

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES

ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

Evaluación del efecto de distintos sistemas de ingreso de agua,
eductor y rociador vertical, sobre el tiempo de mezcla en un
estanque circular.

Proyecto para optar al grado de Ingeniero Acuicultor.

por

Amilcar Edgardo Arriagada Salinas

Valparaíso

2012

Comité de Titulación:

Profesor Guía : Sr. Pablo Venegas Cabello

Profesor : Sr. José A. Gallardo Matus

Profesor : Sr. Guido Plaza Pasten

AUTORIZACIÓN DE USO

Al presentar este Proyecto como último requisito para la obtención del título de Ingeniero Acuicultor, autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente de ella. Autorizo además reproducciones parciales o totales de este Proyecto sólo con fines académicos.

Amilcar Edgardo Arriagada Salinas

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a mi familia por su apoyo incondicional. También a mis amigos y compañeros quienes sueñan y trabajan por lograr una educación gratuita y de excelencia para nuestro pueblo.

Espero sinceramente que pronto llegue el día en que el acceso al conocimiento, y a este trabajo, sea libre para toda la sociedad y no como hoy limitado a una elite de la población.

AGRADECIMIENTOS

Quiero brindar el más grande de los agradecimientos a mi familia por todo el apoyo que recibí durante cada día de universidad, como así también al enorme esfuerzo económico y humano que hicieron, el cual permitió que pudiera lograr la meta de ser un profesional. También quisiera agradecer a mis amigos y compañeros de universidad con los cuales compartí e hice grandes amistades. Tampoco quisiera dejar de lado a aquellos profesores que entregaron más que una cátedra, sino también su experiencia y valores, enseñándome que el conocimiento profesional es una herramienta que debe utilizarse para mejorar a toda la sociedad.

Quiero agradecer al profesor Pablo Venegas y al equipo del Laboratorio de Biotecnología Acuícola de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, por toda la gran ayuda prestada en la realización de este trabajo.

Para finalizar dedico un agradecimiento especial al antiguo equipo del Laboratorio Experimental de Acuicultura (LEDA) de la PUCV, en especial el profesor José Gallardo y a la ingeniera Ximena Toledo, con quienes tuve la suerte de trabajar por varios años, en un muy grato ambiente, donde a través de la práctica adquirí gran parte de mis conocimientos.

Contenido

1	Introducción	3
1.1	Problemática identificada	3
1.2	Objetivo General:	3
1.3	Objetivos específicos:	4
2	Antecedentes	5
2.1	Calidad de agua en los estanques	5
2.1.1	Cantidad de agua	5
2.2	Mezcla en estanques	6
2.2.1	Factores que afectan la mezcla	6
2.2.2	Mezcla inducida mediante chorros	7
2.2.3	Uso de trazadores para determinar tiempos de mezcla	8
2.3	Hidrodinámica de los estanques de cultivo	9
2.3.1	Estanques circulares	10
2.3.2	Patrones de flujo en estanques con ingreso lateral	10
2.3.3	Velocidad del agua	11
2.3.3.1	Velocidades máximas y mínimas para peces	13
2.3.3.2	Fuerza impulsora y velocidad promedio de rotación	13
2.3.3.3	Coefficiente de uniformidad	14
2.3.4	Numero de Reynolds	15
2.3.5	Sistemas de entrada	15
2.3.5.1	Rociadores	16
2.3.5.2	Elementos de configuración de entrada que afectan la mezcla	17
2.3.6	Sistemas de salida	19
2.4	Eductores	20
2.4.1	Estructura y funcionamiento	20
2.5	Mapa conceptual	22
3	Materiales y métodos	23
3.1	Sistema de recirculación de agua	23
3.1.1	Sistema de ingreso de agua al estanque	24
3.1.1.1	Sistema rociador vertical	25
3.1.1.2	Sistema Eductor	26
3.1.2	Determinación de caudales de recirculación usados en la experiencia	26
3.2	Estimación del caudal real entregado por un eductor	27
3.3	Medición de velocidad de la columna de agua	27
3.4	Medición de la mezcla en el estanque	28
3.4.1	Determinación del tiempo de mezcla	30
3.5	Calculo de elementos hidrodinámicos del estanque	30
3.5.1	Velocidad de los chorros de los dispositivos de entrada de agua	30
3.5.2	Velocidad promedio de rotación	31
3.5.3	Fuerza impulsora	31
3.5.4	Coefficiente de uniformidad	32
3.5.5	Números de Reynolds	32
3.6	Análisis de datos	33

3.6.1	Obtención de los tiempos de mezcla.....	33
3.6.2	Diferencias entre tratamientos y comparaciones pareadas.	33
4	Resultados.....	34
4.1	Caudal de entrada y salida del eductor	34
4.2	Tiempos de mezcla	34
4.3	Factores hidrodinámicos	36
4.3.1	Velocidad de los chorros de los dispositivos de entrada	36
4.3.2	Velocidad promedio ponderada	36
4.3.3	Coefficiente de uniformidad	37
4.3.4	Fuerza impulsora.....	39
4.3.5	Numero de Reynolds	40
5	Discusión.	41
5.1	Caudal de entrada y salida del eductor	41
5.2	Tiempos de mezcla	41
5.3	Velocidad de los chorros.....	42
5.4	Velocidad promedio ponderada.....	43
5.5	Coefficiente de uniformidad	43
5.6	Fuerza impulsora.....	44
5.7	Discusión global	45
6	Conclusión.	47
7	Referencias.....	48

Índice de Figuras

Figura 1: Comportamiento de un chorro sumergido.....	8
Figura 2: Comportamiento hidráulico en un estanque circular.....	11
Figura 3: Funcionamiento de un rociador.....	16
Figura 4: Principales diseños de rociadores en estanques circulares.....	16
Figura 5: Distribución del fluido en un rociador	17
Figura 6: Estructura básica de un eductor.....	20
Figura 7: Esquema de funcionamiento de un eductor sumergido.....	21
Figura 8: Mapa conceptual de factores que influyen en la mezcla.....	22
Figura 9: Sistema de recirculación usado en la experiencia	23
Figura 10: Fotografías de eductor y rociador.....	24
Figura 11: Vista superior del estanque indicando ángulos de ataque	25
Figura 12: Eductor en posición 45-45.....	25
Figura 13: Rociador ocupado en la experiencia.....	26
Figura 14: Corte transversal de eductor ocupado en la experiencia	26
Figura 15: Diagrama del dispositivo usando para medir el caudal a la salida del eductor ...	27
Figura 16: Puntos de medición de velocidades en la columna de agua.....	28
Figura 17: Esquema del dispositivo usado para sacar muestras de agua.....	29
Figura 18: Relación entre caudales de entrada y salida del eductor	34
Figura 19: Tiempos de mezcla promedio por tratamiento	35
Figura 20: Velocidades promedio ponderada por tratamiento.....	37
Figura 21: Coeficiente de uniformidad por tratamiento	38
Figura 22: Fuerza impulsora por tratamiento	39

Índice de Tablas

Tabla 1: Principales parámetros de diseño y operación del sistema de recirculación	24
Tabla 2: Variación de tiempos de mezcla entre tratamientos y caudales.	35
Tabla 3: Magnitud de las velocidades de los chorros de los sistemas de entrada.....	36
Tabla 4: Velocidades promedio ponderado por tratamiento.....	37
Tabla 5: Coeficiente de uniformidad de velocidades por tratamiento	38
Tabla 6: Fuerza impulsora por tratamiento.....	39

Resumen

El diseño hidrodinámico de un estanque de cultivo debe enfocarse en proporcionar condiciones homogéneas de calidad de agua para todos los individuos que alberga, sin embargo, en los estanques actualmente usados en la industria se generan mezclas heterogéneas entre el agua del estanque y el agua fresca del sistema de entrada, con marcadas zonas de baja calidad en la columna de agua. Estas diferencias son especialmente importantes en cultivos de peces ya que se ha descubierto que disminuyen el potencial de producción debido a menores tasas de crecimiento, baja conversión de alimento y elevados niveles de agresividad, entre otros factores.

La presente investigación evaluó el tiempo de mezcla que se logró al usar por separado, en un estanque circular de uso acuícola, dos sistemas de entrada de agua distintos: eductor y rociador vertical. Además se determinó el efecto de diferentes caudales de entrada (4, 6 y 8 L/min) sobre el tiempo de mezcla y, para el caso del eductor, la influencia de distintas configuraciones de ángulo del chorro de agua (0° de variación horizontal, 45° de variación horizontal, y 45°-45° de variación horizontal y vertical, respectivamente). Se calcularon cinco factores hidrodinámicos de los chorros de los sistemas de entrada y del estanque: fuerza impulsora, número de Reynolds, velocidad de chorro de entrada, velocidad promedio ponderada de la columna de agua y coeficiente de uniformidad de velocidades, con el fin de determinar la relación de cada uno de ellos con los tiempos de mezcla de los diferentes tratamientos.

Los resultados mostraron que los tratamientos de eductor presentaron tiempos de mezcla significativamente inferiores ($P < 0,05$) que el tratamiento rociador 45, obteniéndose los mejores resultados en los tratamientos eductor 45 y eductor 45-45 los cuales no presentaron diferencias significativas ($P < 0,05$) entre sí, bajo los tres caudales estudiados. Los tiempos de mezcla fueron explicados en gran parte por la variación conjunta del caudal y del ángulo de ataque de los chorros del sistema de entrada, mientras que los factores hidrodinámicos calculados no fueron capaces, por sí solos, de explicar los tiempos de mezcla observados en los cuatro tratamientos.

A pesar de que los tratamientos de eductor presentaron menores tiempos de mezcla es necesario realizar futuras investigaciones donde analice su desempeño en relación al consumo energético, limpieza de sólidos sedimentables y su efecto sobre el comportamiento y bienestar de los organismos cultivados.

Abstract

The hydrodynamic design of a rearing tank should focus on providing homogeneity of water quality for all individuals home, however, in ponds used in the industry currently generates heterogeneous mixtures between the pond water and fresh water input system, with marked areas of low quality water column. These differences are particularly important in fish farming because it has been found to decrease the output potential due to reduced growth rates, poor feed conversion and high levels of aggressiveness, among other factors.

This research evaluated the mixing time was achieved by using separately, in a circular aquaculture pond, two water inlet systems distinct: eductor and vertical spray. Also determined the effect of different flow inlet (4, 6 and 8 L / min) on the mixing time and, in the case of the eductor, the influence of different configurations of jet angle (0° of horizontal variation, 45° of horizontal variation, and 45° - 45° from horizontal and vertical variation, respectively). Hydrodynamic factors were calculated for jets entry systems and the pond (driving force, Reynolds number, jet velocity input, weighted average speed of the water column, and uniformity coefficient) in order to determine the relationship of each with mixing times of different treatments.

The results showed that the eductor treatment mixing times was significantly lower ($P < 0.05$) than the spray treatment 45, obtained the best results in treatments eductor 45 and eductor 45-45 which were not significantly different ($P < 0.05$) from each other, under the three rate flow studied. Mixing times were explained in large part by the joint variation of flow rate and angle of attack of the jets from the inlet system, while hydrodynamic factors calculated were not capable alone to explain the observed mixing times in the four treatments.

Although eductor treatments had lower mixing times, further research is needed which analyze their performance in relation to energy consumption, cleaning of settling solids and its effect on the behavior and welfare of farmed organisms.

1 Introducción

El interés en la ingeniería de los estanques se ha incrementado en los últimos años debido a una mejor comprensión del impacto que tiene su diseño sobre el comportamiento de los peces y el rendimiento final del cultivo (Rasmussen & McLean, 2004). El diseño hidrodinámico del estanque debe proporcionar una adecuada uniformidad en las condiciones de crianza ya que en caso contrario se disminuye el potencial de producción debido a menores tasas de crecimiento, baja conversión de alimento y niveles elevados de agresión, entre otros factores (Ross, 1995), por lo cual la mezcla homogénea del agua en el estanque es de gran importancia.

El sistema de ingreso de agua es uno de los principales elementos que incide en la hidrodinámica de los estanques de cultivo ya que de él dependen, en gran medida, los patrones de circulación del fluido (Timmons, 2002). En la actualidad los sistemas más utilizados se caracterizan por generar zonas, alrededor del centro del estanque, cuya calidad de agua es significativamente inferior que en el resto de la columna (Lekang, 2007), a pesar de que se han realizado estudios que han logrado mejorar el desempeño cambiando la orientación de los chorros de entrada de agua (Davidson & Summerfelt, 2004).

Los eductores son dispositivos de mezcla ocupados en diversas industrias como la química, hidrocarburos o alimentos, y se caracterizan por su bajo costo, fácil instalación y elevada eficiencia en el proceso de mezcla (Tamotsu, 1985). Esto último se debe principalmente a que su diseño permite que un pequeño chorro que ingresa a alta velocidad al estanque mueva una gran cantidad de agua. Sin embargo, a pesar de estas virtudes, su uso en acuicultura no ha sido estudiado.

El presente trabajo evaluó el efecto de dos sistemas de ingreso de agua, eductor y rociador vertical, sobre el tiempo de mezcla en un estanque circular de uso acuícola, mediante el uso de técnica de trazador.

1.1 Problemática identificada

Los sistemas de ingreso de agua a estanques circulares más utilizados en la actualidad generan una mezcla heterogénea, con marcadas zonas de baja calidad de agua, provocando reducciones en el rendimiento final del cultivo, por lo que se hace necesario encontrar alternativas que generen una mezcla homogénea en la columna de agua en menores tiempos.

1.2 Objetivo General:

- Evaluar el efecto de dos sistemas de ingreso de agua, eductor y rociador vertical, sobre el tiempo de mezcla en un estanque circular.

1.3 Objetivos específicos:

- Determinar el tiempo de mezcla en el estanque al usar, por separado, eductor y rociador vertical.
- Determinar el efecto del caudal y el ángulo de ataque de los chorros sobre el tiempo de mezcla.
- Determinar el efecto de distintos factores hidrodinámicos (velocidad de chorro, fuerza impulsora, número de Reynolds, velocidad promedio ponderada de la columna de agua y coeficiente de uniformidad de velocidades) sobre el tiempo de mezcla.

2 Antecedentes

2.1 Calidad de agua en los estanques

La mayor parte de los estudios relacionados con calidad de agua en acuicultura hacen referencia a las características generales que ésta debe poseer con el fin de proporcionar a los organismos cultivados un ambiente óptimo para su desarrollo, haciendo especial hincapié en las fuentes desde donde se abastecen los centros de cultivo y los procesos de filtración que permiten mantener los parámetros abióticos dentro de rangos controlados. Otro componente importante de la calidad del agua tiene que ver con el proceso que ocurre dentro del estanque, en el cual influye su hidrodinámica propia (como se comporta el flujo) y la interrelación entre éste y los organismos cultivados. El ideal es que las condiciones de calidad de agua sean relativamente homogéneas en toda la columna, sin embargo varios autores (Klapisis & Burley, 1984; Watten, 2000; Timmons *et al*, 2002; Rasmussen, 2005) señalan que en la práctica esto no ocurre, lo cual genera diversos problemas que afectan el rendimiento final del cultivo.

Los requerimientos de calidad de agua varían según la especie cultivada y su estado de desarrollo (Lekang, 2007), siendo siempre importante que todos animales de una misma unidad de cultivo reciban agua con niveles de calidad similares. Por otra parte un alto grado de homogeneidad del agua permite aprovechar aún más todo el volumen de crianza, ya que de esta manera el flujo de agua fresca y el oxígeno que se añade llegan a todas las áreas del estanque (Masaló, 2008a).

En el caso del cultivo de peces, un estanque cuya calidad de agua no es homogénea puede provocar disparidad en el crecimiento (Ross, 1995) así también como dar lugar a cambios en la fisiología, agresión más pronunciada, formación de jerarquías sociales, reducción en la sedimentación y eliminación de los residuos sólidos, además del aumento de ocurrencia de volúmenes muertos (Cripps, 2000). Una mala calidad del agua disminuye las tasas de crecimiento (Lekang, 2007), afecta negativamente a la conversión de alimento, influye en la microbiología del estanque y eleva el estrés, y por lo tanto, la probabilidad de pérdidas debido a enfermedades (Rasmussen, 2005).

2.1.1 Cantidad de agua

La cantidad de agua necesaria para mantener los niveles de calidad dentro de los estanques se determina en la etapa de diseño del centro de cultivo. Durante este proceso se realizan balances de masa para establecer los caudales limitantes de cada estanque según la biomasa que éstos albergarán, y bajo los cuales puede mantenerse el cultivo asegurando el suministro de oxígeno y/o el retiro de los desechos metabólicos producidos por los animales. La magnitud de este flujo debe ser tal, que asegure que parámetros importantes que afectan la calidad del agua se mantengan adecuadamente balanceados.

Uno de los principios para realizar un balance de masa es asumir teóricamente que la mezcla del agua en el estanque es homogénea (Timmons *et al*, 2002), situación que en la práctica no ocurre debido a que el comportamiento hidrodinámico de los diferentes estanques genera zonas muertas o de corto circuito, en donde la calidad del agua es

significativamente inferior (Klapisis & Burley, 1984). Suponer que el estanque se encuentra en condiciones homogéneas sin que esto ocurra realmente provoca que se genere un subdimensionamiento del caudal limitante, por ende la cantidad de agua necesaria para el óptimo desarrollo del cultivo se estima por debajo de su valor real. En base a lo anterior, un sistema que reduzca los tiempos de mezcla que se obtienen al usar los sistemas tradicionales implicaría directamente una reducción del consumo de agua al tener menores tasas de cambio en los estanques de cultivo. Sin embargo esta reducción tiene algunas limitantes como por ejemplo producción de metabolitos, debido a que no se podrían reducir los caudales más allá de los valores necesarios para remover desechos generados por los animales de cultivo tales como CO_2 ó NH_3 .

