INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

MODELACIÓN DE FLUJO DE AGUA EN UN SISTEMA DE CULTIVO LARVARIO DE PECES MARINOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN
MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA

JOSÉ RAYMUNDO CASTRO COLLINS

LA PAZ, B.C.S., DICIEMBRE DE 2015

SIP-14 BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de **La Paz, B.C.S.,** siendo las **12:00** horas del día **18** del mes de **Noviembre** del **2015** se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de **CICIMAR** para examinar la tesis titulada:

"MODELACIÓN DE FLUJO DE AGUA EN UN SISTEMA DE CULTIVO LARVARIO DE PECES MARINOS"

Presentada por el alumno:

CASTRO	**COLLINS**	**JOSÉ RAYMUNDO**
Apellido paterno	materno	nombre(s)

Con registro:

A	1	4	0	5	0	4

Aspirante de:

MAESTRIA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron ***APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS***, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Directores de Tesis

DR. MACLOVIO OBESO NIEBLAS
Director de Tesis

DR. JUAN CARLOS PÉREZ URBIOLA
2º. Director de Tesis

DR. FEDERICO ANDRÉS GARCÍA DOMÍNGUEZ

DR. JOSÉ LUIS ORTIZ GALINDO

MC. MANUEL LUIS RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DRA. MARÍA MARGARITA CASAS VALDEZ

PODER EJECUTIVO FEDERAL
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
MÉXICO, D.F.

I.P.N.
CICIMAR
DIRECCIÓN

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 27 del mes de Noviembre del año 2015

El (la) que suscribe ING. PESQ. JOSÉ RAYMUNDO CASTRO COLLINS Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro A140504 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. MACLOVIO OBESO NIEBLAS y DR. JUAN CARLOS PÉREZS URIBIOLA

y cede los derechos del trabajo titulado:

"MODELACIÓN DE FLUJO DE AGUA EN UN SISTEMA DE CULTIVO LARVARIO DE PECES MARINOS"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: **reyli123_@hotmail.com - mniebla@ipn.mx - jperez@cibnor.mx**

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

ING. PESQ. JOSÉ RAYMUNDO CASTRO COLLINS

Nombre y firma del alumno

DEDICATORIA

A mis padres por su amor y apoyo incondicional en el transcurso de la vida.

José Castro Hernández
Ana Isabel Collins Avilés

A mis hermanas con mucho cariño

Verónica Castro Collins
Carolina Estefanía Castro Collins

A toda mi familia, primos, tíos y amigos que de una otra manera estuvieron presentes en todo momento para darme ánimo en la realización de mis estudios de posgrado.

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad"
Albert Einstein

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología de CONACYT, por la beca otorgada para realizar esta tesis y a las autoridades del Instituto Politécnico Nacional (IPN) y al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado, al Centro de Investigación Biológicas del Noroeste (CIBNOR), por el apoyo otorgado de facilitar las instalaciones de laboratorios y la realización de la parte experimental.

A la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI) del IPN por la ayuda económica entregada durante el periodo de mis estudios.

A mis padres y hermanas que siempre me han brindado su confianza y cariño, son los pilares de mi vida, siempre han estado en todo momento.

A mis directores de tesis: Maclovio Obeso Nieblas y Juan Carlos Pérez Urbiola por el apoyo desarrollado a lo largo del proyecto, gracias por su amistad, y estuvieron siempre al pendiente en la parte académica y como persona. También, les gradezco por compartir sus conocimiento, habilidades y la asesoría en la parte experimental, en el mantenimiento de los cultivo y por supuesto por brindarme el equipo necesario tanto de materiales e insumos de trabajo.

Al M. en C. Manuel Luis Rodríguez Rodríguez por su profesionalismo y la ayuda brindada en la parte de simulación del modelo hidrodinámico y gracias por sus consejos de ser claro, concreto y conciso.

Al comité tutorial: Dr. José Luis Ortíz Galindo y Dr. Federico Andrés García Domínguez, por sus importantes sugerencias y comentarios acertados en el desarrollo de la investigación y sobre todo en la escritura de la tesis.

A la Dra. Rosa Isabel Ochoa Báez, por sus conocimientos transmitidos en las clases, sus pláticas y aceptar ser suplente en la comisión revisora.

A los técnicos del laboratorio de biología reproductiva de organismos acuáticos de CIBNOR, Marcos Quiñones, Francisco Encarnación, José Gilberto Colado y Jorge Sandoval por el apoyo otorgado en facilitar las actividades de cultivo larvario, la ayuda necesaria en montar la parte experimental y alimentar a los organismos.

A la M. en C. Roxana Inohuye, por su apoyo brindado de estar siempre al pendiente del trabajo de tesis, por sus comentarios, sugerencias y amistad.

Por último, les doy las gracias a los compañeros y profesores que participaron en seminarios y que aportaron valiosas observaciones en el trabajo de tesis.

