las Piedras menciona que el factor de retorno es de 0.8, por tanto el agua que retornan al río Las Piedras es de 308 l/s y presenta un consumo de 77 l/s aproximadamente.

Para identificar la base de la estructura y especialización de la economía en la Cuenca, dentro de las actividades económicas representativas se encuentra la agricultura de subsistencia, la ganadería extensiva, la ganadería de toros de lidia y la piscicultura, representada por la piscifactoría.

En la estación de la Bocatoma de la Piscifactoría El Diviso han confluído cinco cuencas: Peñas Blancas, Aguas Claras, El Palmichal, la Chorrera y Arrayanales, las cuales cuentan con buenas características fisicoquímicas y bacteriológicas.

5.2 OBJETIVO 1

Evaluar los parámetros de diseño y operación con los que actualmente cuentan los estanques piscícolas para identificar los aspectos que puedan representar inconvenientes en el correcto y eficiente funcionamiento de estos.

Para el desarrollo del objetivo propuesto se identificaron los parámetros de diseño más representativos en la piscícola con el propósito de evaluar el efecto que ejercen estos sobre la calidad del agua utilizada. Dentro de los parámetros de diseño a evaluar, se realizó la medición de la capacidad del estanque (en términos de producción), del caudal y de la velocidad de flujo dentro de este. Para el desarrollo del estudio se procuró que la producción de la planta fuera constante para realizar una evaluación confiable del efecto que ejerce ésta sobre los niveles de OD y los requerimientos de agua para el mantenimiento del sistema.

En cuanto a la medición de los parámetros de operación, se establecieron diferentes periodos de operación del estanque: 3, 5 y 8 días respectivamente, con el propósito de medir su impacto sobre las características fisicoquímicas e hidráulicas del flujo, la cantidad de lodo producido en cada periodo, entre otras variables.

Debido al deficiente funcionamiento del Sedimentador contiguo al estanque en época de invierno, para realizar la extracción y análisis del lodo generado en el estanque al final de cada uno de los tiempos de operación previamente definidos (3, 5 y 8 días), fue necesario adecuar una tubería a la salida del estanque que permitiera obtener la muestra de los lodos, de manera que la purga realizada en el estanque no se mezclara con el agua depositada en el sedimentador, para evitar interferencias en los resultados de las pruebas realizadas a este efluente y para poder realizar la medición del caudal de lavado evacuado del estanque hacia el sedimentador.

La adaptación de la tubería, realizada para la evacuación del efluente de lavado del estanque, y el punto en donde se toma la muestra y se mide el caudal de salida de lodos hacia el sedimentador al final de esta adaptación, se presentan a continuación con la Figura 1 y Figura 2 respectivamente.



Figura 1. Adaptación de tubería de salida de lodos



Figura 2. Final de tubería de adaptación salida de lodos

Los parámetros que permitieron evaluar el impacto sobre la calidad del sistema, se señalan a continuación, en la Tabla 2 especificando las secciones de muestreo definidas, las respectivas frecuencias de medición y el número total de pruebas a realizar durante todo el periodo de estudio:

Tabla 2. Parámetros físico químicos de medición.

PARÁMETRO	UNIDAD	PUNTOS DE MUESTREO Y FRECUENCIAS DE MEDICIÓN			
		Entrada	salida	Interior	Efluente lavado
Caudal	m ³	1 día			3 por lavado
Sólidos suspendidos	mg/l	1 día	1 día		2 por lavado
Oxígeno disuelto	mg/l	1 día	1 día	2 día	
DBO	mg/l	1 día	1 día		1 por lavado
DQO	mg/l	1 día	1 día		1 por lavado
Turbiedad	UNT	1 día	1 día		2 por lavado
Velocidad	l/s			1 día	

Para dar inicio a cada periodo de operación, se realizó la limpieza del estanque con el propósito de medir apropiadamente el cambio que presenta el sistema a través del tiempo en cuanto a la calidad del agua.

Una vez realizada la limpieza, se dio inicio a la medición de los parámetros establecidos en la Tabla 2. En el último día de cada periodo, el muestreo se realizó durante 12 horas consecutivas, donde se intensificó la medición de oxígeno disuelto (OD), inicialmente a intervalos de dos horas y finalizando con intervalos de 30 minutos, ya que se presume que la variación de OD es más significativa cuando aumenta el tiempo de retención de lodos. Al finalizar el periodo de 12 horas se realizó el barrido del lodo depositado en el fondo durante todo el periodo de operación, acumulándolo en la zona de recolección del lodo existente dentro del estanque, la cual cuenta con un sistema de evacuación conformado por un tubo y un canal que se conectan con la tubería implementada, para extraer el material hacia el sedimentador, llevar a cabo la medición del caudal evacuado y realizar la toma de muestras para evaluar los parámetros físico químicos en el Laboratorio (DBO₅, DQO, Turbiedad y Sólidos suspendidos).

Para la medición de los parámetros físico químicos, se hizo uso de las instalaciones del Laboratorio de Química Ambiental de la Universidad del Cauca y de equipos como el Turbidímetro, Oxidímetro y Molinete para el trabajo de campo.

Para la determinación de sólidos suspendidos, DBO y DQO se siguió el procedimiento referenciado en el Standard Methods para las respectivas pruebas.

5.2.1 Descripción del Procedimiento

Con el propósito de tomar los datos de una manera ordenada y eficiente, se realizó la siguiente distribución del estanque para recolectar la información: El estanque se dividió en 3 secciones longitudinales (A, B, C), 3 secciones transversales (S1, S2, S3) y tres alturas diferentes (H1, H2, H3); donde A está ubicada a 0.2 m del borde izquierdo del estanque, B a 0.98 m y C a 1,62 m. La sección 1 (S1) se ubica en la entrada del estanque, la sección 2 (S2) en la mitad y S3 a la salida del mismo, antes de la zona de recolección de lodos. H1 se toma a 10 cm. del fondo del estanque, H2 a la mitad de altura de columna de agua y H3 se toma a 10 cm. de la superficie de la lámina de agua. Figura 3

A continuación se presenta el esquema del estanque de estudio con la respectiva distribución de las secciones asignadas para la recolección de la información.

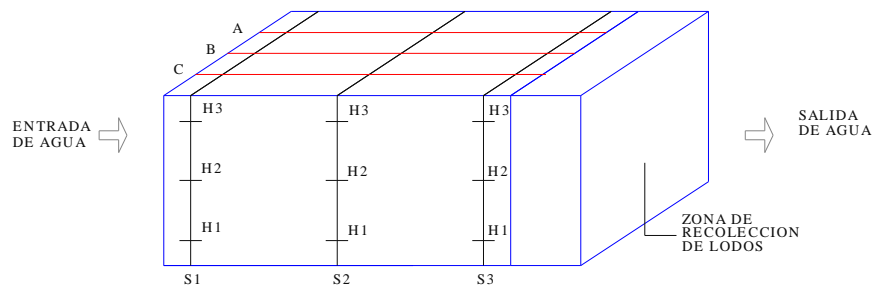


Figura 3. Distribución de los puntos de muestreo en el estanque

5.2.2 Trabajo de Campo

- **Oxígeno Disuelto.** Para la medición del Oxígeno Disuelto en el agua del estanque se utilizó un Oxidímetro marca HACH. Este elemento de medición basado en electrodos es de gran exactitud, del orden de una décima de miligramo, sin embargo se calibra periódicamente en la piscícola para disminuir el margen de error en los datos.

La medición se realiza dos veces por día de muestreo, en los puntos especificados en la Figura 3, al principio y al final de la jornada, exceptuando el último día cuyo procedimiento ya fue explicado anteriormente.

Los datos son reportados en los formatos diseñados para la recolección de información en campo (Ver Anexo 1).

- **Velocidad.** Para la medición de velocidad se hace uso de un molinete con contador Z-30 ($t=30s$) y hélice número 5 en los puntos especificados en la Figura 3. Se realiza la medición dos veces en cada punto para obtener un dato promedio representativo de velocidad.

Los datos son reportados en los formatos diseñados para la recolección de información en campo (Ver Anexo 1).

- **Caudal.** La medición de este parámetro se realiza con el molinete especificado para la medición de velocidad, sobre el vertedero que alimenta el estanque. El ancho del vertedero es 1.8 m, por lo que la medición se hace cada 0.2 m (iniciando en 0,0 m hasta 1,80m); la medición se realiza a 40% de la altura total de la columna de agua en cada punto. Se hacen 3 repeticiones para obtener un valor promedio representativo del caudal.

Para el procesamiento de los datos se hace uso de una hoja de cálculo ajustada para el tipo de molinete y número de hélice utilizados.

Los datos son reportados en los formatos diseñados para la recolección de información en campo).

- **Caudal de Lavado.** La medición de este parámetro se hace volumétricamente, midiendo el tiempo que tarda llenar un recipiente con un volumen de 18 L.

La medición se repite tres veces para obtener un dato promedio significativo de caudal.

Los datos son reportados en los formatos diseñados para la recolección de información en campo (Ver Anexo 1).

Toma de Muestra. Se toman muestras a la entrada y a la salida del estanque en recipientes de dos litros, los cuales se llevan a laboratorio debidamente refrigerados, para realizar la medición de los parámetros físico químicos.

5.2.3 Parámetros Físico químicos

- **DBO₅.** Se toma la muestra para medir DBO₅ a la entrada y a la salida del estanque, utilizando dos Winkler para cada una de las muestras. Un Winkler se utiliza para fijar el oxígeno en campo y el otro se lleva a laboratorio y se incuba para seguir el procedimiento de la prueba de DBO₅ referenciada en el Standard Methods.
- **DQO.** Se realiza por el método colorimétrico utilizando celdas HACH especiales para esta prueba, y se hace la medición con un espectrofotómetro marca HACH siguiendo el procedimiento del Standard Methods.
- **Sólidos Suspendidos.** Se sigue el procedimiento del Standard Methods.
- **Turbiedad.** Se utiliza un Turbidímetro y se sigue el procedimiento del Standard Methods. Los datos anteriormente mencionados son reportados en los formatos diseñados para la recolección de información en laboratorio (Ver ANEXO 2).

Se determinaron las características de sedimentabilidad de los sólidos producidos durante el momento de la alimentación (agitación) y después de la alimentación (reposo). Se realizaron las curvas de sedimentabilidad y se compararon con la carga superficial del estanque, para evaluar la efectividad de éste como un sedimentador.

5.3 OBJETIVO 2

Generar recomendaciones sobre los criterios de diseño, operación y mantenimiento que puedan ser implementados en el proceso de cultivo de peces en estanques piscícolas para alcanzar una Producción Más Limpia y rentable.

Con base en los resultados obtenidos en el desarrollo del OBJETIVO 1 y la revisión bibliográfica realizada, se hizo el análisis los datos utilizando herramientas estadísticas como la prueba de ANOVA, la prueba de Tukey y pruebas de sedimentabilidad.

5.3.1 Análisis de datos

Una de las herramientas utilizadas para el análisis de la información fue ANOVA, el cual es un procedimiento que permite calcular la varianza común a todos los datos y la compara con la media de todos los tratamientos (datos organizados en grupos), con el fin de determinar si existen o no diferencias significativas entre éstos. Este procedimiento se desarrolla considerando, como hipótesis nula, la igualdad entre las medias y como hipótesis alterna que son diferentes. Se consideraron supuestos de normalidad para el Oxígeno disuelto y la velocidad en cada punto, así como su homogeneidad de varianza.

Adicionalmente, se realizó la prueba de Tukey mediante la cual se efectuó una jerarquización de los datos.

Estos procedimientos se realizaron para analizar los datos de OD y velocidad con el propósito de comparar las variaciones que sufren, de una sección a otra, a través del tiempo y respecto a las variaciones de caudal presentes en el estanque. Sin embargo, para estos análisis se calcula previamente el porcentaje de error asociado a la medición o procesamiento de los datos, con base en un rango de confianza del 95%.

Para determinar algunas características de los sólidos suspendidos en el estanque, se construye una curva de sedimentabilidad, que permite evaluar que tan sedimentables son las partículas de acuerdo a su tamaño. La información proporcionada por esta curva se compara con las velocidades y las cargas superficiales de flujo obtenidas al interior del estanque, para conocer los porcentajes de remoción del mismo a través del tiempo.

El procesamiento de la información permitió concluir acerca de los hallazgos más significativos y la realización de análisis para determinar los posibles beneficios que obtendría la piscícola en cuanto a costos de producción y los beneficios ambientales logrados por la reducción del impacto negativo generado por la producción industrial, a través de la implementación de las modificaciones propuestas. En el estudio se hicieron las recomendaciones pertinentes para el mejoramiento y uso eficiente del sistema piscícola.

6 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 IMPACTO SOBRE EL RECURSO HÍDRICO

En la Tabla 3 se presenta el resumen de los caudales diarios y promedio reportados durante cada periodo de operación y el caudal de lavado al final del mismo.

Tabla 3. Resumen de los caudales promedio (m³/s) reportados en cada periodo de operación

DÍA	PERIODO DE OPERACIÓN /CAUDAL (m ³ /s)		
	3 DIAS	5 DIAS	8 DIAS
1	0,052	0,049	0,044
2	0,046	0,041	-
3	0,052	0,048	-
4	-	0,015	0,065
5	-	0,038	0,102
6	-	-	0,105
7	-	-	0,073
8	-	-	0,067
Promedio	0.050	0.0382	0.076
Lavado del Estanque	0,0010	0,0010	0,0011

Para el desarrollo del estudio se procuró que algunos de los parámetros a evaluar, entre ellos el caudal, se mantuvieran constantes con el propósito de adquirir información confiable acerca del impacto generado sobre la calidad del agua durante el desarrollo de la actividad productiva en la piscícola; sin embargo, por tratarse de un estudio desarrollado a escala real, se dificultó controlar este parámetro ya que se encuentra influenciado por las variaciones ambientales que se dan en el lugar y por las operaciones que se desarrollen dentro del estanque.

Con el resumen presentado en la Tabla 3, es posible verificar que las variaciones de caudal de un periodo a otro son significativas, lo cual puede atribuirse a las

condiciones climáticas del lugar en cada periodo de operación. Por ejemplo, el periodo de operación de cinco días se desarrolló en época de verano, lo cual influyó en la disminución del caudal (0.0382 m³/s) en comparación a los periodos de 3 y 8 días (0.050 y 0.076 m³/s) que se llevaron a cabo en época invernal; adicionalmente, las alteraciones de caudal reportadas durante algunos días se presentaron como consecuencia de la operación misma de la piscícola.

