

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



**ANÁLISIS ADIMENSIONAL PARA DETERMINAR TIEMPOS DE MEZCLA Y
CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA EN UN ESTANQUE CIRCULAR DE
USO ACUÍCOLA**

HERALDO GUSTAVO VALLEJOS GUZMÁN

**INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL**

Profesor Guía
DIEGO CAAMAÑO A.

Profesor Informante
PABLO VENEGAS C.

Concepción, Enero 2016

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo caracterizar una función matemática para la cuantificación de tiempos de mezcla en estanques circulares utilizados en acuicultura. El método utilizado considera la aplicación de un análisis dimensional estimado a través del teorema π de Buckingham.

Los resultados del análisis dimensional se combinan con un estudio experimental que registra los tiempos de mezcla para varios estanques circulares sometidos a distintas condiciones de flujo. Los experimentos se realizaron en el Laboratorio de Biotecnología e Ingeniería Acuícola de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Se estudiaron tres estanques circulares de distintos diámetros sometidos a distintas inyecciones de caudal, inyectado por medio de dos dispositivos diferentes denominados educutores.

Como resultado se presentan dos ecuaciones que indican el tiempo de mezcla para cada dispositivo educutor utilizado en función del diámetro del estanque, la altura del agua y el caudal de inyección. Las regresiones aplicadas indican un buen ajuste de los resultados para ambos educutores, con una variabilidad promedio de los datos de 3.7% en el tiempo de mezcla final del estanque.

Se determinó que el educutor más pequeño tiene la capacidad de producir menores tiempos de mezcla, pero ésta está limitada a un tamaño crítico del estanque de 1.93m de diámetro. Puesto que para estanques de mayor diámetro el educutor de mayor tamaño ofrece mejores resultados en los tiempos de mezcla.

Abstract

This research aims to characterize a mathematical function for quantifying mixing times in circular tanks used in aquaculture. The method considers the application of an estimated through Buckingham π theorem dimensional analysis.

The results of dimensional analysis combined with an experimental test that records the mixing times for various circular tanks under different flow conditions. The experiments were performed at the Laboratorio de Biotecnología e Ingeniería Acuícola de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Three circular basins of different diameters subjected to various flow injection, injected through two different devices known eductors were studied.

Results in two equations which indicate the mixing time for each eductor device used according to the diameter of the pool, the water depth and the injection flow are presented. Applied regressions indicate a good fit of the results for both eductors, average data variability of 3.7% in the final mix time pond.

It was determined that the smallest eductor has the ability to produce lower mixing times, but this is limited to a critical size of the pool of 1.93m in diameter. Since pond larger diameter larger eductor provides better results in the mixing times.

*A mi madre y hermanas,
por su sacrificio
y apoyo incondicional*

Agradecimientos

A mi madre Guadalupe Guzmán, por los valores que me ha inculcado, el apoyo y su esfuerzo para darme una buena educación en la vida. Eres siempre un ejemplo de sacrificio y voluntad.

A mis hermanas por ser parte fundamental de mi vida y brindarme el apoyo incondicional en todos estos años. A mis amigos quienes fueron fundamentales en esta etapa, en especial a Olga Cárdenas, por su compañía y ayuda durante estos años de universidad.

Al Profesor Dr. Diego Caamaño por su apoyo, ayuda y paciencia en esta etapa final de mi proceso universitario.

Índice de Contenidos

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Hipótesis.....	2
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES	3
2.1	Hidrodinámica de estanques de cultivo.....	3
2.1.1	Estanques circulares	3
2.1.2	Sistema de entrada de agua lateral en estanque	4
2.1.2.1	Eductor.....	5
2.1.3	Velocidades del flujo.....	7
2.1.3.1	Velocidad de entrada proporcionada por eductor	8
2.1.3.2	Perfil de velocidades en el estanque	10
2.1.4	Mezcla en el estanque	11
2.1.4.1	Mezcla en eductor	12
2.1.4.2	Mezcla en jet.....	13
2.1.4.3	Mezcla patrón de flujo celda secundaria.....	14
2.2	Análisis dimensional	17
2.2.1	Semejanza geométrica.....	17
2.2.2	Semejanza cinemática	18
2.2.3	Semejanza dinámica.....	18
2.2.4	Grupos adimensionales importantes en mecánica de fluidos.....	19
2.2.5	Teorema números π de Vaschy-Buckingham	21
3	MÉTODOS	23

3.1	Descripción del sistema de recirculación de agua utilizado.....	23
3.2	Posición y ubicación del sistema de entrada de agua.....	24
3.3	Experimento en laboratorio.....	25
3.3.1	Medición mezcla estanque.....	26
3.3.2	Medición de velocidades en estanque.....	27
3.3.2.1	Aceptación o rechazo de serie de velocidad:.....	29
3.4	Lista apropiada de variables posibles de medición.....	31
3.5	Selección de variables.....	31
3.5.1	Selección por eductor.....	32
3.5.2	Selección por mezcla en estanque.....	33
3.6	Análisis de datos y elementos hidrodinámicos.....	34
3.6.1	Velocidad media ponderada de rotación.....	34
3.6.2	Estimación del tiempo de mezcla.....	35
3.6.3	Estimación de regresiones, parámetros estadísticos y patrones de velocidad.....	35
4	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	36
4.1	Selección de variables de mayor influencia en el análisis.....	36
4.1.1	Mezcla primaria producto del jet.....	36
4.1.2	Mezcla en la vertical.....	37
4.1.3	Mezcla hacia el centro.....	38
4.2	Determinación de grupos adimensionales (Aplicación teorema π).....	39
4.3	Resumen experimento.....	44
4.3.1	Patrón de velocidades.....	44
4.3.2	Patrón de mezcla.....	46
4.4	Velocidad promedio, caudal de recirculación y tiempos de mezcla.....	47
4.5	Combinación de grupos adimensionales.....	51
4.6	Ajuste de regresión.....	53

4.6.1	Ajuste de regresión Eductor 1	54
4.6.2	Ajuste de regresión Eductor 2.....	56
4.7	Influencia del número de Reynolds y Froude en tiempo de mezcla.....	59
4.8	Elección de eductor por estanque	61
5	CONCLUSIONES	64
6	REFERENCIAS.....	65
	ANEXO A: Tablas de datos resumen del experimento.	67

Índice de Figuras

Figura 1: Dispositivo utilizado en experiencias: Eductor.	4
Figura 2: Componentes de un eductor.	5
Figura 3: Funcionamiento básico de ingresos y salida de fluido en eductor.	6
Figura 4: Disminución de diámetros en boquilla de eductor.	9
Figura 5: a) Ilustración vista en planta de perfil de velocidades en estanques circulares, b) Velocidad puntual respecto al radio con ingreso y salida de agua. Fuente Masaló (2010).	10
Figura 6: Ilustración perfil de velocidades en la vertical para estanque circular.	11
Figura 7: Mezcla producida en eductor por interacción de dos fluidos.	12
Figura 8: Comportamiento de un jet sumergido.	13
Figura 9: Representación fenómeno patrón de flujo secundario producto del gradiente de altura de agua.	14
Figura 10: Comportamiento hidráulico generado por interacción de flujo primario y secundario.	15
Figura 11: Representación de fuerzas en estanque que interfieren en la generación del patrón de flujo secundario.	16
Figura 12: Diagrama del sistema de acuicultura con recirculación utilizado en los ensayos.	23
Figura 13: Posición de dispositivo de inyección de agua a 45° respecto al centro del estanque, vista en planta.	24
Figura 14: Posición de eductor utilizado en la experiencia.	25
Figura 15: Ilustración de sección en donde se tomaron las muestras de color. (a) Estanque de donde se produce la mezcla. (b) Estanque de recirculación. (c) Punto donde se tomaron las muestras en el término de la tubería de drenaje.	27
Figura 16: Estanque con velocímetro acústico instalado utilizado en la medición de velocidades de la experiencia.	28

Figura 17: Ilustración de los 9 puntos registrados en el estanque.....	29
Figura 18: Dimensiones de los diferentes eductores disponibles en el mercado. Fuente Spraying Systems Co., 2008.	32
Figura 19: Eductores utilizados en el estudio.	33
Figura 20: Mezcla inicial del jet y formación de anillo de color.	36
Figura 21: Mezcla en la vertical. (1) Sección de anillo primario producido por la mezcla. (2) Altura de anillo primario de mezcla.	37
Figura 22: Mezcla hacia el centro. (1) Anillo de anilina primario. (2) Sección de agua sin mezcla.	38
Figura 23: Isolíneas de velocidad (cm/s) en sección de medición, para caudal de 24.5 l/min en estanque 3, Eductor 2.	44
Figura 24: Representación de isolíneas de velocidad (cm/s) para corte transversal de Estanque 3.	46
Figura 25: Curva de color de anilina para Estanque 3, con inyección de caudal 9 l/min, Eductor 1.	47
Figura 26: Velocidades alcanzadas en los ensayos con eductor 1, para cada caudal de recirculación. Se agrega línea de tendencia Exponencial para Estanque 1.....	48
Figura 27: Velocidades alcanzadas en los ensayos con eductor 2, para cada caudal de recirculación.....	49
Figura 28: Comparación E1 y E2 para tiempos de mezcla en estanque 1.	50
Figura 29: Comparación E1 y E2 para tiempos de mezcla en estanque 2.	50
Figura 30: Comparación E1 y E2 para tiempos de mezcla en estanque 3.	50
Figura 31: Relación de las grupos adimensionales seleccionadas para todos los estanques usando Eductor 1.....	52
Figura 32: Relación de las grupos adimensionales seleccionadas para todos los estanques usando Eductor 2.....	52
Figura 33: Relación de grupos adimensionales para cada eductor.	53

Figura 34: Regresión Hyperbolic Decline y base de datos experimentales aplicada a grupos adimensionales para el Eductor 1.....	54
Figura 35: Regresión Hyperbolic Decline y base de datos experimentales aplicada a grupos adimensionales para el Eductor 2.....	57
Figura 36: Número de Reynolds en variación del tiempo de mezcla para E1 y E2.....	60
Figura 37: Número de Froude en variación del tiempo de mezcla para E1 y E2.	60
Figura 38: Comparación de puntos más significativos en superposición de regresiones para E1 y E2.....	61

Índice de Tablas

Tabla 1: Velocidades mínimas y máximas recomendadas para salmónidos entre 1 y 40 cm de longitud.....	8
Tabla 2: Características de los estanques utilizados en la experiencia.	25
Tabla 3: Precisión de ensayos según parámetro estadístico error relativo.....	30
Tabla 4: Tamaño mínimo aceptable de la muestra (n) para un 95% de confianza.	30
Tabla 5: Descomposición de variables del análisis adimensional en sus dimensiones básicas.	40
Tabla A.1: Resumen de variables medidas en Estanque 1.....	67
Tabla A.2: Resumen de variables medidas en Estanque 2.....	67
Tabla A.3: Resumen de variables medidas en Estanque 3.....	67

Nomenclatura

π_i	Número adimensional i-ésimo
c_v	Coefficiente de velocidad propia de la boquilla interior
c	Velocidad del sonido (m/s)
C	Coefficiente de variación
D	Diámetro del estanque (m)
D_a	Diámetro boquilla interior eductor (m)
D_b	Diámetro entrada eductor flujo arrastrado (m)
D_x	Diámetro inicial de reducción en la boquilla interior (m)
E_1 , Eductor 1	Eductor de menor dimensión. Nozzle No.46550-1/4
E_2 , Eductor 1	Eductor de mayor dimensión. Nozzle No.46550-3/8
e_r	Error relativo para la media aritmética
Est_1 , Estanque 1	Estanque de 500 (l)
Est_2 , Estanque 2	Estanque de 2000 (l)
Est_3 , Estanque 3	Estanque de 3600 (l)
F_c	Fuerza centrífuga por unidad de volumen (kg m/s^2)
F_p	Fuerza de masa por unidad de volumen (kg m/s^2)
Fr	Número de Froude
g	Aceleración de gravedad (m/s^2)
H	Altura agua del estanque (m)
L	Longitud (m)
O	Cantidad de oxígeno disuelto (ppm)
Q	Caudal de entrada (m^3/s)
R	Radio estanque (m)
r^2	Coefficiente de determinación
Re	Número de Reynolds

S	Desviación estándar de la media
t	Tiempo de mezcla (s)
T	Temperatura del agua (°C)
V	Velocidad promedio del flujo dentro de estanque (m/s)
V_H	Velocidad particular en cada punto de la sección respecto a la altura (m/s)
V_i	Velocidad puntual respecto al radio y altura del estanque (m/s)
V_s	Velocidad de salida del chorro en boquilla interior (m/s)
Δh	Diferencia altura de agua entre centro y borde estanque (m)
Δp	Cambio en la presión (Pa)
ε	Rugosidad del estanque (m)
μ	Viscosidad dinámica o absoluta (kg/(m s))
ρ	Densidad del agua (kg/m ³)
σ	Tensión superficial (N/m)
γ	Peso específico del agua (N/ m ³)
y	Media aritmética

1 INTRODUCCIÓN

El proceso de mezcla en estanques es quizás uno de los procesos de mayor importancia que se da en la industria de la acuicultura. Tanto la transferencia de calor como la transferencia de masa son afectadas en la mezcla, Holland (1996) define el proceso de mezcla como “La entremezcla entre dos o más porciones disimiles de material, que da lugar a un nivel de uniformidad deseado en el producto final, tanto en términos físicos como químicos”. Entonces la mezcla tiene directa relación con la calidad del agua en el estanque, consecuentemente con el crecimiento o incluso supervivencia de las especies cultivadas.

Los tiempos de mezcla en el sistema fueron realizados a través de un análisis adimensional calibrando mediante experimentos realizados en el laboratorio de Ing. Acuícola de la UCSC.

Se definen y estudian diferentes escenarios sobre la base de diversas configuraciones Eductor/ Diámetro de estanque / Caudal.

Con fines de optimizar estos procesos de mezcla este estudio analiza en laboratorio y analíticamente, la utilización de artefactos aceleradores del proceso (Spraying Systems Co., 2008). Lo anterior entendiendo que menores tiempos de mezcla están directamente relacionados con el aumento de la productividad.

Recientes investigaciones indican el beneficio de entender las ventajas cuantitativas de utilizar sistema de inyección de agua no convencional (Venegas et al., 2014). Lo anterior indica una necesidad de analizar exhaustivamente las condiciones y variables hidrodinámicas que se generan en el interior de un estanque.

1.1 Hipótesis

A través de mediciones es factible adimensionalizar una expresión matemática que determine el tiempo de mezcla en estanques circulares.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Caracterización de una función matemática para la cuantificación de tiempos de mezcla en estanques circulares.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar procesos hidrodinámicos que generen mezcla dentro de estanques circulares.
- Caracterizar condiciones y tamaño de eductor óptimo para obtener tiempos de mezcla mínimos.
- Cuantificar tiempos de mezcla a través de expresiones matemáticas resultantes del análisis.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES

2.1 Hidrodinámica de estanques de cultivo

2.1.1 Estanques circulares

El ahorro de costos que se ha alcanzado en el cultivo de peces para consumo humano, con el uso de grandes estanques y estrategias de gestión de producción ha sido un ítem ha considerar al momento de optar un sistema de trabajo (Timmons et al., 1998).

El uso de estanques circulares de cultivo para la producción de peces de consumo humano, son atractivos por las siguientes razones (Timmons, 2002):

- Simple mantención
- Ofrece una calidad uniforme del agua;
- Permite operar en un amplio rango de velocidades de rotación para optimizar salud y condición física de los peces.
- Los sólidos sedimentables pueden ser eliminados rápidamente por el desagüe central
- Tiene a disposición diseños que permiten la observación visual o automática de residuos de alimentos para estimar el estado de saciedad.

Estas ventajas deben sopesarse con las dificultades que pudieran surgir producto de los estanques de cultivo de mayor tamaño, como por ejemplo, la clasificación y recolección de peces, el riesgo de mayor pérdida económica por falla del estanque debido a razones mecánicas o biológicas, etc.

Además los estanques circulares tienden a alcanzar estados de mezcla relativamente completas, es decir, la concentración de un compuesto disuelto en el agua que fluye en el estanque cambia rápidamente la concentración que existe en todo el estanque. Por lo tanto, si un mezclado adecuado se puede lograr, todos los peces dentro del tanque están expuestos a la misma calidad del agua. Buena calidad del agua se puede mantener en todo el estanque

de cultivo circular mediante la optimización del diseño de la estructura de entrada de agua y mediante la selección de un tipo de cambio de agua, para que la calidad del agua no disminuya el límite de la producción cuando el sistema alcanza la capacidad de carga máxima. Por último la capacidad de auto-limpieza es una ventaja clave de los estanques circulares. La literatura recomienda la relación diámetro-profundidad de proporción 5:1 a 10:1 (Oca & Masalo, 2013).

Los estanques están diseñados con las consideraciones de costo de producción, la utilización del espacio, el mantenimiento de la calidad del agua y la gestión de los peces. Hay una tendencia definida hacia grandes estanques de cultivo circulares para la producción de pescado para consumo humano. La selección de un diámetro del estanque en relación a profundidad también se ve influenciada por factores como el costo del espacio físico, la densidad de la población de peces y los métodos de alimentación de peces (Timmons et al, 2002).

2.1.2 Sistema de entrada de agua lateral en estanque

El sistema de entrada en los estanques de cultivo tiene alta importancia en el comportamiento hidrodinámico producido, por lo que la elección del dispositivo en la industria de la acuicultura debe ser en base a la obtención de características efectivas de rotación del agua, mezcla y limpieza de sólidos. Además debe evitar que los patrones de flujo lleven el agua limpia, o agua con mezcla inducida, directamente hacia el sistema de salida impidiendo que los peces aprovechen de forma eficiente las características del fluido inyectado (Lekang, 2007).



Figura 1: Dispositivo utilizado en experiencias: Eductor.

El sistema de entrada en este estudio fue el dispositivo eductor. Las características hidrodinámicas presentan considerables beneficios para la acuicultura, sin embargo, este dispositivo de inyección no es utilizado actualmente de forma generalizada en la industria acuícola (Venegas et al., 2014).

2.1.2.1 Eductor

El dispositivo eductor tiene amplios usos en diferentes industrias, el factor común lo constituye la necesidad de alcanzar rápidos tiempos de mezcla.

En el mercado existe una gran diversidad de tamaños y materiales de fabricación que resisten altas presiones y corrosión (Schutte & Koerting, 2007).

Los componentes generalizados de un eductor son la boquilla que conduce el chorro de salida a alta velocidad, y el venturi o difusor que amplifica condiciones de mezcla y caudal de salida del eductor (Figura 2).