Reducir el consumo de agua en la producción acuícola, sin perjudicar su calidad, tiene una serie de beneficios, especialmente ambientales en cuanto a optimizar el uso de los recursos (Craig, 2008), permitir el desarrollo acuícola en fuentes de agua de bajo caudal (Venegas, 2008) y otros directos para el productor como reducción de costos (Timmons *et al*, 2002) y aumento en la eficiencia de algunos sistemas de tratamiento de aguas en sistemas de recirculación como por ejemplo la remoción de sólidos (Cripps, 2000).

2.2 Mezcla en estanques

En la actualidad existen diversos sistemas para lograr una efectiva mezcla de fluidos en un corto tiempo, sin embargo su aplicación en acuicultura es difícil, por la interacción que pueden tener estos mecanismos con los animales cultivados (por ejemplo las hélices o paletas de mezclado) así también como el gasto energético que implica su uso. Ante esto las herramientas más usadas por los acuicultores para generar una mezcla eficiente del agua en el estanque son la interacción entre los dispositivos de entrada y salida de agua, el caudal y la geometría del estanque (Timmons *et al*, 2002).

Para comprender el concepto de mezcla es necesario definir previamente *sustancia*, la cual es una forma de materia que tiene una composición definida (constante) y propiedades características, como por ejemplo el agua o el oxígeno. Una mezcla es una combinación de dos o más sustancias en la cual éstas conservan sus propiedades características, y que pueden volver a ser separadas mediante el uso de medios físicos (Chang, 2002). De esta manera lo que comúnmente se denomina como “agua” de un estanque de cultivo es una mezcla de múltiples sustancias, de las cuales la mayor parte es agua pura, la que se encuentra combinada con sustancias tales como oxígeno, CO_2 , compuestos nitrogenados, sólidos suspendidos etc. Como se mencionó en la sección de calidad de agua, en los estanques de uso acuícola la mezcla no alcanza un nivel de homogeneidad total, es decir, las concentraciones de los elementos mezclados no son iguales en todos los puntos de la columna de agua.

2.2.1 Factores que afectan la mezcla

Dentro de un estanque de cultivo existen dos elementos principales que afectan la turbulencia, y por ende la mezcla: el sistema de entrada de agua y la actividad natatoria de los peces (Masaló, 2008b). Burley & Klapisis (1985) agrega como tercer elemento las

burbujas producidas por los sistemas de aireación, aunque con un nivel de impacto mucho menor a los dos anteriores.

El efecto de la turbulencia generada por el sistema de entrada de agua tiene una estrecha relación con los elementos propios del diseño del estanque como sus dimensiones, forma, posición de la salida de agua, entre otros, todos los cuales se explican en detalle en la sección 2.3 “Hidrodinámica de los estanques de cultivo”.

En relación a la influencia que ejercen los animales de cultivo sobre el proceso de mezcla, ésta dependerá del nivel y tipo de movimiento que manifiesten. En el caso de los peces su presencia influye positivamente, independientemente de la tasa de flujo del estanque (Rasmussen, 2005), siendo menores los tiempos de mezcla mientras más se aumente la densidad de cultivo (Burley & Klapsis, 1985), aunque no existe una postura categórica sobre el nivel específico de este impacto, debido principalmente a la inconsistencia entre los resultados obtenidos por distintos investigadores, hecho que podría explicarse por las diferentes metodologías usadas en cada experimento, en especial por las diferentes especies y densidades de cultivo ocupadas (Lunger, 2006).

La influencia de los dispositivos de aireación u oxigenación sobre la mezcla en estanques no ha sido muy estudiada, sin embargo Burley & Klapsis (1985) concluyeron que la acción de las burbujas de los sistemas de oxigenación del agua ubicados en el fondo del estanque ayuda a reducir los tiempos de mezcla sin reducir la velocidad del agua.

2.2.2 Mezcla inducida mediante chorros

La mezcla inducida por chorros es ampliamente utilizada en diversas industrias como por ejemplo la química, los hidrocarburos y la alimenticia (Zughbi & Ahmad, 2005), siendo uno de los métodos más sencillos (Manjula, 2010). Los sistemas de entrada de agua que generan chorros son fáciles de instalar, no requieren reforzar la estructura del estanque y son más baratos que los sistemas de mezcla tradicionales, además de ser fáciles de mantener (Patwardhan & Gaikwad, 2003).

El proceso de mezcla producido por la acción de uno o más chorros se genera por la interacción de estos con el volumen del fluido que se encuentra en el estanque. Revill (1992) denomina como líquido primario al flujo que ingresa por el chorro, caracterizado por su elevada velocidad en comparación al fluido del estanque, al cual denomina líquido secundario. La diferencia relativa entre el agua del estanque y la velocidad del chorro crea una capa turbulenta de mezcla alrededor de éste último, provocando el arrastre del líquido circundante, de esta manera, a medida que se aleja de la boquilla, el chorro crece en diámetro (como así también la capa de mezcla) y la velocidad de su eje reduce su magnitud, provocando, finalmente, un patrón de circulación dentro del estanque (Revill, 1992; Patwardhan & Gaikwad, 2003; Zughbi & Rakib, 2004; Manjula, 2010).

Revill (1992) señala que un chorro turbulento puede dividirse en dos regiones distintas: la región de flujo en desarrollo (donde se ubica el núcleo del chorro), y la región

completamente desarrollada (Figura 1). En la región del núcleo, que se extiende hasta aproximadamente 6 veces el diámetro de la boquilla que genera el chorro, la capa de mezcla penetra hacia la línea central o eje del chorro generándose un volumen en forma de cono que posee una velocidad característica. La segunda región, de flujo totalmente desarrollado, comienza aproximadamente a una distancia de 10 veces el diámetro de la boquilla, y en ella, la capa de mezcla ha penetrado al eje del chorro.

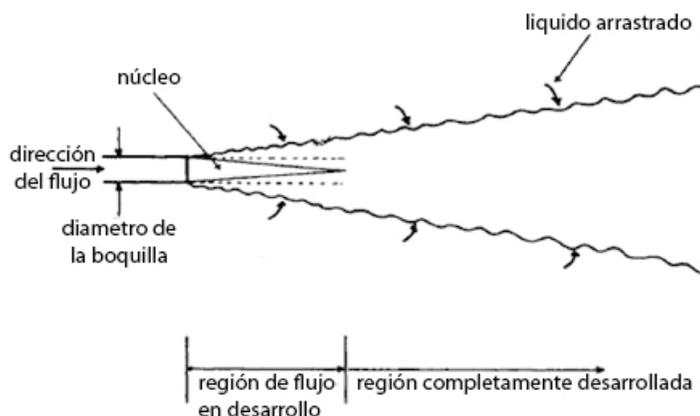


Figura 1: Comportamiento de un chorro sumergido.
Fuente: Revill, 1992.

Patwardhan & Gaikwad (2003), en una revisión bibliográfica, señalan que los tiempos de mezcla, en estanques que utilizan sistemas mezcladores de chorro, dependen de diversos factores propios de las características del chorro y su configuración, tales como la fuerza impulsora, el largo, la velocidad, el número de Reynolds, el diámetro de la boquilla, la ubicación en el estanque, el ángulo de inclinación respecto a la pared y/o fondo, los cuales se detallan en la sección 2.3.5.2 “Elementos de configuración del sistema de entrada que afectan la mezcla”.

2.2.3 Uso de trazadores para determinar tiempos de mezcla

Los tiempos de mezclado en estanques se miden generalmente mediante técnicas de trazadores o por observación visual (Revill, 1992). En la técnica del trazador, éste se inyecta en el estanque midiendo su concentración con respecto al tiempo en uno o varios puntos de la columna de agua. Una alternativa al uso de tintas trazadoras son las soluciones de electrolitos, en donde se mide la conductividad de la mezcla (Zughbi & Ahmad, 2005; Patwardhan & Gaikwad, 2003; Manjula, 2010).

En investigaciones donde se utiliza la técnica del trazador, existen diferentes criterios para determinar el momento en el cual se ha conseguido un nivel de mezcla considerado como homogéneo, siendo el más utilizado el que considera una homogeneidad del 95%, es decir, cuando la diferencia entre la concentración tomada en cualquier punto del estanque menos la concentración final esperada (concentración cuando se ha alcanzado el nivel de homogeneidad completa) es menor o igual al 5% (Zughbi & Ahmad, 2005; Revill, 1992). Este grado de flexibilidad se debe principalmente a que valores menores al

5% pueden considerarse dentro del margen de error propio de la técnica utilizada (Revill, 1992).

Una de las ventajas del uso de trazadores para estudiar la mezcla en estanques de uso acuícola es que las pruebas se pueden hacer en presencia de peces, siempre y cuando el trazador utilizado sea inocuo para ellos, como es el caso de bajas concentraciones de Rodamina (Rasmussen, 2005; Lunger, 2006) o agua salada (Watten, 2000; Burley & Klapsis, 1985). Por otra parte, las principales desventajas del uso de trazadores son:

- a) Esta técnica, por si sola, no proporciona detalles críticos sobre los procesos hidrodinámicos al interior del estanque (Rasmussen, 2005; Oca, 2004).
- b) Las sondas de medición pueden interferir con el flujo en el estanque (Revill, 1992).
- c) La precisión de la sonda utilizada influirá en la exactitud de la medición del tiempo de mezcla (Revill, 1992).

Oca (2004) señala que el uso de trazadores para evaluar el comportamiento hidráulico de un estanque no proporciona una descripción cuantitativa del patrón de flujo, es decir no permite obtener un mapa detallado de lo que sucede en los distintos puntos de la columna de agua, a menos que se utilice un número considerable de sondas para medir el trazador, lo que en la práctica sería inviable por el alto grado de interferencia que estas ejercerían sobre el libre desplazamiento del agua. Como consecuencia, estos métodos son útiles para determinar tiempos de mezcla y detectar anomalías de flujo como volúmenes de cortocircuito o muertos, pero no para dar información útil para la mejora del diseño del estanque. Para eliminar esta deficiencia, varios autores (Burley & Klapsis, 1985; Schei, 1998; Watten, 2000; Davidson & Summerfelt, 2004; Rasmussen, 2004; Zughbi, 2005) complementan la información de tiempos de mezcla, obtenida con técnicas de trazadores, con la medición de velocidades en distintos puntos de la columna de agua, lo cual permite tener un conocimiento más detallado de los procesos hidrodinámicos que ocurren al interior del estanque.

2.3 Hidrodinámica de los estanques de cultivo

La hidrodinámica de un estanque de cultivo debe generar condiciones homogéneas de cría, facilitar la autolimpieza, y proporcionar rangos de velocidades adecuados para el tamaño y las especies cultivadas (Masaló, 2008a). Es por esto que el diseño de un estanque, siempre debe considerar por lo menos estos tres aspectos. Una apreciación completa de la hidrodinámica del estanque representa una parte vital del proceso de ingeniería ya que esta característica afecta la calidad del agua (Rasmussen, 2005).

La hidrodinámica de un estanque está determinada por sus características físicas, por las configuraciones de entrada y salida del agua, y además, por los organismos cultivados, siendo este factor comúnmente asociado a la influencia del nado de los peces. El comportamiento de los peces y su actividad de natación son, a la vez, influenciados por la hidrodinámica del estanque, la cual puede producir condiciones no homogéneas induciendo a los peces a distribuirse de manera desigual en la columna de agua (Masaló, 2008a).

2.3.1 Estanques circulares

La selección de la geometría de un estanque de cultivo es esencial en orden a asegurar condiciones óptimas para el cultivo de los peces, minimizar las descargas de agua al medio ambiente y facilitar las operaciones de manejo (Oca & Masaló, 2007). Los estanques circulares se utilizan con preferencia a cualquier otra forma, siendo los que con más frecuencia se encuentran en establecimientos comerciales (Rasmussen, 2005).

Timmons (2002) afirma que existe una clara tendencia hacia el uso de estanques circulares de cultivo para la producción de peces de consumo humano, los cuales son atractivos por los siguientes motivos:

- Son simples de mantener
- Proveen agua de calidad uniforme
- Permiten operarlos bajo una amplia gama de velocidades de rotación para optimizar la salud y conducta de los peces
- Los sólidos sedimentables pueden ser rápidamente eliminados a través del drenaje central
- Existen diseños que permiten la observación visual o automática de alimento no ingerido lo cual permite alimentar a saciedad.

Si se compara los raceways con los estanques circulares, éstos últimos no tienen una gradiente definida de calidad de agua, por lo que frecuentemente las condiciones de cultivo son consideradas como homogéneas, aunque a pesar de esto, se presentan zonas muertas o de corto circuito, con baja calidad de agua, especialmente en estanques grandes (Timmons *et al*, 2002).

En estanques circulares es usual que el flujo de entrada sea inyectado de forma tangencial a la pared del estanque, creando un patrón rotatorio que provee una alta uniformidad en la calidad del agua debido al logro de una mezcla efectiva (Masaló, 2010). La relación de aspecto del estanque (diámetro/altura) influye en los tiempos de mezcla (Zughbi & Ahmad, 2005). Patwardhan & Thatte (2004) señalan que existe una relación directa entre diámetro de estanque y tiempo de mezcla, para chorros de igual magnitud, lo cual se explica básicamente por el aumento de volumen de líquido.

Los estanques circulares permiten ajustar la velocidad de rotación del agua, y además permiten ofrecer una mayor velocidad de natación que las que se logran típicamente en unidades tipo raceway (Davidson & Summerfelt, 2004; Oca & Masaló, 2007).

2.3.2 Patrones de flujo en estanques con ingreso lateral

Los estanques circulares, que son operados mediante la inyección de agua desde la pared en forma tangencial a ésta, pueden generar dos flujos característicos. El más importante es el patrón rotatorio del agua en torno al centro del estanque llamado flujo primario (Klapisis & Burley, 1984). La acción de este flujo rotatorio con las paredes del estanque crea un flujo secundario el cual se caracteriza por mover los sólidos sedimentables

hacia el centro, creando la propiedad de autolimpieza tan deseada de los estanques circulares, la cual se logra cuando la velocidad primaria de rotación alrededor del eje central del tanque es lo suficientemente grande como para crear el flujo secundario radial a lo largo del fondo del tanque hacia el desagüe central. Este patrón de flujo secundario es conocido como “efecto de taza de té” (Figura 2). La relación entre estos dos patrones de flujo da origen a una circulación hidráulica que genera una zona cercana al drenaje central que se caracteriza por tener una baja o nula velocidad de rotación y pobre mezclado. A esta zona se le denomina área de “corto circuito” o “zona muerta” (Klapisis & Burley, 1984) y su magnitud y forma depende de varios factores como la orientación de los chorros del sistema de entrada, la relación diámetro/profundidad del estanque y la velocidad global del flujo que sale por el drenaje central de fondo (Timmons *et al*, 2002). Estas zonas muertas pueden disminuir el uso efectivo del estanque y generan gradientes de calidad de agua localizados (Timmons *et al*, 2002).

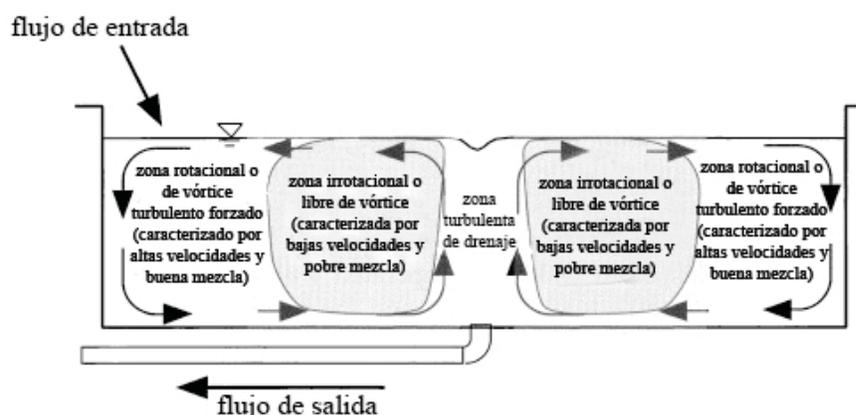


Figura 2: Comportamiento hidráulico generado por la interacción del flujo primario (no aparece en la figura) y secundario (representado con flechas) en un estanque circular con flujo tangencial de entrada.

Fuente: Timmons *et al*, 2002.

Las zonas muertas o de baja velocidad influyen también en los tiempos de mezcla. Si estas zonas son reducidas o minimizadas de alguna manera, se reducirán los tiempos de mezcla (Zughbi & Ahmad, 2005).

2.3.3 Velocidad del agua

La velocidad de la columna de agua es un factor importante en términos de lograr una buena mezcla, sin embargo nunca debe descuidarse su influencia sobre los organismos cultivados. Las velocidad del agua en el estanque de cultivo influyen en la salud de los peces, el tono muscular y la respiración, por lo tanto, mantener sus valores dentro de rangos adecuados mejorará el bienestar general de los peces y la calidad del producto final (Masaló, 2008a).