Con el fin de verificar si la cantidad de agua utilizada durante los periodos de evaluación corresponde a los requerimientos de la producción de trucha, se determinó la cantidad de biomasa y la densidad en el estanque evaluado durante cada periodo de operación. La densidad de biomasa y el caudal promedio utilizado en el estanque se presentan en la Tabla 4

Tabla 4. Densidad de biomasa en el estanque (kg/m³).

Periodo de Operación	Cantidad de Biomasa (Ton)	Caudal (m ³ /día)	Densidad (kg/m ³)
3 días	0.54	4320	16.85
5 días	1.0	3300	32.24
8 días	0.55	6566	17.14

Al comparar la información proporcionada en la Tabla 4 con estudios previos de piscícolas en condiciones similares a las de El Diviso, es posible comprobar que los caudales reportados en el estanque para cada periodo de operación, superan los esperados, teniendo en cuenta la biomasa existente en cada caso; por ejemplo, El Diviso reporta caudales entre 3300 y 6566 m³/ día por 1.0 y 0.5 Tonelada de producción respectivamente, mientras que en estudios como los realizados por Stevenson (1985) se reportan 500 a 650 m³ /día por tonelada de producción para cultivos intensivos. True et al. (2004), Realizó estudios en cinco granjas productoras de trucha arco iris, ubicadas al sur del Idaho, US, reportando flujos de agua de 67 a 84 m³/día por Tonelada de pez producido, con densidades de siembra entre 27 y 51 kg/m³, mientras que El Diviso maneja densidades que oscilan entre 16.85 y 32.24 kg/m³, lo que confirma que los consumos del recurso hídrico reportados en este estudio son muy altos para las densidades que actualmente se manejan y la producción generada.

Por lo anterior, y tomando como referencia que los cultivos de trucha demandan mayores cantidades de agua y mejores condiciones fisicoquímicas que otro tipo de peces, se esperaría que los niveles de calidad del flujo para el cultivo en la

piscícola El Diviso, fuesen los apropiados para el correcto y eficiente desarrollo de la producción, sin embargo, se debe tener en cuenta la incidencia de otros factores, como por ejemplo, los relacionados con el diseño, construcción y operación de las estructuras hidráulicas requeridas para el cultivo, puesto que, con algunos estudios como el desarrollado por Norwegian Directorate of Fisheries en donde se compararon sistemas de cultivo generados en los años 1985 y 2000, se logró comprobar que los consumos de agua disminuyeron de 1000 m³ aproximadamente a 100 y 200 m³ por kg de pez producido, a pesar de que la producción de peces se incrementó aproximadamente en 15 veces de 1985 al 2000, todo esto gracias a los desarrollos logrados en dicho periodo en lo relativo al diseño y construcción de los estanques (Bergheim and Brinker, 2003). Pese a esto, la piscícola el Diviso, no cuenta con tecnologías que garanticen el uso eficiente del recurso hídrico y el apropiado manejo del cultivo, dado que su infraestructura fue construida antes de 1985 y sin la implementación de conceptos innovadores en lo relativo a estructuras hidráulicas y aspectos operacionales de los estanques, situación que hasta hoy no ha cambiado.

Tabla 5. Valores de velocidad (m/s) para cada Periodo de Operación

PERIODO DE OPERACIÓN	ALTURA	SECCIÓN 1				SECCIÓN 2				SECCIÓN 3			
		A	B	C	Promedio por altura	A	B	C	Promedio por altura	A	B	C	Promedio por altura
3 días	1	0.12	0.10	0.11	0.11	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	2	0.08	0.08	0.08	0.08	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
	3	0.26	0.36	0.28	0.30	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
	Promedio por sección	0.16				0.04				0.04			
5 días	1	0.08	0.09	0.07	0.08	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	2	0.07	0.10	0.08	0.08	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
	3	0.28	0.28	0.32	0.30	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
	Promedio por sección	0.15				0.05				0.04			
8 días	1	0.12	0.14	0.12	0.13	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
	2	0.09	0.14	0.09	0.11	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
	3	0.31	0.37	0.34	0.34	0.09	0.07	0.08	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04
	Promedio por sección	0.19				0.06				0.04			

6.2 COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO

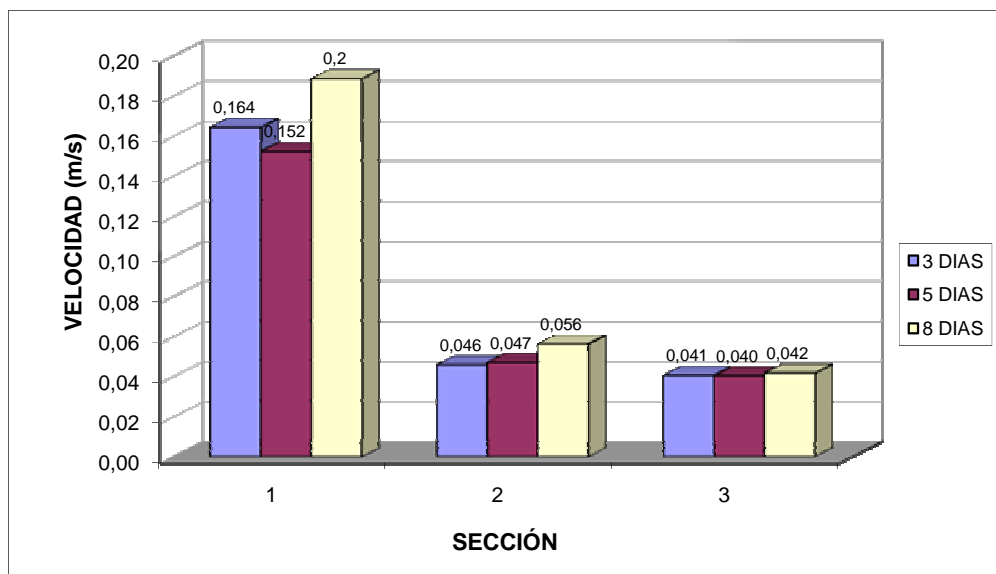
Una adecuada velocidad de flujo es fundamental para garantizar una corriente uniforme en cualquier punto del estanque, de tal forma que la dispersión de los peces en la lámina de agua sea favorecida. Con el propósito de reducir los niveles de material suspendido al interior del estanque, para evitar la disminución de los niveles de oxígeno y proteger el cultivo de peces de sustancias indeseadas, muchos centros de producción piscícola buscan que las corrientes de agua arrastren los residuos de la zona de cría, estableciendo velocidades que llevan fácilmente estos materiales hasta el sitio de vertimiento del efluente final, en donde el tratamiento posterior del mismo se torna más exigente.

Para analizar el comportamiento de la velocidad al interior del estanque, y verificar el impacto que generan las posibles variaciones de este parámetro sobre la calidad del agua, en la Tabla 5 se presentan los promedios de velocidad para cada sección a lo largo de los tres periodos de operación. Los valores puntuales se presentan en el anexo 3.

Tal como se presenta en la Tabla 5, las velocidades promedio del agua en el estanque, son inferiores a las sugeridas por Broersen and Wester 1986, las cuales oscilan entre 0.1-0.6m/s, para evitar la sedimentación de la materia orgánica en el interior de la zona de cría. Las velocidades que se están presentando, permiten que parte del material suspendido logre sedimentar y se deposite en el fondo del estanque, que en este caso funcionaría como una unidad de sedimentación, de donde luego es extraído; sin embargo, se observan inconvenientes asociados, como por ejemplo la variabilidad en los valores de velocidad a lo largo y ancho del estanque, particularmente entre la sección 1, correspondiente a la entrada del mismo donde se reportan valores de velocidad que alcanzan los 0.17m/s en promedio, decayendo hasta los 0.04m/s en las secciones 2 y 3, correspondientes a la parte intermedia y final del estanque, lo que dificulta la uniformidad en la sedimentación de la materia orgánica en toda el área del mismo. La variabilidad en los datos de velocidad puede verificarse mediante la Tabla 5 y Anexo 3..

Al analizar comparativamente la velocidad promedio en cada sección transversal para los tres periodos de operación, Figura 4, se verifica que la velocidad tiende a disminuir en la dirección del flujo a medida que éste se aleja de la entrada de agua al estanque.

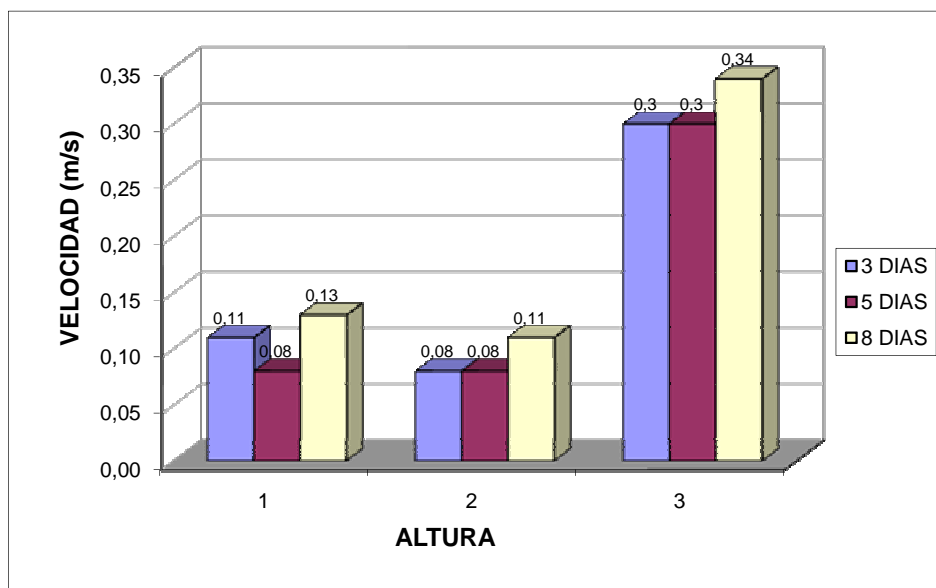
Figura 4. Comportamiento de la Velocidad (m/s) en los tres Periodos de Operación.



Este comportamiento al igual que la variabilidad de velocidades puede ser producto, entre otros, de la entrada de agua al estanque, en donde se genera turbulencia y salida desigual de las corrientes de agua hacia el interior del mismo, provocando que los valores de velocidad más altos se encuentren inmediatamente después de la entrada del agua y a nivel superficial (Sección 1 y Altura Superficial), y vayan disminuyendo a medida que llega al punto intermedio del estanque, al final del mismo y a menores profundidades, lo cual coincide con otros estudios realizados en condiciones semejantes (True. *et al.* 2004), en donde las velocidades también disminuyen a mayores profundidades y distanciamiento de la zona de entrada del agua.

En la Figura 5, se presenta la variación de la velocidad en la Sección 1 para las diferentes alturas por periodos de evaluación. En ésta figura se puede verificar que las velocidades más altas se presentan en la Altura 3, que corresponde a la altura superficial.

Figura 5. Comportamiento de la velocidad en la Sección 1 del estanque (entrada de agua) para cada una de las alturas de medición.



Como se planteo con anterioridad, casi todos los valores de velocidad reportados para el estanque se encuentran por debajo del rango sugerido para evitar la sedimentación (0.1-0.6 m/s (Broersen and Wester, 1986).), sin embargo, como se muestra en la Figura 5, los valores de velocidad correspondientes a las mediciones realizadas a la entrada del estanque y a nivel de la superficie, se encuentran dentro de dicho rango, lo que induce una sedimentación mínima en esta zona, en comparación a las otras dos secciones de medición.

Los valores de velocidad obtenidos muy cerca al fondo alcanzan en promedio los 0.06 m/s, lo cual garantiza la acumulación de las partículas sedimentables en esta zona, evitando su arrastre durante la operación normal del estanque. Sin embargo, la alta densidad de cultivo y la turbulencia provocada por éste, particularmente durante los periodos de alimentación incide en la resuspensión de los sedimentos, como ya se explicó.

A parte del tipo de disposición que presenta la entrada de agua, se esperaría que los incrementos en el caudal presentados durante los periodos de operación, provocaran aumentos en la velocidad al interior del estanque alterando el proceso de sedimentación; sin embargo, al revisar los valores promedio de velocidad (Tabla 5), no se encuentra una variación significativa entre los datos, particularmente en el periodo de 8 días, en el cual se reporta el caudal mas elevado (Tabla 3). El hecho de que los datos de velocidad conserven su tendencia a permanecer en rangos bajos (0.04 - 0.19 m/s) que favorecen el proceso de sedimentación, a pesar del incremento de caudal, puede atribuirse al bajo incremento en la altura de la columna de agua que se presenta en el vertedor frontal de salida, lo que provoca que la velocidad se mantenga relativamente constante dentro del estanque.

6.3 IMPACTO SOBRE LA SEDIMENTABILIDAD DE LAS PARTÍCULAS

Dado que las velocidades reportadas en el estanque de estudio pueden propiciar la sedimentación, se evaluó el comportamiento de las partículas para verificar su sedimentabilidad bajo las condiciones de flujo del estanque. Para ello se realizó la caracterización y comparación de éstas mediante una prueba de sedimentabilidad realizada tanto para condiciones de reposo como para condiciones de agitación (provocada por el proceso de alimentación en el estanque).