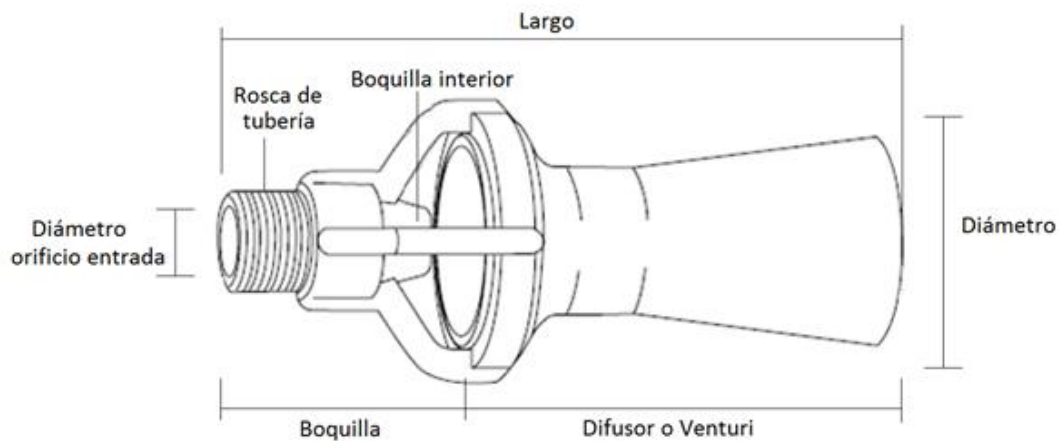


Figura 2: Componentes de un eductor.

Estos dispositivos utilizan la energía cinética de un líquido que sale a presión para arrastrar el líquido en el cual está sumergido y aumentar el caudal de salida respecto al ingresado por la boquilla, mezclando ambos fluidos. El chorro que sale de la boquilla genera en su contorno una zona de baja presión que arrastra el líquido circundante haciéndolo ingresar al difusor.

La relación entre el volumen de líquido que ingresa a la boquilla y el que finalmente es expulsado por el difusor varía según condiciones de caudal ingresado y configuración de educor. Algunos fabricantes señalan que la relación entre caudal de entrada ingresado por boquilla y caudal de salida del educor es aproximadamente de 1:4 pudiendo llegar fácilmente hasta 1:6 según condiciones en que se utilice Spraying Systems Co.(2008). El esquema básico de funcionamiento del educor se presenta en la Figura 3.

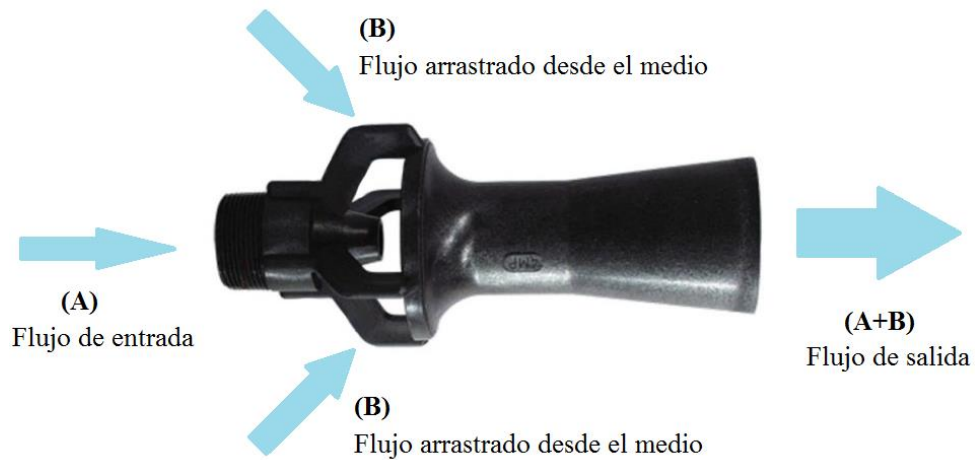


Figura 3: Funcionamiento básico de ingresos y salida de fluido en educor.

2.1.3 Velocidades del flujo

La distribución de velocidades en el estanque es un factor importante en términos de tiempos de mezcla y su homogeneidad, sin embargo de acuerdo a los objetivos de este estudio no se ha descuidado la influencia sobre los peces cultivados.

Existe una interrelación entre velocidad del agua y actividad natatoria de los peces (Masaló, 2010). Las velocidades del agua y su distribución en el estanque de cultivo influyen en la salud de los peces, el tono muscular, la respiración e incluso las zonas donde los peces se ubiquen, 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 velocidad del agua para lograr mínimos tiempos de mezcla debe ser lo mayor posible pero restringida para evitar la fatiga física de los peces. Por otra parte se requiere que la velocidad 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).

De este modo las velocidades óptimas de rotación dependerán de la especie y tamaño de los peces cultivados, Klapsis y Burley (1984).

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

Tabla 1: 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

2.1.3.1 Velocidad de entrada proporcionada por eductor

El caudal que circula en el sistema es una de las variables principales en el comportamiento hidrodinámico de un estanque, ya que éste produce diferentes velocidades en el flujo debido a las condiciones de uso y geometría del eductor. Las velocidades generadas en el sistema de inyección dan origen al chorro de salida en el eductor y por consiguiente la potencia necesaria para generar un flujo de patrón circular en el interior del estanque.

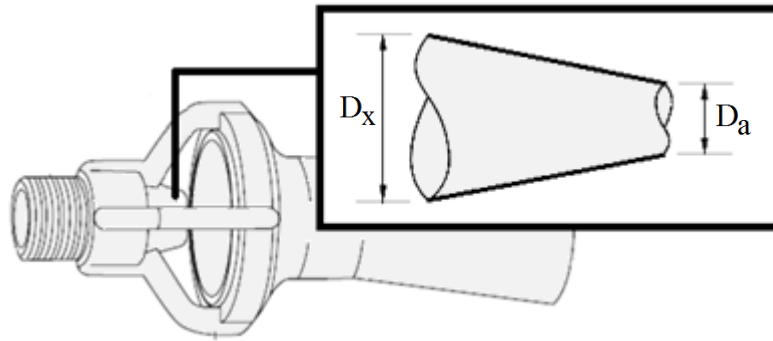


Figura 4: Disminución de diámetros en boquilla de educor.

La pérdida de energía en el sistema por la reducción del diámetro en la boquilla del educor viene dado por

$$h_{loc} = \left(\frac{1}{c_v^2} - 1 \right) \frac{V_s^2}{2g} \quad \text{Ec.1}$$

La potencia del chorro eyectado en la boquilla del educor se resuelve mediante la combinación de la ecuación de continuidad (continuidad de caudal) y la ecuación de Bernoulli (Rocha 2007).

$$Pot = \gamma Q \frac{V_s^2}{2g} \quad \text{Ec.2}$$

En conclusión la velocidad y potencia producida por el sistema de inyección de agua mediante la reducción de diámetros es uno de los componentes básicos más importantes que redefinen el comportamiento hidrodinámico del estanque, aportando la potencia necesaria para generar patrones dinámicos y cinemáticos fundamentales para optimizar los tiempos de mezcla.

2.1.3.2 Perfil de velocidades en el estanque

El flujo es esencialmente tridimensional, es decir, para cada punto de la corriente el vector velocidad tiene componentes en las tres direcciones (Rocha, 2007).

Para analizar la variación de velocidades en la sección se consideran dos planos de interés transversal y en planta, pues la naturaleza y características geométricas del contorno definen la curva espacial de distribución de velocidades.

En un estanque circular la influencia del contorno y la inyección de agua lateral dan origen a un flujo circular alrededor del centro del estanque. El flujo de descarga a través de la salida ubicada en el centro del estanque, genera un vórtice en la región interna del estanque (Paul et al, 1991; Fisher y Flack, 2002).

El esquema característico de la distribución de velocidades desde una vista en planta se presenta en la Figura 5.

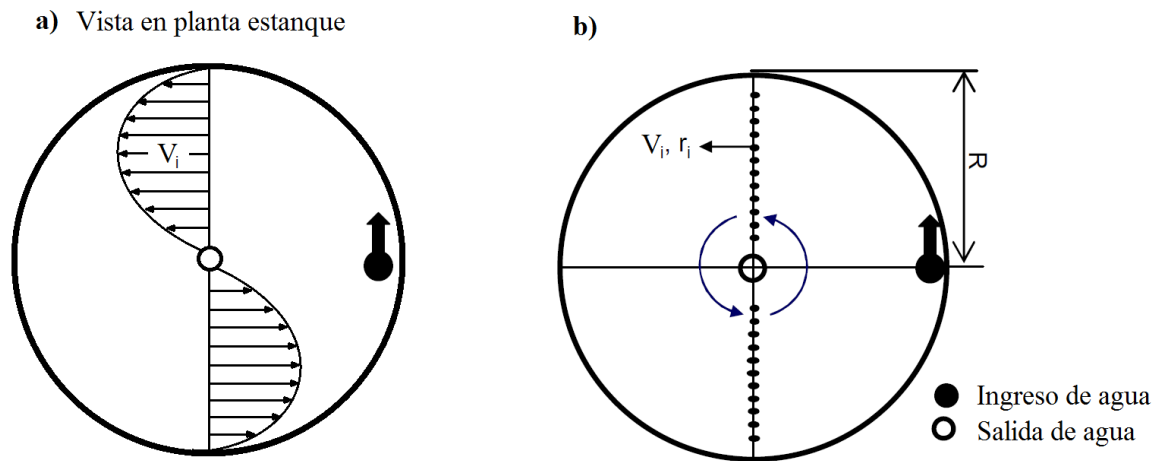


Figura 5: a) Ilustración vista en planta de perfil de velocidades en estanques circulares, b) Velocidad puntual respecto al radio con ingreso y salida de agua. Fuente Masaló (2010).

También, debido a la influencia del fondo, y al igual que en un canal, se define la curva de distribución de velocidades en la vertical, la cual se indica en la Figura 6.

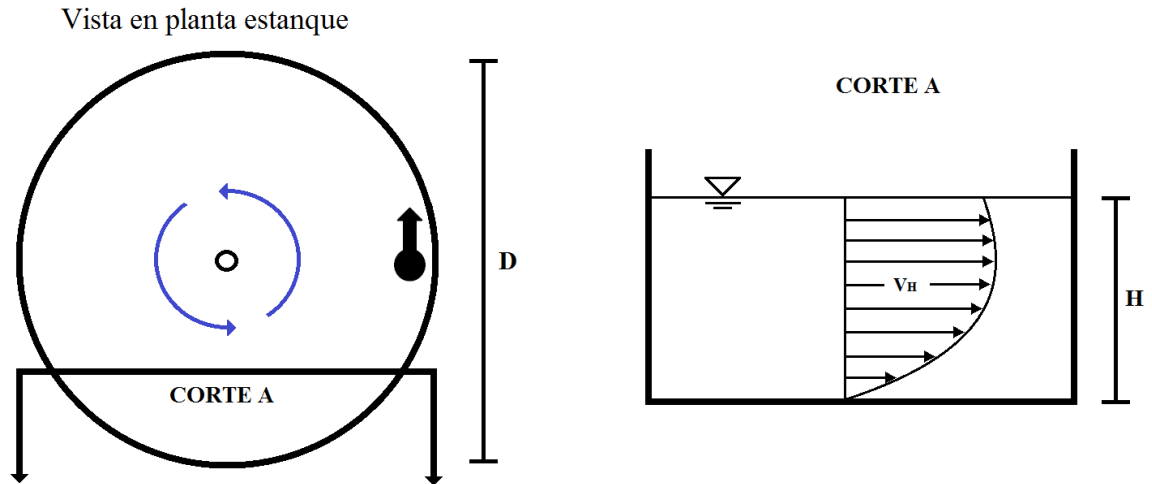


Figura 6: Ilustración perfil de velocidades en la vertical para estanque circular.

En un canal de ancho infinito la velocidad máxima está en la superficie (Rocha, 2007). Pero en un canal rectangular angosto, o en este caso un estanque circular, existe influencia de las paredes y la velocidad máxima se ubica por debajo de los niveles superficiales.

2.1.4 Mezcla en el estanque

Las herramientas más usadas por los acuicultores para generar una mezcla eficiente del flujo en el estanque es la interacción entre los dispositivos de entrada y salida de agua, el caudal y la geometría del estanque (Timmons et al, 2002). Otros mecanismos más eficientes usados en la mezcla de fluidos (por ejemplo las hélices o paletas de mezclado) conllevan una difícil aplicación en acuicultura, por la interacción que pueden tener estos mecanismos con los animales cultivados, así también como el gasto energético que implica su uso.

Si bien la cuantificación de la mezcla experimentalmente es en términos globales en el estanque, para este estudio fue importante definir el origen de la mezcla y así identificar las variables más influyentes para la estimación de los tiempos de mezcla.

2.1.4.1 Mezcla en eductor

La mezcla producida en el eductor se traduce en un porcentaje de mezcla general entre la unión del líquido A y B (Figura 7). El volumen de fluido arrastrado hacia la zona de baja presión dentro del eductor, en contacto con el volumen ingresado al eductor crea una capa turbulenta de mezcla, de la cual se puede deducir que existe mezcla dentro del eductor.

El porcentaje de mezcla dependerá entonces de la velocidad de salida del líquido A en la boquilla del eductor, pues como se ha mencionado anteriormente, el caudal de salida final del eductor (A+B) varía dependiendo del caudal ingresado por tubería (Fluido A), llegando hasta una proporción de 1:6 dependiendo de su configuración (Spraying Systems Co., 2008).

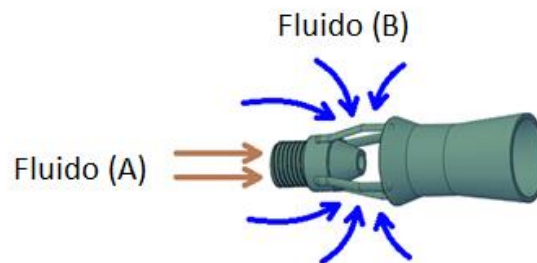


Figura 7: Mezcla producida en eductor por interacción de dos fluidos.

En consideración al jet producido por el eductor, Revill (1992) señala que un chorro turbulento bajo el agua puede dividirse en dos regiones distintas: la región de flujo en desarrollo (aproximadamente dentro del eductor) donde se ubica el núcleo del chorro que se extiende hasta aproximadamente 6 veces el diámetro de la boquilla, y la región completamente desarrollada (jet producto del eductor).

2.1.4.2 Mezcla en jet

El proceso de mezcla producto de un jet sumergido se genera en la zona de interacción del chorro de agua con el volumen del fluido que se encuentra en el estanque.

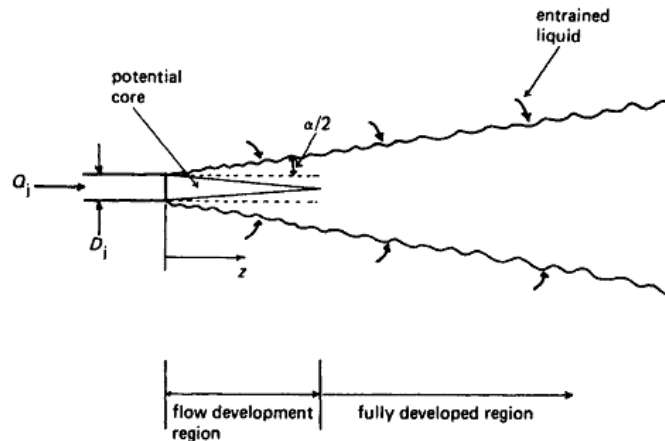


Figura 8: Comportamiento de un jet sumergido.

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 del eductor, 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. Además 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 8). En la región del núcleo, que se extiende hasta aproximadamente 6 veces el diámetro de la boquilla, 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.

2.1.4.3 Mezcla patrón de flujo celda secundaria

Los estanques circulares que son operados por inyección de agua lateral tangencial a la pared del estanque generan un flujo que gira alrededor del centro del depósito denominado patrón primario (Timmons *et al.*, 1998). La relación que existe entre el flujo primario del interior y las paredes laterales del tanque crea un flujo secundario que tiene un componente de flujo radial hacia el interior del estanque el cual genera desplazamientos de volúmenes de agua y posteriormente la mezcla. Este fenómeno es descrito también por autores como Einstein (1926) en comparación con el *sistema de hojas de té*, considerando que las hojas del fondo son desplazadas hacia el centro cuando se gira el líquido con una cuchara. Bajo el mismo sistema se produce una mezcla en el estanque producto de este patrón secundario y el movimiento de la masa de agua hacia el centro del estanque (Figura 9).

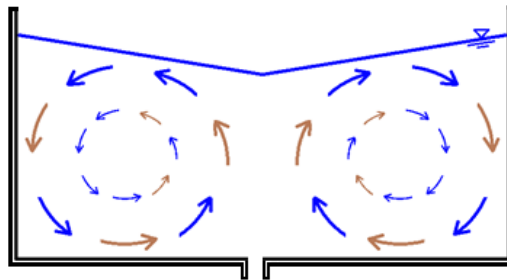


Figura 9: Representación fenómeno patrón de flujo secundario producto del gradiente de altura de agua.

Este flujo radial hacia el interior en la parte inferior del estanque transporta sólidos sedimentables a la salida de flujo en el centro y puede crear la propiedad de auto-limpieza. 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 (Figura 10).

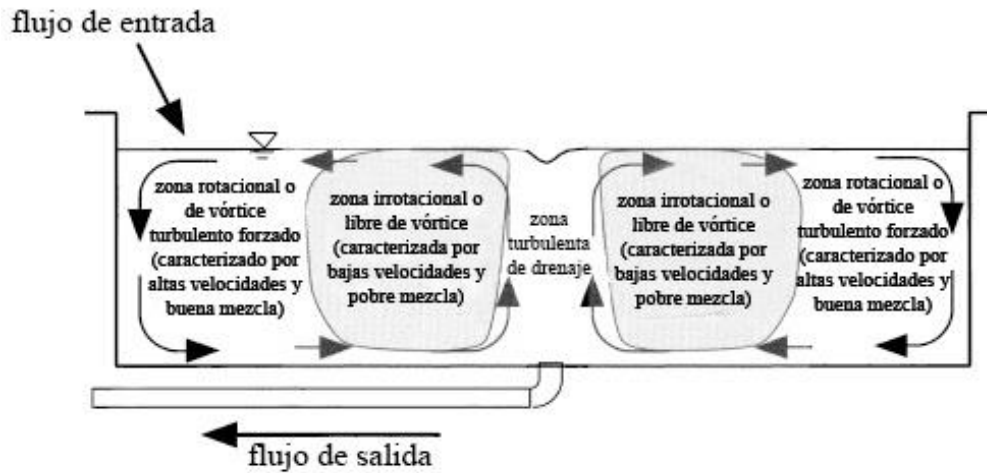


Figura 10: Comportamiento hidráulico generado por interacción de flujo primario y secundario.