La distribución de velocidades en el interior del estanque puede modificar las zonas donde los peces se ubiquen, mostrando una preferencia por una velocidad superior o inferior (Timmons *et al*, 2002) y por áreas con diferentes niveles de mezcla (Duarte, 2011). Rasmussen (2005) observó en experiencias realizadas con Red drum (*Sciaenops ocellatus*) que a caudales bajos (TRH=1,9 cambios/hora), los peces expresaron movimiento y dirección al azar, mientras que a alto flujo (TRH=3,4 cambios/hora), los peces se trasladaban a posiciones cerca de la base del tanque y cerca de su pared, colocándose unidireccionalmente, nadando contra la corriente. Duarte (2011) determinó que, en estanques circulares con sistema de ingreso de agua tangencial, los peces se distribuyen mayoritariamente en las zonas cercanas a las paredes de éste, donde las velocidades del agua son mayores, y en menor medida en las zonas cercanas al centro donde la velocidad del agua es menor, siempre y cuando la velocidad máxima del agua no supere la velocidad de nado sin fatiga de los peces. A pesar de esto, existe una interrelación entre velocidad del agua y actividad natatoria de los peces ya que estos pueden reducir las velocidades de la columna de agua (Masaló, 2010).

Existen diversas metodologías para determinar la velocidad del agua en un estanque, variando desde técnicas muy sencillas como el uso de derivadores, generalmente usados para medir velocidad angular (Davidson & Summerfelt, 2004) hasta otras de mayor complejidad como el uso de técnicas de velocimetría de partículas (PTV) (Oca, 2004; Oca & Masaló, 2007; Duarte, 2011). PTV es un método experimental no intrusivo, en el cual se utilizan partículas trazadoras, las que sirven para medir un campo de velocidad bidimensional de flujo mediante el seguimiento de las partículas individuales en imágenes a través de una secuencia de tiempo, para lo cual el flujo debe ser filmado y las imágenes analizadas posteriormente mediante un software. Los resultados obtenidos son el patrón de flujo del estanque expresado como un mapa de vectores de velocidades. La principal limitación de este método es que debe ser usado con alturas de columna de agua muy bajas (5-6 cm) y con un rango limitado a una cierta magnitud de velocidad máxima (que depende de la cámara grabadora y el software ocupado para procesar las imágenes). Por otra parte existen estudios que ocupan correntómetros que miden la velocidad del agua en un punto específico, como por ejemplo correntómetros de hélice (Schei, 1998; Rasmussen & McLean, 2004), electromagnéticos (Watten, 2000), o correntómetros acústicos (Davidson & Summerfelt, 2004; Masaló & Oca, 2010; Labatut, 2007a; Masaló, 2008a) los cuales permiten medir la velocidad ocupando un principio físico llamado efecto Doppler. Si bien estos aparatos miden en un solo punto se puede obtener un mapa más detallado de velocidades haciendo mediciones por estaciones en distintos lugares del estanque, con la desventaja que las mediciones no son simultaneas.

En la bibliografía revisada, respecto al uso de correntómetros, no se encontró una metodología que justificara un número óptimo de puntos de la columna de agua del estanque en los que se deba medir la velocidad, existiendo mucha variación en las diferentes investigaciones.

2.3.3.1 Velocidades máximas y mínimas para peces

La velocidad del agua debe ser lo suficientemente fuerte como para lograr la autolimpieza del estanque, pero no demasiado alta como para causar la fatiga física de los peces. De este modo las velocidades óptimas de rotación dependerán de la especie y tamaño de los peces cultivados (Klapisis & Burley, 1984).

En peces el ejercicio forzado puede resultar en una disminución en el consumo de oxígeno, debido a adaptaciones fisiológicas, como aumento de la actividad de la musculatura blanca, mejoras en el rendimiento cardíaco e incremento en la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre, además de una disminución en el gasto energético de la respiración debido a que, en aguas rápidas, el pez sólo necesita abrir su boca para ventilar sus branquias, sin necesidad de bombear agua como ocurre en aguas de baja velocidad (Timmons *et al*, 2002), adaptación conocida como “respiración forzada”.

Klapisis & Burley (1984) señalan que la velocidad del agua afecta el metabolismo de los peces, por ejemplo aquellos que se ejercitan constantemente al nadar son más eficientes en la conversión de alimento que aquellos que no lo hacen. Debido a lo anterior es necesario que la velocidad del agua en el estanque supere los valores mínimos de tal manera que permita a los peces realizar la cantidad de ejercicio necesario para mantener la salud, el tono muscular y la respiración (Timmons *et al*, 2002).

2.3.3.2 Fuerza impulsora y velocidad promedio de rotación

Como se mencionó anteriormente la velocidad de rotación del agua en un estanque con sistema de ingreso tangencial, es influenciada por las propiedades del fluido, las dimensiones del estanque (relación radio/profundidad) y la configuración de los sistemas de salida y entrada de agua, sin embargo, las variables que controlan realmente la velocidad de rotación son las relacionadas con la fuerza de impulso que genera el flujo del chorro (Labatut, 2007b; Masaló & Oca, 2010). Esto se explica básicamente porque es el impulso energético del chorro el que quiebra el estado de inercia de la columna de agua que tiene por delante, acelerando el fluido, formando una capa de mezcla y creando el patrón de remolino (Labatut, 2007a).

La fuerza impulsora y la velocidad de rotación pueden ser reguladas ajustando la velocidad de entrada del flujo o el tamaño y/o el número de aberturas de entrada. La velocidad de rotación es directamente proporcional a la velocidad del chorro del sistema de entrada (Labatut, 2007a) según se define en la ecuación 1.

$$V_{rota} = \alpha V_{orif} \quad (\text{ec. 1})$$

donde:

V_{rota} : velocidad de rotación del estanque.

V_{orif} : velocidad del chorro

α : constante de proporcionalidad

Timmons (2002) afirma que en estanques circulares el valor de α varía entre un 15-20%, es decir que la velocidad de rotación del estanque sería un 15-20% de la velocidad del

chorro del sistema de entrada, sin embargo Labatut (2007a) en experimentos realizados en raceways con celdas divididas de flujo rotatorio (MCR) obtuvo valores de α entre 3.5-3.7%, y en otras experiencias valores de un 8%, lo cual se explica por las características propias de cada sistema de ingreso de agua (por ejemplo diámetro de boquillas), los tipos de estanques (dimensiones y configuraciones de funcionamiento) y/o la forma en cómo se calcula la velocidad media del estanque (considerando un volumen determinado o toda la columna de agua del estanque). Ante estas diferencias Labatut (2007b) no recomienda usar esta constante de proporcionalidad como un factor de diseño de estanques, salvo en aquellos casos donde la geometría de éste sea similar a la usada por algún autor que haya determinado dicho factor.

Como se mencionó con anterioridad, en un estanque de flujo rotatorio con ingreso tangencial de agua, la magnitud de la velocidad de rotación disminuye linealmente hacia el centro del estanque, lo cual se debe básicamente a que el campo de acción de la fuerza impulsora se reduce conforme se avanza hacia el centro (Labatut 2007a). La velocidad en la región central del estanque, alrededor de la zona de drenaje, está determinada principalmente por el caudal de salida y no por la fuerza impulsora, sin embargo en las demás zonas la fuerza impulsora sí tiene una fuerte influencia en la velocidad de la columna de agua (Masaló, 2010). Un buen diseño en los sistemas de ingreso y salida de agua del estanque permitirá controlar las velocidades de la columna de agua (Masaló, 2008a).

Altas velocidades de la columna de agua están asociadas con mejores niveles de mezcla (Timmons *et al*, 2002, Oca, 2004, Labatut, 2007b), y como la velocidad depende directamente de la magnitud de la fuerza impulsora, es finalmente este último factor quien juega un papel importante en el proceso de mezclado, tal como lo afirman Fox & Gex (1956, *fide* Patwardhan & Gaikwad, 2003), quienes reportaron que el tiempo de mezcla puede estar correlacionado con la fuerza impulsora tanto para regímenes laminares como turbulentos.

2.3.3.3 Coeficiente de uniformidad

Niveles homogéneos de velocidad en la columna de agua de un estanque de cultivo son deseables, ya que de esta manera se obtendrá una mejor mezcla que en estanques con velocidades más heterogéneas (Duarte, 2011; Masaló, 2008a; Labatut, 2007a; Timmons *et al*, 2002; Burley & Klapsis, 1985).

Debido a que en estanques circulares con sistema de entrada lateral la magnitud de la velocidad de rotación disminuye linealmente desde la pared hacia el centro, es de interés conocer el nivel de homogeneidad de los valores de velocidad de la columna de agua. A pesar de esto, en pocas investigaciones esta variación es medida. Masaló & Oca (2010) proponen el cálculo de un coeficiente de uniformidad (CU_{50}), el cual permite determinar el porcentaje de uniformidad de las velocidades. Un valor de CU_{50} cercano a 100 indica elevados niveles de uniformidad, es decir la velocidad del agua es similar en todos los puntos de la columna, mientras que valores de CU_{50} cercanos a cero indican máximos niveles de heterogeneidad.

En estanques circulares, los mejores coeficientes de uniformidad se obtienen cuando las velocidades en la zona central y en la zona cercana a las paredes son similares, situación que indica condiciones más homogéneas de agua (Masaló & Oca, 2010).

2.3.4 Numero de Reynolds

El número de Reynolds es un factor adimensional que permite caracterizar el movimiento de un fluido en 2 categorías: laminar o turbulento. Para esto la fórmula que permite su cálculo relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas del fluido (Timmons *et al*, 2002). Diversos experimentos han demostrado que cuando el número de Reynolds es menor que 2000, el régimen es laminar, mientras que por encima de 3000 el flujo es turbulento. En la zona de transición entre 2000 y 3000, el régimen es inestable y puede pasar de un tipo a otro (Sears, 1996). De esta manera se puede caracterizar tanto el fluido que se desplaza en el estanque (columna de agua) como el fluido que sale por él o los chorros del sistema de entrada de agua.

El número de Reynolds de un estanque es uno de los elementos usados cuando los resultados de estudios hidrodinámicos realizados a escala de laboratorio quieren ser llevados a prototipos a escala real (Masaló, 2008a; Rasmussen y McLean, 2004).

Desde el punto de vista de lograr una buena mezcla en el estanque, es deseable obtener un número de Reynolds lo más elevado posible, sin embargo, el grado de turbulencia tiene como limitante el bienestar de los organismos cultivados. Un nivel alto de turbulencia puede generar problemas en la natación de los peces, provocándoles un excesivo gasto de energía en la mantención del equilibrio, lo cual generalmente ocurre cuando los vórtices son de tamaños similares o superiores a la longitud del pez (Lupandin, 2005). Según la especie los peces tienen diferentes tolerancias a la turbulencia, siendo capaces de escoger diferentes zonas de agua según motivación individual o estado fisiológico (Lupandin, 2005).

2.3.5 Sistemas de entrada

Los sistemas de entrada tienen una alta importancia en la hidrodinámica de los estanques de cultivo, por lo que deben ser diseñados para obtener características efectivas de rotación del agua, mezcla y limpieza de sólidos (Schei, 1998; Timmons *et al*, 2002; Davidson & Summerfelt, 2004). Por otra parte, el proceso de diseño, además de minimizar las zonas muertas, debe evitar patrones de flujo que lleven el agua limpia de entrada directamente hacia la zona de salida impidiendo que esta sea aprovechada al máximo por los organismos cultivados (Lekang, 2007; Burley & Klapsis, 1985).

El principal factor que influye sobre la calidad del agua, y que determina el correcto funcionamiento de los sistemas de entrada y salida, es el caudal, especialmente en estanques grandes ($>1\text{m}^3$) donde se requieren grandes flujos para generar buenas condiciones de cultivo (Summerfelt, 2000). El mismo autor, en experimentos hechos en estanques circulares de doble drenaje tipo Cornell, encontró una relación inversa entre caudal y tiempos de mezcla, al determinar que este último se reducía a medida que se aumentaba la tasa de recambio.

Dentro de la bibliografía revisada se encontraron dos sistemas de entrada capaces de generar un flujo rotatorio: un tubo simple (tubería con un solo orificio), y los rociadores (tubería con más de un orificio). En acuicultura el sistema más ocupado es el de rociador debido principalmente a que es capaz de distribuir el flujo de agua limpia de manera más homogénea en la columna de agua, que el sistema de tubo simple (Burley & Klapsis, 1985; Masaló, 2008a), además, este último, genera mayores zonas de mal mezclado y una mala eliminación de sólidos desde el fondo (Timmons *et al*, 2002).

2.3.5.1 Rociadores

La configuración básica de un rociador consiste en una tubería con múltiples orificios, separados unos de otros por la misma distancia. La velocidad de rotación de la columna de agua estará dada por la fuerza impulsora total del rociador, que está compuesta por la suma de las fuerzas impulsoras de cada uno de los chorros (Timmons *et al*, 2002). Esta fuerza no solo genera un empuje sino además una succión del agua que se encuentra alrededor del chorro (Figura 3).

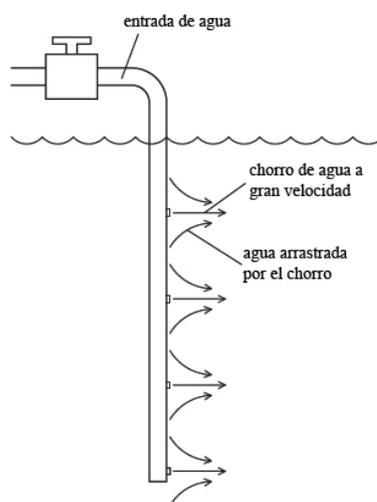


Figura 3: Funcionamiento de un rociador
Fuente: Lekang, 2007.

Existen tres configuraciones básicas de los sistemas de rociadores, para estanques circulares con patrón de flujo rotatorio: horizontal, vertical y combinado (Figura 4).

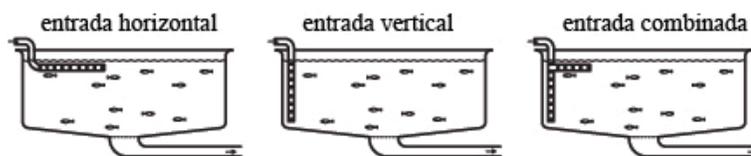


Figura 4: Principales diseños de rociadores en estanques circulares de flujo rotatorio.
Fuente: Lekang, 2007.

Los rociadores horizontales generan un buen patrón primario de flujo, pero el patrón secundario no es el óptimo, generando una débil autolimpieza de sólidos (Lekang, 2007; Timmons *et al*, 2002). Los rociadores verticales generan una mejor autolimpieza pero también generan zonas muertas, las que, sin embargo pueden ser reducidas cambiando el ángulo de orientación de las boquillas. Timmons (2002) señala que el sistema que mejores resultados ha dado en relación a autolimpieza y reducción de zonas muertas es un sistema de entrada que combina un rociador vertical con uno horizontal (entrada combinada) sin embargo su uso no es muy común debido principalmente a que la tubería horizontal interfiere con las actividades diarias de manejo.

Existen dos relaciones importantes que se deben considerar para el diseño de un rociador. La primera es la relación de la energía cinética de la corriente de entrada con la pérdida de presión en la salida. La segunda es la relación entre la pérdida de energía por fricción con la tubería y la pérdida de presión en la salida (Burley & Klapsis, 1985). El predominio de una relación por sobre la otra puede provocar que los chorros del rociador no tengan una distribución homogénea (Figura 5).

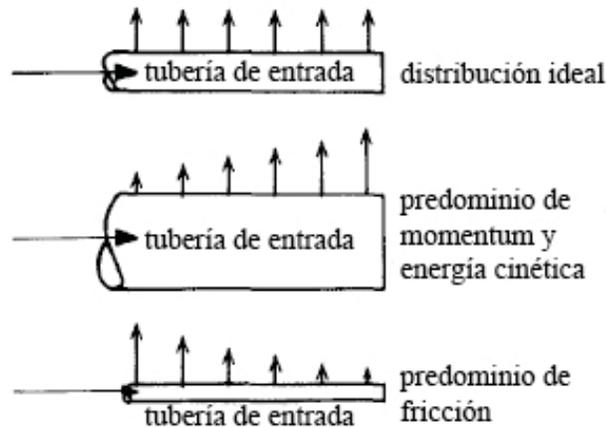


Figura 5: Distribución del fluido en un rociador.
Fuente: Burley & Klapsis, 1985.