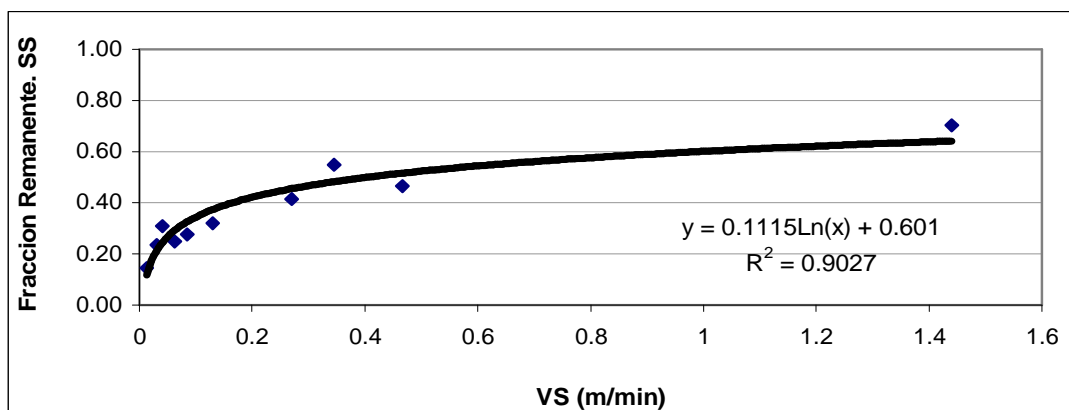


Figura 6. Estanque en reposo

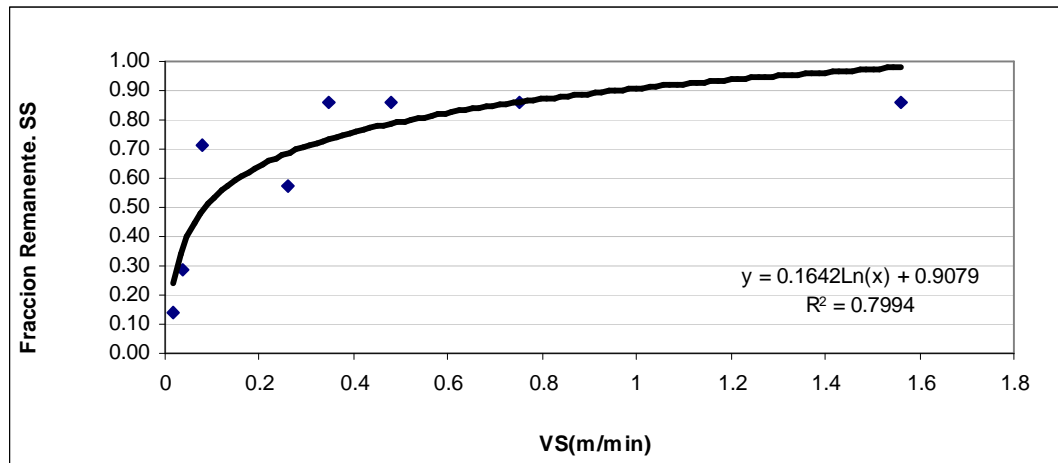


Figura 7. Estanque después de alimentación.

Como resultado de las pruebas de sedimentabilidad, se obtuvieron las curvas de correspondientes para cada una de las condiciones evaluadas (Figura 6 y Figura 7), cuyos datos de origen y descripción del procedimiento para el cálculo de eficiencias de remoción pueden encontrarse en el ANEXO 4.



**Figura 8. Curva de sedimentabilidad de SS.
(Estanque en reposo)**



**Figura 9. Curva de sedimentabilidad de SS.
(Estanque con agitación).**

Tanto para condiciones de reposo como para condiciones de agitación, la sedimentabilidad de las partículas es un factor determinante sobre la eficiencia de remoción que se pueda alcanzar en el estanque.

Las partículas evaluadas presentan velocidades de sedimentación altas que dentro de las condiciones normales del estanque evaluado (reposo), pueden favorecer el proceso de sedimentación; sin embargo, existen otros factores que provocan variaciones importantes sobre la sedimentación y remoción, como lo es el área superficial. Es posible que las partículas resuspendidas por la agitación generada dentro del estanque, sedimenten nuevamente, particularmente cuando el área superficial es lo suficientemente amplia (estanque completo), sin embargo, cuando esta área superficial se reduce, parte de las partículas no alcanzan a llegar a la zona de sedimentación siendo arrastradas por el flujo para salir en el efluente final, y mas cuando el proceso de resuspensión genera la ruptura de la partícula en material mas pequeño que puede ser arrastrado con mayor facilidad (Patterson et al., 1999; Rittmann and McCarty, 2001 citado por Maillard et al., 2005, y Cripps and Bergheim, 2000).

Para verificar la sedimentabilidad bajo las condiciones de operación del estanque, se estimaron las cargas superficiales, (con base en el caudal y el área superficial) y las eficiencias de remoción con base en la curva de sedimentabilidad (ver Tabla

6). Adicionalmente, dado que la distribución de alimento y la resuspensión de los lodos se realizan en toda el área del estanque, se estimó la carga superficial considerando dos tercios y un tercio de área superficial, para verificar la posibilidad de sedimentación de las partículas en estas áreas.

A continuación es presentada la información correspondiente a las eficiencias de remoción reportadas en la prueba de sedimentabilidad para condiciones de reposo y agitación.

Tabla 6. Eficiencias de remoción en el estanque para condiciones de reposos y agitación.

Periodo de Operación	Área Superficial	Carga Superficial (m/min.)	Estanque en Reposo	Estanque con agitación
			Remoción SS (%)	Remoción SS (%)
3 días	Estanque completo	0.12	77	64
	Estanque mitad	0.23	73	58
	Tercera parte	0.35	71	55
5 días	Estanque completo	0.09	78	66
	Estanque mitad	0.18	74	60
	Tercera parte	0.27	72	56
8 días	Estanque completo	0.16	75	61
	Estanque mitad	0.31	71	55
	Tercera parte	0.47	69	52

Conforme con la Tabla 6, se demuestra que las partículas al interior del estanque son sedimentables, lo cual se ve reflejado en las eficiencias de remoción promedio alcanzadas en todo el estanque tanto para condiciones de reposo (77%) como para condiciones de agitación (64%). Al considerar la eficiencia a la mitad del estanque y en el último tercio de éste, se verifica que no difieren mucho entre ellas, para cada condición en particular, tal como se aprecia en la Tabla 6, lo que indica que podrían ser removidas fácilmente dentro del estanque. Sin embargo, bajo condiciones de agitación, se aprecia disminución en las eficiencias de remoción respecto a la condición de reposo, particularmente en el último tercio del estanque, lo que podría deberse, como se mencionó con anterioridad, a la resuspensión y posible ruptura de partículas que no alcanzan a sedimentar nuevamente a causa de la disminución del área superficial. Estas eficiencias se encuentran condicionadas por las velocidades del flujo al interior del estanque,

que de acuerdo a los reportes anteriores (Tabla 5), son en general, lo suficientemente bajas como para garantizar la sedimentación de las partículas, que posteriormente se extraen mediante la evacuación del lodo.

La sedimentación en el estanque, según Brinker (2005), podría verse favorecida por la presencia de zonas en donde la turbulencia es baja, donde se pueden presentar procesos de aglutinación y formación de grandes partículas, especialmente las de tipo orgánico debido a sus características de superficie. La afirmación de Brinker podría explicar aun más la alta sedimentabilidad de las partículas que se muestra en el presente estudio.

Adicionalmente para verificar la cantidad de lodo sedimentado se realizó la medición de sólidos suspendidos, caudal evacuado y tiempo de lavado durante el proceso de purga del estanque. Estos datos son reportados a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7. Concentración de sólidos suspendidos en el lodo evacuado (g) y caudal de lavado del estanque.

SS en el caudal de lavado (mg/l)	Caudal de lavado (l/s)	Tiempo estimado de evacuación de lodo (s)	Cantidad de lodo evacuado (g)
230	1.02	90	21.11
6240	1.02	90	572.83
2395	1.11	90	239.26

La cantidad de sólido evacuado en el efluente de lavado confirma que al interior del estanque se dan procesos de sedimentación con eficiencias significativas como se planteó anteriormente; sin embargo, es necesario considerar que aspectos como el incremento del caudal y la exposición del lodo al movimiento de los peces, influyen significativamente en la pérdida del material sedimentado, reflejándose en las variaciones de la cantidad de lodo evacuado. Por ejemplo, en el periodo de operación de 8 días, la cantidad de lodo evacuado disminuye en comparación a los otros dos periodos de operación, posiblemente como consecuencia del incremento en el caudal sufrido en este periodo, o por el mayor tiempo de retención de las partículas al interior del estanque, en donde se generan turbulencias a causa del movimiento de los peces que resuspenden nuevamente el material sedimentado, saliendo en el efluente del estanque en vez de salir en el efluente de lavado.

6.4 IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA

Para cada periodo de operación, en la Tabla 8 se detallan los valores reportados para los parámetros físico químicos evaluados, especificando el valor promedio, máximos, mínimos y desviación estándar presentada.

Tabla 8. Parámetros físico químicos e hidráulicos evaluados durante cada Periodo de Operación.

Parámetro	Periodo de operación	Punto de muestreo	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación
DBO (mg/L)	3	Entrada	3,25	3,53	2,96	0,28
		Salida	4,44	4,55	4,38	0,09
	5	Entrada	2,22	2,54	1,80	0,38
		Salida	2,92	4,06	2,08	1,01
	8	Entrada	3,11	3,39	2,79	0,23
		Salida	3,20	4,48	2,67	0,66
DQO (mg/L)	3	Entrada	6,33	9	5	2,31
		Salida	4,67	5	4	0,58
	5	Entrada	6,20	7	5	0,84
		Salida	7,60	20	3	7,09
	8	Entrada	6,25	12	1	4,57
		Salida	10,6	16	8	3,21
Sólidos Suspendidos (mg/L)	3	Entrada	3,20	3,67	7	2
		Salida	6,70	4,33	7	3
	5	Entrada	3,20	7,5	1	2,59
		Salida	6,70	10,5	1	3,83
	8	Entrada	2,83	6,00	1,00	2,29
		Salida	3,75	10,50	0,50	3,70
Turbiedad (UNT)	3	Entrada	1,71	1,87	1,6	0,14
		Salida	2,30	2,92	1,85	0,55
	5	Entrada	1,93	2,41	1,37	0,40
		Salida	2,84	4,23	2,11	0,91
	8	Entrada	1,70	2	1,3	0,23
		Salida	2,03	2,8	1,7	0,40

Con la información proporcionada en la Tabla 8 , es posible verificar que la calidad del agua en el periodo de operación correspondiente a 3 días, presenta mayor deterioro que el reportado por los periodos de 5 y 8 días, lo cual puede atribuirse a la afección que sufre el flujo afluente a causa de diversos factores ambientales como son: las condiciones climáticas, la posible modificación del metabolismo de los peces por altos niveles de estrés, entre otros. Sin embargo, resulta difícil establecer con precisión el tipo de impacto generado por parámetros como la Turbiedad, los Sólidos Suspendidos, la DBO₅ y la DQO sobre la calidad durante los tres periodos de operación dado que el número de datos tomados y la frecuencia de muestreo utilizada para la adquisición de la información no son

representativos para obtener la potencia requerida. A pesar de que la información reportada y consignada en la Tabla 8 nos permite confirmar que se está dando un efecto negativo sobre las condiciones de calidad del agua, no es posible definir la magnitud de su incidencia sobre ésta.

6.5 OXÍGENO DISUELTO

La información obtenida de oxígeno disuelto (OD) en el interior del estanque se presenta a continuación en la Tabla 9, la cual es un resumen de los datos obtenidos en los 3 periodos de operación, por cada sección evaluada. Mientras que en el anexo 5 se presentan los datos puntuales obtenidos durante toda la evaluación.

En la Tabla 9 se observa como varía el oxígeno disuelto (OD) en los diferentes puntos evaluados dentro del estanque, tanto en altura como en las secciones transversales y longitudinales y en cada uno de los tres periodos de operación.

Tabla 9. Concentraciones promedio de OD (mg/l) para cada periodo de operación.

PERIODO DE OPERACIÓN	ALTURA	SECCIÓN 1				SECCIÓN 2				SECCIÓN 3			
		A	B	C	Promedio por altura	A	B	C	Promedio por altura	A	B	C	Promedio por altura
3 días	1	6,57	6,63	6,63	6,61	6,33	6,37	6,40	6,37	6,07	6,17	6,13	6,12
	2	6,87	6,83	6,80	6,83	6,40	6,43	6,37	6,40	6,20	6,20	6,23	6,21
	3	7,07	7,03	6,97	7,02	6,57	6,57	6,43	6,52	6,30	6,27	6,20	6,26
	Promedio por sección	6,82				6,43				6,20			
5 días	1	7,36	7,42	7,4	7,39	6,8	6,98	7,1	6,96	6,84	6,88	6,94	6,89
	2	6,98	7,24	7,2	7,14	6,94	6,96	6,88	6,93	6,62	6,6	6,74	6,65
	3	6,84	6,88	6,94	6,89	7,24	7,26	7,18	7,23	6,96	6,92	6,86	6,91
	Promedio por sección	7,14				7,04				6,82			
8 días	1	7,17	7,27	7,23	7,22	6,87	6,92	6,87	6,88	6,63	6,18	6,63	6,48
	2	7,17	7,18	7,18	7,18	6,88	6,90	6,87	6,88	6,72	6,70	6,63	6,68
	3	7,53	7,53	7,48	7,52	7,13	7,08	6,93	7,05	6,85	6,75	6,68	6,76
	Promedio por sección	7,31				6,94				6,64			

Debido a la alta variación horaria de los caudales durante los períodos de evaluación y el efecto que este tiene en la disponibilidad de oxígeno disuelto, se estableció un intervalo de confianza del 95%, para acotar la información de oxígeno disuelto y realiza un análisis del consumo de OD en el tiempo, con datos incluidos en el rango de confianza. En la Tabla 10, se presenta el rango de confianza para los tres períodos evaluados, así como el promedio del rango y su desviación estándar.

Tabla 10. Resultado de la desviación estándar y los Intervalos de confianza para caudal (m³/s) en los 3 periodos de muestreo.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO		3 DÍAS	5 DÍAS	8 DÍAS
Caudal Promedio		0,052 m ³ /s	0,041 m ³ /s	0,070 m ³ /s
1-Alfa		95	95	95
Desviación estándar		0,003	0,014	0,023
Valor del intervalo de confianza		0,003	0,012	0,019
Intervalo de confianza	Menor	0,049	0,029	0,051
	Mayor	0,055	0,053	0,089

6.5.1 Influencia de factores externos

Durante el período de estudio fue visible que diversos factores como la temperatura, las variaciones climáticas (altas precipitaciones e intenso verano), la alimentación, las perturbaciones ambientales y la hora del día en que se realizaron las mediciones, influyeron en la dinámica de los peces, tanto en el consumo de OD, como en su metabolismo.

En el periodo de operación de 3 días el clima era calido (verano), las truchas presentaban el peso más bajo de los tres periodos. En este periodo el agua del estanque presentó una calidad deficiente en comparación con los otros dos, principalmente por el alto contenido de materia orgánica, tal como se observa en los datos presentados en la Tabla 8. Por la presencia de la materia orgánica los valores de oxígeno disuelto se afectaron, repercutiendo en una menor concentración de oxígeno en el agua que ingreso al estanque y por ende proporcionando menor de cantidad de oxígeno disponible para el consumo de los peces.