Debido a que la zona de flujo irrotacional tiene velocidades de agua más bajas y no se mezcla bien, se puede disminuir el uso eficaz del estanque de cultivo producto de la generación de gradientes de calidad de agua localizados (Timmons *et al*, 1998).

En cuanto a la dinámica del sistema, se puede hacer una comparación con el fenómeno que se produce en las curvas de los meandros, en los cuales, la formación de las celdas de circulación secundaria que se establecen en dirección transversal al sentido primario del escurrimiento pueden ser explicadas en términos de un desequilibrio local entre la fuerza centrífuga y el gradiente de presión (Rozovskii, 1957; Engelund, 1974). De ésta manera se producen fuerzas hidrodinámicas teóricamente iguales a ambos lados del estanque como se muestra en la Figura 11.

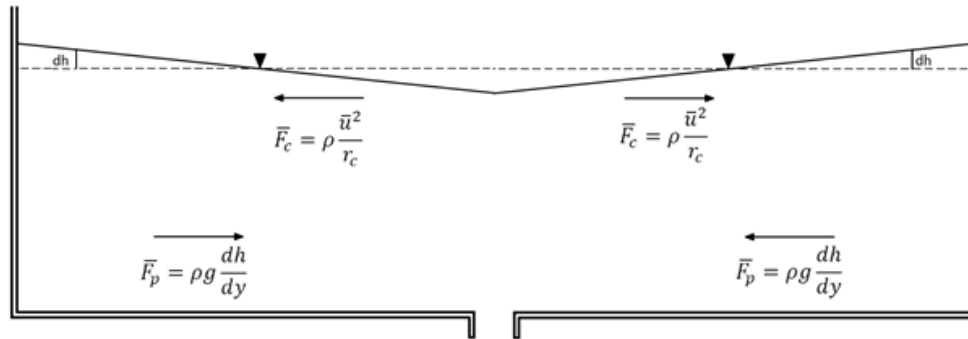


Figura 11: Representación de fuerzas en estanque que interfieren en la generación del patrón de flujo secundario.

Donde F_c es la fuerza centrífuga por unidad de volumen y F_p es fuerza de masa por unidad de volumen. Gran importancia de esta comparación en este estudio recae en la ilustración de las principales variables involucradas en este fenómeno de mezcla, ya que para un correcto análisis dimensional es fundamental de una buena determinación de éstas.

2.2 Análisis dimensional

En el estudio de las variables físicas que presenta un estanque de agua, y como normalmente se hace en casi todos los problemas físicos, se realizan simplificaciones a través de la omisión de variables que no tengan directa incidencia en el comportamiento del fenómeno. A través de esto obtenemos soluciones aproximadas a los resultados reales. Mediante un procedimiento conocido como análisis dimensional, el fenómeno puede formularse como una relación entre un conjunto de grupos adimensionales de las variables, siendo el número de grupos menor que el de variables (Shames, 1995).

Para los casos en los que estas soluciones aproximadas no resultan adecuadas se requiere utilizar las ecuaciones completas sin consideraciones o simplificaciones. Sin embargo, la solución de dichas ecuaciones puede ser mucho más complejas y en muchos casos imposibles de resolver con los métodos actuales.

Por otro lado, la obtención de datos experimentales en laboratorio no siempre es posible o es muy caro. Por lo que normalmente se trata de obtener la mayor información posible del mínimo número de experimentos. Debido a lo anterior es que las simplificaciones adoptan un importante valor no solo en términos representativos del fenómeno sino también en términos de recursos.

El análisis dimensional es una de las herramientas que existe para lograr este objetivo. Los grupos adimensionales que se obtienen sirven para correlacionar los datos y encontrar una presentación objetiva con el mínimo número posible de representaciones gráficas.

2.2.1 Semejanza geométrica

La similitud geométrica es independiente de la clase de movimiento y contempla sólo similitud en la forma del estanque y configuración de eductor. La propiedad característica de los sistemas geoméricamente similares, ya sea figuras planas, cuerpos sólidos o modelos de flujo, es que la relación de cualquier longitud en el modelo con respecto a la longitud correspondiente en el prototipo, es en todas partes igual. Esta relación se conoce

como factor de escala. En este estudio la semejanza geométrica de un estanque, en consideración a otro, queda definida por el diámetro del estanque (D), y diámetros interior y exterior de los eductores estudiados (D_a , D_b). La similitud geométrica además en un contexto general se traduce a la forma de los estanques, es decir, los estanques estudiados son estrictamente circulares. Además, se utilizó el mismo tipo de inyector, variando su tamaño pero considerando su posición y ángulo de ataque.

La rugosidad de los estanques es otro de los factores observados ya que esta característica propia del material de los estanques redefine comportamientos hidrodinámicos.

2.2.2 Semejanza cinemática

La similitud cinemática implica similitud en el movimiento. Esto significa similitud de longitud y en adición similitud de intervalos de tiempo. Cuando los movimientos de los fluidos son cinemáticamente similares, los patrones formados por líneas de corriente son geoméricamente similares en los tiempos correspondientes. El patrón de flujo entonces se define cinemáticamente semejante entre diferentes estanques y sus diagramas de velocidades son estructuralmente similares. En conclusión las variables básicas más importante que representan la semejanza cinemática de los estanques son la velocidad de salida en el eductor y la velocidad en el estanque producto del flujo de carácter circular.

2.2.3 Semejanza dinámica

La similitud dinámica entre dos sistemas geométrica y cinemáticamente similares, requiere que la razón de todas las fuerzas homólogas (incluyendo la fuerza de inercia) en los dos sistemas sea la misma. En este estudio la semejanza dinámica, al igual que semejanza geométrica y cinemática, conlleva un análisis particular del cual se sintetizaron las variables que aporten mayor representatividad para proyectar condiciones hidrodinámicas en diferentes tamaños de estanques. Es entonces que, la fuerza de gravedad y gradiente de

presión producto de la fuerza centrífuga que controla el comportamiento del flujo, siempre son aplicadas de la misma forma y en el mismo lugar del estanque.

2.2.4 Grupos adimensionales importantes en mecánica de fluidos

En la mayor parte de los fenómenos fluidos donde puede ignorarse la transferencia de calor, las variables siguientes pueden ser importantes (Shames, 1995):

1. Cambio en la presión, Δp
2. Longitud, L
3. Viscosidad, μ
4. Tensión superficial, σ
5. Velocidad del sonido, c
6. Aceleración de la gravedad, g
7. Densidad, ρ
8. Velocidad, V

Utilizando estas variables pueden formarse los grupos adimensionales y su significado físico que se describe a continuación:

- Número de Reynolds $Re = \frac{\rho V L}{\mu}$

Relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de fricción, usualmente en función de parámetros geométricos y de flujo convenientes.

- Número de Froude $Fr = \frac{V^2}{L g}$

Relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de gravedad. Si existe una superficie libre, como es el caso de los estanques, el aspecto de esta superficie al formarse ondas se verá directamente afectado por la fuerza de gravedad, de manera que en este tipo de problemas el número de Froude es importante.

- Número de Mach $M = \frac{V}{c}$

Relación entre la raíz cuadrada de las fuerzas inerciales y la raíz cuadrada de las fuerzas originadas por la compresibilidad del fluido. Éste se vuelve muy importante en flujos de alta velocidad, donde las variaciones en la densidad debidas a la presión se vuelven importantes.

- Número de Weber $W_e = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$

Relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de tensión superficial. Este número también requiere la presencia de una superficie libre, pero si están involucrados objetos grandes, como botes en un fluido como el agua, este efecto es muy pequeño.

- Número de Euler $E_u = \frac{\Delta p}{\rho V^2}$

Relación de las fuerzas de presión y las fuerzas inerciales. En ensayos prácticos suele utilizarse el *coeficiente depresión* $\Delta p / (1/2 \rho V^2)$, que es igual al doble del número de Euler.

En la mayor parte de los problemas de ingeniería, sólo algunas de las variables enumeradas anteriormente intervienen en grados apreciables en forma simultánea (Shames, 1995). Por ejemplo, en trabajos de aeronáutica, la tensión superficial y la gravedad no son tan importantes para ser consideradas, así que tanto el número de Froude como el número de Weber no intervienen.

Teniendo una imagen física de lo que significan estos grupos adimensionales, resultó mucho más simple estipular cuáles de ellos son importantes y cuáles pueden no tenerse en cuenta para la presente investigación.

2.2.5 Teorema números π de Vaschy-Buckingham

Existen varios procedimientos para realizar un análisis dimensional, uno de los cuales es el teorema π de Buckingham. Este teorema permite obtener los grupos adimensionales apropiados para cualquier fenómeno físico y naturalmente adecuado para el análisis del estanque de agua estudiado. El número de grupos adimensionales independientes que puede emplearse para describir un fenómeno en el que intervienen “m” variables es igual al número m-n (número de variables – número de dimensiones), donde “n” usualmente es el número de dimensiones básicas necesarias para expresar las variables dimensionalmente (Shames 1995).

En que $f(q_1, q_2, \dots, q_m) = 0$ en donde q_1, q_2, \dots, q_m son magnitudes dimensionales, libre de unidades. Y sea L_1, L_2, \dots, L_n dimensiones básicas (Quintanar 2006).

El método para determinar los grupos adimensionales consiste en la selección de dimensiones de las variables que contenga todas las dimensiones que se estén utilizando en el problema y emplearlas como variables repetitivas, formando grupos adimensionales.

$$[q_i] = L^{a_{1i}} L^{a_{2i}} \dots L^{a_{ni}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{Ec.3}$$

En esencia, el teorema expresa que es posible describir un fenómeno con una cantidad de parámetros adimensionales $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{m-n}$ que es menor que la cantidad de parámetros dimensionales involucrados (q_1, q_2, \dots, q_m)

El análisis dimensional se lleva a cabo en tres etapas (i, ii y iii) que pasan a describirse a continuación.

- i. Establecer una lista apropiada de variables.
- ii. Obtener los grupos adimensionales usando el teorema π de Buckingham.
 1. Enumerar las variables que describen el problema, normalmente son dadas ya que se requiere de experiencia y de conocimiento del problema.
 2. Seleccionar las dimensiones de referencia (n) que corresponden a las variables.
 3. Descomponer las variables en sus dimensiones, de manera tabulada. Para ello se ordenan de más sencillas a más complejas y se desglosan en los exponentes de sus dimensiones.
 4. Elegir las variables de referencia según:
 - Debe ser igual a “ n ” variables de referencia
 - Entre todas deben contener todas las dimensiones
 - Deben ser sencillos e independientes entre sí
 5. Establecer las ecuaciones dimensionales y obtener los números π (π), para ello se plantea el producto de las variables de referencia con cada variable restante. Luego se desglosan en cada dimensión.
 6. Finalmente se verifican los números π (π) obtenidos.
- iii. Determinar experimentalmente la relación funcional entre los números π .

3 MÉTODOS

Se presenta una descripción del sistema de recirculación de agua utilizado en los experimentos y las herramientas que permiten la medición de las variables de interés. Los ensayos experimentales se realizaron en el laboratorio de acuicultura UCSC. El sistema diseñado se repite en 3 estanques de diferentes diámetros que se utilizaron con ambos eductores (escenario 1 y escenario 2), y para diversas condiciones de caudal en recirculación.

3.1 Descripción del sistema de recirculación de agua utilizado

Se utilizó un sistema de cultivo de peces con recirculación que permite el control de varias de las variables seleccionadas como significativas para el análisis. Los componentes del sistema se listan a continuación e indican en la Figura 12.

1. Bomba centrífuga Espa@Iris750M, 0,8 HP
2. Dispositivo de inyección de agua
3. Tanque circular de fibra de vidrio
4. Tubería de drenaje
5. Tanque equalizador

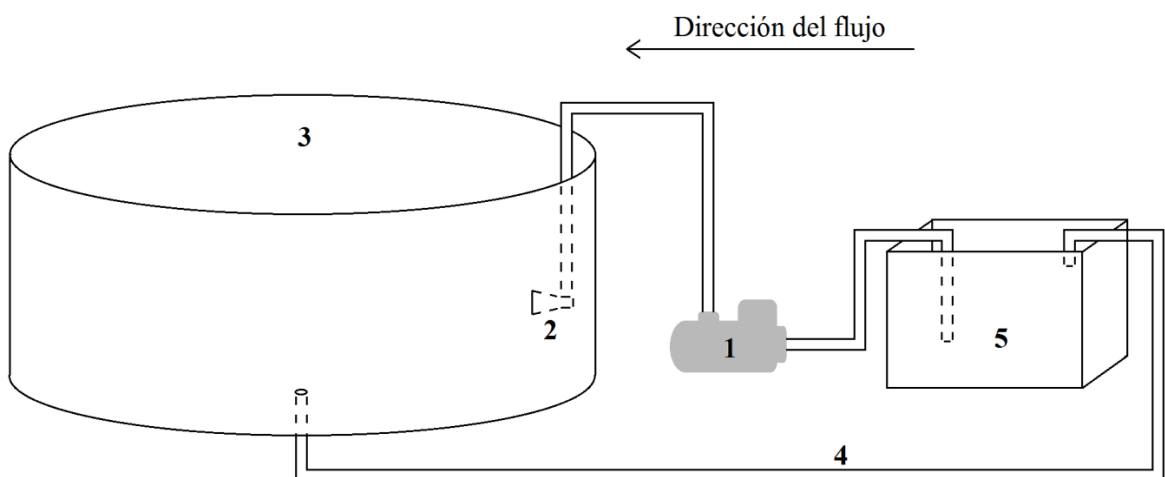


Figura 12: Diagrama del sistema de acuicultura con recirculación utilizado en los ensayos.

El flujo de agua es inyectada al tanque circular por el sistema de inyección eductor y se descarga por el drenaje inferior hacia el estanque ecualizador, luego la bomba centrífuga impulsa el fluido al estanque circular para continuar la recirculación del flujo.

3.2 Posición y ubicación del sistema de entrada de agua

La ubicación de la inyección induce un flujo rotatorio que genera las características adecuadas para el cultivo de peces puesto que produce patrones de circulación de flujo adecuados en velocidad y mezcla (Venegas et al., 2014).

El sistema de entrada consiste en un tubo de PVC 25 mm de diámetro y de largo variable que depende de las dimensiones del estanque utilizado. Se instala cerca de la pared del estanque y en dirección vertical. En su extremo sumergido se conecta el eductor quedando éste paralelo al fondo, es decir, en un ángulo de 90° con respecto al tubo vertical, y de 45° de giro (i.e. ángulo de ataque), tal cual se indica en la Figura 13.

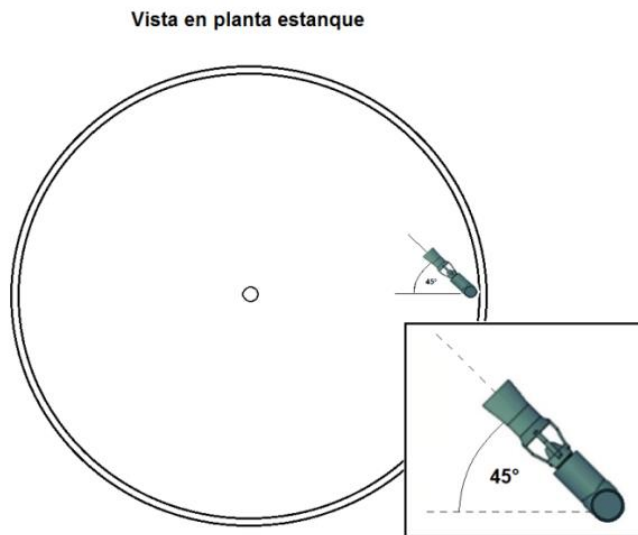


Figura 13: Posición de dispositivo de inyección de agua a 45° respecto al centro del estanque, vista en planta.



Figura 14: Posición de educor utilizado en la experiencia.

3.3 Experimento en laboratorio

Los experimentos fueron realizados en el Laboratorio de Biotecnología e Ingeniería Acuícola de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Se evaluaron las condiciones de mezcla en 3 estanques circulares con flujo inyectado a través de los 2 educadores descritos.

El número de estanques con los que se experimentó fueron tres y sus dimensiones se describen en la Tabla 2.

Tabla 2: Características de los estanques utilizados en la experiencia.

	Diámetro (m)	Altura (m)	Volumen utilizado (m ³)
Estanque 1	1.2	0.9	0.5
Estanque 2	1.88	1.1	2.0
Estanque 3	2.55	1.1	3.6

Todos los ensayos se llevaron a cabo sin la presencia de peces. Estimaciones en la turbulencia inducida por los peces indican un aumento de la difusividad en hasta un tercio en comparación con flujos donde no hay peces (Plew, D. *et al.*, 2015). Por lo que se estudia el caso más desfavorable en la estimación del tiempo de mezcla.

La altura del agua considerada corresponde a lo utilizado usualmente en la industria acuícola y que considera variaciones que definen razones para el diámetro entre 2:1 a 3:1 del diámetro del estanque. La máxima velocidad tangencial se restringió a 50 cm/s, que es considerado apropiado para los peces con una longitud de hasta 36 cm según lo propuesto anteriormente (Tabla 1).

En los ensayos se consideraron tres caudales por cada combinación estanque-educor. Éstos fueron inducidos según las velocidades que produjeron en el estanque, es decir, cada inyección de caudal medida fue inducida con el fin de que las velocidades del flujo generadas permanezcan en los rangos mínimos y máximos establecidos (Ítem 2.1.3).

De los tamaños de educoros disponibles en el mercado, solo los dos educoros más pequeños de los cuatro fueron utilizados en este estudio (Figura 18). Lo anterior debido a que estos dispositivos, según los tamaños de estanque utilizados, son suficientes para generar sistemas hidrodinámicos y velocidades del flujo pertenecientes al rango mencionado.

3.3.1 Medición mezcla estanque

Para cuantificar la evolución de la mezcla dentro del estanque se usó anilina negra marca *Furet*® soluble en agua, a una concentración calculada de 1 g de anilina por 200 litro de agua del estanque, ingresada a través del educor en un pulso de aproximadamente 40 segundos, al igual que lo descrito en los experimentos de Arriagada (2012). El trazador tiene una solubilidad de 36 g/Litro de agua, muy por debajo de la concentración utilizada asegurando que no existan depósitos del trazador ni cambios en las propiedades del agua. La toma de datos se ejecutó a la salida de la tubería de drenaje (Figura 15) adoptando la metodología usada por Burley y Klapsis (1985), método usado tradicionalmente para este tipo de ensayos experimentales (Rasmussen, M. *et al.*, 2005).