2.3.5.2 Elementos de configuración del sistema de entrada que afectan la mezcla

Al momento de diseñar el sistema de ingreso de agua deben tenerse en consideración una serie de elementos que permitirán mejorar la hidráulica del estanque y disminuir los tiempos de mezcla, ya sea al variar la velocidad del chorro y/o su fuerza impulsora lo que generará cambios en las velocidades de la columna de agua y mayores niveles de turbulencia. Estos elementos son:

- Ángulo de ataque
- Diámetro del chorro (tamaño de la boquilla u orificio)
- Número de chorros
- Posición en el estanque

El factor de configuración más importante que afecta el patrón de velocidades dentro del estanque es el ángulo de inyección (ángulo de ataque) de los chorros del sistema de entrada (Burley & Klapsis, 1985). Al respecto, Timmons (2002) señala que el ángulo de ataque de los chorros incide en:

- La uniformidad del perfil de velocidades a través del estanque
- La fuerza del flujo secundario (que permite la autolimpieza)
- La uniformidad del mezclado del agua

Schei (1998) afirma que se generan mejores condiciones de calidad de agua cuando el ángulo del chorro apunta hacia el interior del estanque y no tangente a la pared. Diferentes estudios (Davidson & Summerfelt, 2004; Patwardhan & Gaikwad, 2003) concuerdan en que se obtienen calidades de agua más homogéneas cuando los chorros del sistema de entrada, ubicado en la pared del estanque, son orientados en 45° hacia el centro. La influencia del ángulo del chorro sobre el tiempo de mezcla está en estrecha relación con la geometría del estanque y el lugar donde se ubique la boquilla que ingresa agua. Zughbi & Rakib (2004), en un estudio donde se estimaron tiempos de mezcla usando la técnica de modelación computacional de dinámica de fluidos (CFD) en un estanque cuadrado y con ingreso de agua desde una esquina ubicada en el fondo, obtuvieron los menores tiempos mezcla para un ángulo de 30°. Estos autores señalan que es probable haber obtenido menores tiempos de mezcla con otros ángulos si es que el chorro se hubiese ubicado en otro lugar diferente al fondo del estanque. Esto se debe básicamente a que el ángulo del chorro afecta no sólo la longitud efectiva de mezcla, sino también los patrones generales de flujo en el estanque, factor clave para decidir el tiempo de mezcla total.

El ángulo de ataque está relacionado a la longitud del chorro, pues su magnitud depende hacia donde apunte el sistema de entrada. Tradicionalmente el largo del chorro se define como la máxima distancia que éste recorre antes de tocar la pared opuesta (ruta libre), sin embargo Patwardhan & Thatte (2004) señalan que ésta definición no siempre es muy asertiva, puesto que, en algunos casos puede suceder que el chorro pierda mucha de su fuerza antes de llegar a la pared opuesta, lo que puede conducir a una sobreestimación del tiempo real de mezcla. Zughbi & Rakib (2004) han estudiado el efecto de la longitud del chorro en estanques con entrada lateral, encontrando que existe una relación inversa entre largo del chorro y tiempo de mezcla, sin embargo, estos autores señalan que el ángulo del chorro es un factor que influye con mayor fuerza en el tiempo de mezcla en comparación al largo.

En relación al tamaño de los orificios que generan los chorros, disminuir su diámetro genera un aumento en la velocidad del chorro y por ende mejora la mezcla en el estanque, siempre y cuando el caudal de entrada se mantenga constante, por el contrario al agrandar los orificios, usando el mismo caudal, aumentará el tiempo de mezcla (Timmons *et al*, 2002). Sin embargo esta situación puede revertirse cuando el caudal deja de mantenerse fijo, de esta manera, al usar orificios más grandes se generará una menor resistencia al paso del agua por lo que ingresará un mayor caudal, provocando mayores velocidades de chorro, incrementándose la fuerza impulsora, y por ende, disminuyendo los tiempos de mezcla (Patwardhan & Gaikwad, 2003; Labatut, 2007a).

Respecto al número de chorros generalmente se prefiere usar varios de ellos separados a igual distancia (sistema de rociador), debido a que generan patrones más homogéneos de velocidad y mezcla que un chorro simple (Burley & Klapsis, 1985; Masaló, 2008a).

La posición del chorro dentro del estanque puede influir en los tiempos de mezcla. Manjula (2010) en un estudio donde se utilizaron dos chorros dentro de un mismo estanque, determinó que ubicar uno de los chorros a una determinada profundidad generó tiempos de mezcla diferentes en comparación cuando éste era ubicado a una altura superior, lo cual se explica básicamente porque los patrones de flujo al interior del estanque varían según la posición dentro de la columna de agua donde se ubique la boquilla generadora de chorro.

La mezcla inducida por chorros está directamente relacionada a la turbulencia que estos son capaces de generar, la cual es usualmente asociada al número de Reynolds. Es importante señalar que el número de Reynolds del chorro es diferente al Reynolds del estanque. Revill (1992) define un chorro como completamente turbulento cuando el número de Reynolds que lo caracteriza está por sobre los 1000 a 2000, mientras que un chorro se puede definir como laminar cuando su Reynolds es cercano a 100. Zughbi & Ahmad (2005) analizaron la relación entre el número de Reynolds del chorro y el tiempo de mezcla en un estanque circular. En dicha experiencia probaron diferentes configuraciones del ángulo del chorro (tanto horizontal como vertical), obteniendo en todos los casos, que existe una relación inversa entre tiempo de mezcla y el número de Reynolds del chorro, sin embargo esta relación tiende a estabilizarse en determinados valores de este número, que dependen de la configuración del sistema de entrada de agua que se tenga. Sobre dichos valores no hay un aporte significativo del número de Reynolds a la reducción del tiempo de mezcla.

2.3.6 Sistemas de salida

La estructura de salida de agua generalmente se ha diseñado para remover continuamente los sólidos sedimentables tales como material fecal y residuos de alimento no consumido, así también como para fijar el nivel del agua del estanque (Lekang, 2007). A pesar de esto, la importancia que tiene la salida de agua del estanque en su comportamiento hidrodinámico, y por ende en el proceso de mezcla, ha llevado que su diseño, en este sentido, sea considerado. Tanto la posición de la salida de agua, como el caudal que pasa a través de ella, pueden generar cambios en la hidrodinámica del estanque.

Respecto a la posición de la salida de agua Zughbi & Ahmad (2005), al comparar estanques con salidas de agua ubicadas en diferentes puntos del fondo, señalan que las zonas de bajas velocidades varían, influyendo en los tiempos de mezcla. A pesar de esto, y debido principalmente a los patrones de flujo de los estanques usados en acuicultura, que tienden a acumular los desechos en el centro, es que de manera lógica la salida se ubica en dicha posición (Timmons *et al*, 2002). Uno de los últimos avances en cuanto a drenajes son los estanques circulares de doble salida tipo Cornell, los cuales poseen una salida central ubicada en la parte inferior del estanque y que sirve para extraer sólidos sedimentables usando un bajo caudal (5-20% del caudal total), mientras que una segunda salida ubicada

en la parte superior de la pared lateral permite retirar el caudal restante (80-95%) eliminando de esta manera el vórtice central que se genera en estanques que tienen solo salida en ese sitio, mejorando así la mezcla (Timmons *et al*, 2002; Davidson & Summerfelt, 2004)

En cuanto al caudal de salida Davidson & Summerfelt (2004), en estudios realizados en estanques circulares de doble salida tipo Cornell, indican que el aumento del flujo de descarga por el desagüe central inferior mejora la uniformidad de la velocidad en la columna de agua, lo cual además sirve para la eliminación de sólidos, indicando además que cuando no hay flujo de descarga a través del drenaje central inferior, las velocidades generalmente se aproximan a cero cerca de ese punto.

2.4 Eductores

Los Eductores son dispositivos de mezcla que utilizan la energía cinética de un líquido que sale a presión para arrastrar otro líquido, mezclándolos, y descargando finalmente esta mezcla. Tienen amplios usos en diferentes industrias (por ejemplo alimenticia y química), donde el mezclado es una operación necesaria. En el mercado existe una gran diversidad de tamaños, y los materiales con que son fabricados resisten altas presiones y corrosión (Schutte & Koerting, 2007)

2.4.1 Estructura y funcionamiento

Los componentes básicos de la estructura de un eductor es la boquilla, que genera el chorro, y el venturi (también llamado difusor) que amplifica el proceso de mezcla generado por el chorro principal (Figura 6).

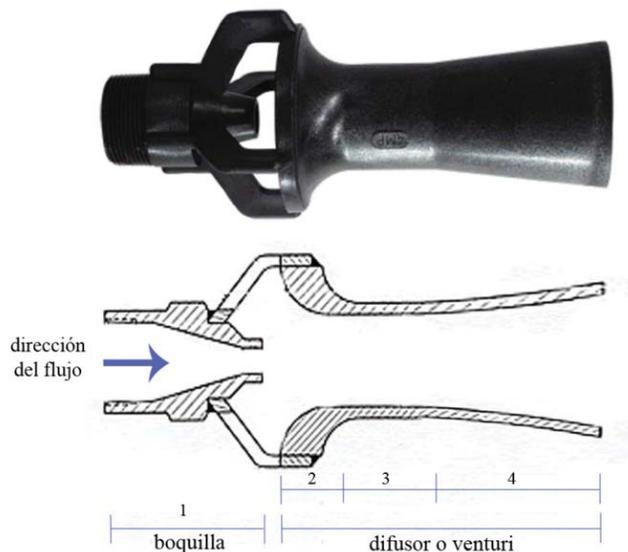


Figura 6: Estructura básica de un eductor. Zonas del venturi: (2) área de contracción; (3) garganta; (4) área de difusión.

Al bombear agua a presión en el eductor, ésta avanza hacia la zona de la boquilla encontrándose con una reducción progresiva del diámetro, lo que genera un chorro que sale a gran velocidad. Este chorro genera en su contorno una zona de baja presión que arrastra el líquido circundante haciéndolo ingresar al área de contracción del venturi, comenzando a mezclarse ambos fluidos (el del chorro y el circundante) y aumentando su velocidad debido a una nueva disminución progresiva de diámetro. En la zona de la garganta continúa la mezcla, la que al pasar a la zona de difusión se desacelera y expande (Tamotsu, 1985). La mezcla que emerge fuera del venturi tiene una forma cónica, la cual también arrastra el líquido que se encuentra a su alrededor. La acción de mezcla del eductor establece un patrón de circulación del líquido del estanque. Un esquema del funcionamiento de un eductor sumergido se muestra en la Figura 7.

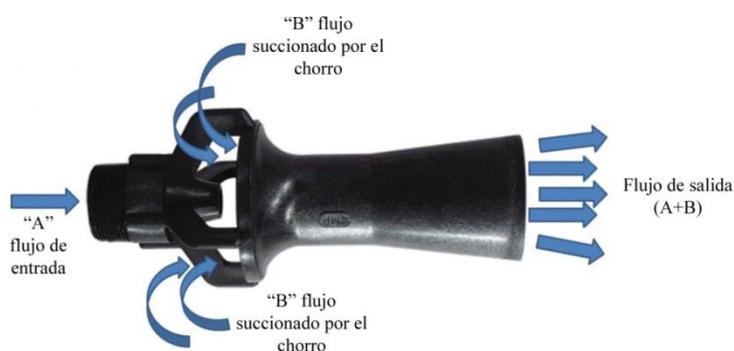


Figura 7: Esquema de funcionamiento de un eductor sumergido.

La relación entre el volumen que sale por el chorro de la boquilla y el que finalmente es expulsado por el difusor varía según el caudal que se utilice y las configuraciones del eductor. Tamotsu (1985) señala que existe una relación exponencial entre presión, en la boquilla del eductor, versus caudal de salida del venturi. Esto se explica porque a medida que el flujo de entrada al eductor aumenta, el chorro se hace más potente generando mayor succión de líquido circundante. Algunos fabricantes señalan que la relación entre caudal de entrada y salida del eductor fácilmente puede llegar a ser de 1:6 (Spraying Systems Co., 2008).

Dentro de los principales beneficios que conlleva el uso de eductores como dispositivos de mezcla se pueden destacar:

- Bombea, dentro del estanque, una cantidad de agua muy superior a la ingresada (hasta 6 veces dependiendo del modelo de eductor y caudal de entrada)
- La cámara difusora permite una mejor mezcla del agua en comparación a un chorro común.
- El diseño de la cámara permite una autolimpieza de material que se acumule en su interior.
- Su pequeño diseño facilita las actividades de manejo del estanque.
- Se fabrican en una amplia gama de tamaños y materiales.

- Fácil instalación y remoción.
- Bajo costo

2.5 Mapa conceptual

A modo de resumen de la revisión bibliográfica se presenta el siguiente esquema que tiene por fin de ayudar en la comprensión del proceso de mezcla, mostrando las relaciones entre los principales factores que influyen en este proceso, y su relación con la calidad de agua en un cultivo de peces.

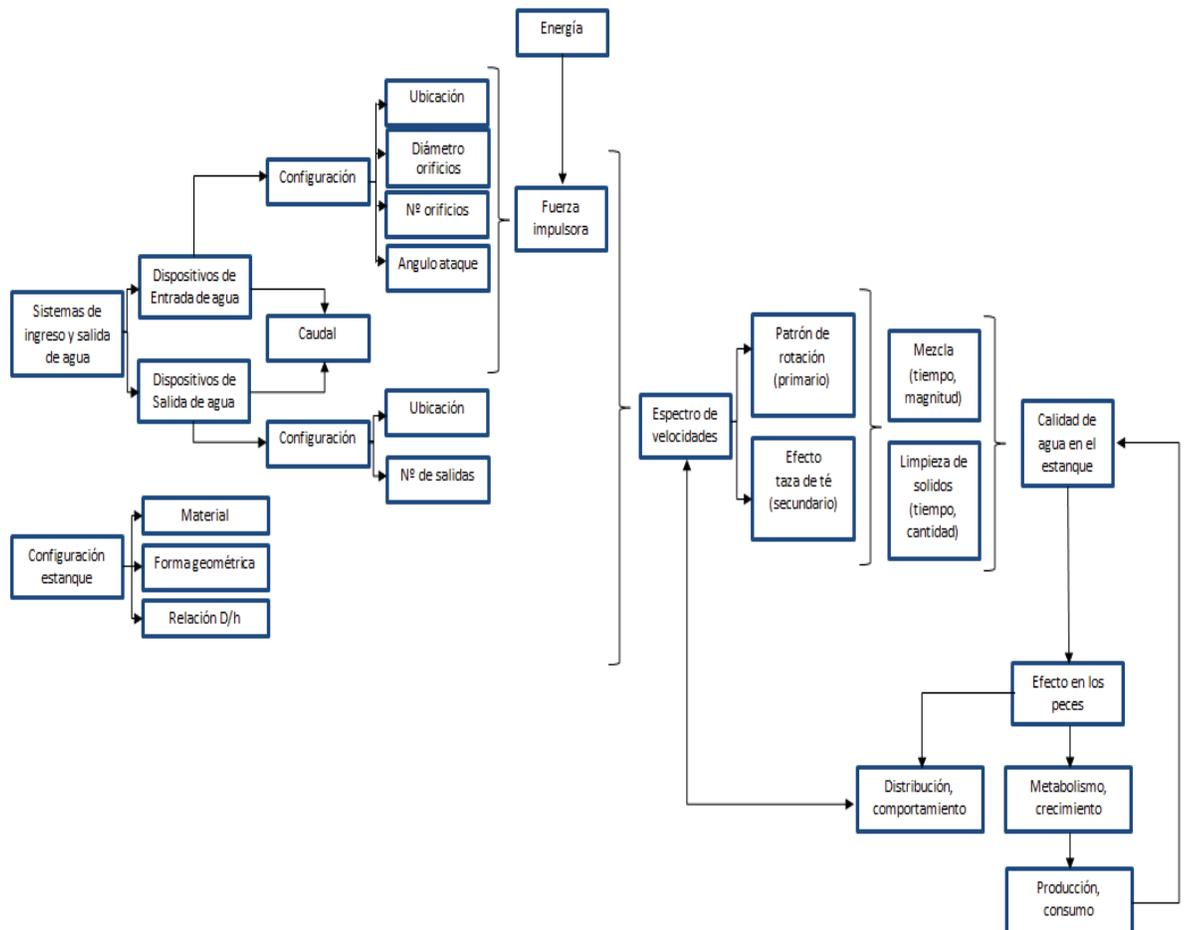


Figura 8: Principales factores que influyen sobre el proceso de mezcla y su relación con la calidad de agua en un cultivo de peces.

Fuente: Elaboración propia a partir de conversación personal con M.Sc. Pablo Venegas.

3 Materiales y métodos.

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Biotecnología e Ingeniería Acuícola de la Universidad Católica de la Santísima Concepción entre los meses de enero y marzo de 2012. En la experiencia se utilizó un sistema de recirculación (sin organismos de cultivo) el cual contó con un estanque circular sobre el cual se probaron los dos sistemas de ingreso de agua, eductor y rociador vertical. En el caso del eductor se probaron 3 diferentes configuraciones de ángulo de chorro (0° , 45° y $45^\circ-45^\circ$) mientras que el rociador vertical se probó sólo a 45° (por ser la mejor configuración recomendada por la bibliografía). Estos cuatro casos conformaron los tratamientos de la experiencia sobre los cuales se hicieron las pruebas de mezcla a 3 caudales diferentes (4, 6 y 8 L/min). Para medir la evolución de la mezcla dentro del estanque de cultivo se usó tinta trazadora. Adicionalmente se midió la velocidad en diferentes puntos de la columna de agua, con lo cual se pudo, posteriormente calcular algunos factores hidrodinámicos como la fuerza impulsora de los chorros de los sistemas de entrada y la velocidad promedio ponderada de la columna de agua, además de un coeficiente de uniformidad de velocidades.

3.1 Sistema de recirculación de agua

El sistema de recirculación usado (Figura 9) estuvo compuesto de un estanque circular de fibra de vidrio con una capacidad máxima de 500 litros, con desagüe central de fondo. Un segundo estanque de 100 litros sirvió para suministrar agua a la bomba y recibir la descarga del desagüe del estanque principal. Se ocupó una bomba hidráulica marca *Espa®* modelo *Iris750M* de 0,75 HP de potencia.