Para el periodo de operación de 5 días, se registran los valores de caudal (Q) más bajos de los tres periodos, con un promedio de $0,041 \text{ m}^3/\text{s}$ (tabla 10), en comparación con los otros dos periodos. El flujo de agua es importante porque la trucha tiene grandes necesidades de calidad de agua, principalmente de oxígeno, por lo que cuando el caudal es insuficiente para satisfacer los requerimientos de la cantidad de peces presentes en el estanque se deteriora más el recurso y se pone en peligro el óptimo desarrollo del pez, en este caso el OD que permanece en el estanque no presenta un descenso brusco a pesar de los bajos caudales registrados en este periodo

En el periodo de operación de 8 días se presenta el mayor caudal de los tres periodos, con un promedio de $0,070 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabla 10) y no se presentaron altas temperaturas ya que para esta época se presentaron fuertes precipitaciones, lo que repercute en el aumento de la cantidad de OD que entra al estanque en comparación de los otros dos periodos.

Con el fin de observar los efectos de factores como la temperatura y la alimentación, En la Tabla 11, se encuentran los datos del periodo de operación de 5 días, solo se toma este periodo de operación porque en los tres periodos de operación evaluados se observa la misma tendencia de como factores físicos como son la temperatura (T_p) y las perturbaciones ambientales influyen en el comportamiento del OD del agua del estanque, por lo que se considera que es suficiente mostrar la afectación de los factores ambientales en solo uno de los periodos de operación.

Con el fin de observar el efecto en la reducción del oxígeno disuelto respecto al tiempo, en la Tabla 11 se encuentran los valores de OD, organizados de mayor a menor, ubicando la mayor concentración de OD en la parte superior hasta llegar a valor con la menor concentración en la última posición de la tabla. Se reporta la hora experimental, refiriéndonos al tiempo real de muestreo. Las 7:00 a.m. del primer día se toma como la hora cero y a partir de esta se empiezan a contabilizar las horas de muestreo en todo el periodo, luego se reporta la hora del día en que se tomó la muestra y finalmente algunas observaciones que son importantes para justificar variaciones de OD inesperadas. Los datos consignados en esta tabla corresponden al oxígeno disuelto de la sección transversal 2 (S2), porque en esta sección se encuentran las condiciones medias en el estanque.

Tabla 11. Promedios de OD por horas dentro del estanque, organizados de mayor a menor para el Periodo de Operación de 5 días.

OBSERVACIÓN	DIA DE MUESTREO	HORA DEL DÍA	HORA EXPERIMENTAL	Q (m ³ /s)	OD (mg/l)
Baja Temperatura, 13.9 ºC	Día 3	8:30 a.m.	45.5	0.048	7.66
	Día 2	8:00 a.m.	22	0.041	7.63
	Día 1	9:00 a.m.	3	0.049	7.44
Después de alimentación	Día 3	9:30 a.m.	46.5	0.048	7.12
Después de alimentación	Día 1	10:00 a.m.	4	0.049	7.03
	Día 5	10:00 a.m.	93	0.038	6.92
Después de alimentación	Día 2	9:30 a.m.	23.5	0.041	6.88
	Día 5	8:00 a.m.	91	0.038	6,78
Tranquilidad del estanque	Día 5	5:00 p.m.	100	0.038	6.74
	Día 5	5:30 p.m.	100.5	0.038	6.72
	Día 5	3:00 p.m.	98	0.038	6.41
	Día 5	12:00 m.	95	0.038	6.38
	Día 5	4:00 p.m.	99	0.038	6.38
Alta temperatura y perturbación	Día 5	2:00 p.m.	97	0.038	6.34

Teóricamente se espera que la concentración de oxígeno disuelto disminuya con el tiempo, debido a la acumulación de residuos que se genera en el estanque, siempre que factores ambientales, como la temperatura y cantidad de agua permanezcan constantes. Sin embargo, en la Tabla 11 se observa que el mayor valor de OD, 7.66 mg/l, se reporta en la primera medición del tercer día de este período de operación, lo que muestra como factores físicos como la temperatura

(T) y las perturbaciones ambientales influyen en el comportamiento del OD del agua del estanque en el momento de tomar la concentración presente, este valor se registro en la medición realizada a las 7 de la mañana, hora en la cual se presenta la temperatura más baja del día ($T=13.4^{\circ}\text{C}$) y en la que los peces se encuentran en reposo. El comportamiento del OD a 13.4°C es coherente con la concentración teórica esperada en el estanque a 10°C , la cual es 8.8 mg/l . En cuanto al consumo de oxígeno se refiere, la temperatura ambiental es un factor que modifica los consumos de OD de los peces de tal forma que estos son más elevados a medida que ésta aumenta, proporcionalmente a esto, a temperatura más bajas mayor OD, esta relación de OD vs. Temperatura se evidencia en las variaciones del OD durante todo los periodos de muestreo, además vale la pena resaltar que las variaciones altas de temperatura, afectan a los peces en los cultivos haciéndolos más susceptibles a las enfermedades a causa del estrés, lo que lleva a un mayor consumo de OD, deterioro de la condición del pez y de su hábitat.

En el tercer día de muestreo se presenta un descenso brusco de oxígeno en un corto periodo de tiempo, entre la primera y segunda medición el OD disminuyo 0.54 mg/l en una hora, lo que probablemente esta relacionado con el proceso de alimentación de los peces, ya que poco antes de realizar la segunda medición se alimento a los peces (aproximadamente 20 minutos antes), y como plante Cachafeiro (1984), la alimentación es una actividad determinante en el consumo de oxígeno, el consumo de oxígeno aumenta con la distribución e ingestión de la comida originándose descensos que son máximos a los 15 ó 30 minutos después de la distribución, el alimento ingerido por las truchas pasa al aparato digestivo y metabólico de los peces y sufre una serie de transformaciones por los procesos, estos consumen oxígeno, estableciéndose una gran depleción en este gas.

En las últimas 7 posiciones de la tabla se encuentran las mediciones correspondientes al último día del periodo de operación, en donde el mayor valor de OD reportado es 6.78 mg/l , el cual corresponde a la primera hora de medición de este día (8:00 a.m.), lo esperado para el muestreo; el valor más bajo de todo el periodo de operación y por consiguiente del último día, es el correspondiente a las 2:00 p.m. con una concentración de 6.34 mg/l , lo cual se sale de la tendencia esperada pero que podría ser explicado, porque no había pasado más de media hora de haberle suministrado la última ración de alimento del día a los peces, por la alta temperatura, y por una fuerte perturbación que sufrieron las truchas en ese momento, lo que obligó a mover el agua e interrumpir por unos minutos la normal tranquilidad de los peces, razones que pudieron incidir en un mayor consumo del oxígeno disuelto.

Los valores más bajos de OD en el último día del periodo evaluado se presentan probablemente por la degradación que presenta la materia orgánica acumulada en

los sedimentos. Al estar más tiempo en el estanque presentan un estado más avanzado de descomposición biológica, razón por la cual se generan mayores consumos de oxígeno del agua, compitiendo por este elemento vital con los peces. Esta tendencia del OD a presentar los menores valores en el último día de muestreo corrobora la influencia del tiempo de permanencia de la materia orgánica y los sedimentos en el consumo del oxígeno del agua.

6.5.2 Efecto de la acumulación de lodo en el estanque

Para determinar cual fue el comportamiento del consumo de Oxígeno Disuelto (OD) en el agua dentro del estanque, y analizar su variación respecto al tiempo, se tomó el promedio de OD por horas de muestreo, y se les realizó el análisis estadístico ANOVA, mediante el cual fue posible determinar que existen diferencias significativas entre los datos, con un nivel de significancia de 0.05 (Ver ANEXO 6).

Para determinar las cantidades de oxígeno consumido por día, se realizó la diferencia entre el oxígeno de la sección 1 (S1) y el de la sección 3 (S3), esta diferencia se multiplica por el caudal y por el tiempo (24 h). En la Figura 10, Figura 11 y Figura 12 se presenta el comportamiento del consumo de oxígeno en el tiempo para los tres periodos de operación.

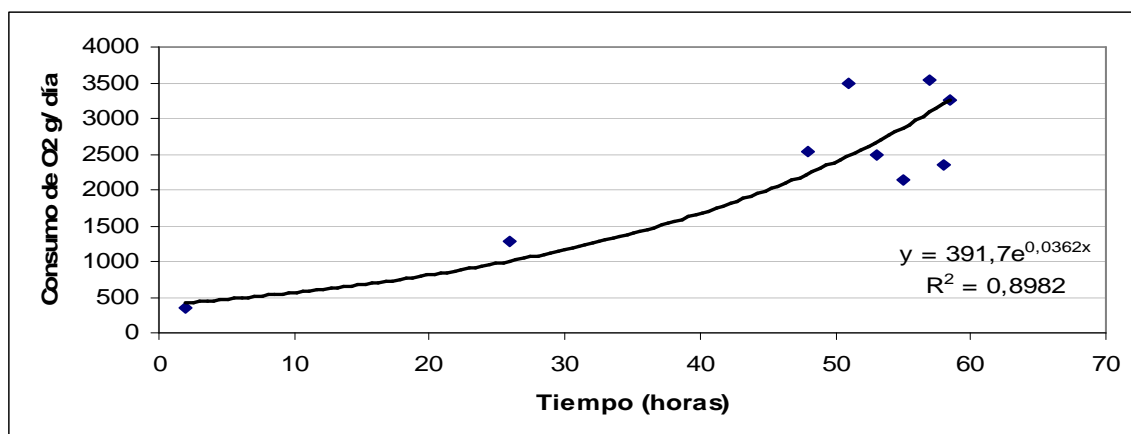


Figura 10. Día vs. Cantidad de oxígeno consumido por día, en el periodo de operación de 3 días

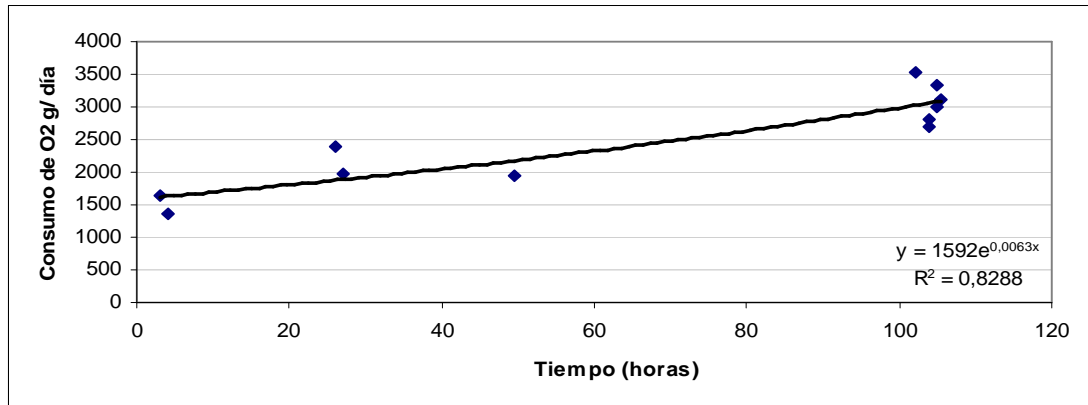


Figura 11. Día vs. Cantidad de oxígeno consumido por día, en el periodo de operación de 5 días

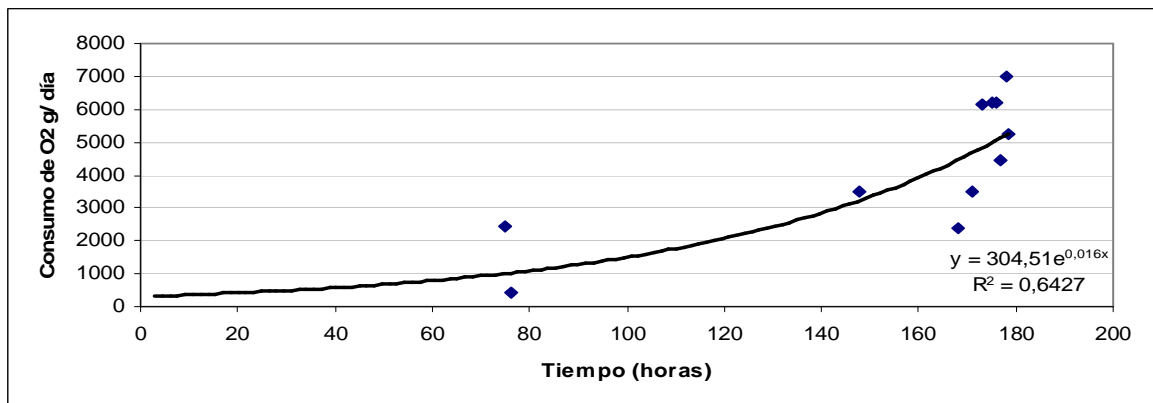


Figura 12. Día vs. Cantidad de oxígeno consumido por día, en el periodo de operación de 8 días

En los tres periodos se observa una tendencia exponencial hacia el aumento del consumo de Oxígeno del agua del estanque, a medida que aumenta el tiempo de permanencia del lodo en el fondo del estanque. El consumo de oxígeno disuelto en el estanque tiene dos fuentes: los peces y la degradación de materia orgánica retenida. Durante cada uno de los periodos de evaluación la cantidad de peces fue casi constante, por lo que el consumo de oxígeno por parte de los peces debe ser mas o menos el mismo. En este sentido, el incremento del consumo del oxígeno en el tiempo podría ser explicado por la degradación de la materia orgánica retenida en el estanque, ya que este proceso necesita oxígeno.

La tendencia exponencial del consumo de oxígeno, indica que se va a presentar un rápido incremento del consumo de este gas, poniendo en riesgo la supervivencia del pez, por esto se considera importante minimizar el efecto que tiene el lodo almacenado en el estanque. Una rápida extracción podría ayudar a disminuir los consumos de oxígeno.

6.5.3 Diferencias de OD por ubicación en el estanque

En la Figura 13, se muestra la variación promedio de la cantidad de Oxígeno Disuelto en el agua (OD) en cada una de las secciones transversales (S1, S2, S3) en los tres periodos de operación.