ÍNDICE

	Página
GLOSARIO	i
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I.- INTRODUCCIÓN	1
1.1. Por qué trabajar con el jurel (*Seriola rivoliana*).	3
1.2. Generalidades de la especie.	3
1.3. Distribución del género *Seriola.*	4
1.4. Los efectos de aireación en tanques de cultivo de peces marinos.	5
II.- ANTECEDENTES	8
2.1. El cultivo de peces marinos a nivel mundial.	8
2.2. La producción de pesca y cultivo de jurel *Seriola* spp., en Japón.	9
2.3. La pesca de jurel en México por entidades federativas y regiones.	10
2.4. Producción pesquera y acuícola por los Estados de la República Mexicana.	11
2.5. Captura de jurel en Baja California Sur.	14
2.6. El desarrollo del cultivo de peces marinos en México.	15
2.7. Principales empresas que cultivan y engorda peces marinos en Baja California Sur.	17
2.8. Estudios relacionados con el flujo de aireación en larvas de peces marinos.	19
2.9. Descripción de la geometría en tanques de acuicultura.	22
2.10. Tanque de cultivo tradicional de peces marinos en la acuicultura.	22
2.11. Métodos numéricos.	24
III.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA O HIPÓTESIS	26
3.1. Justificación.	26
3.2. Hipótesis.	27
IV.- OBJETIVOS	28
4.1. Objetivo general.	28
4.2. Objetivos específicos.	28
V.- METODOLOGÍA	29
5.1. Ecuaciones utilizadas en el modelo COMSOL.	30
5.1.1. Ecuación de momentum para la fase líquida del flujo burbujeante.	30
5.1.2. Ecuación de continuidad.	30
5.1.3. Ecuación de transporte de la fracción de volumen de gas a líquido.	31
5.2. Plataforma COMSOL.	32
5.3. Descripción del modelo.	34
5.3.1. La construcción del modelo burbujeante.	35
5.4. La parte experimental.	40
5.5. Captura de reproductores.	43
5.6. Primera corrida del cultivo larvario	44
5.7. Segunda corrida del cultivo larvario.	45
5.8. Tercera corrida del cultivo larvario.	45

VI.- RESULTADOS	46
6.1. Simulación con fuente aire central (Tanque A).	46
6.2. Simulación con fuente de aire perimetral (Tanque B).	50
6.3. Simulación en el Tanque A utilizado en el laboratorio.	54
6.4. Simulación en el Tanque B utilizado en el laboratorio.	57
6.5. Primera corrida del cultivo larvario de *Seriola rivoliana.*	60
6.6. Segunda corrida del cultivo larvario de *Seriola rivoliana.*	62
6.7. Tercera corrida del cultivo larvario de *Seriola rivoliana.*	64
VII.- DISCUSIÓN	67
VIII.- CONCLUSIONES	70
IX.- RECOMENDACIONES	71
X.- LITERATURA CITADA	72
XI.- ANEXO	80
11.1. Fuerzas que actúan en una burbuja de aire.	80
11.2. Flujo burbujeante.	85
11.3. Patrón de flujo burbujeante en tubería vertical.	86
11.4. Evaluación de la supervivencia en un cultivo de larvas en un tanque con fuente de aire central.	88
11.5. Cultivo masivo de rotíferos.	91
11.6. Cultivo masivo de copépodos.	91

GLOSARIO

Aceleración de la gravedad: Se denota por g y se define como el incremento constante de la velocidad por un cuerpo en caída libre por unidad de tiempo. En la superficie de la tierra la aceleración de la gravedad es aproximadamente 9.81 m/s^2 (Yunus y John, 2012).

Altura: Es una longitud o una distancia de una dimensión geométrica, usualmente vertical o en la dirección de la gravedad (Baldor, 2004).

Circulación: El concepto de circulación lo utilizan en nuestra lengua para indicar el movimiento o traslado de cosas, sustancias, líquidos y hasta personas por un determinado lugar o a través de una vía (Yunus y John, 2012).

Copépoda: Es un grupo de pequeños crustáceos bentónicos, p. anctónicos o parásitos que viven en la columna de agua, son usualmente el grupo dominante del zooplancton marino (Lalli y Parsons, 1993).

Corriente: En física, en general, una corriente es el movimiento de traslación de un fluido en una dirección (Yunus y John, 2012).

Densidad: Se define como masa por unidad de volumen. Ejemplo, ρ = kg/m^3 (Yunus y Michael, 2009).

Ecuación de continuidad: Forma matemática de la conservación de masa aplicada a una partícula de fluido en un flujo (Yunus y John, 2012).

Ecuación de difusión del gas en el líquido: Es una magnitud física que calcula la fracción volumétrica de gas que se transfiere al líquido (Yunus y John, 2012).

Ecuación de momentum o cantidad de movimiento: Es una magnitud física fundamental de tipo vectorial que describe el movimiento de un cuerpo en cualquier sistema mecánico (Yunus y John, 2012).

Eclosión: Proceso en el cual se rompe el corion o envoltura del huevo y emerge el eleuteroembrión (Balon, 2002).

El periodo embrionario en peces: Se divide en tres fases:

Fase de segmentación: comprende desde la fertilización del huevo hasta el comienzo de la organogénesis (Balon, 2002).

Fase de embrión: inicia al cerrarse el blastoporo, caracterizado por una intensa organogénesis, la cual termina poco momentos antes de la eclosión.

Fase eleuteroembrión: abarca desde el momento de la eclosión y termina cuando el vitelo es absorbido y el organismo es apto para la alimentación exógena.

Fluido: Un material que cuando se aplica un esfuerzo cortante, se deforma continuamente a lo largo de la dirección perpendicular al esfuerzo aplicado (Yunus y John, 2012).

Flujo: Cambio continúo de la configuración de un fluido. (Yunus y John, 2012).