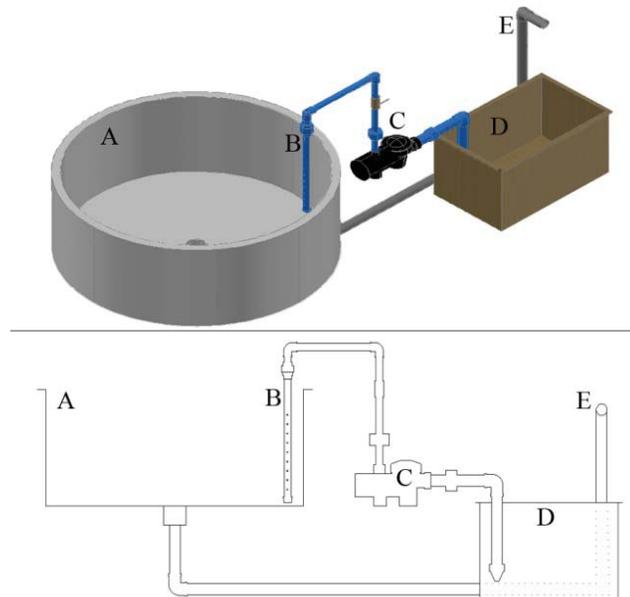


Figura 9: Esquema del sistema de recirculación usado en la experiencia. Vista en 3D (imagen superior) y corte transversal (imagen inferior). (A) Estanque principal; (B) sistema de ingreso de agua al estanque; (C) bomba; (D) estanque secundario; (E) tubería de desagüe a nivel fijo.

En cada uno de los ensayos el estanque principal fue llenado con 400 litros de agua potable, mientras que al estanque secundario se agregaron 40 litros de la misma, teniendo un total de 440 litros de agua en el sistema. La altura de la columna de agua fue mantenida mediante el uso de una tubería en la parte final del desagüe. La Tabla 1 resume los principales parámetros de diseño y operación del sistema de recirculación ocupado en la experiencia.

Tabla 1: Principales parámetros de diseño y operación del sistema de recirculación ocupado en la experiencia

	Magnitud	Unidad de medida
Diámetro estanque principal	1.2	m
Altura estanque principal	0.5	m
Altura columna de agua estq. principal	0.4	m
Capacidad máxima estanque secundario	100	Litros
Volumen real ocupado en estq. secundario	40	Litros
Volumen total del sistema	440	Litros
Potencia bomba hidráulica	0,75	HP
Diámetro tubería de desagüe estq. principal	50	mm

3.1.1 Sistema de ingreso de agua al estanque

Se utilizaron dos sistemas de ingreso de agua al estanque (Figura 10). El primero fue una tubería con orificios uniformemente distribuidos, conocido comúnmente como “rociador” o sistema “tipo flauta”. El segundo fue el sistema de eductor. Ambos se construyeron de manera de poder ser desmontados mediante el uso de una unión americana, siendo ubicados a 2 cm de la pared del estanque.



Figura 10: Sistemas de ingreso de agua ocupados en la experiencia. De izquierda a derecha: eductor y rociador

Todas las pruebas descritas en este trabajo se realizaron para los siguientes sistemas y configuraciones de ingreso de agua al estanque:

- i. Rociador vertical en 45° hacia el centro (Rociador 45)
- ii. Eductor en 0° hacia el centro, paralelo a la tangente del estanque (Eductor 0)
- iii. Eductor en 45° hacia el centro (Eductor 45)
- iv. Eductor en 45° hacia el centro y 45° hacia el fondo (Eductor 45-45)

Los ángulos se determinaron a partir de una línea recta paralela a la tangente del estanque ubicada a la misma altura de punto de salida de él o los chorros del sistema de ingreso de agua (Figura 11). En el caso del eductor 45°-45° el segundo ángulo de inclinación se calculó respecto a la horizontal en dirección al fondo del estanque (Figura 12). El sistema rociador se configuró sólo con un ángulo de ataque de 45° debido a que la información recopilada en bibliografía señala que esa configuración, en estanques circulares con sistema de entrada lateral, es la que genera los menores tiempos de mezcla.

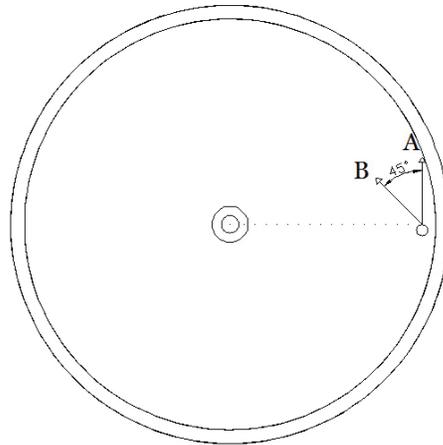


Figura 11: Vista superior del estanque, mostrando los ángulos de ataque de él o los chorros de agua de los sistemas de ingreso. (A) Sistema en 0° ó paralelo a la tangente del estanque. (B) Sistema en 45°.



Figura 12: Eductor en posición 45°-45°

3.1.1.1 Sistema rociador vertical

En la experiencia se utilizó el dispositivo estándar ocupado en los estanques de mantención de peces del laboratorio de biotecnología acuícola de la UCSC, el cual estaba formado por una tubería de PVC para alta presión de 32mm de diámetro, el cual posee 9

orificios de 5mm de diámetro cada uno, con una separación entre ellos de 4 cm, los que quedaban totalmente sumergidos en la columna de agua cuando se realizaron las pruebas (Figura 13)

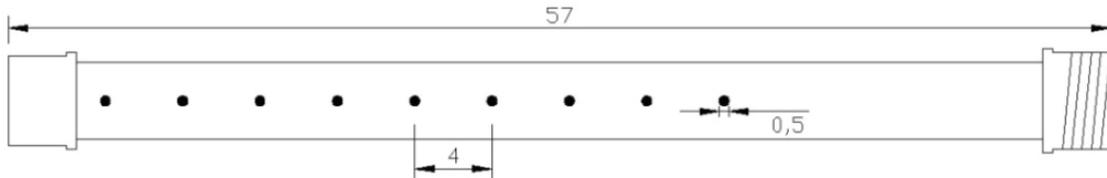


Figura 13: Rociador estándar ocupado en la experiencia. Longitudes en cm.

3.1.1.2 Sistema Eductor

Este dispositivo se elaboró usando PVC de alta presión (Figura 14). Para construir la sección de la reducción de la boquilla se utilizó masilla de alta resistencia marca *Poxilina*®.

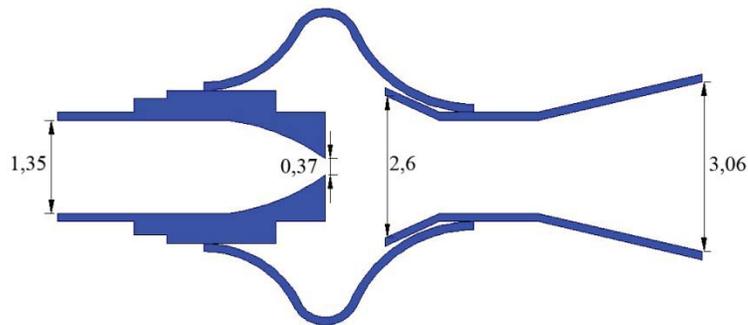


Figura 14: Corte transversal del eductor ocupado en la experiencia. Longitudes en cm.

3.1.2 Determinación de caudales de recirculación usados en la experiencia

Fueron determinados a partir del sistema de entrada de agua limitante en términos de caudal, es decir, aquel que presentara la menor capacidad máxima de ingreso de flujo al estanque, siendo el eductor el que exhibió dicha característica. Posteriormente se procedió a cuantificar dicho caudal usando la misma bomba de esta experiencia (0,75 HP de potencia), obteniéndose que el caudal máximo que fue capaz de ingresar el eductor al estanque (caudal de entrada) fue poco más de 9 L/min. Ante este resultado se determinó usar 3 caudales de trabajo para las pruebas de mezcla: 4 L/min, 6 L/min y 8L/min. No se optó por usar un caudal máximo de 9 L/min debido a que bajo esa condición el eductor funciona a su máxima capacidad, generándose una gran presión al interior de su boquilla, la cual podría, eventualmente, haber producido algún tipo de daño físico al aparato, alterando los resultados del experimento.

En términos de tasa de recambio del estanque usado en la experiencia, estos caudales equivalen a lo siguiente:

- 4 L/min equivale a 0.6 recambio/hora
- 6 L/min equivale a 0.9 recambio/hora
- 8 L/min equivale a 1.2 recambio/hora

3.2 Estimación del caudal real entregado por un eductor

Se realizaron mediciones del caudal ingresado por el eductor al estanque (chorro) *versus* el caudal a la salida del eductor (venturi). El caudal del chorro se midió de manera indirecta, para lo cual se tomaron mediciones a la salida del estanque, debido a que por balance de masa la cantidad de agua que entra es igual a la que sale. Antes de tomar las mediciones se dejó recirculando el estanque por al menos una hora, para que alcanzara un estado de equilibrio, de manera que el flujo de entrada y salida se igualaran.

Las mediciones de caudal a la salida del eductor se hicieron conectando una manguera en la salida del venturi, la cual dirigía el flujo hasta la superficie, donde era captado por un recipiente sumergido de capacidad máxima de 4 litros, y cuyo orificio de entrada se ubicaba exactamente al nivel de la superficie (Figura 15). El caudal se determinó tomando el tiempo de llenado del recipiente. El tiempo cero se tomó al momento de conectar la manguera al recipiente, lo que se hacía después que el sistema llevaba en funcionamiento al menos una hora, de manera de asegurar que el flujo que entraba al estanque se encontraba estabilizado. Se realizaron seis replicas por cada medición.

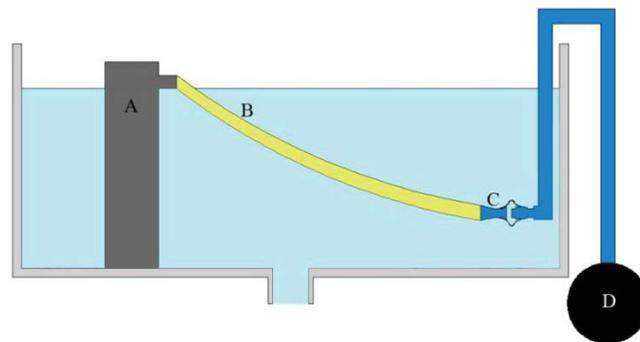


Figura 15: Diagrama del dispositivo usado para medir el caudal a la salida del eductor. (A) recipiente graduado; (B) manguera de conexión; (C) eductor; (D) bomba hidráulica.

3.3 Medición de velocidad de la columna de agua

Los perfiles de velocidad del agua se midieron a través de un plano vertical ubicado en el centro del estanque, en los puntos indicados en la Figura 16. Las mediciones se realizaron usando un correntómetro acústico, marca *Falmouth Scientific, Inc*®, modelo 2ACM-CBP-S. Este dispositivo realiza una medición en dos dimensiones (ejes 'x' e 'y'), entregando además la magnitud y dirección de la resultante total de la velocidad en el punto de medición.

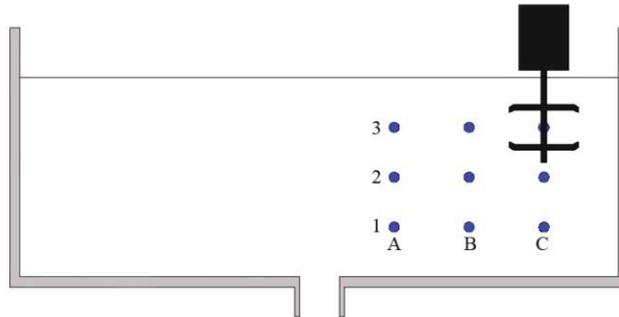


Figura 16: Puntos de medición de velocidades. Los niveles horizontales (1, 2 y 3) se ubican a 10cm, 20cm y 30cm respectivamente del fondo del estanque. Los niveles verticales (A, B y C) se ubican a 15cm, 30cm y 45cm, respectivamente, del centro del estanque. La figura en negro representa al correntómetro acústico midiendo en el punto 3C.

El correntómetro se unió a un riel de aluminio que permitió fijarlo en un punto y posteriormente moverlo a las demás posiciones de medición. Se realizaron 6 réplicas por cada punto de medición. Con el fin de reducir al máximo la interferencia del aparato en el patrón de velocidades del estanque es que se optó por invertir la carcasa metálica que protege los transductores de eventuales golpes. Antes de comenzar a medir las velocidades en un punto determinado se situó el correntómetro en dicho punto y se esperó un lapso de 10 minutos, con el fin de permitir que el patrón de velocidades del estanque eliminara el efecto de distorsión provocado al sumergir o mover el aparato. Además las mediciones se realizaron por etapas, midiendo primero en los puntos cercanos a la superficie y posteriormente los puntos ubicado más al fondo.

Los puntos de medición se fijaron adaptando una metodología sugerida por Lekang (2007). Se midió la velocidad sólo en un cuadrante del estanque debido a que las características de funcionamiento del correntómetro exigían que la velocidad del agua en la zona hacia donde apuntan los transductores (eje del aparato) debe ser relativamente uniforme, lo cual no ocurría en la otra mitad del estanque ya que, específicamente en el caso del eductor a 45°, el chorro principal de agua llega directamente al correntómetro, generando un alto nivel de turbulencia. Una situación similar ocurrió en el centro del estanque, donde la influencia del flujo de salida del eductor 45-45 abarcaba algunos de los transductores del equipo, por lo que se determinó no medir en dicha zona.

3.4 Medición de la mezcla en el estanque

Para determinar la evolución de la mezcla dentro del estanque se usó tinta trazadora, la cual se ingresó por el dispositivo de entrada de agua correspondiente. Por un lapso de media hora se tomaron muestras con el fin de conocer la concentración de tinta en diferentes puntos del estanque.

Como trazador se utilizó anilina negra marca *Montblanc*®, la cual se preparó en una solución de 7mg de anilina por litro de agua destilada. En cada prueba se inyectaron 100ml de la solución trazadora, mediante una manguera de silicona que dirigía la tinta hasta el punto de succión de la bomba. Cada 2 minutos se tomaron muestras de 10 ml en dos puntos (Figura 17), durante un lapso de media hora, teniendo un total de 15 muestras por cada punto. El tiempo cero se consideró desde el instante en que la tinta comenzó a hacer ingreso al estanque. A cada una de las muestras se les midió el color de agua usando un sensor multiparámetro marca *Hanna instruments*® modelo C200.

El dispositivo usado para sacar las muestras estaba compuesto por un soporte de PVC sobre el cual se adhirieron dos capilares de vidrio de 0,5 cm de espesor, los que, por medio de mangueras de silicona, conducían el agua hacia 2 jeringas plásticas de 25 ml cada una. Las muestras eran colocadas en recipientes plásticos para su posterior medición de color.

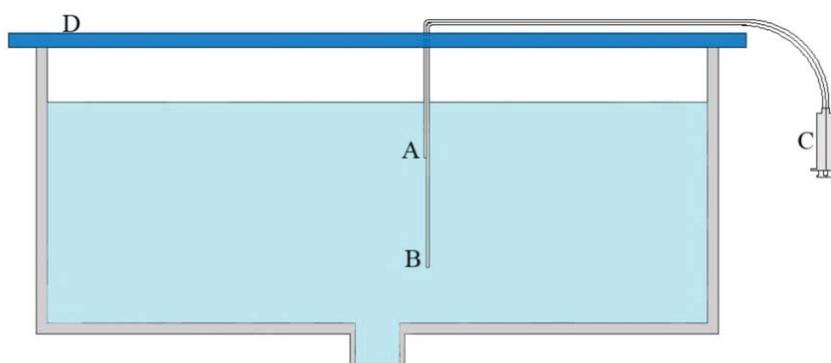


Figura 17: Esquema del dispositivo usado para sacar muestras de agua. (A) punto de toma ubicado a 10 cm de la superficie y 10 cm del centro del estanque. (B) punto de toma ubicado a 10 cm del fondo y 10 cm del centro del estanque. (C) Jeringas para tomar muestras. (D) soporte móvil de PVC

Antes de efectuar una prueba se dejó el sistema funcionando por una hora, de manera que éste alcanzara un estado de equilibrio. Una vez finalizada la prueba el estanque era vaciado, lavado y llenado nuevamente, limpiando además la bomba y el estanque secundario.

Para disminuir la interferencia de los capilares en el proceso de mezcla el dispositivo sólo era colocado en el estanque al momento de tomar las muestras tras lo cual era sacado hasta la próxima medición (2 minutos después). Cada vez que se vertía el contenido de las muestras sobre los recipientes plásticos se limpiaban los restos de agua que quedaban en los capilares y las mangueras, de manera que no contaminar la medición siguiente.

3.4.1 Determinación del tiempo de mezcla

El tiempo de mezcla se consideró como el instante en el cual la concentración de trazador, en el punto de medición, ha alcanzado, o casi alcanzado, la concentración final esperada de trazador cuando se ha logrado la homogeneidad completa en el estanque (Revill, 1992). La ecuación 2 define matemáticamente el concepto de mezcla en un estanque:

$$mezcla = \frac{|c-\bar{c}|}{\bar{c}} \quad (\text{ec. 2})$$

Donde:

C: concentración de tinta en cualquier punto del estanque.

\bar{C} : concentración final media esperada cuando se alcanza la homogeneidad completa.