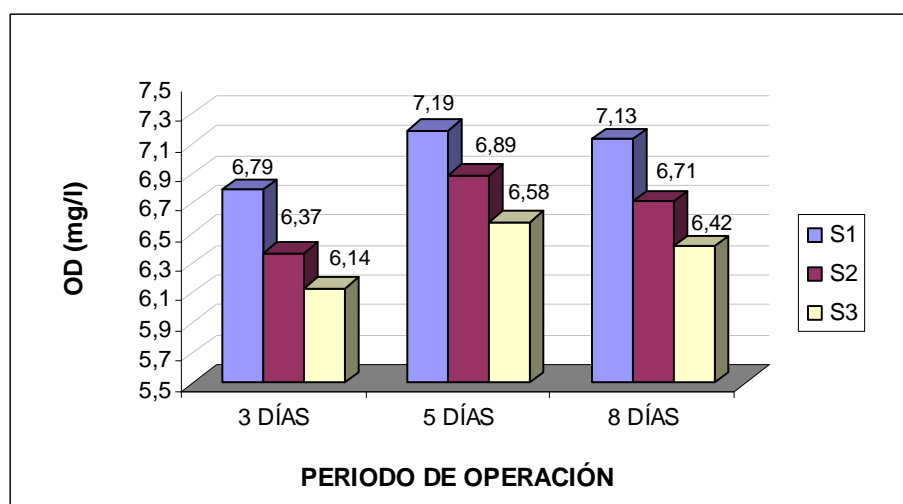


Figura 13. Variación de OD (mg/l) en las secciones transversales en cada uno de los periodos de operación.

En la Figura 13 se evidencia como el oxígeno disuelto presenta la tendencia a disminuir en dirección del flujo en los tres periodos de operación. La disminución del oxígeno disuelto se presenta a medida que el flujo se aleja de la entrada de agua al estanque (Sección Transversal 1, S1), en donde la oxigenación es permanente, alcanzando niveles entre 6.5-7.0 mg/L de OD aceptables para el sostenimiento del pez; a medida que el flujo se acerca a la salida del estanque (Sección Transversal 3, S3), los niveles de OD caen por debajo de los niveles permisibles para el pez (<6.5 mg/L de OD).

Al comparar los datos usando la prueba estadística de ANOVA con un nivel de significancia de 0.05, se determinó que si existen diferencias significativas entre las secciones transversales en todos los periodos de operación. En el ANEXO 6 se presentan los resultados de las comparaciones por Anova. Una prueba de jerarquización estadística complementaria de Tukey mostró que la sección 1 presenta la mayor concentración de oxígeno disuelto, seguida por la sección 2 y 3, ver Anexo 8.



Figura 14. Entrada de agua al estanque.

La sección transversal 1 (S1), es el lugar por donde ingresa el agua al estanque. Por la diferencia de alturas entre la salida del estanque anterior y la entrada del estanque de estudio se produce una cascada de agua, este salto genera oxigenación y turbulencia por la velocidad con que ingresa el agua (Figura 14). Autores como Burley y Klapsis encontraron que el uso de cascadas (flujo vertical) en la entrada del estanque no contribuye a un aprovechamiento y buen rendimiento de la explotación porque esto afecta la posibilidad que las truchas aprovechen el oxígeno presente en esta sección, a pesar de la buena oferta del gas existente en este sitio. En la sección 1 se encuentra en promedio de 7,04 mg/L de OD, encontrándose suficiente OD disponible para que la trucha abastezca sus necesidades de oxígeno.

A medida de que el flujo llega al final del estanque, los niveles de OD decrecen, por ejemplo, en la sección transversal 3 (S3) el OD descendió a un valor promedio de 6.38 mg/l, valor que se encuentra por debajo del mínimo permisible de 6.5 mg/L lo cual representa un alto riesgo para el buen desarrollo de la trucha ya que la escasez de este recurso dificulta la satisfacción de las necesidades del pez. Se presentó una disminución respecto a S1 de 0.66 mg/l en una distancia de 11.80 m; esta disminución de OD muestra la importancia de la continua oxigenación del agua en un sistema de cultivo industrial, ya que en estos sistemas se deben manejar grandes densidades de oxígeno y los salmónidos son una de las especies más exigentes de este elemento.

La disminución del oxígeno a lo largo del estanque se debe al efecto combinado de dos factores, uno es el consumo de oxígeno propio de los peces que al utilizar el OD en el agua van agotando este gas, y el otro factor, es el oxígeno consumido en la degradación de la materia orgánica depositada en el fondo. La alta turbulencia y mayores velocidades causadas por el ingreso del flujo al estanque, podrían influir en que se produzca una menor acumulación de sólidos en la entrada del estanque (S1), por lo que la mayor acumulación se podría presentar al final de este (S3). Algunos factores como la velocidad del agua y la pendiente en el estanque (4.3%) influyen en que gran cantidad de materia orgánica se pueda acumular al final del estanque, por lo que al encontrarse mayor cantidad de este material el proceso de degradación es mayor, utilizando así una mayor cantidad de oxígeno del agua. El agua llega a este punto agotada por el consumo de oxígeno propio de los peces y la materia orgánica acumulada en el fondo del estanque, razón por la cual se presentan valores muy bajos de OD en este punto (6,38mg/l), lo que afecta a los peces. Esto se puede corroborar por la baja cantidad de peces que habitan esta sección en comparación con el resto del estanque.

La variación del OD con respecto a la altura de columna de agua se presenta la figura 12, (H1: 10 cm del fondo, H2: en la mitad de la columna de agua y H3 a 10 cm de la superficie).

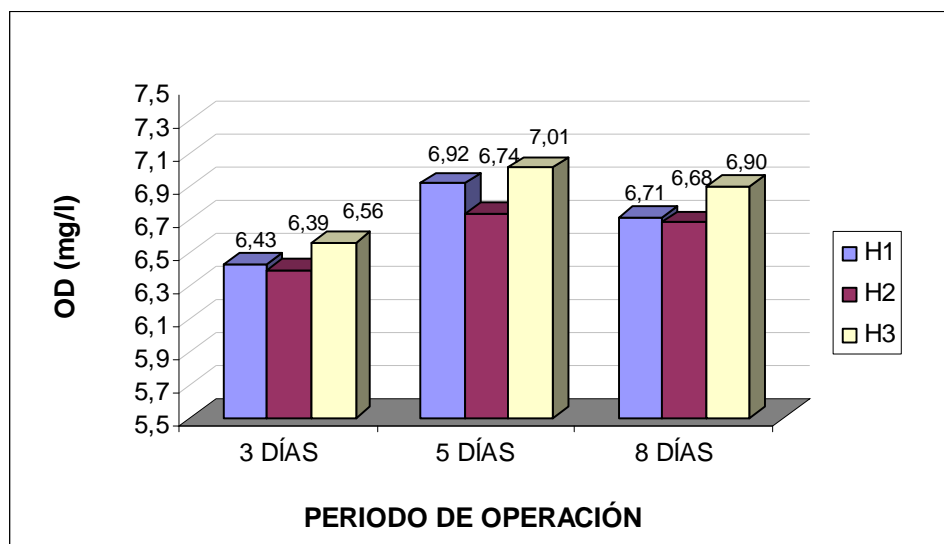


Figura 15. Variación de OD (mg/l) en la columna de agua en cada uno de los periodos de operación

En la Figura 15, se aprecia que la mayor cantidad de OD se concentra en la altura 3 (H3), donde se encuentra el máximo valor de OD (6,82 mg/l), esto sucede porque a esta altura la lámina de agua tiene mayor contacto con la atmósfera, recibiendo así mayor oxigenación por ser la capa más superficial. La menor cantidad de oxígeno, (6,60 mg/l), corresponde a la altura 2 (H2), esto se debe a que la mayoría de las truchas, por su naturaleza, se ubican en la mitad de la columna de agua, razón por la que el consumo de oxígeno en esta altura es alto debido a los requerimientos de este gas por parte de las truchas. Es poco común encontrar estos peces en el fondo del estanque (H1), en donde se reportó una concentración de OD intermedia (6,69 mg/l), pero muy cercana al mínimo valor, lo que se atribuye a la presencia de materia orgánica en el fondo del estanque, la cual consume oxígeno para realizar su proceso de degradación.

De forma general se puede observar como se afecta la calidad del agua con el aumento del tiempo de permanencia del lodo en el estanque, como se observa en la Tabla 11 empezamos con un valor de OD de 7.66 mg/l y se finalizó el periodo de 5 días de operación, con 6.34 mg/l, lo que nos lleva a una diferencia de 1.32 mg/l en 5 días, si hacemos esta comparación con el periodo de operación más corto (3 días), en donde se comenzó con una concentración de OD de 6.84 mg/l y se finalizó con 6.02 mg/l de OD, presentando una diferencia de 0.82 mg/l en tres días, lo que evidencia como se presenta la menor diferencia de OD, lo que representa menor consumo de Oxígeno en el periodo más corto.

6.5.4 Relación de calidad de agua con las condiciones de la trucha

Es importante resaltar que la trucha tiene grandes necesidades de oxígeno; según Yason (1971), necesita entre 8 y 9 mg/l de oxígeno para satisfacer sus necesidades. Los niveles óptimos están sobre las 7 ppm en condiciones cercanas a la saturación de oxígeno disuelto, por lo que es recomendable disminuir la carga de los estanques cuando el OD disminuya por debajo de 6 ppm, ya que los peces presentan signos de asfixia cuando su concentración en el agua es inferior a 3 mg/l.

Tabla 12. Resultado de la clasificación del estado del agua para el estanque de estudio en los tres periodos operación.

PERIODO DE OPERACION	CLASIFICACION		S1		S2		S3		TOTAL
	Rango OD	Característica	Promedio	%	Promedio	%	Promedio	%	(%)
3 DÍAS	7-9	Optimo	7,3	39,8	*	*	*	*	13,27
	6.5-7	Aceptable	6,8	34,3	6,7	39,8	6,7	17,6	30,56
	5-6.5	Critico	6,1	25,9	6,1	60,2	6	82,4	56,17
5 DÍAS	7-9	Optimo	7,4	66,7	7,4	39,6	7,4	18,7	43,27
	6.5-7	Aceptable	6,8	29,9	6,8	31,3	6,7	38,2	34,38
	5-6.5	Critico	6,2	3,5	6,3	18,1	6,1	43,1	22,36
8 DÍAS	7-9	Optimo	7,4	66	7,3	32,7	7,2	19,1	39,30
	6.5-7	Aceptable	6,8	22,2	6,7	34,6	6,7	32,7	29,84
	5-6.5	Critico	6,1	11,7	6,1	32,7	6	48,1	30,86

Para determinar la incidencia de las variaciones del Oxígeno Disuelto en las truchas, se tomó como referencia la clasificación realizada por Herminia Alvarado de Alizo e Hilda Bastardo de Colmenares (Tabla 1), en donde se clasifica el agua de acuerdo al nivel de OD que ésta presente, partiendo del estado óptimo, que comprende el rango de 9 a 7 mg/l, hasta el estado rápidamente mortal, que se encuentra en el rango de 3 a 1,5 mg/l. De acuerdo a esta clasificación, se analizaron y clasificaron los datos de OD obtenidos en el estudio y se compararon con la información bibliográfica Tabla 1, para determinar en que estado se encuentra el agua de la piscifactoría y como pueden afectar las variaciones de OD

a las truchas. En la Tabla 12 encuentra la clasificación por sección (S1, S2 y S3), para cada periodo de operación

Es importante tener en cuenta que como se discutió anteriormente en el periodo de operación de tres días, la calidad del agua que ingresó al estanque fue muy deficiente y las truchas que poblaban el estanque en ese momento poseían bajo peso, lo que evidencia que el agua no puede considerarse en condiciones óptimas, clasificando en los rangos aceptable y crítico.

Como se explicó anteriormente en S1 se encuentran las mejores concentraciones de oxígeno en el agua, ya que a pesar de las malas condiciones de oxígeno presentes en este periodo de operación se encontraron el 39.8 % de los datos en estado óptimo, pero aun así en S1 más de la mitad de los datos (60.2%) se encuentran en condiciones aceptables y críticas.

Según Yason (1971), es recomendable disminuir la carga de los estanques cuando el OD disminuya por debajo de 6 mg/l, valor intermedio dentro de la clasificación del agua en estado crítico; si se observa en S2 se presenta el 60.2% en este estado, y en S3 el 82,4%, situación que se torna preocupante ya que las truchas son muy susceptibles a presentar problemas.

En el periodo de operación de 5 días se observa la misma tendencia, en donde la mejor calidad del agua de acuerdo a los datos reportados, se encuentra en S1 (66.7 % en estado óptimo) y la más peligrosa en el S3 (43.1 %).

En la Tabla 12, se puede observar como la influencia del tiempo de permanencia de la materia orgánica en el estanque es más significativa sobre la calidad del agua que el caudal y la temperatura, ya que aunque en el periodo de operación de 8 días se reportaron los mayores caudales y las temperaturas más bajas, la calidad del agua es más deficiente en este periodo en donde se presente un 66% de los datos dentro de la clasificación de estado óptimo en S1 y un 48% en estado crítico en S3, condiciones inferiores de calidad comparada con los resultados del periodo de 5 días, en donde se encontraron en estado óptimo el 66.7 % en S1 y 43.1% en estado crítico, por lo que en el periodo mas largo de tiempo (8 días) se encuentra menor porcentaje en estado óptimo y mayor en estado crítico. Es necesario aclarar que factores como el caudal y la temperatura son muy importantes y tienen gran influencia en la concentración de OD en el agua, razón por la cual no es posible realizar, en este caso, la comparación con el periodo de 3 días; pero como las condiciones climáticas y los factores que influyen en el OD de los periodos de 5 y 8 días son similares, es posible hacer la comparación en este caso.

En los tres periodos de operación la calidad se encuentra en estado crítico y aceptable, en todos los casos con valores superiores al 50%, y en contraste con esto, menos de la mitad se encuentra en estado aceptable, lo que lleva a pensar que es necesario realizar un control continuo de la calidad del agua para poder tener un eficiente funcionamiento del sistema.

Los resultados del estudio nos permiten determinar que las condiciones de OD más críticas se presenta en S3, por lo que esta sección del estanque no es preferida para habitar por el pez, el cual se ubica preferencialmente en S1 y S2, por que le ofrece un mejor hábitat. Bajo estas condiciones la longitud del estanque podría ser reducida ya que no se esta utilizando eficientemente todo el estanque y se esta exponiendo a el pez a condiciones limites para su desarrollo, es mucho mejor para el pez y para la calidad del agua que sale del estanque disminuir la longitud del estanque como tal y aumentar el área de la zona de recolección de lodos.