Flujo burbujeante: Se presenta cuando hay dos fases, líquido y gas en la que la fase gaseosa está formada por un flujo de burbujas en interacción con la fase líquida. Presentando el líquido un movimiento acoplado al del gas (García-Mendoza, 2007).

Flujo incompresible: Se presenta, cuando la densidad permanece aproximadamente constante, e independiente de la presión a lo largo de todo el flujo (Yunus y John, 2012).

Flujo laminar: Estado estable bien ordenado de flujo de fluido en el que cada una de las partículas que lo componen se mueven a largo de líneas bien definidas e independientes unas de otras (Yunus y John, 2012).

Flujo turbulento: Estado desordenado e inestable de flujo de fluido que es inherentemente no-estacionario y que contiene vórtices en un amplio rango de tamaños (Yunus y John, 2012).

Gas: Fluido sin forma ni volumen propios, cuyas moléculas tienden a separarse unas de otras y presentan una alta movilidad (Yunus y John, 2012).

Geometría: Es una rama de la matemáticas que se ocupa del estudio de las propiedades de las figuras en el plano o el espacio (Baldor, 2004).

Hidrodinámica: El estudio y análisis de líquidos por medio de la leyes de conservación macroscópica de la física (Yunus y John, 2012).

Huevo: Inicia cuando el ovocito es fecundado y termina en la eclosión (Balon, 1984).

Isotérmico: Que conserva la temperatura constante en el proceso (Yunus y Michael, 2009).

Líquido: Es un estado de la materia con una densidad y volumen definidos, pero sin una forma particular, adopta la forma del recipiente dejando una superficie libre (Yunus y Michael, 2009).

Magnitud: Es una propiedad o cualidad medible de un sistema físico, es decir, a la que se le pueden asignar distintos valores como resultado de una medición o una relación de medidas. Como ejemplo: velocidad, temperatura. (Yunus y Michael, 2009).

Masa: Es una medida de la cantidad de materia que posee un cuerpo que tiene unidades de (kg) (Yunus y Michael, 2009).

Método de elemento finito: Es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales (Bathe *et al*. 1995).

Patrón de flujo: Son las distintas configuraciones que toma el fluido al moverse de una región a otra del espacio. En caso de que el movimiento se presente en una tubería, se clasifican por la forma que adquieren, lo cual depende de la topografía de la interface sólida (García-Mendoza, 2007).

Presión: Es una magnitud física que mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie (Yunus y John, 2012).

Presión hidrostática: La componente de variación de presión en un fluido que depende de la fuerza gravitacional (Yunus y John, 2012).

Presión manométrica: La presión relativa (P) a la presión atmosférica (P atm). Esto es: P manométrica = P absoluta – P atm (Yunus y John, 2012).

Periodo larvario de peces: Se divide en tres fases, que se consideran como principal criterio el grado de flexión o torsión de notocordio, el cual se relaciona directamente con la talla de los organismo, manifestando cambios morfofisiológicos y desarrollo de manera particular para cada especie (Kendall, 1984).

Fase de preflexión: Comienza desde el nacimiento de la larva, mientras presenta un notocordio recto, ocurriendo eventos importantes como la pigmentación de los ojos, formación y apertura de la boca, finaliza antes de iniciar la flexión del notocordio.

Fase de flexión: Es el intervalo de talla, que comprende desde que inicia hasta que concluye la flexión del notocordio.

Fase de postflexión: Inicia a partir de haberse completado la flexión del notocordio, hasta que los órganos presenten características y el aspecto de un juvenil.

Problema con condiciones de fronteras: Se le denomina así al conjunto de una ecuación diferencial y a las condiciones de fronteras o de contorno aplicadas. Una solución de un problema con condiciones de fronteras es una solución de una ecuación diferencial que también satisface esas condiciones (Yunus y John, 2012).

Radio: En geometría, el radio de una circunferencia es cualquier segmento que une el centro a cualquier punto de ésta (Baldor, 2004).

Remolino o vórtice: Es un volumen de fluido que presenta un patrón giratorio (Yunus y John, 2012).

Rotífero: Son organismos microscópicos y acuáticos, un tipo de animal metazoario invertebrado, conocido principalmente por ser componente del zooplancton (Fulks y Main, 1992).

Simetría axial: Cualquier patrón que se representa idénticamente respecto de la rotación en torno a un eje (Baldor, 2004).

Temperatura: La temperatura es una magnitud física que es una variable de estado del sistema. En otras palabras, el grado o nivel térmico de un cuerpo o de la atmósfera (Yunus y Michael, 2009).

Vector: Es una magnitud física definida por un punto del espacio donde se mide la magnitud, dirección y sentido (Yunus y John, 2012).

Velocidad: Vector que cuantifica la razón de cambio en la posición y la dirección de movimiento de una partícula material (Yunus y John, 2012).