Conforme a la ecuación anterior la variable *mezcla* puede oscilar entre 0 y 1. Al comienzo del proceso, es decir, cuando aún no se ha agregado el trazador al estanque *mezcla*=1. Este valor empieza a disminuir a medida que el trazador comienza a mezclarse en el estanque, siendo *mezcla*=0 cuando la homogeneidad completa se ha alcanzado. En la mayoría de los estudios experimentales, el tiempo de mezcla se mide desde la adición del trazador hasta cuando se consigue una homogeneidad del 95%, es decir, cuando *mezcla*=0,05 (Zughbi, 2005; Patwardhan & Gaikwad, 2003) criterio que también se utilizó en este trabajo.

Para cada tratamiento se repitió tres veces el proceso de llenado, inyección de trazador y toma de muestras en los puntos A y B (que señala la Figura 17). Debido a que, para calcular el tiempo de mezcla es necesario conocer la variación de la concentración de trazador en un solo punto del estanque, y, ya que se tomaron muestras en 2 puntos repitiendo el proceso 3 veces, esto da un total de seis replicas por tratamiento.

El valor de la concentración final media esperada (\bar{C}) se determinó de la siguiente manera: se usó el sistema eductor a un caudal de entrada de 8 L/min, dejando el sistema recirculado por 1 hora, de modo que éste se estabilizara. Luego de esto se agregó 100 ml de solución trazadora (la misma cantidad ocupada en cada tratamiento de la experiencia). Posteriormente se midió la concentración de trazador en lapsos de 20 min, por un tiempo total de 4 horas, determinándose el valor en el cual se estabilizó, es decir, cuando se alcanzó la homogeneidad completa.

3.5 Cálculo de elementos hidrodinámicos del estanque

3.5.1 Velocidad de los chorros de los dispositivos de entrada de agua.

Para calcular la velocidad del agua en el chorro del eductor, y en los chorros del rociador vertical, se utilizó la ecuación 3 que relaciona caudal y área (Timmons *et al*, 2002).

$$V_{orif} = \frac{Q}{A} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde:

Q: Es el caudal que ingresa al estanque, medido en [m³/min]

A: Es el área de él o los orificio(s) por donde salen él o los chorro(s) del eductor o rociador vertical. Se mide en [m²].

En el caso del rociador vertical la magnitud de la velocidad calculada corresponde a la sumatoria de las velocidades de cada chorro.

3.5.2 Velocidad promedio ponderada de rotación

Usando las magnitudes de velocidad tomadas en los 9 puntos de un cuadrante del estanque se calculó una velocidad promedio de rotación, valor ponderado en relación a la distancia de los puntos de medición respecto al radio del estanque y la altura de la columna de agua. La fórmula utilizada se presenta en la ecuación 4, la cual corresponde a una modificación de la fórmula utilizada por Oca & Masaló (2010) para calcular la velocidad promedio en un estanque donde sólo se hicieron mediciones a lo largo de su diámetro y no a diferentes alturas de la columna de agua, como sí se hizo en esta experiencia.

$$V_{rota} = \frac{\sum_{j=1}^m \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i r_i * h_j}{\sum_{i=1}^n r_i} \right]}{\sum_{j=1}^m h_j} \quad (\text{ec. 4})$$

Donde:

V_{rota} : velocidad promedio ponderada de rotación de la columna de agua.

V_i : velocidad en el punto “i”

r_i : distancia horizontal desde el centro del estanque hasta el punto “i”

h_j : altura desde el fondo del estanque hasta el punto “i”

n: número de niveles horizontales donde se midió la velocidad. En esta experiencia n=3.

m: número de niveles verticales donde se midió la velocidad. En esta experiencia m=3.

3.5.3 Fuerza impulsora

La fuerza impulsora que generan él o los chorros de agua, y que provocan el movimiento rotatorio de ésta en el estanque, fue calculada mediante la ecuación 5 (Timmons *et al*, 2002).

$$F_i = Q \rho (V_{orif} - V_{rota}) \quad (\text{ec. 5})$$

Donde:

Q : caudal de agua ingresado al estanque [L/s]

ρ : densidad del agua [gr/cm³]

V_{orif} : velocidad de él o los chorros de agua del sistema de ingreso de agua [m/s]

V_{rota} : Velocidad promedio de rotación del agua del estanque [m/s]

3.5.4 Coeficiente de uniformidad

Para determinar el grado de homogeneidad bajo el cual se distribuyen las velocidades en los diferentes puntos de la columna de agua es que se calculó un coeficiente de uniformidad, propuesto por Oca & Masaló (2010), el cual se presenta en la ecuación 6.

$$CU_{50} = 100 * \left[\frac{V_{50}}{V_{\text{rota}}} \right] \quad (\text{ec. 6})$$

Donde:

V_{50} : promedio de las velocidades de circulación del 50% del área con menores valores

V_{rota} : velocidad promedio de la columna de agua

Debido a que en cada tratamiento se midieron las velocidades de rotación en 9 puntos del estanque, el 50% del área contiene 4,5 puntos. Ante este problema se optó por considerar 4 puntos para el cálculo de V_{50} .

3.5.5 Números de Reynolds

El número de Reynolds es un factor adimensional que relaciona el área húmeda del estanque y la velocidad característica del fluido (fuerzas inerciales), con la viscosidad cinemática del fluido (fuerzas viscosas) (Timmons *et al*, 2002). La ecuación 7 muestra la ecuación que permite determinar el número de Reynolds de un estanque.

$$Re = \frac{v_s R_h}{\nu} \quad (\text{ec. 7})$$

Donde:

v_s : velocidad característica del agua [m/s]

R_h : radio hidráulico del estanque [m]

ν : viscosidad cinemática del agua [m²/s]

El radio hidráulico se calculó usando la ecuación 8:

$$R_h = \frac{A_{ht}}{P_m} \quad (\text{ec. 8})$$

Donde:

A_{ht} : área húmeda transversal del estanque [m²]

P_m : Perímetro mojado [m]

3.6 Análisis de datos

3.6.1 Obtención de los tiempos de mezcla

Para determinar los tiempos de mezcla se realizó una regresión para cada una de las réplicas (Patwarhan & Gaikwad 2003), ajustando los puntos previamente graficados (eje x = tiempo; eje y = mezcla). Para este procedimiento se ocupó el software *CurveExpert Professional*© v1.5. el cual genera diferentes ajustes, los que ordena en un ranking en base a los coeficientes de determinación (r^2) de cada una de las curvas. El criterio para la selección de la mejor curva de ajuste consideró la que presentara el mayor r^2 . El tiempo de mezcla se determinó cuando el valor de “y” en la curva ajustada era igual a 0,05.

3.6.2 Diferencias entre tratamientos y comparaciones pareadas.

Los datos obtenidos para tiempos de mezcla, velocidad promedio ponderada y coeficiente de uniformidad se compararon estadísticamente ($P < 0,05$) usando ANOVA de 2 vías, previa comprobación de la normalidad (test de Kolmogorov-Smirnov) y homogeneidad de los datos (test de Levene). Posteriormente se aplicó el test post-hoc de Tukey para hallar las diferencias significativas ($P < 0,05$) específicas entre los tratamientos. Para realizar este análisis se utilizó el software SYSTAT© v.12.

4 Resultados.

4.1 Caudal de entrada y salida del eductor

La relación entre el caudal de entrada al eductor (Q_e) *versus* el caudal de salida por el venturi (Q_s) siguió la tendencia que se presenta en la Figura 18. En ella es posible apreciar que la relación $Q_e:Q_s$ se ajusta a una curva exponencial ($r^2=0,989$) donde el caudal de salida del venturi aumenta a gran velocidad a medida que el caudal de entrada se hace mayor. La relación $Q_e:Q_s$ varía aproximadamente de 1:2 cuando Q_e es cercano a 2, hasta aproximadamente 1:7 cuando Q_e es cercano a 8 L/min. El máximo caudal capaz de ser ingresado al eductor fue de 9,3 L/min.

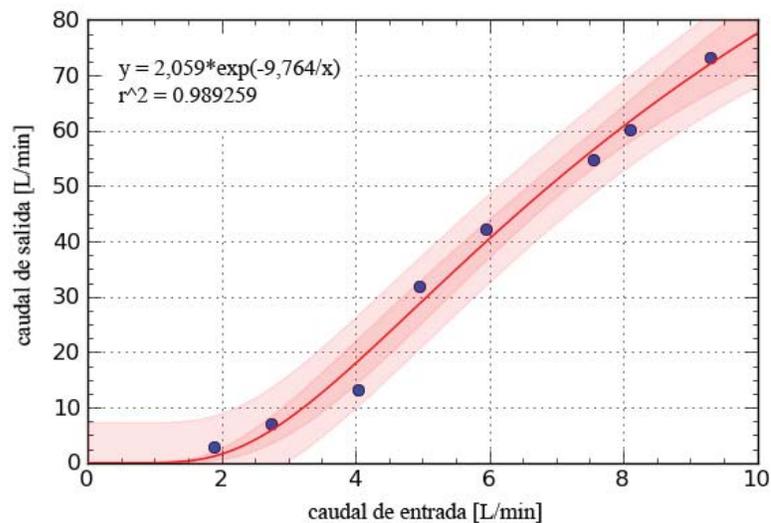


Figura 18: Relación entre caudales de entrada y salida del eductor

4.2 Tiempos de mezcla

El análisis estadístico determinó que, por sí solas, las variables caudal y tratamiento, así también como el efecto conjunto de ambas, influyeron significativamente ($P<0,05$) sobre los tiempos de mezcla observados en la experiencia.

El análisis *post hoc* mostró que los tiempos de mezcla obtenidos con eductores, en sus tres configuraciones diferentes (0° , 45° y $45^\circ-45^\circ$) fueron significativamente menores ($P<0,05$) a los del tratamiento rociador 45° , para cada una de las tres condiciones de caudal (4, 6 y 8 L/min), tal como se muestra en la Figura 19 y cuyos valores se detallan en la Tabla 2. Las diferencias significativas presentadas en dicha tabla consideran el efecto conjunto de las variables tratamiento y caudal.

El eductor a 0° presentó el tiempo de mezcla más alto de los tres tratamientos que usaron este dispositivo. La variación horizontal del ángulo de ataque, en 45° hacia el centro, generó reducciones en el tiempo de mezcla de alrededor del 50% para los tres caudales de

trabajo. La variación vertical del ángulo en 45° hacia el fondo del estanque (educator 45-45) generó leves disminuciones en el tiempo de mezcla, sin embargo estas no fueron significativas respecto de los tiempos obtenidos con el tratamiento educador 45.

El aumento en el caudal redujo los tiempos de mezcla en los cuatro tratamientos, cada uno de los cuales presentó diferencias significativas entre 4 y 8 L/min. Bajo esa misma variación de caudal el tratamiento rociador 45 presentó reducciones en el tiempo de mezcla del orden del 14% (pasando de 29,23 a 25,11 min), mientras que los tres tratamientos de educador, presentaron disminuciones en el tiempo de mezcla entre un 40 a un 60%. A pesar de lo anterior los aumentos de caudal no siempre significaron reducciones significativas en el tiempo de mezcla, lo cual puede apreciarse en los tratamientos rociador 45 y educador 45 cuando se varió el caudal de 6 a 8 L/min.

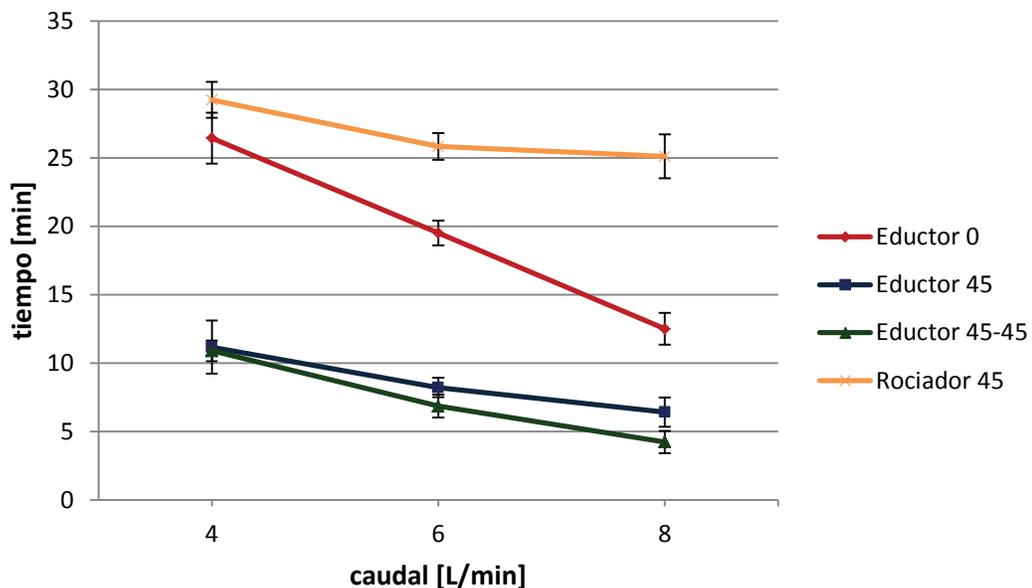


Figura 19: Tiempos promedio de mezcla por tratamiento

Tabla 2: Variación de tiempos de mezcla (minutos) entre tratamientos y caudales ± desviación estándar.

Tratamiento\Caudal	4 [L/min]	6 [L/min]	8 [L/min]
Educador 0	26,43 ± 1,87 a	19,51 ± 0,91	12,51 ± 1,16 b
Educador 45	11,16 ± 1,94 b	8,22 ± 0,72 c	6,42 ± 1,07 cd
Educador 45-45	10,90 ± 0,75 b	6,86 ± 0,83 c	4,24 ± 0,82 d
Rociador 45	29,23 ± 1,31	25,82 ± 0,97 a	25,11 ± 1,60 a

4.3 Factores hidrodinámicos

4.3.1 Velocidad de los chorros de los dispositivos de entrada

En el caso del eductor se calcularon las magnitudes de las velocidades producidas por sus dos chorros, el de su boquilla (generado por el caudal de entrada) y el del venturi (generado por el flujo de entrada más el líquido circundante succionado), los cuales se presentan en la Tabla 3. Los valores correspondientes al rociador representan la magnitud total de la velocidad generada por sus nueve chorros (sumatoria).

Tabla 3: Magnitud de las velocidades (cm/s) de los chorros de los sistemas de entrada

Chorro \ caudal	4 L/min	6 L/min	8 L/min
Eductor boquilla	603.61	905.41	1207.22
Eductor venturi	29.51	94.44	136.32
Rociador	37.7	56.6	75.5

Se aprecia que hay una relación directa entre caudal y velocidad, tanto en el sistema eductor como en el rociador. Por otra parte, al comparar la velocidad del chorro generado por la boquilla del eductor, se puede apreciar que supera ampliamente a la que finalmente generará el venturi, sin embargo las diferencias no son iguales bajo los tres caudales ya que a 4 L/min la velocidad en la boquilla es aproximadamente 20 veces superior que la velocidad alcanzada en el venturi, mientras que a 8 L/min esta diferencia se reduce a poco más de 8 veces.

Las velocidades alcanzadas por el chorro del venturi del eductor siguieron una tendencia al alza más pronunciada que las generadas por los chorros del sistema rociador. Lo anterior se aprecia cuando a 4L/min la velocidad del venturi es inferior que la velocidad del rociador, sin embargo esta situación se revierte al utilizar caudales de 6 y 8 L/min, donde el la velocidad del venturi supera ampliamente a la del sistema rociador.

4.3.2 Velocidad promedio ponderada

El análisis de varianza determinó que los tratamientos y el caudal, así como el efecto conjunto de ambas variables, influyeron significativamente ($P < 0,05$) en los valores observados de velocidad promedio ponderada.

Los tres tratamientos donde se usó eductor fueron capaces de generar mayores magnitudes de velocidad promedio ponderada de la columna de agua, en comparación a los resultados obtenidos con rociador 45 (Figura 20). Las curvas de los cuatro tratamientos siguieron comportamientos ascendentes a medida que se aumentó el caudal de entrada. La Tabla 4 complementa esta información, donde se puede apreciar que en los cuatro tratamientos, la magnitud de la velocidad promedio ponderada obtenida a un caudal de 8

L/min, fue levemente inferior al doble de los valores obtenidos a 4 L/min. Por otra parte la variación del ángulo, en los tratamientos de eductor generó diferentes resultados. Al variar de 0° a 45° se apreció un aumento en las velocidad promedio ponderada, mientras que al orientar el chorro en dirección 45°-45° generó una disminución en los valores, los que, sin embargo, fueron más de dos veces superiores que los presentados por el tratamiento rociador 45 cuando se trabajó a un caudal de 4 L/min, y cerca de tres veces superiores cuando el caudal utilizado fue de 8 L/min.

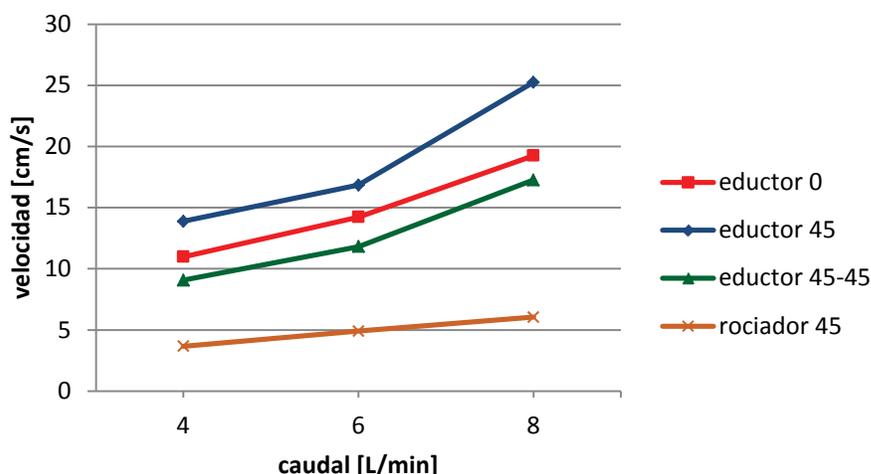


Figura 20: Velocidades promedio ponderada de la columna de agua del estanque, por tratamiento.