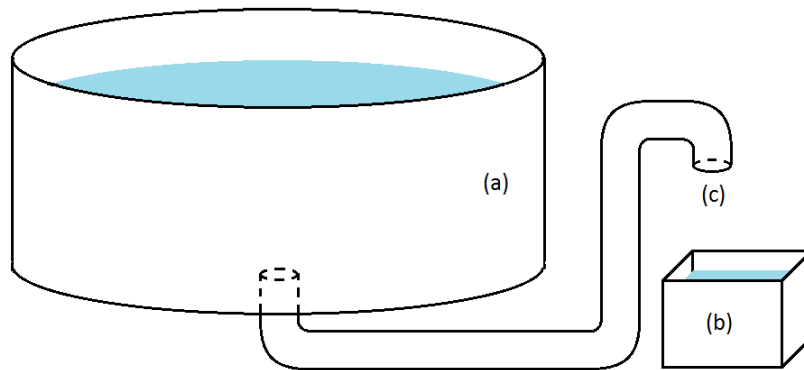


Figura 15: Ilustración de sección en donde se tomaron las muestras de color. (a) Estanque de donde se produce la mezcla. (b) Estanque de recirculación. (c) Punto donde se tomaron las muestras en el término de la tubería de drenaje.

El tiempo cero se consideró desde el instante en que la tinta comienza su ingreso al estanque. Se tomaron muestras en intervalos de 2 minutos durante un periodo de media hora, esto sobre la base de los tiempos de mezcla observados en los experimentos desarrollados por Arriagada (2012) y en los cuales se cuantificaron tiempos menores a los 30 minutos. Las muestras se almacenaron en recipientes plásticos y luego se procesaron caracterizando el color mediante un instrumento multiparámetro marca *Hanna instruments*® modelo C200.

Adicionalmente se registrara de manera audio-visual la mezcla en el estanque con la finalidad de verificar en que instante de tiempo se comienza a homogeneizar el volumen de agua y corroborarlo con los datos obtenidos.

3.3.2 Medición de velocidades en estanque

La velocidad del flujo es un factor importante en términos de lograr una eficiente mezcla completa, sin embargo, debe cuidarse su efecto sobre los organismos cultivados. Las metodologías para determinar la velocidad del agua en un estanque, varían desde técnicas muy sencillas a otras más complejas siendo una de éstas la medición a través de velocímetros doppler acústicos (ADV). Los ADV registran la velocidad del agua en un

punto de control definido por la orientación de sus beams, ocupando un principio físico conocido como el efecto Doppler. Si bien esta herramienta permite medir en un solo punto, se puede obtener un mapa detallado de velocidades realizando varias mediciones distribuidas en el espacio y en este caso en el área de control del estanque.

Para lograr la medición de los perfiles de velocidad como primera instancia se consideraron las recomendaciones entregadas por Lekang (2007), sin embargo, al no contar con la instrumentación necesaria se empleó el criterio utilizado por Arriagada (2012). Este criterio consiste en la ubicación de 9 puntos fijos de medición en un plano vertical, seleccionados estratégicamente para representar las velocidades de circulación (Figura 17). La ubicación del plano de medición para determinar la velocidad media se estableció alejada del eductor, para disminuir los efectos del jet y la zona de succión, y de manera de capturar la distribución de velocidad en condiciones de mezcla completa.

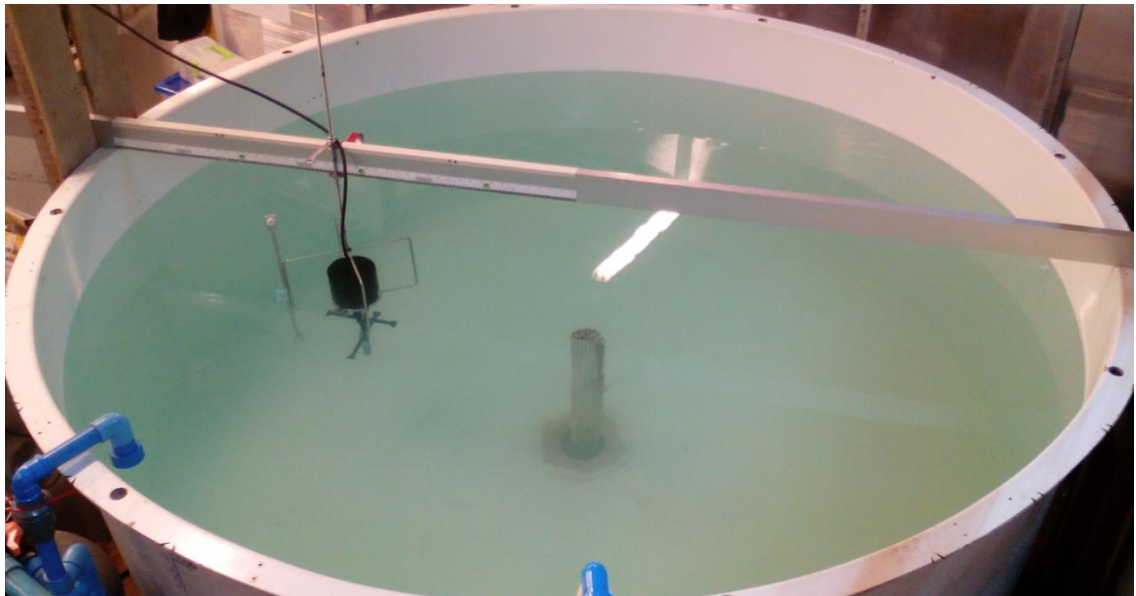


Figura 16: Estanque con velocímetro acústico instalado utilizado en la medición de velocidades de la experiencia.

El ADV utilizado corresponde a un equipo de marca *Falmouth Scientific, Inc*®, modelo 2ACM-CBP-S. Este dispositivo realiza una medición en dos dimensiones entregando

además la magnitud y dirección de la resultante total de la velocidad en el punto de medición.

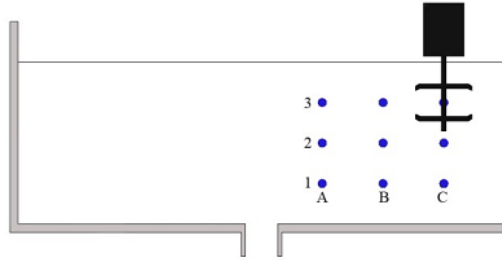


Figura 17: Ilustración de los 9 puntos registrados en el estanque.

Los niveles horizontales (1, 2 y 3) se ubican a 0.25, 0.5 y 0.75 respectivamente de la pared del estanque. Los niveles verticales (A, B y C) se ubican a 0.25, 0.5 y 0.75 del nivel del agua respectivamente. La figura en negro representa al velocímetro acústico midiendo en el punto 3C.

3.3.2.1 Aceptación o rechazo de serie de velocidad:

Para la serie de datos obtenidos de velocidad y su validación, se utilizaron técnicas estadísticas aplicadas a experimentos (Shirakov V. P.; Manual de Hilandería. 1985).

Uno de los parámetros importantes para aceptar la serie de datos fue la desigualdad cuadrática o variabilidad del procedimiento de ensayo (C). A este parámetro también se le conoce como Coeficiente de Variación y se da en %.

$$C = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100 \quad \text{Ec.4}$$

La precisión de los ensayos se evalúa a través del error, para lo cual se consideran o analizan dos tipos fundamentales de error, el absoluto y el relativo. Por otro lado, se tiene

que desde el punto de vista práctico la precisión de los ensayos está caracterizada (definida) por la magnitud del error relativo.

Error relativo para la Media Aritmética (e_r)

$$e_r = \frac{k \cdot C}{\sqrt{n-1}} \cdot 100 \quad \text{Ec.5}$$

De este modo, para una probabilidad del 95% se tiene:

Tabla 3: Precisión de ensayos según parámetro estadístico error relativo.

Magnitud del error relativo (e_r)	Grado de precisión del ensayo
$e_r \leq 2$	Alto
$2 < e_r \leq 5$	Medio
$5 < e_r \leq 10$	Bajo
$e_r > 10$	Muy bajo

La Tabla 3 se obtuvo considerando ecuaciones estadísticas y un 95% de nivel de confianza.

Tabla 4: Tamaño mínimo aceptable de la muestra (n) para un 95% de confianza.

Coeficiente de Variación C (%)	Error Relativo permisible de la muestra e_{rp} (%)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	
1	4	1								
2	16	4	2	1						
3	35	9	4	3	2	1				
4	62	16	7	4	3	2	2			
5	96	24	11	6	4	3	2	2	1	
6		35	16	9	6	4	3	2	2	
7		47	21	12	8	6	4	3	2	
8		62	28	16	10	7	5	4	3	
9		78	35	20	13	9	7	5	4	
10		96	43	24	16	11	8	6	4	

En conclusión la medición de la velocidad en un punto se analizó mediante el error relativo que este pueda inferir, del cual se pudo aceptar o rechazar la serie de repeticiones medidas

en un punto específico. Se planificó una serie de 6 (seis) repeticiones por punto, de la cual se calculó el coeficiente de variación y según la Tabla 4, se aceptó la serie para los casos en que éste coeficiente fuese menor a 6%, para un error relativo del 5%.

3.4 Lista apropiada de variables posibles de medición

Se presenta una lista de variables que se estimó puedan aportar información al análisis.

- D : Diámetro del estanque (m)
- H : Altura agua del estanque (m)
- Q : Caudal de entrada (m^3/s)
- V : Velocidad promedio del flujo dentro de estanque (m/s)
- t : Tiempo de mezcla (s)
- ε : Rugosidad del estanque (m)
- O : Cantidad de oxígeno disuelto (ppm)
- T : Temperatura ($^{\circ}C$)
- μ : Viscosidad dinámica ($kg/(m\ s)$)
- ρ : Densidad del agua (kg/m^3)
- ρ_1 : Densidad del trazador (kg/m^3)
- Δh : Diferencia altura de agua entre centro y borde estanque (m)
- D_a : Diámetro boquilla interior eductor (m)
- D_b : Diámetro entrada eductor flujo arrastrado (m)
- g : Aceleración de gravedad (m/s^2)
- V_s : Velocidad de salida del chorro en boquilla interior (m/s)

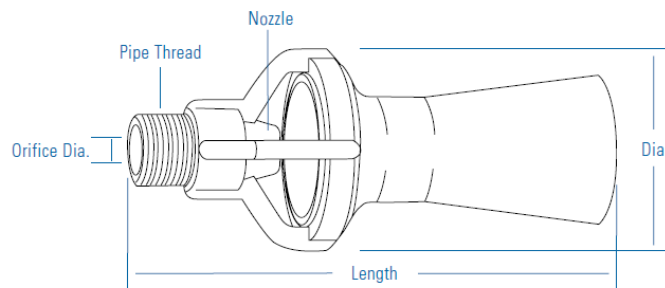
3.5 Selección de variables

Con la finalidad de disminuir el número de variables básicas que conformaron la formulación empírica sobre el tiempo de mezcla en los estanques, y a la vez mantener una buena representatividad de este proceso, se hizo un análisis para identificar aquellas

variables que deben estar en la formulación. Para este fin se llegó al consenso de hacer una formulación para cada uno de los dos eductores utilizados, por lo cual se seleccionaron variables según dos procesos: (a) selección por eductor, (b) selección por mezcla.

3.5.1 Selección por eductor

La ejecución de esta experiencia se basó en la utilización de dos tamaños de eductores, los cuales fueron utilizados de la misma forma para poder realizar una comparación entre ellos. Este dispositivo por catálogo (Spraying Systems Co., 2008) presenta diferentes variables y principios de funcionamiento, y están disponibles en muchos estilos, tamaños y materiales. Específicamente los eductores utilizados son los dos de menores dimensiones disponibles en el mercado (Figura 18), y su elección se realizó en consideración a la experiencia de profesionales y las características hidrodinámicas que producen según los tamaños de estanques disponibles para los experimentos.



Dimensions

Nozzle No.	Inlet Conn. (in.) NPT or BSPT (M)	Orifice Dia. in. (mm)	Length in. (mm)	Dia. in. (mm)	Net Weight oz. (kg)		
					KY	PP	SS
46550-1/4—	1/4	3/16 (5)	3 (76)	1-1/4 (32)	.51 (.01)	.51 (.01)	—
46550-3/8—	3/8	5/16 (8)	4-1/16 (103)	1-11/16 (52)	—	1 (.03)	9.9 (.28)
46550-3/4—	3/4	3/8 (10)	6-3/8 (162)	3 (76)	—	2.8 (.08)	24.5 (.69)
46550-1-1/2—	1-1/2	9/16 (14)	10 (254)	4-1/2 (114)	—	10.2 (.29)	73.5 (2.1)

Figura 18: Dimensiones de los diferentes eductores disponibles en el mercado. Fuente Spraying Systems Co., 2008.



Figura 19: Eductores utilizados en el estudio.

Entonces, se realiza una formulación para cada eductor utilizado generándose dos diferentes escenarios. De esta forma quedan fuera del análisis cualquier variable que defina el tamaño o su funcionamiento, ya que éstas pasan a ser constantes y representativas de cada escenario. Por lo tanto, de las variables que componen el análisis adimensional no son consideradas:

- D_a : Diámetro boquilla eductor
- D_b : Diámetro entrada eductor flujo arrastrado

3.5.2 Selección por mezcla en estanque

Los ensayos experimentales permitieron caracterizar el comportamiento de la mezcla y dividirlo en tres secciones relevantes que conforman la mezcla total. Se obtienen aquellas variables de mayor influencia en cada proceso y se incluyen como variables básicas en la formulación resultante de este estudio.

3.6 Análisis de datos y elementos hidrodinámicos

3.6.1 Velocidad media ponderada de rotación

Usando las magnitudes de velocidad tomadas en los 9 puntos del 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 20, 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. Entonces se tomó la misma metodología usada a lo largo del diámetro y se usó aplicada a la altura de los estanques obteniéndose la Ec.6.

$$V = \frac{\sum_{j=1}^m \left[\frac{\sum_{i=1}^n V_i r_i}{\sum_{j=1}^m r_i} * h_j \right]}{\sum_{j=1}^m h_j} \quad \text{Ec.6}$$

Dónde:

- V: velocidad promedio ponderada de rotación de la columna de agua (m/s)
- Vi: velocidad en el punto “i” (m/s)
- ri: distancia horizontal desde el centro del estanque hasta el punto “i” (m)
- hj: altura desde el fondo del estanque hasta el punto “i” (m)
- 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.

3.6.2 Estimación del tiempo de mezcla

Para determinar los tiempos de mezcla se calculó el coeficiente de variación de cada muestra tomada con las respectivas 2 muestras siguientes, de esta forma la variación se hace mínima cuando se tiende a la mezcla completa en el estanque, es decir, los 3 datos tienden a ser similares. También, como segunda condicionante, se aseguró un mezclado completo utilizando la metodología de la validación en las series de velocidad, en donde se calculó el coeficiente de variación a los últimos seis datos según la Tabla 4. Se aseguró por experiencias anteriores (Amilcar, 2012) que los tiempos de mezcla de este tipo de ensayos se alcanzaran completamente, para lo cual se tomó la determinación de tomar mediciones al doble de tiempo de alcanzada la mezcla.

3.6.3 Estimación de regresiones, parámetros estadísticos y patrones de velocidad

Para obtener las ecuaciones asociadas al tiempo de mezcla a través del análisis dimensional, se generaron combinaciones entre los grupos adimensionales, donde se analizaron las correlaciones entre las diferentes combinaciones a través de regresiones efectuadas con el software *Curve Expert Professional*© v1.5. Este software ajusta todo tipo de graficas en 2D y 3D a la serie de datos ingresada y ordena en un ranking las mejores regresiones en base a los coeficientes de determinación (r^2) de cada una de las curvas ajustadas.

Además se utilizó este software para obtener una función que represente el diagrama de velocidades en 3D y mediante el mismo graficar las isolíneas de velocidad.

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Selección de variables de mayor influencia en el análisis

4.1.1 Mezcla primaria producto del jet.

Esta mezcla se produjo debido a la interacción del jet producido por el eductor y la masa de agua que interactúa con él, donde la velocidad del agua generó un anillo de color en la pared del estanque como se muestra a continuación.

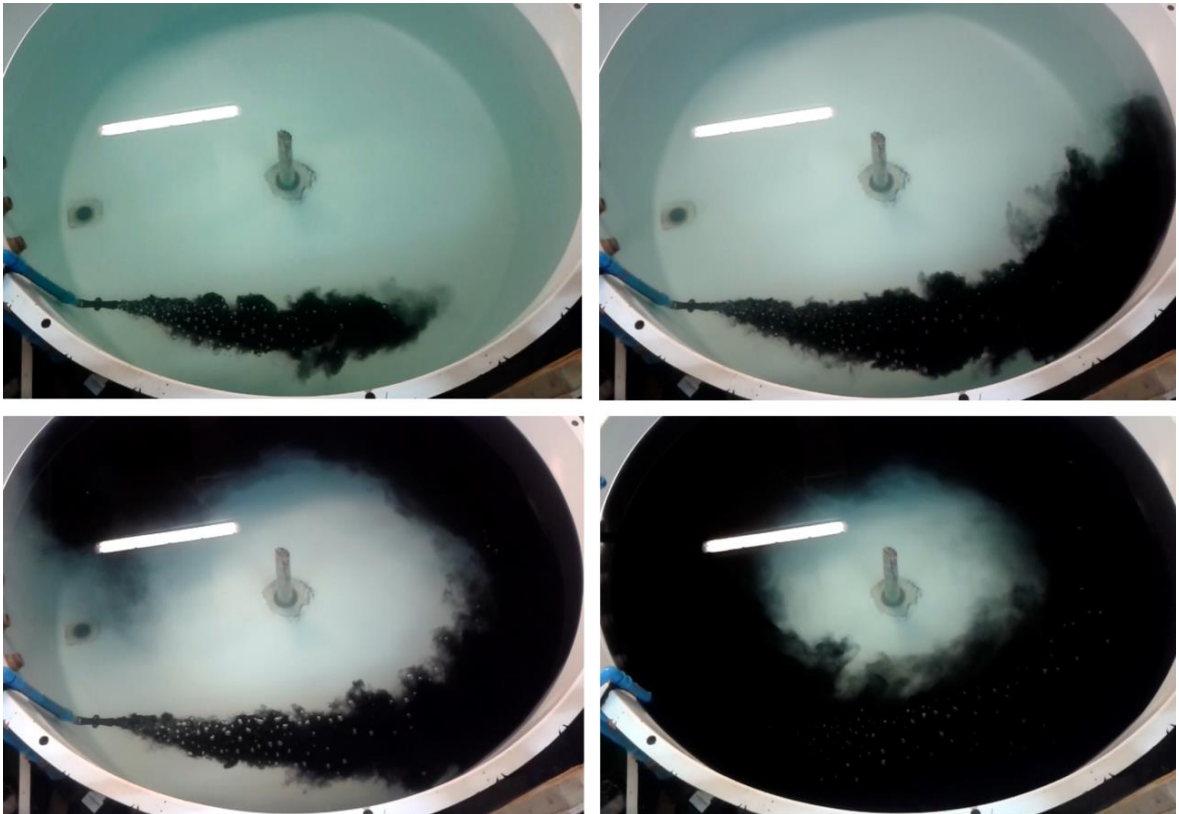


Figura 20: Mezcla inicial del jet y formación de anillo de color.