LISTA DE FIGURAS

No.	Descripción	Página
1	Zona de captura del jurel *Seriola* en el litoral del Pacífico Mexicano.	4
2	Producción pesquera del género *Seriola* en noroeste de México.	4
3	Estado mundial de la pesca y acuicultura.	8
4	Pesca y cultivo de *Seriola* spp., en Japón (FAO, 2000).	9
5	Pesca de jurel de 1986-2002 por entidades federativas.	10
6	Captura estatal del jurel en el Pacífico Mexicano de 1986-2007.	11
7	Producción pesquera y acuícola por Estado de la República en el año de 2010 en millones de pesos.	11
8a	Estado de las pesquerías en el litoral centro del Pacífico mexicano. Azul oscuro: subdesarrollada; Azul claro, en desarrollo; Verde, máximo aprovechamiento; Amarillo, sobre-pesca; Rojo, colapso.	12
8b	Estado de las pesquerías en el litoral centro del Pacífico mexicano. Azul oscuro: subdesarrollada; Azul claro, en desarrollo; Verde, máximo aprovechamiento; Amarillo, sobre-pesca; Rojo, colapso.	13
9	Composición específica de especies que se capturan con pesca deportiva en B.C.S., (2001-2010).	14
10	Captura estatal de la pesca ribereña de jureles en toneladas de 1986-2007.	14
11	Estados de la República donde se cultiva el jurel (*Seriola*).	15
12	Ilustración de los componentes del tanque de cultivo de peces marinos que se utilizan con mayor frecuencia.	23
13	Imagen del tanque de cultivo de peces marinos con vista de la sección vertical para visualizar de mejor manera la circulación del tanque.	23
14	Esquema representativo del diseño del tanque que se utiliza en el proceso de modelación y simulación en el ambiente de COMSOL.	32
15	Dominio de la hidrodinámica del tanque circular.	38

16	Malla que utiliza el modelo para realizar cálculos hidrodinámicos en el tanque.	38
17	Imagen de la fuente de aire en la parte central (color negro) del fondo del tanque A, (Diámetro 2.0 m y Altura 1.0 m).	40
18	Fotografía de la fuente de aire central en el fondo del tanque en el laboratorio.	41
19	Imagen de la fuente de aire en la parte perimetral (color rojo) en el fondo del tanque B, (Diámetro 2.0 m y Altura 1.0 m).	41
20	Fotografía de la fuente de aire perimetral en el fondo del tanque en el laboratorio.	42
21	Fotografía de los tanques reproductores del jurel *Seriola rivoliana* en CIBNOR.	43
22	Periodo embrionario en el día cero del cultivo del jurel *Seriola rivoliana*.	44
23	Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 0.5 m y H = 1.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.	46
24	Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 2.0 m y H = 1.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.	47
25	Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 1.0 m y H = 0.5 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.	48
26	Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 1.0 m y H = 2.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.	49
27	Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 0.5 m y H = 1.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.	50
28	Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 2.0 m y H = 1.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.	51

29	Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 1.0 m y H = 0.5 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.	52
30	Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 1.0 m y H = 2.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.	53
31a	Imagen de la modelación de la distribución de corrientes, en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 1.0 m y H = 0.8 m.	54
31b	Modelación de la distribución vectorial de corrientes en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 1.0 m y H = 0.8 m.	55
32	Puntos muestreados donde se calcula la magnitud de velocidad del agua en el Tanque A.	56
33	Magnitud de velocidad de la fase líquida en los puntos muestreados en el Tanque A.	56
34a	Imagen de la modelación de la distribución de corrientes, en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 1.0 m y H = 0.8 m.	57
34b	Modelación de la distribución vectorial de corrientes en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 1.0 m y H = 0.8 m.	58
35	Puntos muestreados donde se calcula la magnitud de velocidad del agua en el Tanque B.	59
36	Magnitud de velocidad de la fase líquida en los puntos muestreados en el Tanque B.	59
37	Período larvario del jurel *Seriola rivoliana*: en (A) Larval día 1, (B) el saco vitelino comienza a reducirse, los ojos y el aparato digestivo van desarrollándose.	60
38	Larva preflexión día 3, se ven los ojos pigmentados, además abren la boca para capturar a su presa y se abre el ano, aún conserva parte de la gota de aceite.	61
39	Temperatura y oxígeno disuelto en la primera corrida tanque A.	61
40	Temperatura y oxígeno disuelto en la primera corrida tanque B.	61
41	Temperatura y oxígeno disuelto en la segunda corrida tanque A.	63
42	Temperatura y oxígeno disuelto en la segunda corrida tanque B.	63

43	Temperatura y oxígeno disuelto en la tercera corrida tanque A.	65
44	Temperatura y oxígeno disuelto en la tercera corrida tanque B.	65
45	Movimiento ascendente de una burbuja de aire en un fluido viscoso, P = 0 (Presión de vacío), X1 = Profundidad en el punto X1 y X0 = Profundidad cero.	81
46	Burbuja de aire ascendiendo en una columna de aceite. R y r radios de las burbujas según la posición.	82
47	Fuerzas que gobiernan el movimiento ascendente de una burbuja de aire, Fa = Fuerza de arrastre, E = Fuerza empuje y r = radio de la burbuja.	82
48	Fotografía del octavo día del cultivo larvario del jurel *Seriola rivoliana.*	90
49	La relación entre la temperatura y oxígeno del tanque con fuente de aire central.	90
50	Fotografías (a y b) del tanque de cultivo masivo de copépodos en el patio de cultivo en el CIBNOR.	92

LISTA DE TABLAS

No.	Descripción	Página
1	Descripción de puntos muestreados en el Tanque A.	55
2	Descripción de puntos muestreados en el Tanque B.	58
3	Calendario de actividades de alimentación de la corrida 1.	62
4	Calendario de actividades de alimentación de la corrida 2.	64
5	Calendario de actividades de alimentación de la corrida 3.	66
6	Calendario de actividades de alimentación.	89