Tabla 4: Velocidades promedio ponderado (cm/s) por tratamiento, bajo tres condiciones de caudal de entrada ± desviación estándar.

Tratamiento/Caudal	4 L/min	6 L/min	8 L/min
Eductor 0	10,98 ± 0,07	14,22 ± 0,11	19,26 ± 0,11
Eductor 45	13,88 ± 0,14	16,84 ± 0,18	25,24 ± 0,18
Eductor 45-45	9,07 ± 0,11	11,81 ± 0,04	17,27 ± 0,13
Rociador 45	3,67 ± 0,04	4,90 ± 0,05	6,04 ± 0,02

4.3.3 Coeficiente de uniformidad

La Figura 21 muestra los diferentes coeficientes de uniformidad obtenidos con los cuatro tratamientos, valores que se detallan en la Tabla 8 junto a sus respectivas desviaciones estándar. El análisis de varianza determinó que los tratamientos y el caudal, por sí solos, así como el efecto conjunto de ambas variables, influyeron significativamente ($P < 0,05$) en los valores observados de coeficiente de uniformidad.

El tratamiento que mostró menores niveles de homogeneidad en las velocidades de la columna de agua fue el eductor 0°, disminuyendo aún más a medida que se aumentó el caudal, llegando a un 36%. Por el contrario, los demás tratamientos de eductor (45 y 45-45) mostraron tendencias al alza entre caudales de trabajo de 4 y 8 L/min.

Al comparar los tratamientos eductor 0 y eductor 45 se puede apreciar que el ángulo de orientación del chorro del eductor aumentó de manera importante los niveles e homogeneidad en la columna de agua del estanque, especialmente cuando se trabajó a caudales altos (6 y 8 L/min). Este efecto se vio aún más pronunciado cuando adicionalmente el ángulo se inclinó en 45° hacia el fondo (eductor 45-45).

El tratamiento rociador 45 mostró niveles de uniformidad de velocidades relativamente similares en los tres caudales utilizados, bordeando el 65%, con una leve tendencia a disminuir la uniformidad a medida que el caudal de entrada se hacía mayor. Cuando se trabajó a un caudal de 4 L/min, los sistemas que presentaron mejor uniformidad fueron eductor 45 y eductor 45-45 superando el 70%, sin embargo a caudales superiores el sistema eductor 45-45 presentó la mayor uniformidad, llegando a superar el 96% cuando se usó un caudal de 8 L/min, alcanzando un valor casi ideal.

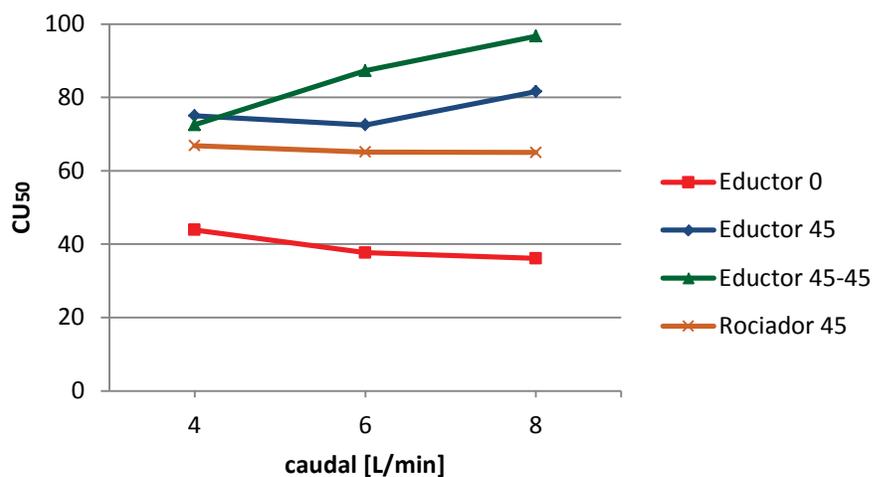


Figura 21: Coeficiente de uniformidad por tratamiento

Tabla 5: Coeficiente de uniformidad de velocidades, por tratamiento, bajo tres condiciones de caudal de entrada. Valores en porcentaje ± desviación estándar.

Sistema/caudal	4 L/min	6 L/min	8 L/min
Eductor 0	43,87 ± 0,75	37,69 ± 0,60	36,13 ± 0,36
Eductor 45	74,99 ± 0,55	72,50 ± 1,31	81,60 ± 1,16
Eductor 45-45	71,81 ± 1,41	87,29 ± 1,15	96,71 ± 0,78
Rociador 45	66,86 ± 1,61	65,10 ± 0,66	64,97 ± 2,22

4.3.4 Fuerza impulsora

La fuerza de impulso generada por los chorros de los tratamientos de eductor fue siempre superior a los valores presentados por el tratamiento rociador 45, donde las variaciones entre los dos sistemas, al trabajar a un caudal de 4 L/min, fue del orden de un 50 a un 100%, situación que se revirtió al pasar a caudales de 6 y 8 L/min, donde las curvas que representan a los eductores mostraron una tendencia al crecimiento mucho más pronunciada en comparación al sistema rociador 45 (Figura 23), cuyas magnitudes se detallan en la Tabla 7. Los tres tratamientos donde se utilizó eductor llegaron a tener diferencias más de diez veces superiores que el tratamiento de rociador cuando el caudal de entrada fue de 6 y 8 L/min.

Al comparar los tratamientos eductor 0 y eductor 45 se puede apreciar que cuando se orientó el chorro del eductor en 45° hacia el centro del estanque se generó una reducción en los valores de fuerza impulsora, sin embargo esta situación se revierte al orientar el eductor en posición 45-45, generando incluso mayores que el tratamiento eductor 0.

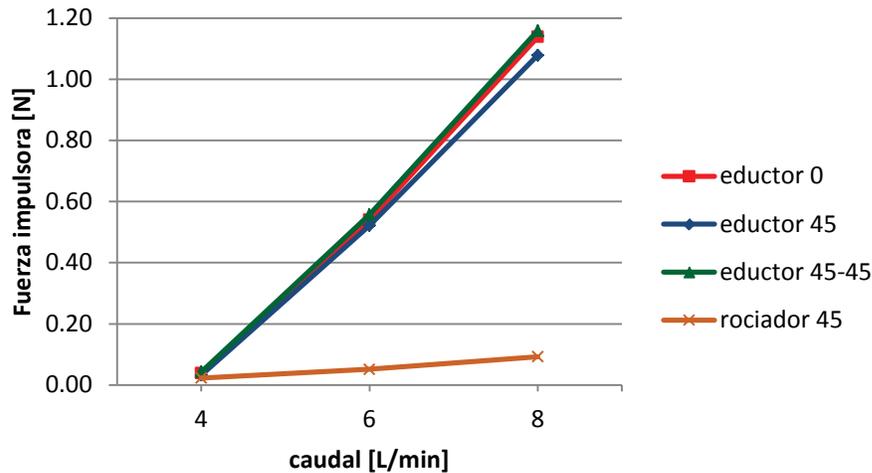


Figura 23: Fuerza impulsora por tratamiento

Tabla 6: Fuerza impulsora (Newton) por tratamiento, bajo tres condiciones de caudal de entrada

Sistema/caudal	4 L/min	6 L/min	8 L/min
Eductor 0	0.040	0.557	1.174
Eductor 45	0.034	0.539	1.114
Eductor 45-45	0.044	0.574	1.193
Rociador 45	0.023	0.052	0.093

4.3.5 Número de Reynolds

Al calcular el número de Reynolds del estanque, para cada tratamiento, se apreció que el único factor que permitía la variación de las magnitudes dentro de la formula era la velocidad característica del agua (velocidad promedio), mientras que el radio hidráulico del estanque y la viscosidad cinemática del agua son magnitudes que se mantuvieron constantes dentro de los experimentos. Debido a esto el grado de correlación de los números de Reynolds con la respectiva velocidad promedio ponderada de cada tratamiento es igual a 1. Esto implica que las gráficas de las curvas de Reynolds y velocidad promedio ponderada tienen el mismo comportamiento, por lo que sus resultados no se incluirán en la discusión. Una situación similar ocurrió al calcular los números de Reynolds de los chorros, tanto para el eductor como el rociador, donde se observó una correlación igual a 1 con los valores de la velocidad de los chorros de cada uno de los sistemas de entrada de agua.

5 Discusión.

5.1 Caudal de entrada y salida del eductor

El funcionamiento del eductor se ajustó a lo que se esperaba según la información recopilada en los antecedentes. La relación entre caudal de entrada *versus* caudal de salida (Qe:Qs) siguió una tendencia de crecimiento exponencial, por lo que se corrobora lo afirmado, en ese sentido, por Tamotsu (1985). Este comportamiento presentado en la relación Qe:Qs, cuando se aumentó el caudal de entrada, puede explicarse porque a medida que Qe se incrementa también lo hace la presión dentro de la boquilla del eductor, provocando que el chorro salga con mayor velocidad, lo cual a su vez implica que aumente la capacidad de succión del chorro al entrar en contacto con el agua del estanque, saliendo finalmente, un mayor caudal por el venturi. La relación Qe:Qs llegó a superar el valor 1:7, lo cual está por sobre la relación 1:6 propuesta por algunos fabricantes (Spraying Systems Co., 2008). Esta diferencia podría explicarse debido a que las características de diseño del eductor utilizado permitieron tener una mejor succión en el venturi, lo cual se reflejó en una mayor proporción de caudal de salida.

5.2 Tiempos de mezcla

Las diferencias en los tiempos de mezcla observadas entre los sistemas donde se utilizó eductor, bajo los tres caudales de trabajo, concuerdan con lo señalado por varios autores (Burley & Klapsis, 1985; Schei, 1998; Timmons *et al*, 2002; Davidson & Summefelt, 2004; Patwardan & Gaikwad, 2003) respecto a la importancia del ángulo de ataque como factor que afecta la mezcla. Lo anterior se vio especialmente reflejado al comparar los tratamientos eductor 0 y eductor 45, donde la variación de 0° a 45° generó que el tiempo de mezcla se redujera a más de la mitad. Lo anterior puede explicarse porque en un ángulo de 0° el chorro que sale del eductor avanza libremente pocos centímetros antes de chocar con la pared del estanque, momento en el cual pierde una gran cantidad de energía, en cambio en un ángulo de 45° la longitud del chorro es mucho mayor antes de chocar con la pared, por lo cual, la mayor parte de la energía se utiliza en mezclarse con el agua del estanque.

El que no se presentaran diferencias significativas entre los tratamientos eductor 45 y eductor 45-45 muestra que el efecto del ángulo vertical (45° hacia el fondo del estanque) no fue relevante en términos de reducción de tiempos de mezcla, bajo los tres caudales estudiados. A pesar de esto otros autores (Davidson & Summefelt, 2004) en un estudio donde se utilizó un estanque con sistema de entrada tipo rociador vertical, han variado los chorros inferiores en 45° hacia el fondo obteniendo mejoras en la propiedad de autolimpieza del estanque por lo que, considerando este aspecto, el sistema eductor 45-45 podría ser más ventajoso que el eductor 45.

La disminución en los tiempos de mezcla obtenidos en todos los tratamientos a medida que se aumentó el caudal de entrada, concuerda con los resultados de otros investigadores (Summefelt, 2000; Patwardhan & Gaikwad, 2003; Labatut, 2007a) respecto a que existe una relación inversa entre caudal de entrada y tiempo de mezcla. En este

sentido, la mayor disminución en los tiempos de mezcla presentada por los tratamientos de eductor en comparación a la observada en el tratamiento rociador 45 podría explicarse, en gran medida, por el efecto amplificador del caudal que genera el venturi del eductor, el cual, al mover un flujo mucho mayor dentro del estanque, en comparación al que realmente se ingresa, genera que el dispositivo aumente considerablemente su capacidad de homogenizar la columna de agua obteniendo, de esta manera, tiempos de mezcla significativamente menores.

Las variaciones en los tiempos de mezcla se explican no sólo por el efecto individual de la variable caudal o por la variación del ángulo de ataque de los chorros, sino también por el efecto que ambas ejercen en conjunto. Lo anterior puede apreciarse con mayor claridad al comparar las curvas de los tiempos de mezcla de los tratamientos eductor 0 y eductor 45, donde, si bien las dos presentan una tendencia a la baja, su comportamiento no es el mismo a través de los tres caudales de la experiencia. Si el tiempo de mezcla fuese explicado por la acción de una sola variable se esperaría que las curvas presentaran pendientes similares, lo cual no ocurrió en este caso.

5.3 Velocidad de los chorros

La diferencia entre la velocidad del chorro de la boquilla del eductor y el chorro del venturi concuerda con lo afirmado por Tamotsu (1985), respecto a que gran parte de la energía del chorro de la boquilla es ocupada en succionar el líquido circundante al eductor para generar el flujo de mezcla que sale por el venturi, el cual se caracteriza por poseer un mayor caudal, pero también una menor velocidad que el chorro de la boquilla.

Timmons (2002) afirma que existe una relación inversa entre velocidad de chorro y tiempo de mezcla. Lo anterior se cumple cuando se comparan los tiempos de mezcla de cada tratamiento con sus respectivas velocidades de chorro, es decir, al aumentar los caudales, tanto el eductor como el rociador aumentan sus velocidades de chorro y disminuyen sus tiempos de mezcla. Sin embargo, lo anterior no implica que un tratamiento que presenta una mayor velocidad de chorro necesariamente obtenga un menor tiempo de mezcla que otro tratamiento diferente. Esto se aprecia con claridad cuando se comparan los tres tratamientos de eductor con el tratamiento rociador 45, bajo un caudal de entrada de 4 L/min, en donde la velocidad total de los chorros del tratamiento rociador 45, fue mayor que la velocidad de chorro del venturi, a pesar de esto, el tiempo de mezcla de los tres tratamientos de eductor fueron significativamente menores que los del tratamiento rociador 45. Lo anterior puede explicarse porque a ese caudal de trabajo la relación $Q_e:Q_s$ fue aproximadamente 1:3, lo que se tradujo en que el eductor fue capaz de generar un chorro de menor velocidad pero con un mayor caudal en el venturi (Q_s), es decir, en este caso influyó de mayor manera la cantidad de agua que fue capaz de mover el venturi del eductor dentro del estanque por sobre la velocidad que su chorro fue capaz de generar, lo que finalmente determinó tiempos de mezcla menores.

El hecho que a 6 y 8 L/min la velocidad generada por el venturi siguiera una tendencia al alza más pronunciada que el tratamiento rociador 45, fue un factor que

contribuyó a que los tiempos de mezcla obtenidos con eductores, bajo esos caudales, aumentaran su distancia respecto a los alcanzados por el tratamiento rociador 45.

5.4 Velocidad promedio ponderada

Los elevados valores de velocidad promedio ponderada obtenidos por los tratamientos de eductor en comparación al tratamiento rociador 45 se explican en gran medida por el efecto amplificador de caudal que genera el venturi, el cual permitió mover una mayor cantidad de agua dentro del estanque, generando mayores velocidades incluso cuando la velocidad del chorro del venturi fue inferior a la velocidad de los chorros del rociador (a un caudal de entrada de 4 L/min, ver Tabla 3). Labatut (2007a) y Timmons (2002) señalan que la velocidad de rotación de la columna de agua es directamente proporcional a la velocidad del chorro del sistema de entrada, afirmación que se cumplió para el tratamiento rociador 45, ya que al aumentar el caudal de trabajo se generó un aumento sostenido en la velocidad de los chorros, lo cual provocó un aumento lineal de la velocidad de la columna de agua. Sin embargo, no ocurrió lo mismo con los tratamientos de eductor, ya que sus curvas tienen pendientes diferentes entre 4 y 6 L/min, y entre 6 y 8 L/min, es decir, el aumento de la velocidad promedio ponderada fue más pronunciado a caudales más altos. Lo anterior puede explicarse debido a que la relación $Q_e:Q_s$ del eductor no aumenta en forma lineal, sino que exponencial, haciéndose más grande a medida que el caudal de entrada se hace mayor, lo cual finalmente se reflejó en que el eductor presentó mejores desempeños de velocidad promedio ponderada a caudales más elevados.

Los diferentes valores de velocidad promedio ponderada observados entre los 3 tratamientos de eductor muestran la importancia del ángulo de ataque como factor que afecta la velocidad de la columna de agua. Los mayores valores presentados por el tratamiento eductor 45 pueden explicarse porque esta configuración permitió dirigir la influencia del chorro de una manera más directa hacia la columna de agua que los otros tratamientos de eductor, los cuales al apuntar sus chorros contra la pared o el fondo generaron pérdidas de energía que afectaron su desempeño.