La mezcla se produjo rápidamente y las variables principales identificadas fueron:

- Velocidad media (V): a mayor velocidad, más rápido se genera el anillo.

- Diámetro estanque (D): a mayor diámetro, más distancia a recorrer para conformar el anillo.
- Caudal (Q): determinante para el ancho del anillo producto del jet.

4.1.2 Mezcla en la vertical.

Al producirse el anillo de color, de forma casi imperceptible se mezcló en la vertical, sin embargo para estanques de diferentes proporciones diámetro-altura, ésta característica debe tenerse en consideración.

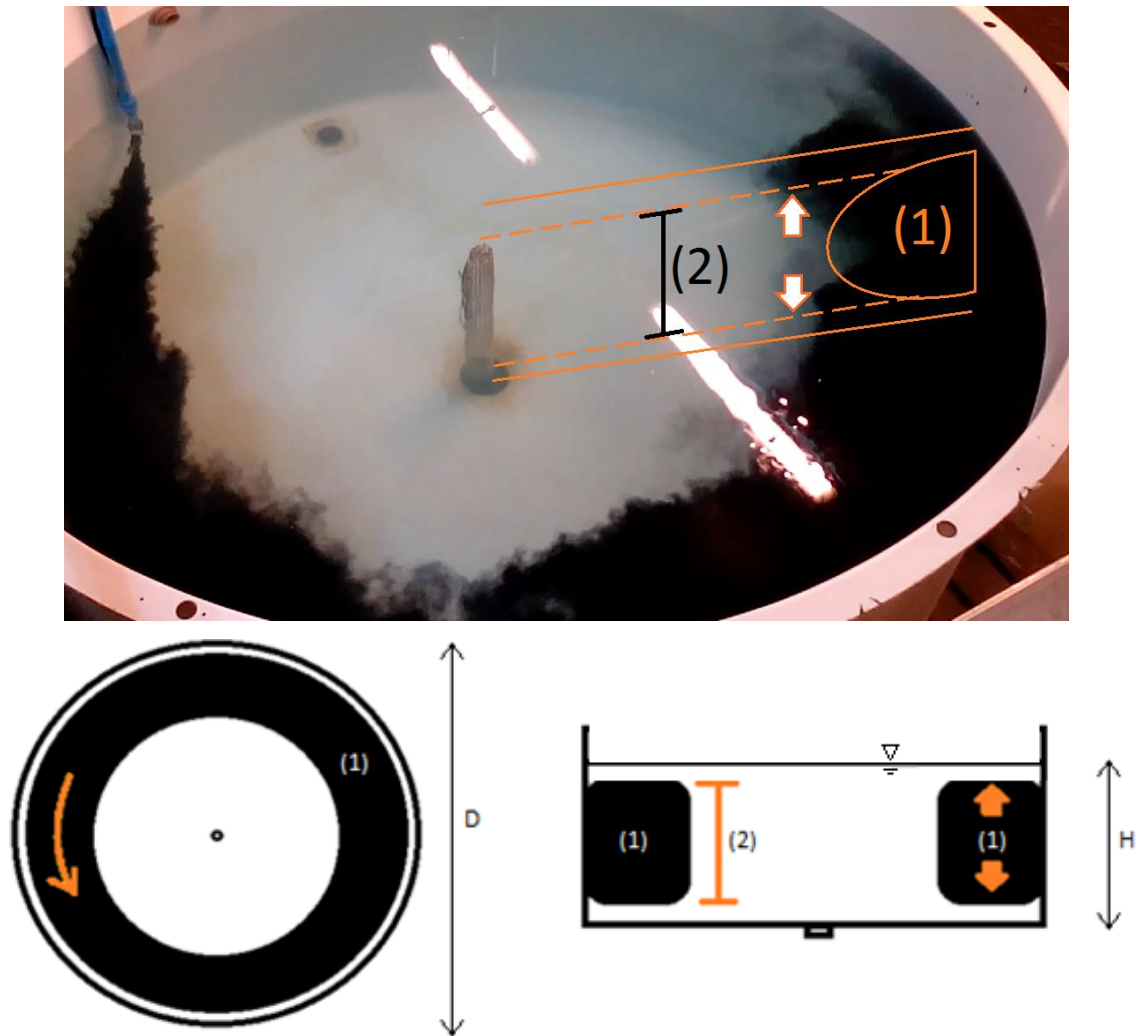


Figura 21: Mezcla en la vertical. (1) Sección de anillo primario producido por la mezcla.
(2) Altura de anillo primario de mezcla.

Las principales variables que influyeron en este proceso fueron:

- Altura del estanque (H): fundamental para determinar la distancia que debe mezclar en la vertical.
- Caudal (Q): determinante para la altura del anillo producto del jet.

4.1.3 Mezcla hacia el centro.

Después del anillo primario producido, éste se mezcló hacia el centro a menor rapidez que los procesos anteriores. Esta mezcla es dependiente de la turbulencia generada en cada estanque.

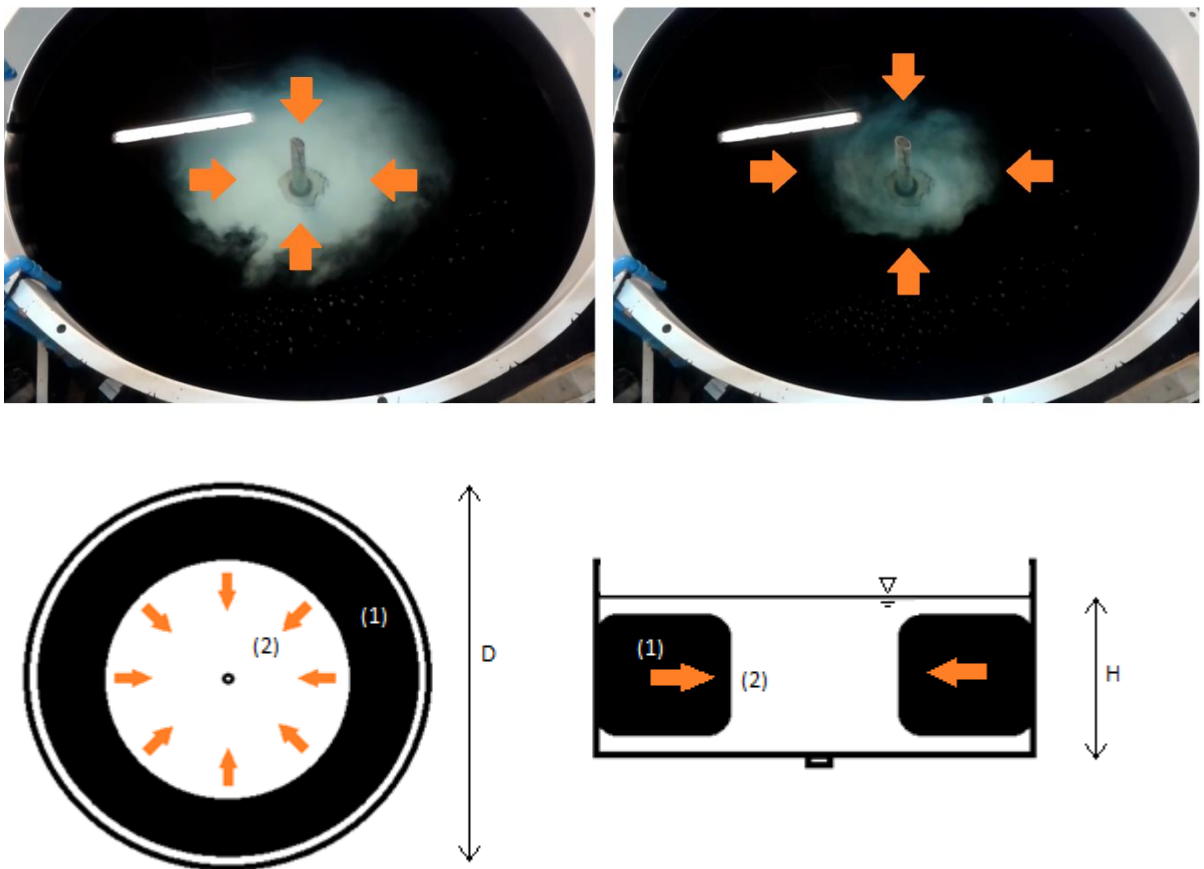


Figura 22: Mezcla hacia el centro. (1) Anillo de anilina primario. (2) Sección de agua sin mezcla.

Las variables involucradas en este proceso son:

- Diámetro estanque (D): a mayor diámetro, mayor distancia a recorrer hacia el centro.
- Velocidad media (V): variable básica para la variación de las turbulencias generadas en cada combinación de estanques-educor.

En resumen, debido a la directa relación de la velocidad media (V) producida en el estanque y el caudal (Q) ingresado por cada educor, no se incluyen ambas variables como condición de formulación para la estimación del tiempo de mezcla. Las variables que se consideran para la obtención de la formulación son:

- Diámetro estanque (D)
- Altura estanque (H)
- Velocidad media (V)
- Caudal (Q) (opcional, si se incluye velocidad media)

4.2 Determinación de grupos adimensionales (Aplicación teorema π)

1. Lista de variables significativas para el análisis: Se consideraron las variables más influyentes determinadas anteriormente y aquellas que presentaron un grado de fácil medición experimental, con la finalidad de incorporar la mayor cantidad de información para una mejor representatividad de la formulación.

- D : Diámetro del estanque (m)
- H : Altura agua del estanque (m)
- Q : Caudal de entrada (m^3/s)
- V : Velocidad promedio del flujo dentro de estanque (m/s)
- t : Tiempo de mezcla (s)
- μ : Viscosidad dinámica ($\text{kg}/(\text{m s})$)
- ρ : Densidad del agua (kg/m^3)
- Δh : Diferencia altura de agua entre centro y borde estanque (m)
- g : Aceleración de gravedad (m/s^2)

2. Selección de conjunto fundamental (primario) de dimensiones:

Dimensiones de referencia: [L], [T], [M] por lo tanto, $n=3$. Se obtuvieron $\pi = 10-3= 7$ números adimensionales

3. Se descomponen las variables en sus dimensiones, de manera tabulada. Para ello se ordenan y se desglosan en los exponentes de sus dimensiones.

Tabla 5: Descomposición de variables del análisis adimensional en sus dimensiones básicas.

Variable	Unidad	L(m)	T(s)	M(kg)
D	m	1	0	0
H	m	1	0	0
Q	m ³ /s	3	-1	0
V	m/s	1	-1	0
t	s	0	1	0
ε	m	1	0	0
μ	kg/(m s)	-1	-1	1
ρ	kg/m ³	-3	0	1
Δh	m	1	0	0
g	m/s ²	1	-2	0

4. Se eligieron las variables de referencia según:

- Debe ser igual a “n” variables de referencia
- Entre todas deben contener todas las dimensiones
- Deben ser sencillos e independientes entre sí

Referencias = D, V, ρ (n=3, sencillas e independientes entre sí)

Para verificar que sean independientes se verifica el determinante de los exponentes de las dimensiones, eso asegura que una variable no resulta de la combinación de las otras.

$$\det \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{bmatrix} = -1 \neq 0 \quad \text{Ec.7}$$

5. Se establecieron las ecuaciones dimensionales y se obtuvieron los números pi (π), para ello se plantea el producto de las variables de referencia con cada variable restante. Luego se desglosan en cada dimensión.

$$\pi_1 = D^{a1} * V^{b1} * \rho^{c1} * H$$

$$\pi_2 = D^{a2} * V^{b2} * \rho^{c2} * Q$$

$$\pi_3 = D^{a3} * V^{b3} * \rho^{c3} * t$$

$$\pi_4 = D^{a4} * V^{b4} * \rho^{c4} * \varepsilon$$

$$\pi_5 = D^{a5} * V^{b5} * \rho^{c5} * \mu$$

$$\pi_6 = D^{a6} * V^{b6} * \rho^{c6} * \Delta h$$

$$\pi_7 = D^{a9} * V^{b9} * \rho^{c9} * g$$

➤ Para π_1

$$[L] = 1a_1 + 1b_1 - 3c_1 + 1 = 0$$

$$[T] = 0 - 1b_1 + 0 + 0 = 0$$

$$[M] = 0 + 0 + 1c_1 + 0 = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} a_1 = -1 \\ b_1 = 0 \\ c_1 = 0 \end{array} \right\}$$

$$\pi_1 = D^{-1} * V^0 * \rho^0 * H$$

$$\pi_1 = \frac{H}{D}$$

➤ Para π_2

$$[L] = 1a_2 + 1b_2 - 3c_2 + 3 = 0$$

$$[T] = 0 - 1b_2 + 0 - 1 = 0$$

$$[M] = 0 + 0 + 1c_2 + 0 = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} a_2 = -2 \\ b_2 = -1 \\ c_2 = 0 \end{array} \right\}$$

$$\pi_2 = D^{-2} * V^{-1} * \rho^0 * Q$$

$$\pi_2 = \frac{Q}{D^2 V}$$

➤ Para π_3

$$\begin{array}{l}
 [L] = 1a_3 + 1b_3 - 3c_3 + 0 = 0 \\
 [T] = 0 - 1b_3 + 0 + 1 = 0 \\
 [M] = 0 + 0 + 1c_3 + 0 = 0
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} [L] \\ [T] \\ [M] \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 a_3 = -1 \\
 b_3 = 1 \\
 c_3 = 0
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} a_3 \\ b_3 \\ c_3 \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 \pi_3 = D^{-1} * V^1 * \rho^0 * t \\
 \\
 \boxed{\pi_3 = \frac{V t}{D}}
 \end{array}$$

➤ Para π_4

$$\begin{array}{l}
 [L] = 1a_4 + 1b_4 - 3c_4 + 1 = 0 \\
 [T] = 0 - 1b_4 + 0 + 0 = 0 \\
 [M] = 0 + 0 + 1c_4 + 0 = 0
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} [L] \\ [T] \\ [M] \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 a_4 = -1 \\
 b_4 = 0 \\
 c_4 = 0
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} a_4 \\ b_4 \\ c_4 \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 \pi_4 = D^{-1} * V^0 * \rho^0 * \varepsilon \\
 \\
 \boxed{\pi_4 = \frac{\varepsilon}{D}}
 \end{array}$$

➤ Para π_5

$$\begin{array}{l}
 [L] = 1a_5 + 1b_5 - 3c_5 - 1 = 0 \\
 [T] = 0 - 1b_5 + 0 - 1 = 0 \\
 [M] = 0 + 0 + 1c_5 + 1 = 0
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} [L] \\ [T] \\ [M] \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 a_5 = -1 \\
 b_5 = -1 \\
 c_5 = -1
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} a_5 \\ b_5 \\ c_5 \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 \pi_5 = D^{-1} * V^{-1} * \rho^{-1} * \mu \\
 \\
 \boxed{\pi_5 = \frac{\mu}{D V \rho}}
 \end{array}$$

1 / Número de Reynolds

➤ Para π_6

$$\begin{array}{l}
 [L] = 1a_6 + 1b_6 - 3c_6 + 1 = 0 \\
 [T] = 0 - 1b_6 + 0 + 0 = 0 \\
 [M] = 0 + 0 + 1c_6 + 0 = 0
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} [L] \\ [T] \\ [M] \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 a_6 = -1 \\
 b_6 = 0 \\
 c_6 = 0
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} a_6 \\ b_6 \\ c_6 \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 \pi_6 = D^{-1} * V^0 * \rho^0 * \Delta h \\
 \\
 \boxed{\pi_6 = \frac{\Delta h}{D}}
 \end{array}$$

➤ Para π_7

$$\left. \begin{aligned} [L] &= 1a_9 + 1b_9 - 3c_9 + 1 = 0 \\ [T] &= 0 - 1b_9 + 0 - 2 = 0 \\ [M] &= 0 + 0 + 1c_9 + 0 = 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} a_9 &= 1 \\ b_9 &= -2 \\ c_9 &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \pi_9 &= D^1 * V^{-2} * \rho^0 * g \\ \pi_9 &= \frac{D g}{V^2} \end{aligned}$$

1 / Número de Froude

6. Verificación de adimensionalidad.

$$\pi_1 = \frac{H}{D} \quad \rightarrow \quad [L] * \left[\frac{1}{L} \right] = [1] \quad \text{Ec.8}$$

$$\pi_2 = \frac{Q}{D^2 V} \quad \rightarrow \quad \left[\frac{L^3}{T} \right] * \left[\frac{1}{L^2} \right] * \left[\frac{T}{L} \right] = [1] \quad \text{Ec.9}$$

$$\pi_3 = \frac{V t}{D} \quad \rightarrow \quad \left[\frac{L}{T} \right] * [T] * \left[\frac{1}{L} \right] = [1] \quad \text{Ec.10}$$

$$\pi_4 = \frac{\varepsilon}{D} \quad \rightarrow \quad [L] * \left[\frac{1}{L} \right] = [1] \quad \text{Ec.11}$$

$$\pi_5 = \frac{\mu}{D V \rho} \quad \rightarrow \quad \left[\frac{M}{LT} \right] * \left[\frac{1}{L} \right] * \left[\frac{T}{L} \right] * \left[\frac{L^3}{M} \right] = [1] \quad \text{Ec.12}$$

$$\pi_6 = \frac{\Delta h}{D} \quad \rightarrow \quad [L] * \left[\frac{1}{L} \right] = [1] \quad \text{Ec.13}$$

$$\pi_7 = \frac{D g}{V^2} \quad \rightarrow \quad [L] * \left[\frac{L}{T^2} \right] * \left[\frac{T^2}{L^2} \right] = [1] \quad \text{Ec.14}$$

4.3 Resumen experimento

4.3.1 Patrón de velocidades

Las velocidades aplicadas en los ensayos se mantuvieron en el rango apto para los peces (Tabla 1). Cabe notar que sin importar el tamaño del estanque o la velocidad aplicada por la inyección, los resultados indicaron un patrón de velocidades similar. Se presenta un ejemplo en la Figura 23 en que se indican las isolíneas de velocidad generadas por un caudal de 24.5 l/min en el estanque de 3.6 m³ y diámetro 2.25 m considerando la configuración del eductor 2. La figura indica velocidades máximas ocurriendo lejos del centro y superficies de contacto del estanque.