RESUMEN

El cultivo de peces marinos en México ha progresado rápidamente en la última década. Es realizado en tanques de cultivo, con flujo de aire a presión, para generar movimiento en el agua y homogenizar los parámetros fisicoquímicos (O_2, S, TºC, etc), así como la distribución de las larvas. Las larvas son sensibles al estrés físico, particularmente cuando el flujo de agua es desfavorable. Ésta condición crítica se presenta en el periodo larvario, específicamente en la primera semana del cultivo, cuando se registra la mayor mortalidad. El objetivo de este trabajo es aplicar un modelo hidrodinámico que permita determinar el régimen de flujo de agua, para adecuarlo a las necesidades de la especie en cultivo y aumentar la supervivencia. Con la plataforma computacional basada en el Método de Elementos Finitos, se realizaron simulaciones de las condiciones de flujo de agua, con fuente de aire central (Tanque A) y perimetral (Tanque B). Se observó que la circulación con fuente perimetral se dirige al centro del tanque, con velocidades máximas en la superficie y en el centro del tanque, mientras que, con la fuente central, la circulación se dirige a la pared del tanque con la mayor rapidez en la parte central y en la superficie. La visualización del movimiento del agua en el tanque, se obtuvo empleando azul de metileno y con partículas trazadoras, esto permitió constatar la tendencia del flujo de agua determinado con las simulaciones. Para validar el modelo hidrodinámico se realizaron tres corridas de cultivo larvario con jurel *Seriola rivoliana.* Con fuente de aire central se presentó una supervivencia larvaria de 6, 79 y 130 organismos con una presión de flujo de aire de 0.17, 0.10 y 0.05 atm, mientras que con fuente de aire perimetral, la supervivencia fue de 0, 46 y 65 organismos con una presión de flujo de aire de 0.23, 0.17 y 0.10 atm respectivamente. La simulación con fuente de aire central, proporciona un patrón de circulación más homogéneo y con velocidades que facilitan la supervivencia larvaria en el caso del jurel, esto fue confirmado en las tres corridas del cultivo.

ABSTRACT

The marine fish culture in México has progressed rapidly in the last decade. It is performed in culture tanks with air flow pressure to generate movement in the water and homogenize the physicochemical parameters (O_2, S, T^{o}C, etc.), and the distribution of larvae. Larvae are sensitive to physical stress, particularly when the water flow is poor. This critical condition occurs in the larval period, specifically in the first week of culture, when most mortality occurs. The objective of this work is to apply a hydrodynamic model to determine the flow regime of water, to adjust the needs of the species in cultivation and increase survival. With the computing platform based on Finite Element Method, the simulations were performed of the conditions of water flow, with central air source (Tank A) and perimeter (Tank B). It was observed that the circulation perimeter source is directed to the center of the tank, with maximum speeds on the Surface and in the center of the tank, while, with central source, circulation is directed to the tank wall with máximum speed in the central part and on the surface. Displaying the movement of water in the tank, was obtained using methylene blue and tracer particles, this helped to confirm the trend of water flow determined with simulations. To validate the hydrodynamic model were performed three runs of larviculture with yellowtail *Seriola rivoliana*. With central air source was presents a larval survival of 6, 79 and 130 organisms, with a pressure of airflow 0.17, 0.10 and 0.05 atm, while, with perimetral air source the survival was 0, 46 and 65 organisms with a pressure of airflow 0.23, 0.17 and 0.10 atm respectively. The simulation with central air source, It provides a pattern of more homogeneous circulation and with speeds that facilitate larval survival in the case of yellowtail, this was confirmed in the three culture runs.

I.- INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el desarrollo tecnológico ha tenido una gran importancia en la piscicultura, dio inicio en la década de los 80. Se han realizado trabajos de jaulas flotantes con el cultivo de salmón (*Salmo salar)*. Estos esfuerzos incentivaron la intervención de los acuicultores europeos, quienes analizaron el potencial de cultivo de la dorada (*Sparus aurata*), la lubina (*Dicentrarchus labrax*) y el rodaballo (*Scophthalmus maximus*) en el Mediterráneo. Estos trabajos dieron como resultado un creciente desarrollo en la producción de estas especies, las que tienen alto valor en el mercado, estimándose en más de 15000 toneladas métricas anuales (Sorgeloos y Sweetman, 1993).

En México, el cultivo de peces marinos tiene un gran potencial de desarrollo, principalmente por la extensa línea costera que puede ser explotada (Océano Pacífico, Golfo de California, Golfo de México y el Caribe). Pese a esto, son pocas las especies cultivadas a nivel comercial. Los cultivos se centran principalmente en el cultivo de moluscos y crustáceos, esto abre un escenario de oportunidad propicio para los cultivos de peces marinos en nuestro país. El mayor desarrollo de cultivo de peces marinos se encuentra en el noroeste del País, en el Instituto de Acuicultura del Estado de Sonora se realizaron estudios para el cultivo y cría de jurel (*Seriola lalandi*) y curvina golfina (*Cynoscion othonoptereus*) (Salvador-Meza, 2010).

En el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) de la unidad de Mazatlán Sinaloa, se han conducido investigaciones sobre el cultivo el botete diana (*Sphoeroides annulatus*) y pargo lunarejo (*Lutjanus guttatus*) relativos a la reproducción, nutrición y alimentación de estas especies (García-Ortega, 2010).