Al comparar los valores ponderados de velocidad promedio con los tiempos de mezcla de cada tratamiento, se puede apreciar que las bajas magnitudes de velocidad alcanzadas por el tratamiento rociador 45, a los diferentes caudales de trabajo, en comparación a las velocidades alcanzadas por los tres tratamientos de eductores, concuerdan con lo afirmado por varios autores (Timmons *et al*, 2002; Oca, 2004; Labatut, 2007b) respecto a que altas velocidades en la columna de agua están asociadas a mejores niveles de mezcla, sin embargo esta relación no siempre se cumple pues, eductor 0 tuvo niveles superiores de velocidad que eductor 45-45, mientras que éste último tratamiento presentó tiempos de mezcla considerablemente menores a los alcanzados por eductor 0. Debido a lo anterior no se puede establecer una relación estricta entre velocidad promedio y tiempo de mezcla aplicable a diferentes sistemas de entrada de agua.

5.5 Coeficiente de uniformidad

En el análisis de los resultados puede observarse que el ángulo de orientación de los chorros juega un papel importante en los niveles de uniformidad de velocidades observados. Los bajos valores presentados por el tratamiento eductor 0 pueden explicarse porque al dirigir el chorro hacia la pared genera que las mayores velocidades se concentren en esa área, mientras que en la zona cercana al centro la influencia del chorro es muy baja, obteniendo de esta manera una alta disparidad de magnitudes y, por ende, una menor uniformidad. Al respecto, Oca & Masaló (2010) señalan que los mejores coeficientes de uniformidad se obtienen cuando las velocidades de la zona central y las paredes del estanque son similares, lo cual puede verse reflejado al observar los valores alcanzados por el tratamiento eductor 45, los cuales superan ampliamente a los del tratamiento eductor 0. Los mejores resultados alcanzados por el tratamiento eductor 45-45 pueden explicarse porque al orientar adicionalmente el ángulo de ataque en 45 hacia el fondo se mejora la distribución de velocidades en el nivel vertical de la columna de agua, aunque este efecto no se aprecia cuando el caudal es bajo (4 L/min), lo cual puede deberse esencialmente a que el efecto del choque del chorro con el fondo necesita de caudales mayores para generar una especie de “rebote” del flujo y afectar, de manera importante, la distribución vertical de velocidades, aunque es probable que en estanques más grandes o con una relación mayor diámetro:alto este efecto sea menor.

En cuanto a la influencia del caudal se aprecia que éste afectó de manera diferente a cada uno de los tratamientos generando en algunos tendencias al alza y en otros tendencias hacia la baja por lo cual se hace difícil establecer una relación que explique la variación del coeficiente de uniformidad sólo en base al caudal, sino que debería considerarse su relación con otras variables como por ejemplo el ángulo de ataque de los chorros.

Varios autores (Duarte, 2011; Masaló, 2008; Labatut, 2007a; Timmons *et al*, 2002; Burley & Klapsis, 1985) señalan que niveles homogéneos de velocidad en la columna de agua generan mejor mezcla. Lo anterior puede verse reflejado en los comportamientos de las curvas de los coeficientes de uniformidad obtenidos por los tratamientos eductor 45 y eductor 45-45. Sin embargo no se puede hablar de una relación directa entre uniformidad de velocidades y tiempo de mezcla. Un ejemplo de lo anterior es el caso del tratamiento eductor 0, el cual tiene coeficientes de uniformidad significativamente menores que rociador 45, sin embargo los tiempos de mezcla de este último tratamiento fueron significativamente mayores.

5.6 Fuerza impulsora

Las diferencias obtenidas entre los tres tratamientos donde se utilizó eductor en comparación al tratamiento rociador 45, pueden explicarse en gran medida por el aporte del caudal, ya que es un factor que se ocupa directamente en el cálculo de la fuerza impulsora. El crecimiento acelerado en las curvas de los tratamientos de eductores, a medida que se usaron caudales mayores, se explica principalmente por el efecto amplificador de flujo que genera el venturi, el cual crece exponencialmente a medida que se ingresa un caudal mayor.

A priori, la fuerza impulsora parece ser un buen parámetro para explicar tiempos de mezcla, ya que para su cálculo incorpora, entre otros factores, caudal, velocidad de chorro del sistema de entrada y velocidad promedio de la columna de agua del estanque. En este mismo sentido Fox y Gex (1956 *fide* Patwardhan & Gaikwad 2003) señalan que el tiempo de mezcla puede estar correlacionado con la fuerza impulsora, sin embargo, al comparar las curvas de los distintos tratamientos, no se apreció una relación causa-efecto entre estos dos factores, ya que, por ejemplo, la fuerza impulsora del tratamiento eductor 0 fue mayor que la del eductor 45, sin embargo los tiempos de mezcla de este último tratamiento, bajo los tres caudales de trabajo, fueron bastante menores a los obtenidos con eductor 0°. Estas diferencias pueden explicarse a partir de los valores de velocidad promedio necesarios para el cálculo de la F_i , donde no existe una asociación estricta entre velocidad promedio y tiempos de mezcla, aplicable a diferentes sistemas de entrada de agua, por lo que tampoco se podrá extrapolar una relación de ese tipo para la fuerza impulsora.

5.7 Discusión global

Las variaciones de caudal y los ángulos de orientación de los chorros de los sistemas de entrada explicaron, en gran parte, los tiempos de mezcla obtenidos por cada tratamiento. En primer lugar el caudal de entrada ejerció un papel importante porque determinó las velocidades de los chorros que aportaron la energía necesaria para mover el agua dentro del estanque, y, por otra parte, los diferentes ángulos de ataque de los chorros generaron los patrones de circulación del flujo. Los tiempos de mezcla de cada tratamiento se explican fundamentalmente por la interacción entre el caudal y el ángulo, quienes además determinaron las magnitudes de diferentes factores hidrodinámicos (fuerza impulsora, velocidad promedio ponderada y coeficiente de uniformidad) que se midieron con el fin de encontrar alguna relación que explicara los tiempos de mezcla. Cada uno de estos factores hidrodinámicos no fue capaz, por sí solo, de explicar los tiempos de mezcla observados en los cuatro tratamientos. Lo anterior se debe principalmente a que la mezcla es un proceso complejo donde interfieren una gran cantidad de variables, por lo que, claramente, existen elementos importantes que los factores calculados no consideran, lo cual genera que no se pueda establecer una relación causa-efecto entre un determinado factor hidrodinámico y los diferentes tiempos de mezcla. A pesar de esto las gráficas de cada uno de estos factores entregan información útil para la selección y configuración de un sistema de entrada basado en criterios adicionales al tiempo de mezcla, como por ejemplo velocidades óptimas y/o niveles de uniformidad en la columna de agua deseados para determinadas especies de peces u otros organismos de cultivo.

6 Conclusión.

El sistema eductor mostró un mejor desempeño que el sistema rociador 45, al lograr tiempos de mezcla significativamente menores, alcanzando los tiempos más bajos en configuraciones de 45° y 45°-45°.

La relación entre el caudal de entrada y el ángulo de ataque de los chorros del sistema de entrada determinó los tiempos de mezcla de los cuatro tratamientos. Por otra parte elementos hidrodinámicos como la fuerza impulsora, la velocidad promedio y el coeficiente de uniformidad dependen de la interacción de ambos factores principales mencionados anteriormente. Estos elementos, además de la velocidad de los chorros de los sistemas de ingreso de agua, no presentaron relaciones directas entre sus magnitudes y los tiempos de mezcla por lo que no se recomienda su uso como elementos que expliquen, por sí solos, este proceso.

A pesar de que el eductor fue capaz de conseguir una mezcla homogénea en tiempos cortos y con bajo caudal, éste a lo más podrá ser reducido a niveles que aseguren mantener las condiciones de calidad de agua de las especies cultivadas, como por ejemplo, la remoción de los desechos metabólicos. Por otra parte, antes de implementar el uso de eductores como sistemas de entrada de agua en estanques de uso acuícola es necesario realizar una serie de investigaciones donde se estudie su efecto sobre factores de interés, tales como su consumo energético, su capacidad de remover desechos sólidos sedimentables y también su efecto sobre el comportamiento y bienestar de los animales de cultivo.

7 Referencias

- Burley, R. & Klapsis, A. 1985.** Flow distribution studies in fish rearing tanks. Part 2 analysis of hydraulic performance of 1m square tanks. *Aquacultural Engineering* 4: 113-134.
- Craig, T. et al 2008.** Environmental best management practices for aquaculture. Blackwell Publishing, EE.UU, 594 pp.
- Cripps, S. 2000.** Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* 22: 33–56.
- Chang, R. 2002.** *Química*. 7^a ed. Editorial Mc Graw Hill.
- Davidson, J et al 2009.** Heavy metal and waste metabolite accumulation and their potential effect on rainbow trout performance in a replicated water reuse system operated at low or high system flushing rates. *Aquacultural Engineering* 41: 136–145.
- Davidson, J & Summerfelt, S. 2004.** Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m³) circular ‘Cornell-type’ dual-drain tanks. *Aquacultural Engineering* 32: 245–271.
- Duarte, S et al 2011.** Influence of tank geometry and flow pattern in fish distribution. *Aquacultural Engineering* 44: 48–54.
- Hu, Y. et al 2010.** Study on the reactive mixing process in an unbaffled stirred tank using planar laser-induced fluorescence (PLIF) technique. *Chemical Engineering Science* 65: 4511–4518.
- Klapsis, A. & Burley, R. 1984.** Flow distribution studies in fish rearing tanks. Part 1- design constraints. *Aquacultural Engineering* 3: 103-118.
- Labatut, R. et al 2007a.** Effects of inlet and outlet flow characteristics on mixed-cell raceway (MCR) hydrodynamics. *Aquacultural Engineering* 37: 158–170.
- Labatut, R. et al 2007b.** Hydrodynamics of a Large-scale Mixed-Cell Raceway (MCR): Experimental studies. *Aquacultural Engineering* 37: 132–143.
- Lekang, O. 2007.** *Aquaculture Engineering*. Blackwell Publishing, Noruega, 354 pp.
- Lunger, A. et al 2006.** Fish stocking density impacts tank hydrodynamics. *Aquaculture* 254: 370–375.
- Lupandin, A. 2005.** Effect of Flow Turbulence on Swimming Speed of Fish. *Biology Bulletin*, Vol. 32, No. 5, pp. 461–466.
- Manjula, P. et al 2010.** Development of mixing time correlation for a double jet mixer. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 85: 115–120.

Masaló, I. 2008a. Hydrodynamic characterisation of aquaculture tanks and design criteria for improving self-cleaning properties. Tesis, Department of Food and Agriculture Engineering and Biotechnology, Technical University of Catalonia, Castelldefels, 54pp.

Masaló, I. et al 2008b. Study of fish swimming activity using acoustical Doppler velocimetry (ADV) techniques. *Aquacultural Engineering* 38: 43–51.

Masaló, I & Oca, J. 2010. Distribution of velocities in aquaculture circular tanks with rotating flow and evaluation of uniformity. Conference report. [<http://hdl.handle.net/2117/10593>] revisado abril de 2012.

Oca, J. & Masaló, I. 2007. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks. *Aquacultural Engineering* 36: 36–44.

Oca, J. et al 2004. Comparative analysis of flow patterns in aquaculture rectangular tanks with different water inlet characteristics. *Aquacultural Engineering* 31: 221–236.

Patwardhan, A & Gaikwad, S. 2003. Mixing in tanks agitated by jets. *Trans IChemE* 81-A.

Patwardhan, A. & Thatte, A. 2004. Process design aspects of jet mixers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Volume 82.

Rasmussen, M. & McLean, E. 2004. Comparison of two different methods for evaluating the hydrodynamic performance of an industrial-scale fish-rearing unit. *Aquaculture* 242: 397–416.

Rasmussen, M. et al 2005. Do fish enhance tank mixing?. *Aquaculture* 250: 162– 174.

Revill, B. 1992. Jet mixing. In Harnby, N et al (Ed) *Mixing in the process industries*. 2ª Edición. 412 pp.

Ross, R. et al 1995. Influence of tank design and hydraulic loading on the behaviour, growth, and metabolism of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture Engineering* 14: 29–47.

Schei, I. et al 1998. Control of water quality and growth performance by solids removal and hydraulic control in rearing tanks. The proceedings of the first international symposium on fisheries and ecology. Turquia.

Schutte & Koerting, 2007. Water jet eductors. *Boletín 2M*. [http://64.201.227.3/~sk/2M_Water_Jet_Eductors.PDF]. Revisado agosto de 2012.

Sears, F. et al 1996. *Física universitaria*. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana. 6ª edición.

Spraying Systems Co. 2008. A guide to optimizing in-tank agitation and mixing using eductors. [de.spray.com/Portals/0/pdf/B635.pdf] revisado Julio 2012.

Summerfelt, S. et al 2000. Hidrodinamics in the ‘Cornell-Type’ dual-drain tank. Conference report. [<http://www.atlantech.ca/public/articles/Solids%20Control2.PDF>] revisado Junio 2012.

Tamotsu, P. 1988. The peripheral jet pump: laboratory model & practical application for incompressible material transport. Tesis, University of British Columbia.

Timmons, M. et al 2002. Sistemas de recirculación para la acuicultura. Fundación Chile, Santiago, 750 pp.

Timmons, M. et al 1998. Review of circular tank technology and management. Aquacultural Engineering 18: 51–69.

Venegas, P. et al 2008. Efecto de tiempos de retención hidráulico de agua, en un sistema de cultivo experimental de un paso para trucha arcoiris (*oncorhynchus mykiss*). Información Tecnológica 19, N°6.

Watten, B. et al 2000. Hydraulic characteristics of a rectangular mixed-cell rearing unit. Aquacultural Engineering 24: 59–73.

Zughbi, H. & Ahmad, I. 2005. Mixing in liquid-jet-agitated tanks: effects of jet asymmetry. Ind. Eng. Chem. 44: 1052-1066.

Zughbi, H. & Rakib, M. 2004. Mixing in a fluid jet agitated tank: effects of jet angle and elevation and number of jets. Chemical Engineering Science 59: 829 – 842.

Anexos

Anexo I

Velocidades mínimas y máximas para salmónidos

Al analizar las magnitudes de velocidades promedio ponderada de la columna de agua obtenidas con los tratamientos de eductor, nace la duda respecto a si este sistema genera velocidades demasiado altas para el cultivo de peces, en especial de salmónidos que son las especies de mayor cultivo en nuestro país.

La Tabla 7 muestra las velocidades mínimas y máximas recomendadas para el cultivo de salmónidos según su tamaño, desde 1 a 40 cm de longitud (Davidson & Summerfelt 2004; Timmons *et al*, 2002).

Tabla 7: Velocidades mínimas y máximas recomendadas para salmónidos entre 1 y 40 cm de longitud

Longitud [cm]	Vmin [cm/s]	Vmax [cm/s]	Longitud [cm]	Vmin [cm/s]	Vmax [cm/s]
1	0,5	5,3	21	10,5	35,7
2	1,0	8,1	22	11,0	36,8
3	1,5	10,5	23	11,5	37,8
4	2,0	12,6	24	12,0	38,9
5	2,5	14,5	25	12,5	39,9
6	3,0	16,2	26	13,0	40,9
7	3,5	17,9	27	13,5	41,9
8	4,0	19,5	28	14,0	42,8
9	4,5	21,0	29	14,5	43,8
10	5,0	22,4	30	15,0	44,7
11	5,5	23,8	31	15,5	45,7
12	6,0	25,1	32	16,0	46,6
13	6,5	26,4	33	16,5	47,5
14	7,0	27,7	34	17,0	48,4
15	7,5	28,9	35	17,5	49,3
16	8,0	30,1	36	18,0	50,2
17	8,5	31,3	37	18,5	51,1
18	9,0	32,4	38	19,0	51,9
19	9,5	33,6	39	19,5	52,8
20	10,0	34,7	40	20,0	53,6

Al comparar estos valores con las velocidades promedio ponderada del estanque alcanzadas por cada tratamiento bajo los tres caudales de trabajo (Tabla 4), se tiene que cada sistema permite cultivar salmónidos dentro de los rangos de talla que muestra la Tabla 8.

Tabla 8: Rango de tallas de salmónidos que se podrían cultivar bajo condiciones óptimas de velocidad, por tratamiento.

Tratamiento	Rango [cm]	Magnitud del rango [cm]
Rociador 45	7-12	5
Eductor 45-45	18-34	16
Eductor 0	22-38	16
Eductor 45	27-50	23

En base a los datos anteriores se puede apreciar que el tratamiento rociador 45 permite el cultivo de peces de menor tamaño, pero genera velocidades insuficientes para peces sobre los 12 cm de longitud, a un caudal de 8 L/min, por lo que si se quisiera tener peces más grandes debería aumentarse la fuerza impulsora generada por el dispositivo, reduciendo el área de los orificios y/o aumentar el caudal de entrada según recomienda Labatut (2007a). A pesar de esto el aumento de velocidades que se puede lograr con el rociador al ingresar mayor caudal no es muy significativo en comparación a las velocidades promedio generadas por los eductores.

Si bien el sistema eductor, en las configuraciones estudiadas en este trabajo, permite generar velocidades mínimas para el cultivo de salmónidos sobre los 18 cm es importante destacar que para el análisis no se consideraron las velocidades de la columna de agua en la zona cercana al chorro de salida del eductor, donde las magnitudes son mucho mayores, por lo que se recomienda la realización de experimentos donde se estudie su efecto sobre los peces, tanto en su comportamiento como en la eventual generación de lesiones.