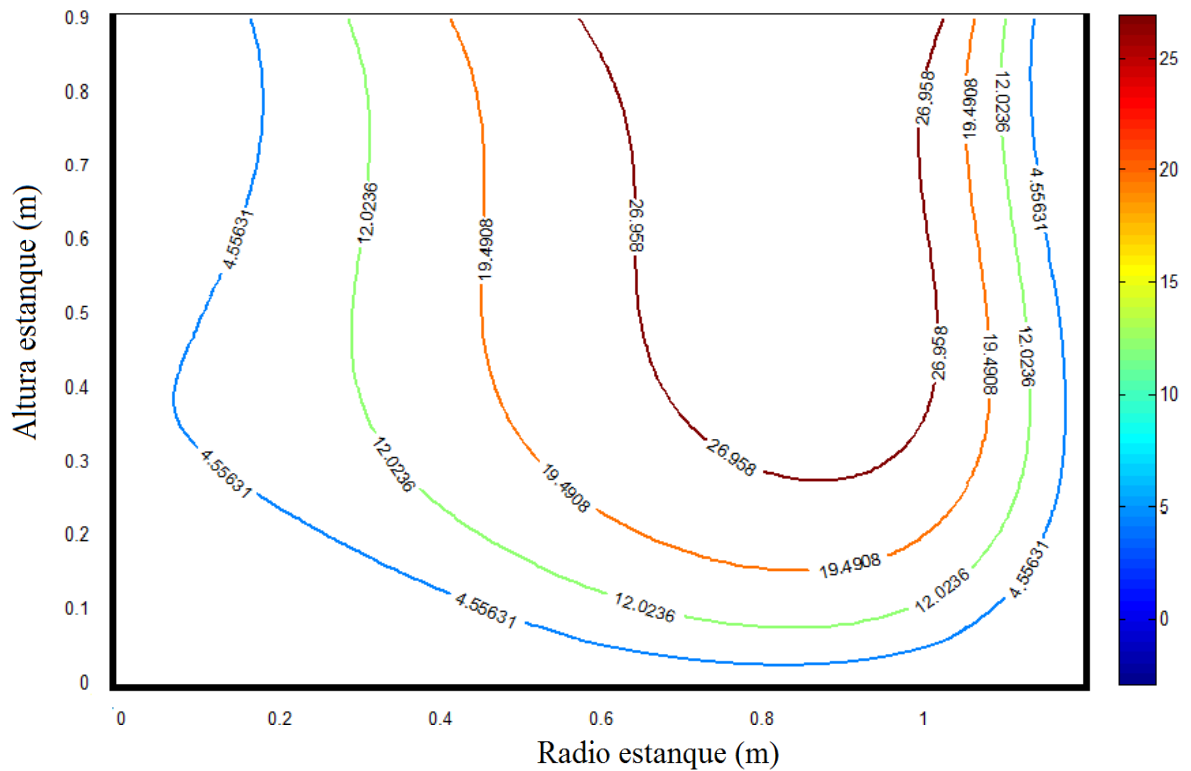


Figura 23: Isolíneas de velocidad (cm/s) en sección de medición, para caudal de 24.5 l/min en estanque 3, Eductor 2.

Cabe mencionar que las isolíneas generadas no se ajustan completamente a los datos recopilados en laboratorio, debido a que la regresión generada por el software *Curve Expert Professional*© v1.5 no se ajusta al 100% con la base de datos asignada (coeficiente de determinación $r^2 = 0.93$). Lo anterior implica que las velocidades máximas se representen más cercanas al centro del estanque que lo registrado en los ensayos. Sin embargo, constituye una buena aproximación y más importante aún, es similar en todos los ensayos realizados en esta experiencia, en consideración a la forma y distribución de las isolíneas.

En relación a la uniformidad espacial que presentan las velocidades, 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, y por lo tanto se concluye que la mezcla se alcanza en todos los estanques. Sin embargo, lo anterior no asegura que el tiempo necesario para alcanzarla sea mínimo.

Una comparación de diferentes ángulos de ataque del dispositivo eductor fueron estudiados por Arriagada (2012). Sus resultados indican que una orientación en un ángulo de 45° es el más eficiente, que coincide con los resultados encontrados en este estudio. Por lo tanto, la distribución de las isolíneas de velocidad en los experimentos realizados corresponde a los mejores niveles de uniformidad posibles en este tipo de flujo.

Respecto a la sección de mayor velocidad en el estanque o en este caso a la isolínea de mayor magnitud, se aprecia una lejanía del centro y pared del estanque, que confirma altos niveles de uniformidad, ya que 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.

Para representar de forma más clara el concepto y la generación de isolíneas se presenta un bosquejo de su distribución en el estanque (Figura 24). En esta figura las velocidades mínimas se alcanzan en las cercanías del centro del estanque. Cabe destacar que estas bajas velocidades no son representativas del cono de succión o vórtice formado en el punto de drenaje central del estanque, ya que no se registraron puntos de velocidad cercanos a éste.

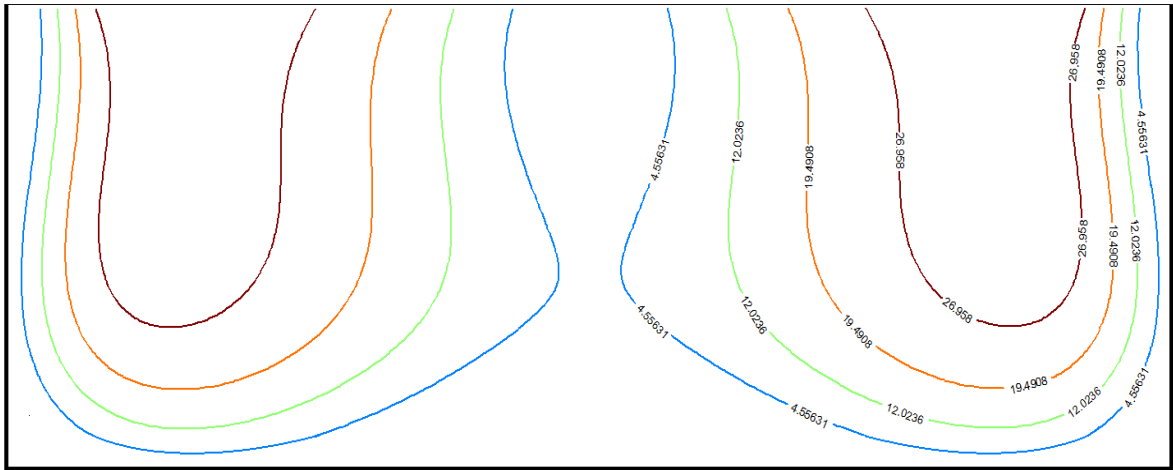


Figura 24: Representación de isolíneas de velocidad (cm/s) para corte transversal de Estanque 3.

Se observó además que se genera un patrón cercano al drenaje central que se caracteriza por tener una baja velocidad de rotación y con un mezclado más lento (tal como se indica en el capítulo 2, Figura 10).

4.3.2 Patrón de mezcla

La mezcla en los estanques, al igual que en las velocidades, generó un patrón similar en los resultados de todos los ensayos. La forma de las curvas de color se mantuvo constantes y un ejemplo de ésta se representa en la Figura 25.

Se puede distinguir tres sectores distintos de esta curva:

1. Del minuto de la inyección (i.e. tiempo cero) al minuto 2, la mezcla es rápida (i.e. turbulenta) y la anilina no ha logrado alcanzar el centro del estanque.
2. Del minuto 2 al 8, la mezcla pasa por el sistema de recirculación a diferente tonalidad, ocasionándose un pick en la medición debido a que existen sectores sin mezcla dentro del estanque.
3. Del minuto 8 en adelante, la mezcla es completa y homogénea en todos los sectores del estanque y del sistema de recirculación.

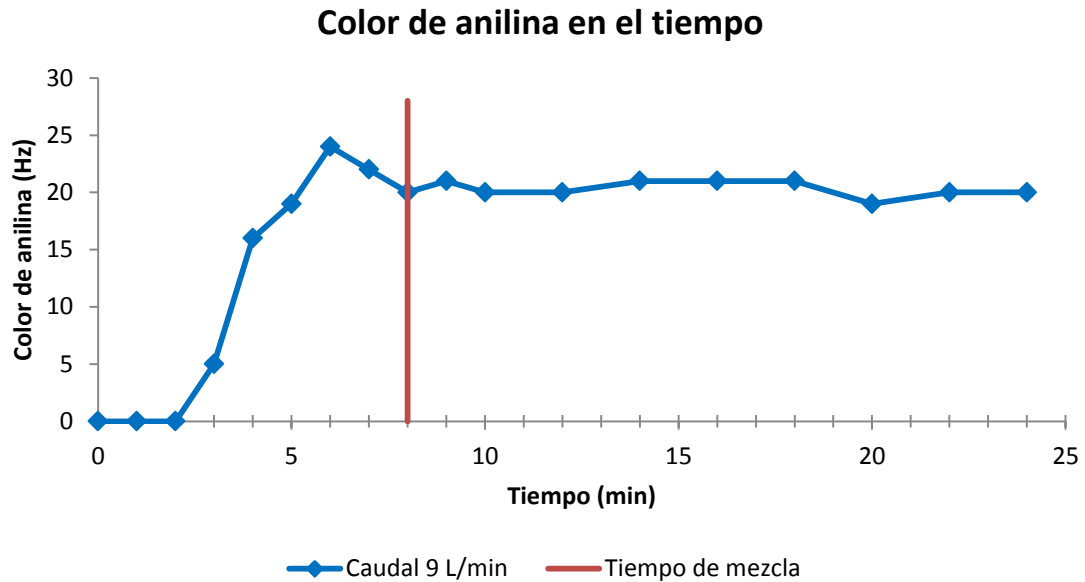


Figura 25: Curva de color de anilina para Estanque 3, con inyección de caudal 9 l/min, Eductor 1.

Los resultados de los experimentos muestran menores tiempos de mezcla con el aumento del caudal de inyección, y estos resultados concuerdan con los resultados de otros investigadores (Summerfelt, 2000; Patwardhan & Gaikwad, 2003; Labatut, 2007a) respecto a que existe una relación inversa entre caudal de entrada y tiempo de mezcla. De esta forma, para diferentes caudales, la curva de color (Figura 25) presentó una forma similar, con un rápido incremento inicial de color mostrando un claro peak, luego de algunos minutos seguido de un posterior descenso de los valores hasta que se alcanza un valor de equilibrio que prevalece en el tiempo.

4.4 Velocidad promedio, caudal de recirculación y tiempos de mezcla.

En los ensayos se mantuvo como principio fundamental el realizar pruebas manteniendo un rango de velocidades apto para los peces, pero no se descuidó el consumo de caudal que ocupaba cada configuración estanque-educor.

Los resultados obtenidos indican que para un mismo caudal, el dispositivo es capaz de mover más rápido el agua en los estanques pequeños. El dispositivo muestra una diferencia notoria de velocidades entre el estanque de 500 y 2000 litros, pero deja de ser significativo para el estanque de 2000 y 3600 litros (Figura 26 y 27). Esto es razonable debido a que la diferencia de volúmenes de los estanques es similar a las diferencias en las velocidades proyectadas e indican que su crecimiento pertenece a una función exponencial (como se presenta en Figura 26).

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. En este caso la velocidad del chorro señalada puede interpretarse como el caudal de recirculación ingresado por cada educor. En la Figura 26 se confirma una directa relación de ambas variables, pero no una relación lineal sino una más cercana a una forma exponencial, lo que coincide con lo expresado por Arriagada (2012) respecto a los caudales de ingreso y salida del educor, en donde los resultados obtenidos indican una tendencia exponencial de éstas.

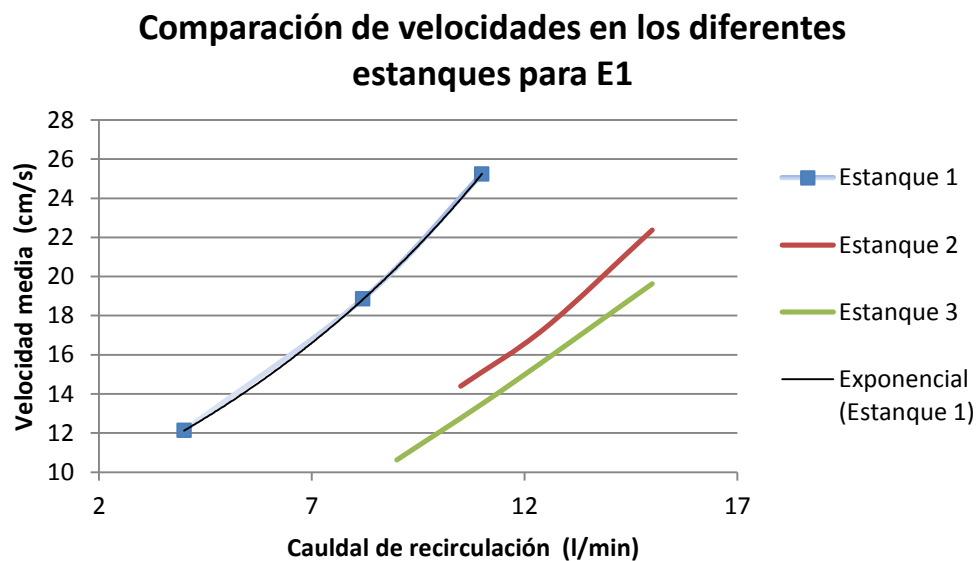


Figura 26: Velocidades alcanzadas en los ensayos con educor 1, para cada caudal de recirculación. Se agrega línea de tendencia Exponencial para Estanque 1.

Comparación de velocidades en los diferentes estanques para E2

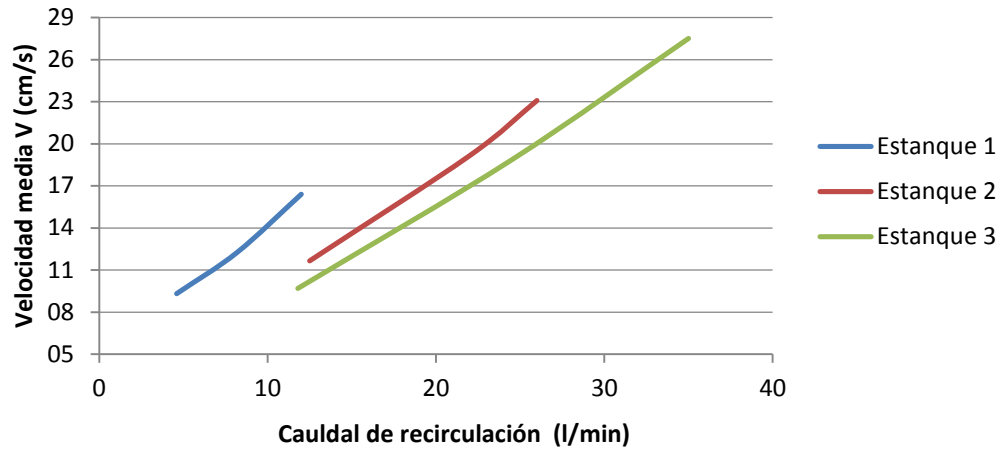


Figura 27: Velocidades alcanzadas en los ensayos con educador 2, para cada caudal de recirculación.

La distribución espacial de velocidades para los diferentes educadores fue similar como se mencionó anteriormente, pero no el caudal de recirculación. Existen ventajas y desventajas de los diseños de ambos y que son independientes del tiempo de mezcla.

Una de las ventajas de usar el Educador 1 es que siempre consumió menos caudal para producir las mismas velocidades en comparación al Educador 2. Pero debido a que el orificio de salida del educador o boquilla interior es más pequeño en el Educador 1, conlleva un mayor gasto energético y en conclusión para una bomba de 0.8 HP alcanzó una menor velocidad máxima en el estanque.

La variación del tiempo de mezcla para los educadores E1 y E2 se presenta en las Figuras 28, 29 y 30, en donde se aprecia que la velocidad está directamente relacionada con la disminución del tiempo de mezcla. Esto 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, pero esta dependencia va disminuyendo a medida que se aumenta el tamaño de los estanques.

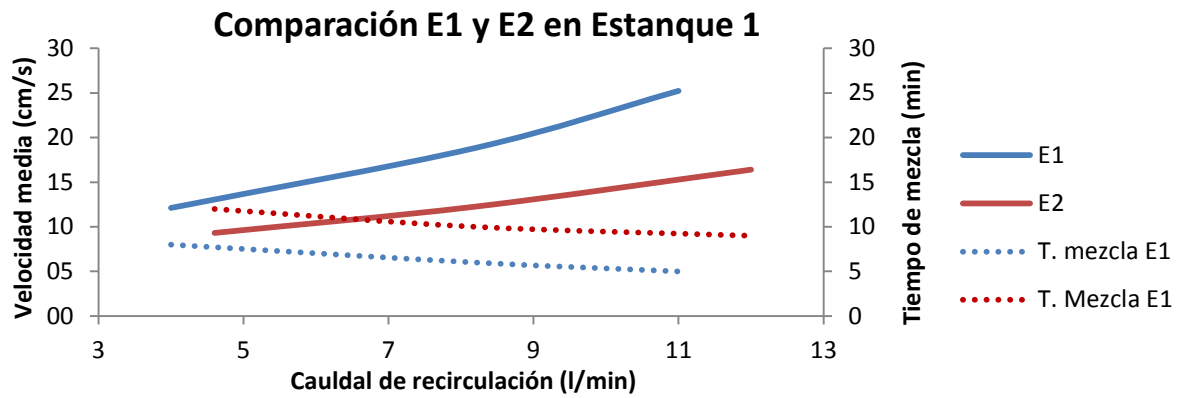


Figura 28: Comparación E1 y E2 para tiempos de mezcla en estanque 1.

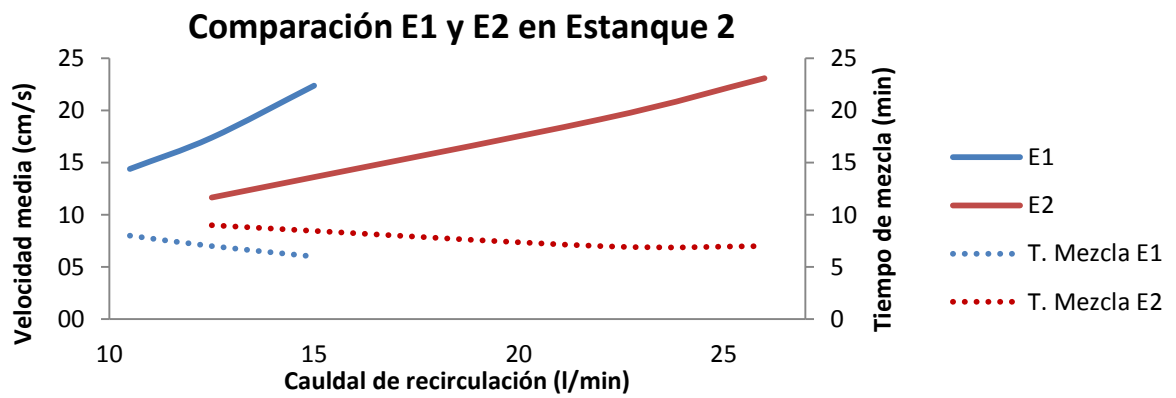


Figura 29: Comparación E1 y E2 para tiempos de mezcla en estanque 2.