6.6 CONSIDERACIONES SOBRE EL MANEJO E IMPLEMENTACION DE PML

La información encontrada en el presente documento, ha permitido sentar las bases para empezar a implementar alternativas de producción mas limpia.

El diseño de los estanques de la piscícola favorece la retención de sólidos, lo cual permite disminuir la carga orgánica en el agua y concentrarla en el efluente de lavado que podría ser tratado como agua residual.

Al realizar la remoción periódica de los sólidos en la zona de cría de peces se logra alcanzar buenos niveles de OD, posibilitando que un porcentaje de este gas en el estanque, pase de la condición crítica de oxígeno, a condiciones aceptables para la trucha. Cuando el pez cuenta con las características necesarias para su óptimo desarrollo, mejora la producción de biomasa y se generan beneficios económicos en términos de producción.

Aunque el lavado del estanque repercute negativamente en el pez, provocando condiciones de estrés, éste es momentáneo y permite que la trucha se recupere rápidamente, en comparación a la generada por la permanencia continua del lodo en el estanque. La limpieza del estanque implica mayor uso de mano de obra, sin que esto provoque el aumento de costos en el proceso a causa de la contratación de personal, ya que se requiere de poco tiempo para su ejecución y la planta cuenta con el personal suficiente para el desarrollo de esta labor, y por el contrario, favorece la reducción de carga contaminante evacuada en el efluente de la piscícola, lo que disminuye el impacto negativo propio de la producción sobre el ambiente.

Las modificaciones en el diseño del estanque, como definir una zona para la acumulación y recolección de lodos y considerar la disminución de la longitud de la zona de cría inutilizada, permitiría la reducción de los niveles del recurso hídrico utilizado actualmente en la producción sin que se afecten las condiciones requeridas por el pez, haciendo uso eficiente del agua y disminuyendo los caudales con carga contaminante, descargados al cuerpo receptor, lo cual representa para la piscícola la reducción de algunos costos en el desarrollo de la producción, ya que puede disminuir el valor del cobro que hace la CRC por tasas retributivas y uso de aguas.

7 CONCLUSIONES

- Los consumos del recurso hídrico reportados en este estudio (3300 y 6566 m³/ día) son muy altos para las densidades que actualmente se manejan (16.85 y 32.24 kg/m³) y la producción generada (1.0 y 0.5 Tonelada).
- La variación de factores como el caudal, la temperatura, la frecuencia de alimentación y las perturbaciones ambientales influyen en la reducción de los niveles de OD, ya que provocan cambios en el consumo de oxígeno de la trucha, lo que repercute directamente en la calidad del agua.
- La distribución de oxígeno disuelto en el estanque no es uniforme. El oxígeno disuelto presenta la tendencia a disminuir en la dirección del flujo y a menores profundidades, alcanzando las mas altas concentraciones en la Sección Transversal 1, (S1) y a nivel superficial (H3) y cayendo por debajo de los niveles permisibles para el pez (<6.5 mg/L de OD) en la Sección Transversal 3 (S3) y H2, próxima a la salida del agua al final del estanque.
- Los últimos metros (desde la Sección S3) del estanque al presentan condiciones de oxígeno disuelto bajas, las truchas se ubican en menor cantidad en esta zona lo cual estaría indicando que no se esta aprovechando toda la longitud del estanque, y que este podría ser diseñado con una menor longitud.
- En los tres periodos de operación la calidad se encuentra en estado crítico y aceptable, en todos los casos con valores superiores al 50%, y en contraste con esto, menos de la mitad se encuentra en estado aceptable, lo que lleva a recomendar realizar un control continuo de la calidad del agua para poder tener un eficiente funcionamiento del sistema.
- El aumento en el tiempo de retención de sedimentos en el estanque analizado, durante los periodos de operación (3, 5 y 8 días), afecta la calidad del agua, sin embargo, no se puede llegar a una determinación concreta del tiempo de remoción del lodo sin que se presenten efectos negativos sobre las condiciones de este recurso influenciado por la variabilidad de parámetros como el caudal, la temperatura, la materia orgánica y las perturbaciones ambientales.

- La retención de sedimentos en el estanque afecta el consumo de oxígeno disuelto del estanque en el tiempo. La tendencia de tipo exponencial indica que el consumo de oxígeno se incrementará rápidamente con el tiempo, lo que podría ser una gran limitante para el crecimiento y desarrollo de las truchas.
- La resuspensión de los lodos, particularmente durante el proceso de alimentación disminuye la eficiencia en la retención de sólidos en los estanques, lo cual provoca la descarga de contaminantes en el efluente final.
- La característica de sedimentabilidad de las partículas generadas durante la producción de trucha indica que son fácilmente sedimentables, lo cual se ve favorecido por las bajas velocidades de flujo que se reportan en el estanque. Se estima una remoción teórica de partículas en condiciones de reposo del 77 %.
- La posibilidad de generar eficiencias de remoción de sólidos superiores al 75% indica que los estanques pueden servir como unidades de sedimentación para tratamiento preliminar del efluente y disminuir la carga contaminante al final del proceso productivo.
- La implementación de alternativas de PML genera beneficios económicos para la planta, ya que permite disminuir los costos del recurso hídrico e influye en el mejoramiento de la producción proporcionando mejores condiciones para el desarrollo de la trucha y disminuyendo la mortalidad de estas. También genera beneficios al ambiente ya que permite disminuir el impacto negativo que genera esta actividad industrial.

8 RECOMENDACIONES

8.1 ASPECTOS HIDRÁULICOS

- Es necesario corregir y modificar las estructuras de regulación para los excesos de agua que se generan en épocas de superávit hídrico, dado que el área dispuesta para el tratamiento del efluente de lavado (sedimentador), se ve perjudicada por las inundaciones generadas por el rebosamiento del flujo, lo cual impide que se produzca un tratamiento eficiente del efluente.
- Se debe implementar un sistema en el estanque, que facilite el almacenamiento y la extracción del lodo, evitando que los peces entren en contacto con ese material y generen su resuspensión durante el proceso de alimentación, para evitar que salgan en el efluente final sin un previo tratamiento.
- Evaluar la posibilidad de reducir la longitud del estanque, particularmente cuando se está reusando el efluente, con el propósito de hacer mejor uso del recurso hídrico y del espacio útil de la piscícola, favoreciendo la calidad de agua necesaria para el óptimo desarrollo del pez
- En S3 se presentan las condiciones de OD más críticas, razón por la cual esta sección no es preferida por el pez para habitar, por lo que la longitud del estanque podría ser reducida aumentando la zona de recolección de lodos, para así mejorar la eficiencia del estanque y garantizar un óptimo funcionamiento del sistema.

8.2 ASPECTOS OPERACIONALES

- Debido a que periodos de operación superiores a 3 días afectan la calidad del agua y a partir de los cinco días generan condiciones críticas para la trucha, es recomendable incrementar la frecuencia de limpieza en los estanques, para disminuir los efectos perjudiciales en los peces y en la calidad del agua. En este sentido, si el proceso de limpieza del estanque se realiza a diario, pueden disminuirse las perturbaciones del entorno del pez, ya que se requieren menores tiempos para llevar a cabo esta operación y lograr mejoras en la

producción dado que se evita estresar al animal, la resuspensión del sedimento y la disminución del OD.

- Cuando disminuyen los niveles de OD, es necesario realizar la extracción del lodo depositado en el fondo del estanque, ya que cuando este material inicia su proceso de descomposición utiliza el oxígeno requerido por las truchas, poniendo en peligro la vida de estas.
- En épocas de altas temperaturas y bajas precipitaciones, confluyen la disminución del oxígeno en el agua, y el aumento de los consumos de oxígeno de los peces, por lo que es recomendable el control periódico de OD en el estanque para la oportuna inyección de este gas cuando sea necesario.
- Se evidencia la necesidad de actualizar y precisar la información acerca de la disponibilidad de agua superficial del río (Río Piedras) que abastece la piscícola para adoptar medidas de regulación tanto en la época de superávit hídrico, como en la época de desabastecimiento.

9 BIBLIOGRAFÍA

Agrocadenas “*La Cadena de la Piscicultura*” Anuario 2004.

ALIANDES, (ALIANZA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE).1998.
www.angelfire.com/nh/aliandes/index.htm.

ALVARADO. Hermina, BASTARDO Hilda. “*Producción de Truchas en Venezuela*” FONAIAP, Caracas Venezuela. 1983.

BELTRAN TURRIAGO, Claudia Stella. VILLANEDA JIMENEZ, Abraham Alberto. “*Perfil de la pesca y la acuicultura en Colombia*”. Instituto Nacional de Pesca y acuicultura INPA. Bogotá, Junio de 2000.

Bergheim, A. y Brinker B., Effluent treatment for flow through systems y European Environmental Regulations. *Aquacultural Engineering*, Volume 27, Issue 1, January 2003, Pages 61-77.

BLANCO C, Maria del Carmen. “*La Trucha, Cría Industrial*”. Editorial Mundi – Prensa. 1984

BOYD, C. E. “*Effluents from catfish ponds during fish harvest*”. J. Environ. Qual., 7. 1978, p. 59-62.

BRAGA J, Maria Isabel. “*Integración de las funciones y servicios de los ecosistemas de agua dulce a los proyectos de desarrollo hídrico*”. Informe Técnico. Banco Interamericano de Desarrollo, Banco Mundial. Washington D.C. Enero del 2000.

Boersen, G. y Westers, H., 1986, Waste Solids Control in Hatchery Raceways, The Progressive Fish-Culturist, 48 (1986), pp. 151–154.

CACHAFEIRO M. C Blanco. “*La Trucha Cría Industrial*”. Ediciones Mundi-Prensa. 1984.

CHEN, M. C. M. Beveridge, T. C. Telfer, W. J. Roy. “*Nutrient leaching and settling rate characteristics of the faeces of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and the implications for modeling of solid waste dispersion*”. (2003). Journal of Applied Ichthyology 19 (2), 114–117. doi:10.1046/j.1439-0426.2003.00449.x

Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes). 2002. Documento 3177, Bogota, Colombia

COLOMBIA; COORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA (C.R.C.). "Plan de Ordenación y Manejo de la Subcuenca Hidrográfica del Río Las Piedras", 2006

De la cruz C. A. y Salazar A. F., 2007. Caracterización y Estudio de Tratabilidad del Efluente de Estaciones Piscícolas. Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

ESPINAL G, Carlos Federico; GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, Fredy A. y MARTÍNEZ COVALEDA, Héctor J. "La cadena de la piscicultura en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica 1991 – 2005". Ministerio de agricultura y desarrollo rural, observatorio agrocadenas Colombia Bogotá, marzo de 2005.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. "Technical Development Document for the Final Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Concentrated Aquatic Animal Production Point Source Category". Washington D.C. 2004

FLORES, H., 1995. Control Ambiental en Maricultura. "Contaminación por Alimentación en Cultivo de Peces". Curso de Nutrición y Alimentación de Salmónidos. Universidad Católica de Temuco. Chile.

HELLAWELI, J., 1989. "Biological Indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management. Elsevier Applied Science". 1ª edición. EEUU.

HEPHER Balfour, PRUGININ Yoel. "Cultivo de Peces Comerciales". Ed. Noriega Limusa. México D.F. 1991.

HUGGINS Dania L., PIEDRAHITA Raul H. □, RUMSEY, Tom. "Analysis of sediment transport modeling using computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceways. Implications for waste-dispersal models". Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 340 (2007) 160–168.

IDEAM, 2001. El medio Ambiente en Colombia. Segunda Edición Bogota.

INCOPECA. Instituto Costarricense de Pesca y acuicultura. <http://www.infoagro.go.cr/incopeca/Acuicultura.htm>

Informe sobre la situación de la agricultura en Colombia. FAO. 2004.

LA ACUICULTURA EN AMERICA LATINA. VOLUMEN 3 - INFORMES NACIONALES.htm.

MAILLARD Vicent, BOARDMAN Gregory, NYLAND Justin, KUHN David. “*Water quality and sludge characterization at raceway-system trout farms*”. Manual de acuicultura. COLPOS.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005. “*Acuerdo de Competitividad de la Cadena de la Piscicultura en Colombia*”:
www.agrocadenas.gov.co/piscicultura/documentos/Acuerdo_Piscicultura.pdf.
Visitado Marzo de 2006

NUÑEZ, M.; Salas, C. 2000. “*Caracterización, clasificación y tratamiento de fangos residuales de pisciculturas salmónideas para su biodisponibilidad como bioremediador de fertilizante orgánico*”. Tesis de grado presentada como parte de los requisitos para optar a Licenciado en Ciencias de la Acuicultura. Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile.

OCA Joan, MASALÓ Ingrid, REIG Lourdes. “*Comparative analysis of flow patterns in aquaculture rectangular tanks with different water inlet characteristics*”. Engineering. Volume, October 2004, Pages 221-236.
Stevenson, J.P., *Trout Farming Manual*, Fishing News Books Limited, London, 1987.

OJEDA, Eduardo, *et. al.* (2000): “*Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Colombia, Recursos Hídricos, Agua Potable y Saneamiento*”
www.censat.org/Documentos/Agua/Remendar_Agua.pdf

PALMA CARDONA R.A. 2004. “*Aprovechamiento de materia orgánica de efluentes de instalaciones de producción de salmones en pisciculturas, en el engorde de camarón de río del sur, samastacus spinifrons, philippi* “.1882. Tesis de grado Universidad Católica de Temuco. Chile.

Panorama Acuícola Magazín. Contribución de la acuicultura a la seguridad alimentaria mundial.htm. 2004. www.panoramaacuicola.com.

Programa para la formación de ACUICULTORES EN EL CENTRO REGIONAL.
www.fao.org.2004.

SANZ Fernando. “*La Alimentación en Piscicultura*”. XVII Curso de Especialización FEDNA. España. 2003

SAWYER Claire, McCARTY Perry, PARKIN Gene. *“Química para Ingeniería Ambiental”*. Ed. Mc Graw Hill. Bogotá D.C. Colombia 2001.