La Universidad Autónoma de Baja California (UABC), también ha desarrollado cultivos de *Totoaba macdonaldi (*SEMARNAT, 2010). El cultivo de jurel de castilla (*Seriola lalandi*) se ha realizado por la empresa Baja Sean Labs y del lenguado (*Paralichthys californicus*) por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y varias empresas (como Baja Aqua Farm S.A. de C.V., Maricultura del Norte, S. de R. L. de C.V., etc.) tienen

experiencia comercial en la engorda del atún aleta azul (*Thunnus orientalis*) en ranchos marinos al norte de la Ciudad de Ensenada, B.C., Isla de Cedros, B.C.S. y en la Bahía de La Paz. La empresa Rancheros del Mar de La Paz S.A. de C.V., realiza actividades de cultivo y engorda de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) y jurel (*Seriola* spp.*)* en el Estado de Baja California Sur (Salvador-Meza, 2006).

En el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) se conducen estudios sobre la biología y cultivo larvario de *Cynoscion parvipinnis, Gerres cinereus, Paralabrax maculatofasciatus, Eugerres axillaris, Calamus brachysomus* y *Atherinops affinis* (Matus-Nivón *et al.,* 1990). El Centro Regional de Investigación Pesquera de La Paz, B.C.S., desarrolló con éxito la metodología de cultivo de la cabrilla arenera (*Paralabrax maculatofasciatus*) (Avilés-Quevedo, 1995). En el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) se ha trabajado con la tecnología de cultivo de pargos, cabrillas y actualmente sobre el jurel pez fuerte. La metodología para el cultivo larvario de peces marinos está en una etapa de progreso rápido y hay mejoras significativas. Sin embargo, las larvas de peces marinos son frágiles ante el estrés físico, tal como un flujo de agua, la luz y los parámetros fisicoquímicos desfavorable, los cuales pueden ser la causa de una mortalidad masiva.

Por otra parte, uno de los rasgos importantes a considerar en el desarrollo de la acuicultura, es que la especie seleccionada para el cultivo tenga una demanda comercial importante, sea está a nivel local, nacional o internacional. Los jureles son un alimento muy popular y muy apreciado, por esta razón hay un especial interés en lograr con éxito su cultivo (INAPESCA, 2004).

1.1. Por qué trabajar con jurel (*Seriola rivoliana*)

Esta especie, es resistente al manejo y ésta característica facilita su manipulación desde el cultivo larvario hasta los juveniles y adultos, se adaptan rápidamente al cautiverio, y consumen alimento seco peletizado esparcido en la superficie del agua a las pocas semanas de cautiverio, lo cual es una ventaja. Se reproducen en cautiverio, madurándose con el manejo de temperatura y el fotoperiodo de forma natural. La especie presenta un crecimiento continuo y rápido durante los primeros días del cultivo larvario. Asimismo, el filete de carne presenta una excelente calidad y tiene un alto valor en el mercado a nivel local, nacional y mundial (INAPESCA, 2004).

1.2. Generalidades de la especie

Los jureles pertenecen a la familia Carangidae son pelágicos de amplia distribución principalmente en regiones tropicales y templadas, agrupados en el género *Seriola,* son carnívoros depredadores, en su ambiente natural se alimentan principalmente de macarela, anchoveta, sardina y calamar (Cardona-pascual, 1993).

En el periodo juvenil presentan una buena tasa de crecimiento y en cautiverio, *Seriola dumerili* crece a razón de 5.8 g/día en verano (Cardona-Pascual, 1993), *Seriola quinqueradiata* 5.6 g/día (Ikenoue y Kafuku, 1992) y *Seriola lalandi* 22 g/ día (Nakada, 2000).

Las especies de este género, se encuentran en todos los mares templados y subtropicales a profundidades de 20.0 a 70.0 m, las especies más grandes alcanzan una talla máxima de 190.0 cm de longitud total y 80 kg de peso.

1.3. Distribución del género *Seriola*

Es un género frecuente en la costa del pacífico mexicano. Esto permite la captura de juveniles y reproductores silvestres, lo cual facilita su cultivo en las diferentes etapas de crecimiento *(INAPESCA, 2004)*. La pesca del jurel es multiespecífica, no se enfoca en una sola especie, sino en el género *Seriola* y se desarrolla durante todo el año *(SAGARPA, 2006)* (Fig. 1 y 2).

*Fig. 1. Zona de captura del jurel Seriola en el litoral del Pacífico Mexicano (*SAGARPA, 2006).

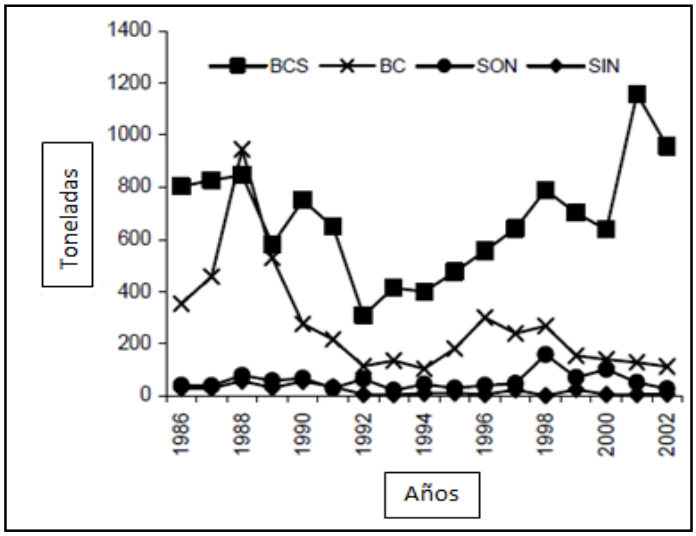

*Fig. 2. Producción pesquera del género Seriola en noroeste de México (*SAGARPA, 2006).