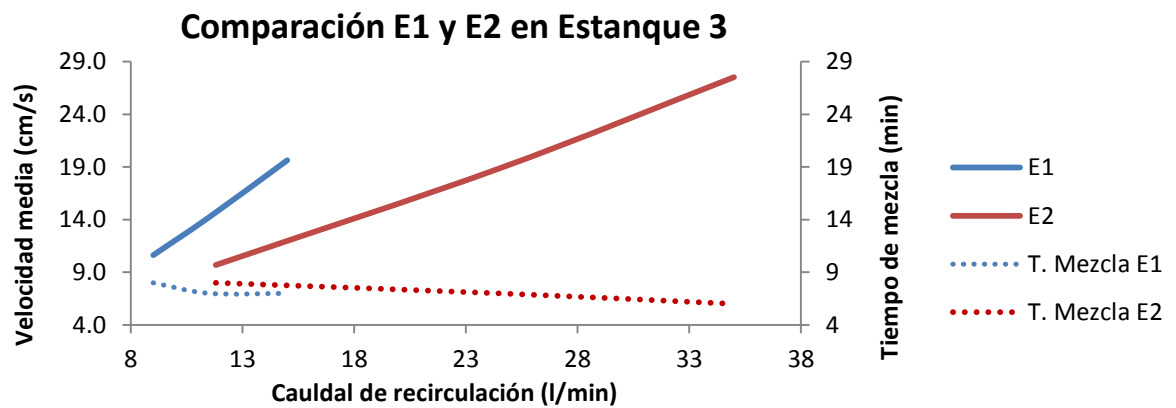


Figura 30: Comparación E1 y E2 para tiempos de mezcla en estanque 3.

En el Estanque 3 se puede observar que los tiempos de mezcla comienzan a ser similares para E1 y E2 independiente de las velocidades alcanzadas, incluso se puede proyectar que éstos se intercambian.

Lo anterior sugiere hasta un cierto punto la eficiencia de la mezcla es independiente de la elección del eductor, sin embargo, pasado este punto el Eductor 2 produce menores tiempos de mezcla. Por lo tanto, dependiendo de la configuración y los tiempos de mezcla que se quieran alcanzar la elección del Eductor será fundamental para alcanzar los objetivos planteados.

4.5 Combinación de grupos adimensionales

La selección de los grupos adimensionales se realizó en función de las variables obligatorias mencionadas, en donde se realizaron combinaciones de todos los grupos que aportaran dichas variables, arrojando una mejor correlación al combinar los siguientes grupos:

$$\pi_3 = f(\pi_1, \pi_5, \pi_7) \quad \text{Ec.15}$$

Esta combinación se puede separar en dos sub-grupos adimensionales π_x y π_y :

$$\pi_x = \frac{\pi_7}{\pi_5} = \frac{\frac{D * g}{V^2}}{\frac{\mu}{D * V * \rho}} = \frac{D^2 * \rho * g}{V * \mu} = \frac{Re}{Fr} \quad \text{Ec.16}$$

$$\pi_y = \frac{\pi_3}{\pi_1} = \frac{\frac{t * V}{D}}{\frac{H}{D}} = \frac{t * V}{H} \quad \text{Ec.17}$$

La relación de los grupos es

$$\pi_y = f(\pi_x) \quad \text{Ec.18}$$

$$\frac{t * V}{H} = f \left(\frac{D^2 * \rho * g}{V * \mu} \right) \quad \text{Ec.19}$$

De lo experimentos realizados se obtuvieron los siguientes gráficos asociados a la combinación descrita anteriormente:

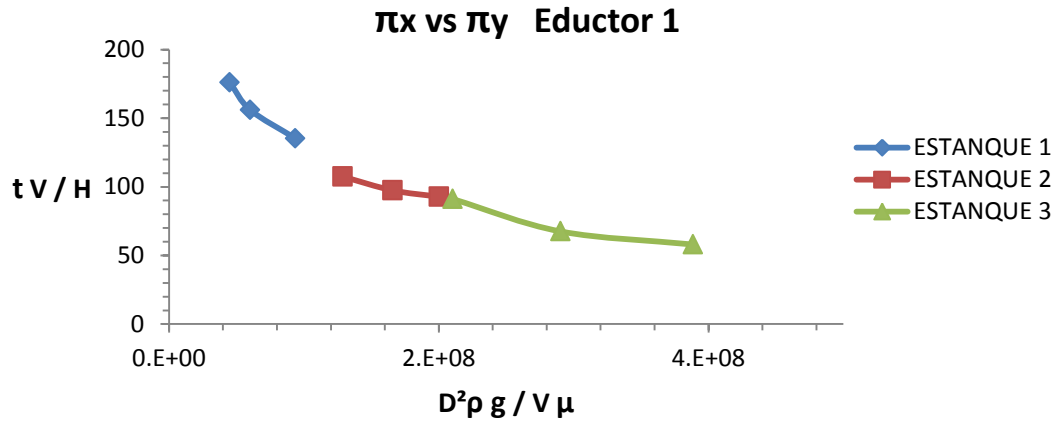


Figura 31: Relación de los grupos adimensionales seleccionados para todos los estanques usando Eductor 1.

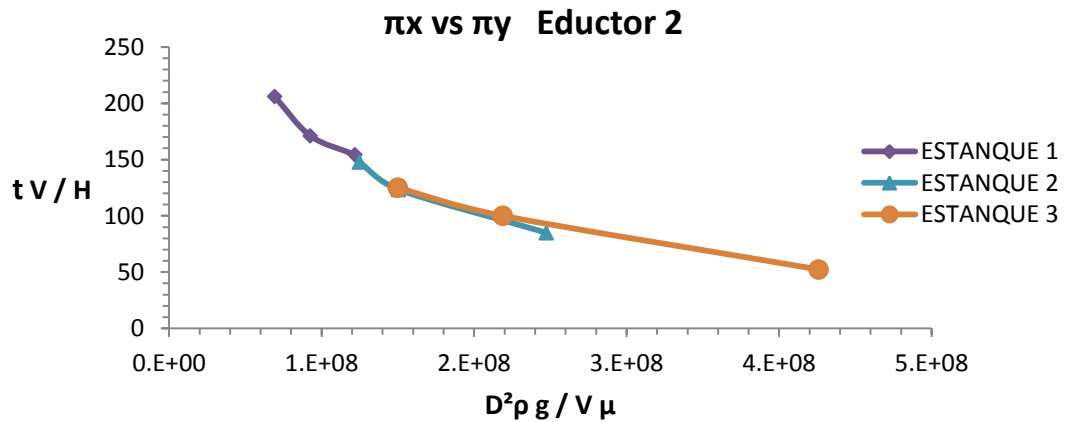


Figura 32: Relación de los grupos adimensionales seleccionados para todos los estanques usando Eductor 2.

Los gráficos tienen una tendencia clara e inversa entre los grupos, y el largo que abarca cada serie de datos por estanque depende básicamente del rango de velocidades tomadas en

las experiencias. Se observa entonces para el Eductor 2 en la Figura 32 como el largo de la línea de tendencia en el estanque 3 es más mayor que en cualquier otro caso, esto es porque el rango en que se tomó las velocidades fue desde 9.7 cm/s hasta 27.5 cm/s que es el mayor rango de velocidades medias ensayadas.

Ambos gráficos (Figura 31 y 32), tienen una forma similar sin embargo no pertenecen a la misma curva, como se muestra a continuación (Figura 33):

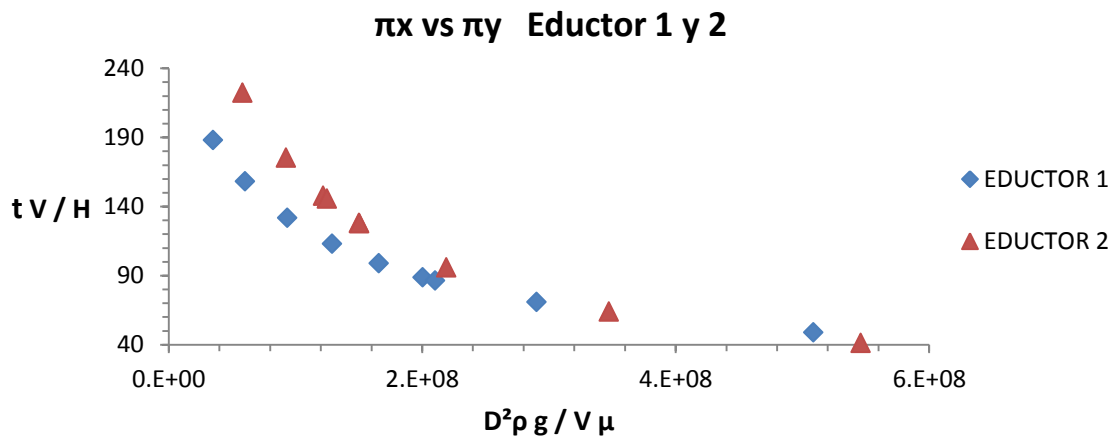


Figura 33: Relación de grupos adimensionales para cada eductor.

Sobre la relación de los eductores por pertenecer a curvas diferentes, en cuanto a la obtención de una ecuación que modele los tiempos de mezcla, se estudiaron por separado como fue mencionado anteriormente (Ítem 3.2). Sin embargo, la similitud en las curvas sugiere una semejanza en los resultados de dichas ecuaciones de tiempos de mezcla.

4.6 Ajuste de regresión

Al reemplazar los datos en los grupos adimensionales se obtuvo formas y correlaciones para ambos eductores, sin embargo, para obtener una ecuación representativa se debe ajustar una regresión. Para esto se ocupó el software *Curve Expert Professional*© v1.5, el cual ajusta y evalúa una serie de graficas en 2D en este caso, y discrimina la mejor gráfica a

través del coeficientes de determinación (r^2). La elección de la gráfica se hizo teniendo en cuenta r^2 y la complejidad en la forma de la ecuación, ya que una de las motivaciones de este estudio fue ayudar al sector de la acuicultura en el problema que se genera al tener estanques circulares de peces de diferentes dimensiones, de los cuales existe la incertidumbre si la mezcla se ha realizado completamente en un determinado tiempo

4.6.1 Ajuste de regresión Eductor 1

De todas las regresiones que discriminó el software se eligió la regresión “*Hyperbolic Decline*” de la familia modelos de declinación, la cual presenta un muy buen coeficiente de determinación ($r^2 = 0.991$) y la forma de la ecuación es más amistosa en consideración a las demás opciones.

La Regresión aplicada a los datos para el Eductor 1 se muestra a continuación (Figura 34):

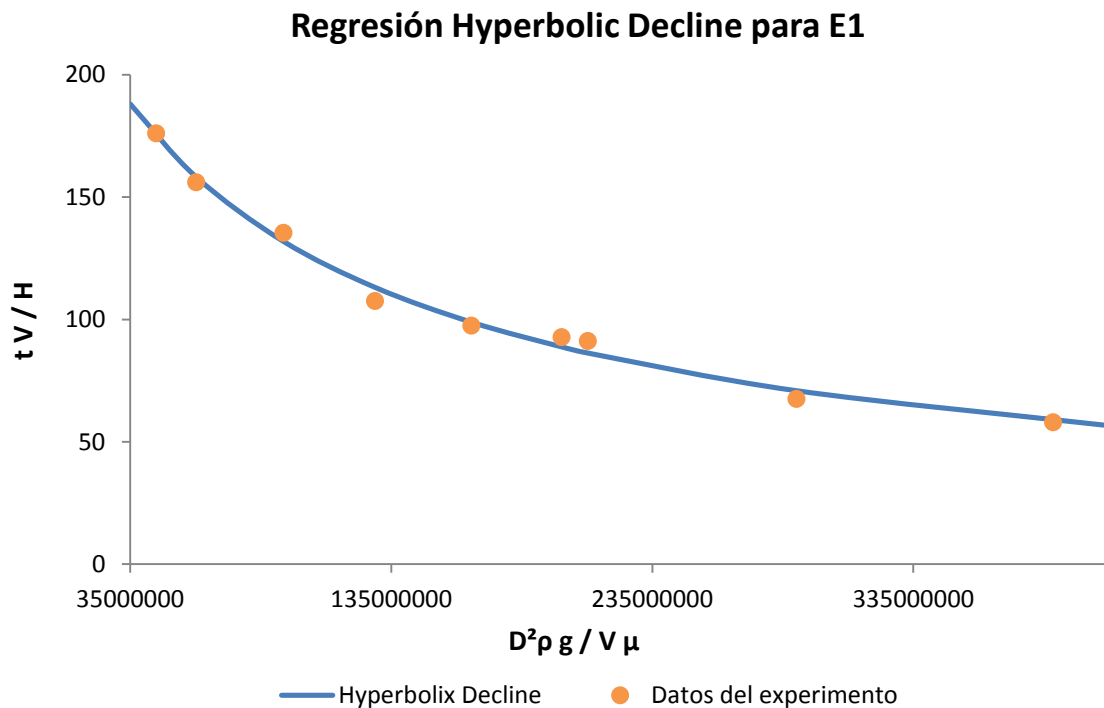


Figura 34: Regresión Hyperbolic Decline y base de datos experimentales aplicada a grupos adimensionales para el Eductor 1.

La forma de la ecuación Hyperbolic Decline es la siguiente:

$$y = q_0 * \left(1 + \frac{b * x}{a}\right)^{\left(\frac{-1}{b}\right)} \quad \text{Ec.20}$$

Luego de asignada la regresión, los parámetros de la ecuación son:

$$q_0 = 2.61317 * 10^2$$

$$a = 8.53544 * 10^7$$

$$b = 1.2912$$

Donde,

$$x = \frac{D^2 * \rho * g}{V * \mu} \quad \text{Ec.21}$$

$$y = \frac{t * V}{H} \quad \text{Ec.22}$$

Reemplazando,

$$\frac{t * V}{H} = 2.61317 * 10^2 * \left(1 + \frac{1.2912 * \frac{D^2 * \rho * g}{V * \mu}}{8.53544 * 10^7}\right)^{\left(\frac{-1}{1.2912}\right)} \quad \text{Ec.23}$$

Despejando t , se obtuvo la ecuación que determina el tiempo de mezcla para el eductor 1, en unidades SI.

$$t = 261.32 \frac{H}{V} \left(1 + \frac{1.512 * 10^{-8} D^2 \rho g}{V \mu}\right)^{-0.774} \quad \text{Ec.24}$$

A temperatura del agua de 15°C,

$$t = 261.32 \frac{H}{V} \left(1 + 0.123 \frac{D^2}{V}\right)^{-0.774} \quad \text{Ec.25}$$

El error estándar de la regresión fue de $SE_{E1} = 4.16$ asociada a cada grupo adimensional. El término incertidumbre está estrechamente relacionado con el error estándar y esta variabilidad nos indica el grado de precisión de la regresión que ejecutó el software sobre la base de datos ingresada.

De este modo se reemplazó el error estándar sobre cada grupo adimensional para lograr despejar cada tiempo de mezcla proyectado y analizar su variación respecto al obtenido experimentalmente.

Los resultados fueron que en promedio para el Eductor 1 se obtuvo una variabilidad de los datos en la regresión de aproximadamente 18 segundos respecto al medido experimentalmente. Esto induce por ejemplo, para un promedio de mezcla de 8 minutos una variación de 3.7%. El bajo porcentaje de error de la regresión corrobora el buen coeficiente de determinación obtenido ($r^2 = 0.991$), es decir, un buen ajuste de los datos.

4.6.2 Ajuste de regresión Eductor 2

De las regresiones ajustadas, como era de esperarse, para el Eductor 2 se obtuvo los mismos resultados que para el Eductor 1 en cuanto a la forma de la ecuación “*Hyperbolic Decline*” como mejor candidato, pero con parámetros diferentes que modificaron su inclinación. El coeficiente de determinación mejoró en consideración al Eductor 1 ($r^2 = 0.993$).

De todas las regresiones que discriminó el software se eligió la regresión “de la familia modelos de declinación, la cual presenta un muy buen coeficiente de determinación ($r^2 = 0.991$) y la forma de la ecuación es más amistosa en consideración a las demás opciones.

La Regresión aplicada a los datos para el Eductor 2 se muestra a continuación (Figura 35):

Regresión Hyperbolic Decline para E2

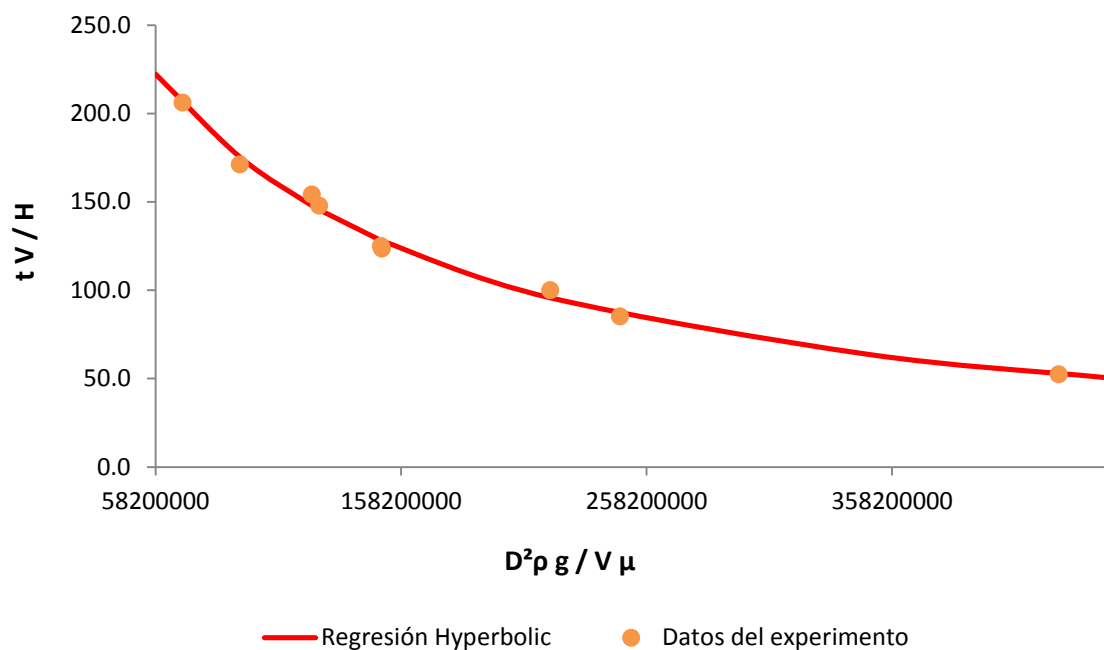


Figura 35: Regresión Hyperbolic Decline y base de datos experimentales aplicada a grupos adimensionales para el Eductor 2.