SECRETARIA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, PESCA Y ALIMENTACIÓN. *“Información Resumida sobre Acuicultura Comercial: Mundial, Regional y Global: Perspectivas para el Nuevo Siglo”*. Buenos Aires. Argentina. 2001

Stevenson J., 1985. Manual de Cría de la Trucha. Primera Edición. Editorial ACRIBIA, S. A. Zaragoza (España). ISBN 84-200-0558-4

STEWART Nathan T. BOARDMAN Gregory D. HELFRICH Louis A. *“Characterization of Nutrient leaching rates from settled rainbow trout (Ocorhynchus Mykiss) sludge.”* Aquaculture Engineering No 35 – 2006

TRUE Brit, JOHNSON William, CHEN Shulin. *“Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture I: facility and effluent characterization wild fish faeces and food around Mediterranean fish farms”*. 2004.

Yasnó J. y García C., 2007. Selección y Diseño de Alternativas para el Tratamiento de Afluentes y Efluentes del Proceso de Producción Piscícola Caso Trucha en El Municipio de Silvia Cauca. Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

Warrer-Hasen, I.; 1982 Evaluation of matter discharged from trout farming in Denmark. In Alabster, J:S Report or the EIFAC Workshop on fish-farm effluents. Silkeborg , Denmark 26-28 May 1981. *EIFAC Tech. Pap.* 41: 166p

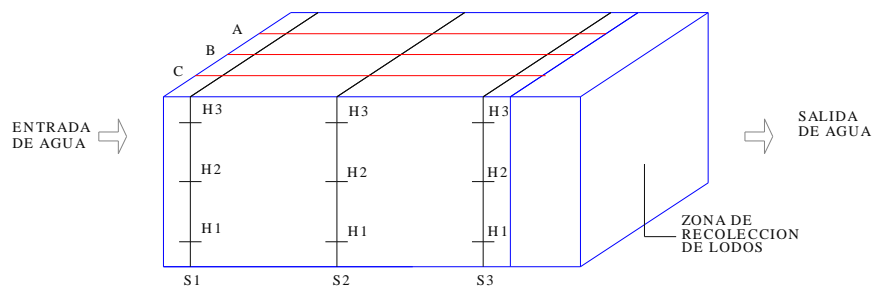
Watten B.J., Honeyfield D.C. and Schwartz M.F., 2000. Hydraulic characteristics of a rectangular mixed-cell rearing unit, *Aquacult. Eng.* 24, pp. 59–73.

Westerman P.W., Hinshaw, J.W, Barker, J.C., 1993 Trout manure characterization y nitrogen mineralization rate. *Techniques for Modern Aquaculture*, June, American Society of Agriculture Engineers, St. Joseph Michigan.

WOODWARD. IAN. *“Finfish Farming and the Environment”* – A Review. 1989. Australia.

ANEXOS

ANEXO 1. FORMATO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN CAMPO



H 1: 10 cm. Desde el fondo A: Sección longitudinal izquierda
H 2: Mitad del estanque B: Sección longitudinal centro
H 3: 10 cm. desde la superficie C: Sección longitudinal derecha

VELOCIDAD

Tabla 1. Velocidad

Fecha:

	SECCIÓN					
	H1 profundo		H2 Medio		H3 superficie	
	rps	rps	rps	Rps	rps	rps
1A						
1B						
1C						
2A						
2B						
2C						
3A						
3B						
3C						

CAUDAL

Altura:

Tiempo (s):

Tabla 2. Caudal con molinete

Distancia (m)	Rps			promedio
0,0				
0,2				
0,4				
0,6				
0,8				
1,0				
1,2				
1,4				
1,6				
1,8				

Tabla 3. Caudal desagüe sedimentador

#	Tiempo (s)	Volumen (L)
1		
2		
3		

OXÍGENO DISUELTO

Hora:

Tabla 4. Datos de oxígeno disuelto

	Sección					
	H1 profundo		H2 Medio		H3 superficie	
	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%
1A						
1B						
1C						
2A						
2B						
2C						
3A						
3B						
3C						

**ANEXO 2.FORMATO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EN
LABORATORIO**

Fecha:

Calculo de sólidos suspendidos.

SS = S. Totales – S. Disueltos.

Tabla 1. Datos para la obtención de Sólidos Suspendidos.

Muestra	Sólidos Suspendidos Totales					
	V (cm ³)	Peso inicial (g)	Promedio	Peso final (g)	Promedio	Diferencia
Entrada						
Salida						

Tabla 2. Datos para la obtención de Sólidos Suspendidos en el lavado.

Muestra	Sólidos Suspendidos Totales					
	V (cm ³)	Peso inicial (g)	Promedio	Peso final (g)	Promedio	Diferencia
M1						
M2						
M3						
M4						

Tabla 3. Determinación de DQO

Muestra	Entrada		Salida	
	Abs.	Valor DQO (mg O ₂ /l)	Abs.	Valor DQO (mg O ₂ /l)

Tabla 4. Determinación de DQO en el lavado

Lavado		
Muestra	Abs.	Valor DQO (mg O ₂ /l)

Tabla 5. Determinación de DBO

MUESTRA	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	DBO _i	DBO ₅

V₁: Volumen de titulante consumido.

V₂: Volumen de titulante consumido después de agregar almidón.

Formula Dilución:

$$Y = (V_i - V_f) * (M \text{ Tiosulfato} / 0.025) - (300 / \text{Vol. Muestra})$$

$$Y = \text{mg/l}$$

Tabla 6. Datos de Turbiedad.

Muestra	Valor de Turbiedad.

ANEXO 3. VALORES DE VELOCIDAD (M/S) PARA CADA PERIODO DE OPERACIÓN

Tabla 1. Valores de velocidad (m/s) para Periodo de Operación de días

ALTURA	DÍA	SECCIÓN 1			SECCIÓN 2			SECCIÓN 3		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1	0,12	0,12	0,12	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	2	0,13	0,08	0,16	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
	3	0,10	0,10	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	PROMEDIO	0.12	0.10	0.11	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
2	1	0,08	0,09	0,08	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	2	0,09	0,07	0,08	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
	3	0,08	0,08	0,08	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04
	PROMEDIO	0.08	0.08	0.08	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
3	1	0,26	0,32	0,26	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	2	0,23	0,36	0,32	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	3	0,30	0,40	0,27	0,04	0,05	0,11	0,04	0,04	0,04
	PROMEDIO	0.26	0.36	0.28	0.04	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04

Tabla 2. Valores de velocidad (m/s) para Periodo de Operación de 5 días

ALTURA	DÍA	SECCIÓN 1			SECCIÓN 2			SECCIÓN 3		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1	0.06	0.12	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	2	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04
	3	0.11	0.13	0.14	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04
	4	0.11	0.10	0.06	0.04	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04
	5	0.05	0.08	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	PROMEDIO	0.08	0.09	0.07	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04
2	1	0.06	0.07	0.05	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	2	0.07	0.13	0.09	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
	3	0.08	0.12	0.10	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04
	4	0.06	0.09	0.10	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06	0.04
	5	0.06	0.11	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	PROMEDIO	0.07	0.10	0.08	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
3	1	0.19	0.30	0.20	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04
	2	0.13	0.08	0.15	0.05	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04
	3	0.56	0.44	0.48	0.06	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04
	4	0.13	0.25	0.38	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	5	0.41	0.31	0.39	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	PROMEDIO	0.28	0.28	0.32	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04

Tabla 3. Valores de velocidad (m/s) para Periodo de Operación de 8 días

ALTURA	DÍA	SECCIÓN 1			SECCIÓN 2			SECCIÓN 3		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1	0.15	0.18	0.10	0.04	0.08	0.05	0.04	0.04	0.04
	4	0.17	0.17	0.09	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
	5	0.10	0.09	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	6	0.06	0.13	0.14	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	7	0.11	0.19	0.17	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	8	0.11	0.09	0.11	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04
	PROMEDIO	0.12	0.14	0.12	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
2	1	0.07	0.11	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	4	0.10	0.16	0.10	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	5	0.09	0.16	0.10	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04
	6	0.11	0.19	0.11	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05
	7	0.08	0.09	0.07	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04
	8	0.08	0.13	0.07	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04
	PROMEDIO	0.09	0.14	0.09	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04
3	1	0.27	0.36	0.22	0.10	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	4	0.27	0.30	0.32	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
	5	0.35	0.16	0.34	0.15	0.07	0.07	0.04	0.04	0.04
	6	0.35	0.36	0.45	0.12	0.06	0.11	0.04	0.04	0.04
	7	0.26	0.55	0.33	0.05	0.13	0.14	0.04	0.04	0.04
	8	0.36	0.47	0.35	0.08	0.09	0.05	0.04	0.04	0.04
	PROMEDIO	0.31	0.37	0.34	0.09	0.07	0.08	0.04	0.04	0.04

ANEXO 4. ANÁLISIS DE SEDIMENTABILIDAD DE PARTÍCULAS

Tabla 1. Parámetros Hidráulicos del Estanque de estudio

Periodo de Operación	Velocidad Promedio (m/s)	CAUDAL (m ³ /s)	Área Superficial	C.S o Vsc. (m/s)
3 días	0,08	0,05	26,6	0,0020
5 días	0,08	0,041	26,6	0,0015
8 días	0,10	0,07	26,6	0,0026

Tabla 2. Datos para la curva de sedimentabilidad de sólidos suspendidos. (Estanque en reposo)

TIEMPO (min.)	H (m)	Vs (m/min.)	Fracción Rem.
1	1,44	1,44	0.70
2	1,42	0,71	0.44
3	1,4	0,47	0.46
4	1,38	0,35	0.55
5	1,35	0,27	0.42
8	1.32	0.17	0.82
10	1,3	0,13	0.32
15	1,28	0,09	0.28
20	1,26	0,06	0.25
30	1,24	0,04	0.31
40	1,22	0,03	0.23
60	1,19	0,02	0.17
90	1,17	0,01	0.14

Tabla 3. Datos para la curva de sedimentabilidad de sólidos suspendidos. (Estanque con agitación).

TIEMPO (min.)	H (m)	Vs (m/min.)	Fracción Rem.
1	1.56	1.56	0.86
2	1.5	0.75	0.86
3	1.44	0.48	0.86
4	1.38	0.35	0.86
5	1.31	0.26	0.57
10	1.23	0.12	0.29
15	1.18	0.08	0.71
20	1.12	0.06	0.86
30	1.08	0.04	0.29
60	1.03	0.02	0.14
90	0.99	0.01	0.57

Eficiencias de Remoción Teóricas.

El cálculo de las eficiencias de remoción se realiza con base en la construcción de la curva de sedimentabilidad (Fracción Remanente vs. Velocidad de sedimentación) para los datos de sólidos suspendidos. Las Cargas superficiales se obtienen como el cociente entre el Caudal promedio para cada periodo y el área superficial definida (estanco completo, dos tercios y un tercio de área superficial). La fracción remanente se corrige mediante la ecuación correspondiente a la línea de tendencia ajustada a la curva, y a partir de ésta se estiman las eficiencias de remoción para cada punto mediante la siguiente expresión:

$$Eficiencia = 1 - C + \frac{1}{V_{sc}} \int_0^c V_s dc$$

Remoción
de partículas
 $V_s > V_{sc}$

←

Remoción
de partículas
 $V_s < V_{sc}$

→

Donde C representa un dato de Fracción Remanente y la Eficiencia corresponde al área sobre la curva.

ANEXO 5. CONCENTRACIONES PROMEDIO DE OD PARA CADA PERIODO DE OPERACIÓN.

Tabla 1. Concentraciones promedio de OD (mg/l) para periodo de operación de 3 días

Altura	Día	SECCIÓN 1			SECCIÓN 2			SECCIÓN 3		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1	6,1	6,2	6,2	6,1	6,2	6,2	5,9	6,0	6,0
	2	7,0	7,0	7,0	6,6	6,6	6,7	6,2	6,4	6,3
	3	6,6	6,7	6,7	6,3	6,3	6,3	6,1	6,1	6,1
2	1	6,6	6,6	6,5	6,2	6,3	6,2	6,1	6,1	6,1
	2	7,2	7,2	7,2	6,8	6,8	6,7	6,5	6,5	6,5
	3	6,8	6,7	6,7	6,2	6,2	6,2	6,0	6,0	6,1
3	1	6,6	6,6	6,5	6,3	6,3	6,1	6,2	6,1	6,1
	2	7,5	7,4	7,4	6,9	6,9	6,8	6,5	6,5	6,4
	3	7,1	7,1	7,0	6,5	6,5	6,4	6,2	6,2	6,1

Tabla 2. Concentraciones promedio de OD (mg/l) para periodo de operación de 5 días.

Altura	Día	SECCIÓN 1			SECCIÓN 2			SECCIÓN 3		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1	7,3	7,4	7,4	6,7	7,3	7,4	7,0	7,1	7,2
	2	7,7	7,8	7,7	7,0	7,5	7,5	7,3	7,3	7,3
	3	7,8	7,7	7,7	7,4	7,5	7,4	7,1	7,1	7,2
	4	7,0	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2	6,7	6,7	6,8
	5	7,0	7,1	7,0	6,6	6,7	6,5	6,1	6,2	6,2
2	1	6,7	6,9	7,1	7,1	7,2	7,2	6,4	6,4	7,0
	2	6,4	6,8	7,1	7,0	7,0	6,9	7,1	7,1	7,1
	3	7,3	7,5	7,5	7,4	7,4	7,2	6,9	6,9	7,0
	4	6,6	6,7	6,8	6,6	6,6	6,6	6,5	6,4	6,4
	5	7,0	7,0	7,0	6,6	6,6	6,5	6,2	6,2	6,2
3	1	7,4	7,6	7,6	7,4	7,5	7,1	7,3	7,2	7,2
	2	7,7	7,8	7,8	7,5	7,5	7,6	7,4	7,3	7,3
	3	7,9	7,9	7,9	7,5	7,5	7,5	7,2	7,1	7,1
	4	7,2	7,2	7,2	7,1	7,1	7,0	6,6	6,7	6,5
	5	7,2	7,1	7,2	6,7	6,7	6,7	6,3	6,3	6,2

Tabla 3. Concentraciones promedio de OD (mg/l) para periodo de operación de 8 días.