1.4. Los efectos de aireación en tanques de cultivo de peces marinos

El flujo en un tanque de cultivo normalmente se obtiene por medio de los aireadores que proporcionan el oxígeno y distribuyen uniformemente el alimento vivo. Hay pocos antecedentes sobre los efectos de la aireación en los cultivos larvarios entre las especies de peces, por ejemplo, se encuentra que las larvas de mero (*Epinephelus septemfasciatus),* son altamente sensibles al estrés físico y que después de la eclosión, la mortalidad masiva es causada por la flotación en el tanque de cultivo (Shiotani *et al*., 2005).

Pese a la gran experiencia acumulada en este tipo de sistemas, hay pocos estudios relativos al campo de flujo en el tanque de cría. Backhurst y Harker (1988); Yamaoka *et al*. (2000) reportaron que las burbujas de aire producidas durante la aireación causan mortalidad masiva como resultado de la flotación. Uno de los problemas más importantes en la cría larvaria de peces marinos es la mortalidad masiva durante el estadio inicial de la larvicultura, referida como la mortalidad temprana. Las principales causas de la mortalidad inicial en los organismos silvestres son la inanición, depredación y transporte del agua en condiciones físicas inadecuadas (Houde, 1987).

Controlando el medio físico y el flujo en el tanque de cría con aireadores adecuados, se incorporan elementos importantes en la cría de peces. Los procedimientos para establecer estas condiciones se apoyan principalmente en la experiencia y observaciones directas del campo de flujo, estos conocimientos empíricos ponen de manifiesto que hay una variación considerable en el patrón de flujo entre cultivos de peces. Es necesario incorporar un conocimiento basado en la dinámica de los fluidos para lograr tener un control sobre los parámetros característicos del patrón de flujo, ya que, la mortalidad masiva puede ocurrir incluso con un pequeño desajuste de la aireación, por otra parte, una aireación intensa puede ser la causa de mortalidad masiva debido a que las larvas consumen su energía en mantener la posición y tienen dificultades para alimentarse (Tucker, 1998). En el otro extremo, si el porcentaje de aireación es insuficiente, el flujo en la parte central del vórtice se convierte en agua estancada, que es inadecuado para la cría de las larvas, esto sugiere la búsqueda de los niveles de aireación óptimos (Shiotani *et al*., 2005).

En vista de lo anterior, asegurar el medio físico apropiado para la larvicultura de peces marinos, es un factor crucial que aporta ideas básicas dentro del desarrollo de técnicas de cultivo. Estudios previos sobre el campo de flujo en los tanques de cultivo miden la velocidad en tanques rectangulares a escala pequeña, también se han investigado los efectos del porcentaje de aireación (Backhurst y Harker, 1988). Pero se han realizado muy pocas mediciones sistemáticas del campo de flujo dentro del tanque.

Recientemente, una serie de estudios investigaron cuantitativamente el campo de flujo en tanques de cría de larvas de mero de siete bandas (*Epinephelus septemfasciatus*) en tanques circulares utilizados con volúmenes de 1.0 m^3 y 100.0 m^3, respectivamente (Shiotani *et al*., 2005; Sakakura *et al*., 2006). En estos estudios, los tanques tenían relaciones de aspecto A/R < 1.0 (A = altura del líquido y R = radio interno del tanque). El flujo se midió con un medidor ultrasónico en la sección vertical a través del eje central del tanque.

La relación entre el campo de flujo establecido por aireación y el porcentaje de supervivencia de larvas fue comparada a través de experimentos de cría larvaria usando tanques similares, y el campo de flujo óptimo para la cría de larvas se obtuvo para varios escalas de tanques (Shiotani *et al*., 2005; Sakakura *et al*., 2006).

Ruttanapornvareesakul *et al*. (2007) llevaron a cabo una serie de experimentos de cría de larvas para el mero siete bandas y el aguijón negro *Inimicus japonicus*. En estos estudios fueron usados tres tipos de tanques circulares con aireación de Q = 50 ml/min, en un volumen de agua constante de 0.1 $m^{3,}$ el radio del tanque y la profundidad del líquido variaban en los tanques. El porcentaje de supervivencia de las larvas de mero de siete bandas y aguijón negro fueron mayores en tanques con una relación de aspecto A/R >1.0. Las observaciones del comportamiento revelaron que el número de muertes relacionadas con la tensión superficial disminuye al tener menor área en la superficie libre del tanque. Desafortunadamente, en estos estudios no investigaron cómo se relaciona el flujo dentro del tanque y la distribución de las larvas.