La regresión elegida, al igual que en el Eductor 1, tiene la misma forma:

$$y = q_0 * \left(1 + \frac{b * x}{a}\right)^{\left(\frac{-1}{b}\right)} \quad \text{Ec.20}$$

Luego de asignada la regresión, los parámetros de la ecuación son:

$$\begin{aligned} q_0 &= 8.883785 * 10^2 \\ a &= 8.1625317 * 10^7 \\ b &= 8.4637336 * 10^{-1} \end{aligned}$$

Donde,

$$x = \frac{D^2 * \rho * g}{V * \mu} \quad \text{Ec.21}$$

$$y = \frac{t * V}{H} \quad \text{Ec.22}$$

Reemplazando,

$$\frac{t * V}{H} = 8.883 * 10^2 * \left(1 + \frac{8.4637336 * 10^{-1} * \frac{D^2 * \rho * g}{V * \mu}}{8.1625317 * 10^7} \right)^{\left(\frac{-1}{8.4637336 * 10^{-1}} \right)} \quad \text{Ec.26}$$

Despejando t , se obtuvo la ecuación que determina el tiempo de mezcla para el eductor 2, en unidades SI.

$$t = 388.38 \frac{H}{V} \left(1 + \frac{1.04 * 10^{-8} D^2 \rho g}{V \mu} \right)^{-1.182} \quad \text{Ec.27}$$

A temperatura del agua de 15°C,

$$t = 388.38 \frac{H}{V} \left(1 + 0.08475 \frac{D^2}{V} \right)^{-1.182} \quad \text{Ec.28}$$

El error estándar de la regresión para el Eductor 2 fue de $SE_{E2} = 4.38$ asociada a cada grupo adimensional.

En promedio para el Eductor 2 se obtuvo una variabilidad de los datos en la regresión de aproximadamente 20 segundos respecto al medido experimentalmente. Esto induce por ejemplo, para un promedio de mezcla de 9 minutos una variación de 3.7%.

Si bien el coeficiente de determinación obtenido ($r^2 = 0.993$) de esta regresión es mejor al del Eductor 1 (lo que indica un mejor ajuste) su variación del tiempo respecto al medido es mayor, ya que los tiempos de mezcla para este eductor en la mayoría de ensayos fueron más altos.

4.7 Influencia del número de Reynolds y Froude en tiempo de mezcla

La relación de ambos números y su variación, proporcionó diferente información al momento de determinar su influencia en la combinación estanque-educador, manteniendo siempre el rango de velocidades adecuado para los peces.

Dado que el número de Reynolds se separa en escurrimiento laminar y turbulento, los resultados de los experimentos indicaron que claramente el flujo que rige en los estanques es turbulento, ya que el rango de valores para este parámetro varió entre 9670 y 58000 (Re para canales), mucho mayor al valor crítico de 600 para canales o 2300 en tuberías.

Como se trabajó con un rango de estanques desde el más pequeño usado en la práctica, y los números de Reynolds fueron aumentando gradualmente (Re desde 9670), se puede afirmar que siempre se estará en presencia de un flujo turbulento. Entonces en todos los estanques las fuerzas de inercia son más fuertes a las fueras viscosas. Esto es importante ya que la mezcla se produce por turbulencias.

De la Figura 36 se afirma que, un aumento del número de Reynolds, produce una disminución en el tiempo de mezcla. Para un estanque determinado, dado que este parámetro depende básicamente de la velocidad, se dedujo que a medida que se aumenta la velocidad se disminuye el tiempo de mezclado en el estanque. Sin embargo, se observó que la influencia en la variación del número de Reynolds sobre el tiempo de mezcla fue disminuyendo a medida que aumentaba el tamaño del estanque.

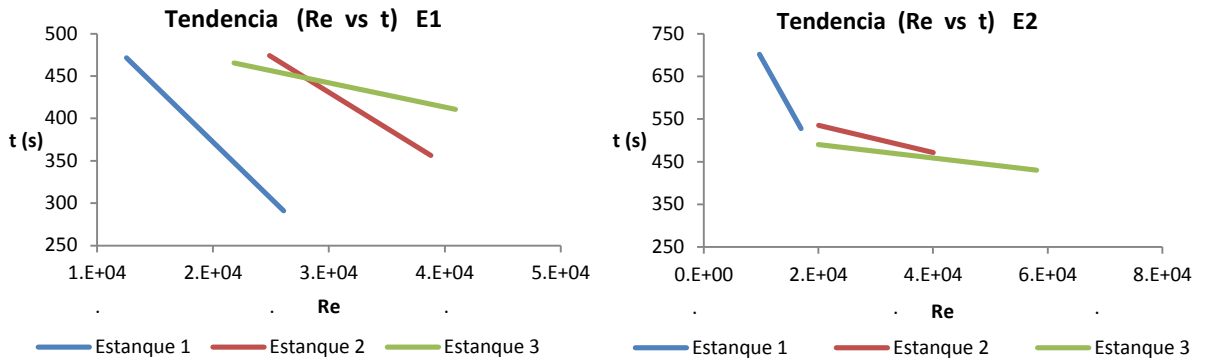


Figura 36: Número de Reynolds en variación del tiempo de mezcla para E1 y E2.

Por otra parte el número de Froude por ser mucho menor a 1 en todos los ensayos (alrededor de 0.003), indica que existe alta influencia de la gravedad.

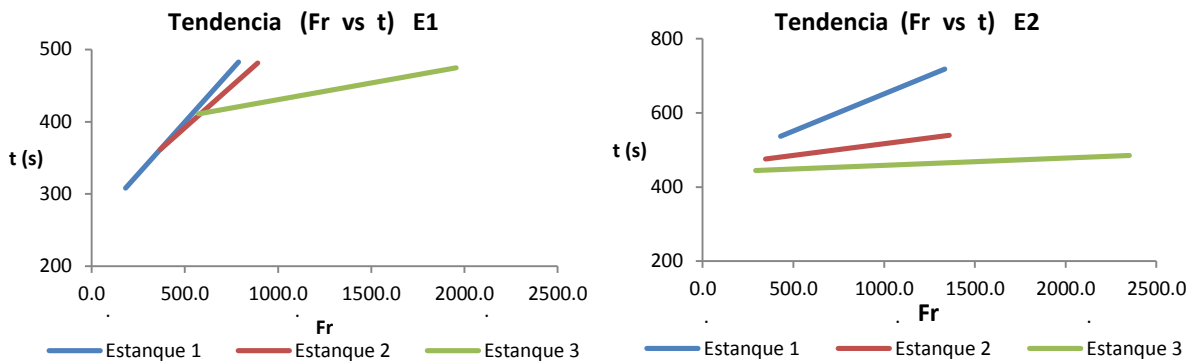


Figura 37: Número de Froude en variación del tiempo de mezcla para E1 y E2.

Al igual que el número de Reynolds, en los estanques pequeños, el número de Froude muestra mayor influencia en la variación del tiempo de mezcla, pero a medida que se aumenta el tamaño del estanque tiende a estabilizarse.

4.8 Elección de eductor por estanque

De los puntos 1 y 2 en la Figura 38 se puede inferir que para una misma relación Reynolds-Froude el Eductor 1 produce menores tiempos de mezcla; en otras palabras para un mismo estanque y misma velocidad aplicada, el Eductor 1 produce menores tiempos de mezcla.

Sin embargo, en el punto 3 se hace indiferente usar cualquier eductor para aumentar el mezclado en el estanque. Entonces se puede ajustar un criterio de elección de eductor en torno a estos resultados.

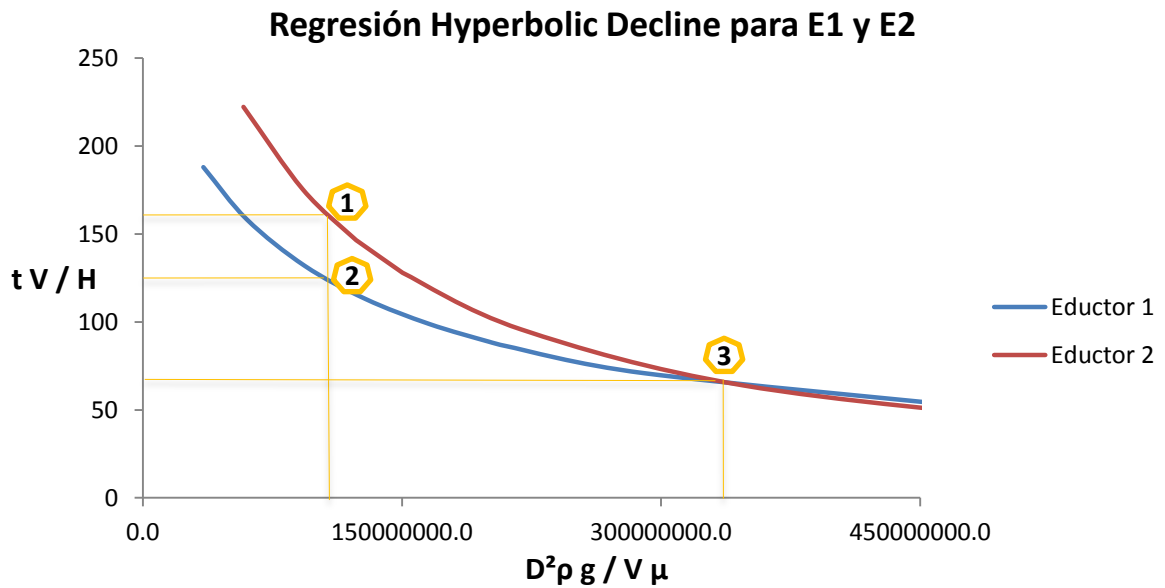


Figura 38: Comparación de puntos más significativos en superposición de regresiones para E1 y E2.

Para la elección de los eductores aplicado a los diferentes tamaños de estanques, en función de optimizar el tiempo de mezclado, se utilizaron dos criterios:

1. Tamaño de estanque, alcanzado el rango de velocidades:

Como la relación Reynolds-Froude depende básicamente de la variación de la velocidad y el diámetro del estanque, y la velocidad del estanque mantiene siempre el mismo rango limitado por el tamaño de los peces, se pudo discriminar el punto 3 de la Figura 38 despejando las condiciones en ambos ejes.

El rango de velocidades a respetar como condición se propone del 80% del rango expresado en la Tabla 1, que es de 8.5 cm/s a 34.1 cm/s para un tamaño de peces de 5 a 36 cm.

La combinación para este punto (Figura 38) en ambos eductores ocurre en el Estanque 3 con velocidades de aproximadamente 10 cm/s, y a medida que se aumenta la velocidad siempre el Eductor 1 se presenta como mejor candidato. Por esta razón la condicionante corresponde a la velocidad mínima de 8,5 cm/s.

Reemplazando esta condición en la combinación de equilibrio Reynolds-Froude podemos despejar un diámetro de estanque crítico.

$$\frac{D^2 * \rho * g}{V * \mu} = 3.5 * 10^8 \quad \text{Ec.29}$$

$$\frac{D^2 * 999.46 * 9.81}{0.085 * 0.001202} = 3.6 * 10^8 \quad \text{Ec.30}$$

$$D = 1.93 \text{ m} \quad \text{Ec.31}$$

En consecuencia el diámetro crítico para el uso eficiente del eductor 1 es de 1.93 m, y por lo tanto para diámetros mayores el Eductor 2 se presenta como mejor candidato.

2. Velocidad alcanzada, dado la bomba utilizada:

En los ensayos realizados se distinguió la capacidad de cada eductor para generar velocidades y sus condicionantes. Debido a que el Eductor 1 presenta una boquilla de salida más pequeña se produjo una pérdida importante de energía, provocando que en consecuencia para la bomba utilizada de considerable potencia de 0.8 HP, fuese en el Estanque 2 de 2000 litros alcanzara una velocidad media máxima de 22.38 cm/s. En cambio el Eductor 2 alcanzó su máxima velocidad media en el Estanque 3 con una velocidad de 27.52 cm/s.

En consecuencia, debido a la incertidumbre sobre la bomba a utilizar por cada sector acuícola, el criterio de elección se considera como un comentario de aporte al criterio anterior, en el cual se propone siempre usar el Eductor 1 para diámetros de estanques inferiores a 1.93 m, siempre y cuando el eductor genere las velocidades requeridas para el tamaño de bomba utilizada.

5 CONCLUSIONES

Se logró generar un análisis adimensional de las variables principales que influyen en la mezcla de un estanque circular y caracterizar el comportamiento hidrodinámico debido al sistema de inyección eductor. Lo que indicó como resultado dos ecuaciones de mezcla, una para cada eductor utilizado (Ec.24 y Ec.27).

En la mayoría de los ensayos realizados, para la misma velocidad generada en los estanques, el Eductor 1 (Nozzle No.46550-1/4) de menor dimensión arrojó menores tiempos de mezcla que el Eductor 2 (Nozzle No.46550-3/8). Se determinó que esta capacidad está limitada a un tamaño crítico del estanque de 1.93 metros de diámetro. De este valor en adelante el Eductor 2 ofrece mejores resultados.

Las regresiones aplicadas a los números adimensionales arrojaron un ajuste de buenos resultados para los Eductores 1 y 2, con una variabilidad de los datos en promedio de 18 y 20 segundos respectivamente. Lo que corresponde aproximadamente al 3.7% del tiempo de mezcla final del estanque.

Otra condición de elección de eductor es dependiente de la bomba a utilizar, ya que para la bomba utilizada de considerable potencia de 0.8 HP, fue en el Estanque 2 de 2000 litros (1.88 m de diámetro) que el Eductor 1 alcanzó una velocidad media máxima de 22.38 cm/s, por lo que se debe optar por el Eductor 2 de mayores dimensiones para alcanzar velocidades más altas. Por lo tanto, es necesario realizar investigaciones donde se estudie el consumo energético de los eductores en función de la velocidad del estanque para el bienestar de los peces cultivados.

6 REFERENCIAS

Arriagada, A. 2012. Evaluación del efecto de distintos sistemas de ingreso de agua, educador y rociador vertical, sobre el tiempo de mezcla en un estanque circular. Pontificia universidad católica de valparaíso, Chile.

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.

Dias, J. 2006. Mecánica de los Fluidos e Hidráulica, Universidad del Valle, Colombia, 1ª Edición. pp 73

Engelund, F. (1974). Flow and bed topography in channel bends. *J. Hydraul. Engrg.*

Holland, F.A. and Chapman, F.S., 1966. Liquid Mixing and Processing in stirred tanks. Reinhold Publishing Corporation, 1a. edición, pp 17-25.

Huntley, H.E. 1967. Dimensional Analysis. Dover Publications, Inc. New York.

Klapsis, A. & Burley, R. 1984. Flow distribution studies in fish rearing tanks. Part 1- design constraints. *Aquacultural Engineering* 3: pp 103.

Lekang, O.I., 2007. *Aquaculture Engineering*, pp 158-174.

Masaló, I & Oca, J. 2010. Distribution of velocities in aquaculture circular tanks with rotating flow and evaluation of uniformity.

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, pp 54.

Oca, J. & Masalo, I., 2013. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. *Aquacultural Engineering*, pp 65–72.

- Plew, D. et al 2015.** Changes to flow and turbulence caused by different concentrations of fish in a circular tank. *Journal of Hydraulic Research*.
- Quintana, L. 2006.** El teorema de Pi y la modelación. Tabasco, México.
- Rasmussen, M. et al 2005.** Do fish enhance tank mixing?. *Aquaculture* 250: 162– 174.
- Revill, B. 1992.** Jet mixing. In Harnby, et al (Ed) *Mixing in the process industries*. 2ª Edición. pp 412.
- Rocha, A. 2007.** *Hidráulica de canales y tuberías*, pp 177.
- Rozovskii, I. L. (1957).** Flow of water in bends of open channels (in Russian). Israel Program for Sci. Transl., Jerusalem, 1961: Izd. Akad. Ukr. SSR, Kiev, 1957.
- Schutte & Koerting, 2007.** Water jet eductors. Link (64.201.227.3/~sk / 2M_Water_Jet_Eductors .pdf), pp 1-8.
- Shames, I. 1995.** *Mecánica de fluidos*, 3ª Edición.
- Shirakov, V. 1985.** *Manual de Hilandería*. Moscú. pp 392-394
- Spraying Systems Co. 2008.** A guide to optimizing in tank agitation and mixing using eductors. Link (de.spray.com/Portals/0/pdf/B635.pdf).
- Tandon, A. and Marshall J. 2010.** Einstein's Tea Leaves and Pressure Systems in the Atmosphere. *The Physics Teacher*. Vol. 48.
- Timmons, M. et al 2002.** *Sistemas de recirculación para la acuicultura*. Fundación Chile, Santiago, pp 750.
- Timmons, M.B., Summerfelt, S.T. & Vinci, B.J., 1998.** Review of circular tank technology and management. *Aquacultural Engineering*, 18(1), pp.51–69.
- Venegas, P. et al 2014.** Hydrodynamic effects of use of eductors (Jet-Mixing Eductor) for water inlet on circular tank fish culture. *Aquacultural Engineering*, 59, pp.13–22.

ANEXO A: Tablas de datos resumen del experimento.

Tabla A.1: Resumen de variables medidas en Estanque 1.

Estanque 500 litros									
D	Da		Db	Q		V	t	ΔH	H
(m)	(mm)		(mm)	(l/min)		(cm/s)	(min)	(m)	(m)
1,18	E1	4,6	17	Q1	4	12,12	8	0,001	0,43
				Q2	8,2	18,84	6	0,002	0,435
				Q3	11	25,23	5	0,004	0,435
	E2	8	34	Q1	4,6	9,31	12	0,001	0,43
				Q2	8,2	12,27	10	0,004	0,43
				Q3	12	16,40	9	0,005	0,435

Tabla A.2: Resumen de variables medidas en Estanque 2.

Estanque 2000 litros									
D	Da		Db	Q		V	t	ΔH	H
(m)	(mm)		(mm)	(l/min)		(cm/s)	(min)	(m)	(m)
1,88	E1	4,6	17	Q1	10,5	14,40	8	0,001	0,745
				Q2	12,5	17,40	7	0,002	0,75
				Q3	15	22,38	6	0,004	0,75
	E2	8	34	Q1	12,5	11,65	9	0,001	0,74
				Q2	22	19,16	8	0,004	0,745
				Q3	26	23,09	8	0,005	0,75

Tabla A.3: Resumen de variables medidas en Estanque 3.

Estanque 3600 litros									
D	Da		Db	Q		V	t	ΔH	H
(m)	(mm)		(mm)	(l/min)		(cm/s)	(min)	(m)	(m)
2,25	E1	4,6	17	Q1	9	10,63	8	0,001	0,88
				Q2	11,5	14,23	7	0,0025	0,885
				Q3	15	19,63	7	0,003	0,905
	E2	8	34	Q1	11,8	9,69	8	0,001	0,889
				Q2	24,5	18,86	8	0,002	0,905
				Q3	35	27,52	7	0,006	0,925