Altura	Día	SECCIÓN 1			SECCIÓN 2			SECCIÓN 3		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1	7,2	7,4	7,4	7,2	7,1	7,0	6,7	3,8	6,8
	4	7,0	7,2	7,2	6,7	6,8	6,9	6,5	6,6	6,6
	5	7,6	7,7	7,7	7,2	7,4	7,3	7,2	7,3	7,2
	6	7,0	7,1	7,0	6,9	6,9	6,8	6,7	6,6	6,6
	7	7,5	7,5	7,4	7,0	7,1	7,1	6,8	6,8	6,7
	8	6,7	6,7	6,7	6,2	6,2	6,1	5,9	6,0	5,9
2	1	7,4	7,4	7,5	7,2	7,2	7,1	7,0	7,0	7,0
	4	6,9	6,9	7,0	6,7	6,8	6,8	6,6	6,6	6,5
	5	7,8	8,0	8,0	7,4	7,5	7,5	7,3	7,4	7,2
	6	7,3	7,3	7,3	7,1	7,1	7,0	6,9	6,8	6,7
	7	6,8	6,7	6,6	6,6	6,5	6,6	6,5	6,4	6,4
	8	6,8	6,8	6,7	6,3	6,3	6,2	6,0	6,0	6,0
3	1	7,5	7,5	7,5	7,2	7,3	6,7	6,9	6,9	6,9
	4	7,2	7,2	7,3	7,0	6,8	6,8	6,8	6,7	6,6
	5	8,2	8,2	8,2	7,7	7,6	7,6	7,5	7,4	7,2
	6	7,6	7,6	7,6	7,3	7,2	7,1	6,9	6,7	6,7
	7	7,5	7,5	7,2	7,1	7,1	7,0	6,8	6,7	6,6
	8	7,2	7,2	7,1	6,5	6,5	6,4	6,2	6,1	6,1

ANEXO 6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA

Tabla 1. Cuadro resumen del análisis estadístico ANOVA para el muestreo de 3 días.

OD	Grados de libertad	SC	CM	FC	Alfa 0.05 y 11 y 96 grados de libertad	
Tratamientos	11	9,846	0,895	17,657		
Error Exp	96,000	4,867	0,051		FC(11,96,0.05)	1.6 <17.66
Total	107,000	14,713	Hay diferencias significativas			
					CV	0,035
F corregido	4380,267				Promedio	6,369

Tabla 2. Cuadro resumen del análisis estadístico ANOVA para el muestreo de 5 días.

OD	Grados de libertad	SC	CM	FC	Alfa 0.05 y 15 y 128 grados de libertad	
Tratamientos	15	25,187	1,679	34,345		
Error Exp	128,000	6,258	0,049		FC(15,128,0.05)	4.8 <34,34
Total	143,000	31,444	hay diferencias significativas			
					CV	0,032
F corregido	6843,426				Promedio	6,894

Tabla 3. Cuadro resumen del análisis estadístico ANOVA para el muestreo de 8 días.

OD	Grados de libertad	SC	CM	FC	Alfa 0.05 y 17 y 144 grados de libertad	
Tratamientos	17	26,484	1,558	9,956		
Error Exp	144,000	22,533	0,156		FC(17,144,0.05)	4.89 <9.95
Total	161,000	49,018	Hay diferencias significativas			
					CV	0,055
F corregido	8234,722				Promedio	7,130

ANEXO 7. VARIACIÓN DE LA CANTIDAD DE OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA (OD) EN EL ÚLTIMO DÍA DE CADA PERIODO DE OPERACIÓN EN CADA UNA DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES (S1, S2, S3) Y EN CADA ALTURA (H1, H2, H3) DEL ESTANQUE DE ESTUDIO.

PERIODO DE OPERACIÓN DE 3 DÍAS

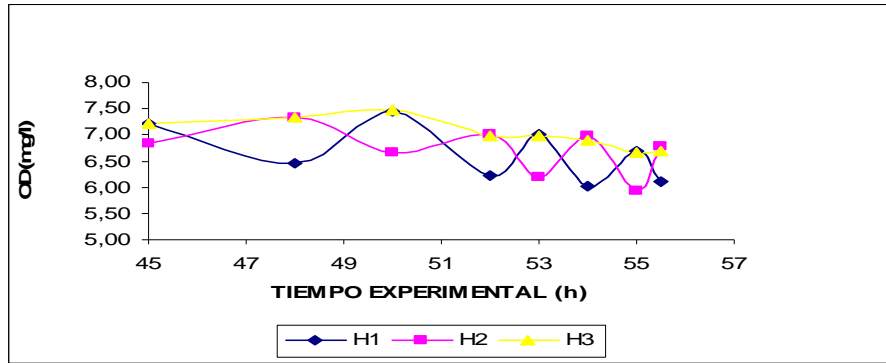


Figura 1. Comportamiento del OD en la Sección Transversal 1 (S1) del estanque.

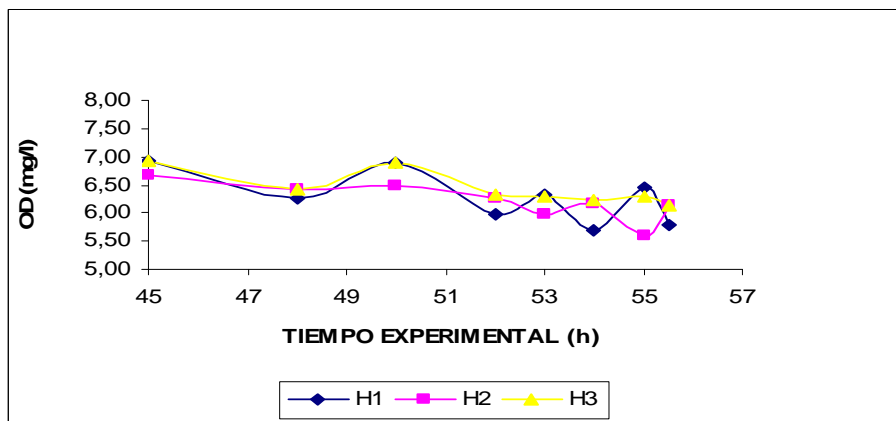


Figura 2. Comportamiento del OD en la Sección Transversal 2 (S2) del estanque

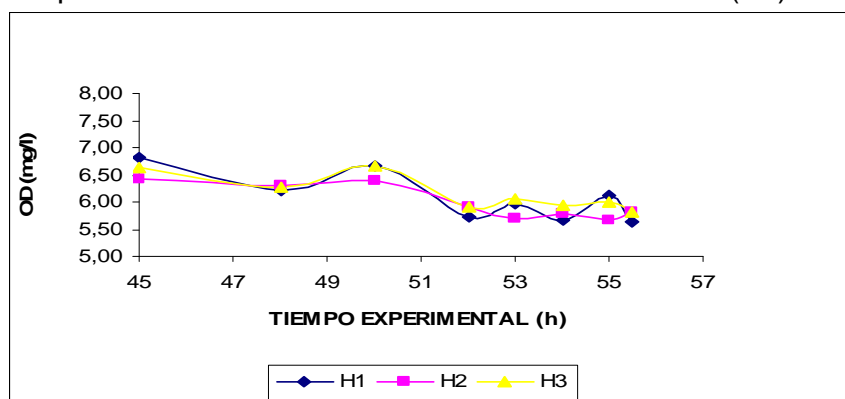


Figura 3. Comportamiento del OD en la Sección Transversal 3 (S3) del estanque
PERRIODO DE OPERACIÓN DE 5 DÍAS

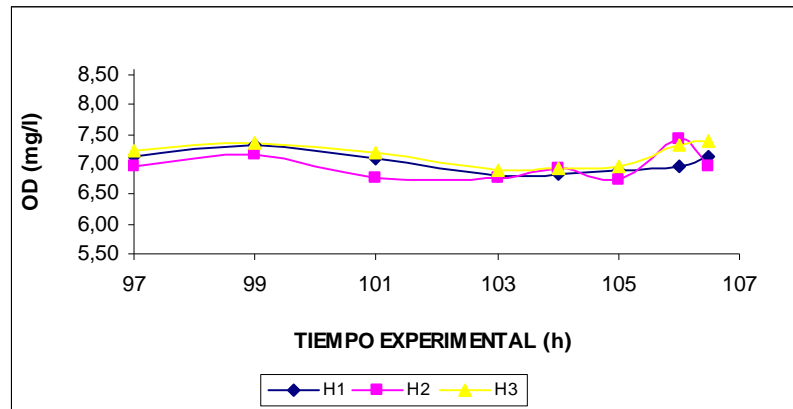


Figura 4. Comportamiento del OD en la Sección Transversal 1 (S1) del estanque

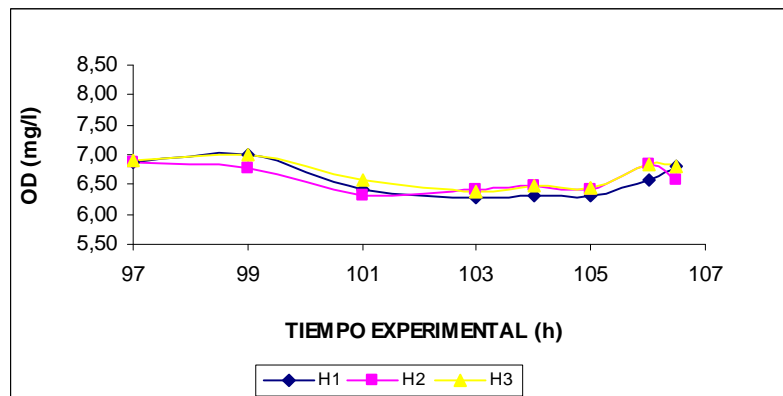


Figura 5. Comportamiento del OD en la Sección Transversal 2 (S2) del estanque

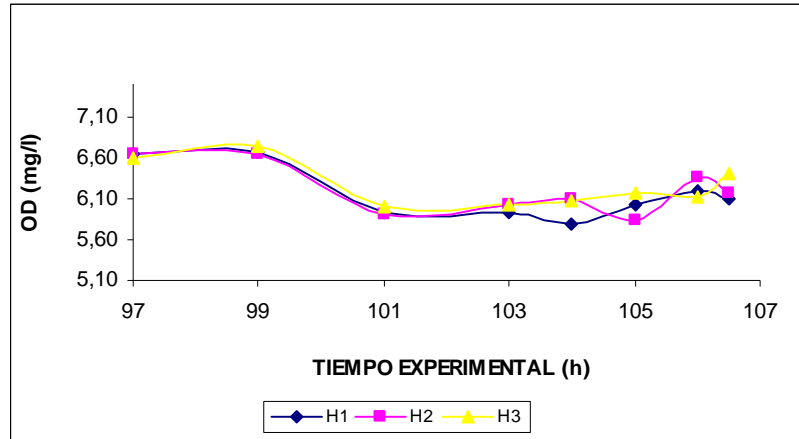


Figura 6. Comportamiento del OD en la Sección Transversal 3 (S3) del estanque
 PERRIODO DE OPERACIÓN DE 8 DÍAS

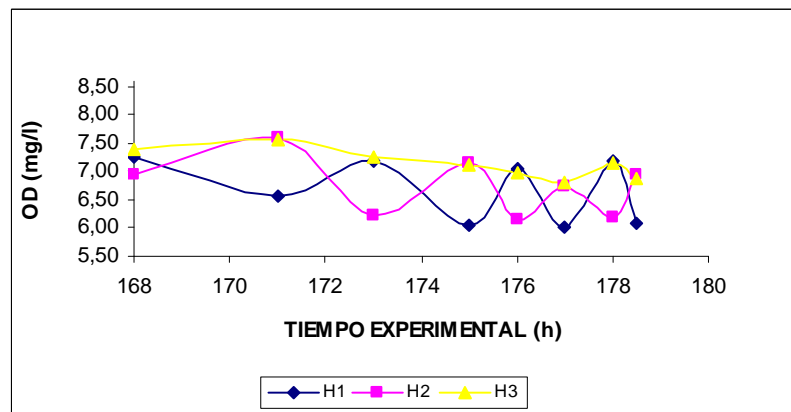


Figura 7. Comportamiento del OD en la Sección Transversal 1 (S1) del estanque

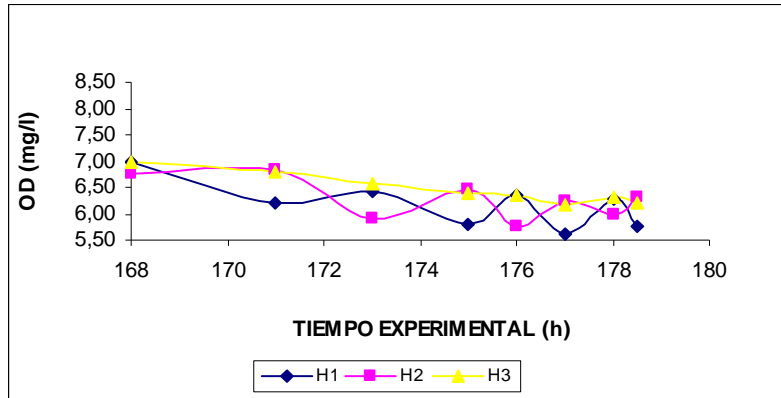


Figura 8. Comportamiento del OD en la Sección Transversal 2 (S2) del estanque

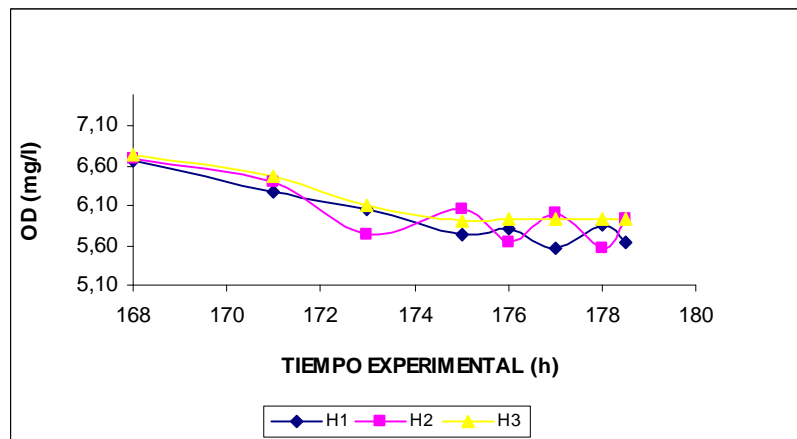


Figura 9. Comportamiento del OD en la Sección Transversal 3 (S3) del estanque.

**ANEXO 8. JERARQUIZACIÓN DE RESULTADOS POR LA PRUEBA DE TUKEY
DE MAYOR A MENOR PARA LAS SECCIONES TRANSVERSALES.**

Tabla 1. Jerarquización de resultados por la Prueba de Tukey de mayor a menor de las secciones transversales.

SECCIÓN LONGITUDINAL	COMPARACIÓN		CLASIFICACIÓN
S1	A		Mayor
S2	A	B	
S3		B	Menor