Ruttanapornvareesakul *et al*. (2007) y Tani *et al*. (1961) informaron que el patrón de flujo puede ser modificado según la relación del aspecto (A/R) de los tanques de cultivo, cuando el patrón de flujo en el tanque puede ser examinado en detalle y controlado, esto puede hacer posible comprender como el patrón de flujo afecta el porcentaje de supervivencia en los experimentos de cría mencionados anteriormente. Los tanques circulares utilizados en los experimentos de estos autores estaban hechos de policarbonato (SPS-200, SPS-100, Tanaka Sanjiro Co Ltd, Fukuoka, Japón) y eran de una forma cuyo diámetro aumentaba ligeramente desde el fondo hacia la superficie libre. La relación del aspecto (A/R) se calculó después de encontrar un radio medio del tanque a partir del volumen de agua y la profundidad del tanque, con valores de 0,74, 1,36, y 3,29, respectivamente. En suma, es necesario entender cómo se generan los patrones apropiados de flujo en el tanque de cría, dadas las características del tanque y como realizar simulaciones haciendo variar las proporciones del tanque, con un control eficaz de los flujos en los tanques de cultivo mediante la aireación.

En este trabajo de investigación se propone determinar el flujo de aire óptimo que genere un patrón de flujo de agua en el tanque favorable para la supervivencia larvaria. Esto se simula mediante un modelo hidrodinámico en un tanque de cultivo.

II.- ANTECEDENTES

2.1. El cultivo de peces marinos a nivel mundial

La Piscicultura Marina es una actividad relativamente nueva, cuyo auge comenzó desde la década de los 60´s, cuando se desarrollaron las técnicas para la producción de huevos, larvas y juveniles de *Pagrus major* en Japón (Ikenoue y Kafuku, 1992). Actualmente, a pesar de que hay avances en aspectos como la reproducción, nutrición y cultivo larvario, el cultivo de peces marinos en ciclo cerrado se limita a tres especies a nivel mundial, (lubina, *Dicentrarchus labrax;* dorada*, Sparus aurata* y bacalao*, Gadus morhua*) (Álvares-Lajonchére, 2005). Por otra parte, la producción pesquera mundial se ha elevado de forma constante en los últimos cincuenta años y el suministro de peces para la alimentación ha crecido a una tasa media anual del 3.2 %, superando así la tasa de crecimiento de la población mundial, que es de 1.6 % (FAO, 2014) (Fig. 3).

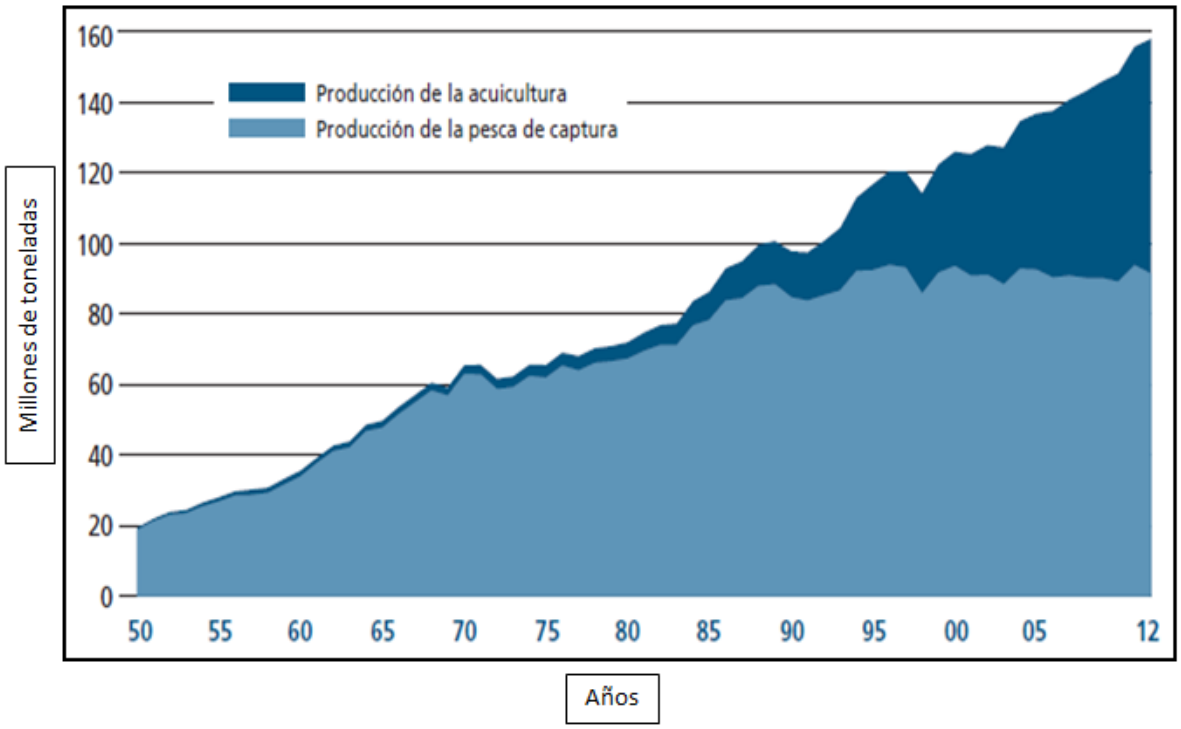

Fig.3. Estado mundial de la pesca y acuicultura (FAO, 2014).

2.2. La producción de pesca y cultivo de jurel *Seriola* spp., en Japón

El cultivo de *Seriola* spp., en el Japón se realiza a partir de la captura de juveniles en medio marino y constituye la empresa de acuacultura más exitosa (Fig. 4), superando por mucho la producción acuícola de las otras especies y de la misma pesquería de las poblaciones naturales. Estos peces son apreciados a nivel internacional, en países como: Japón, China y E.U.A.

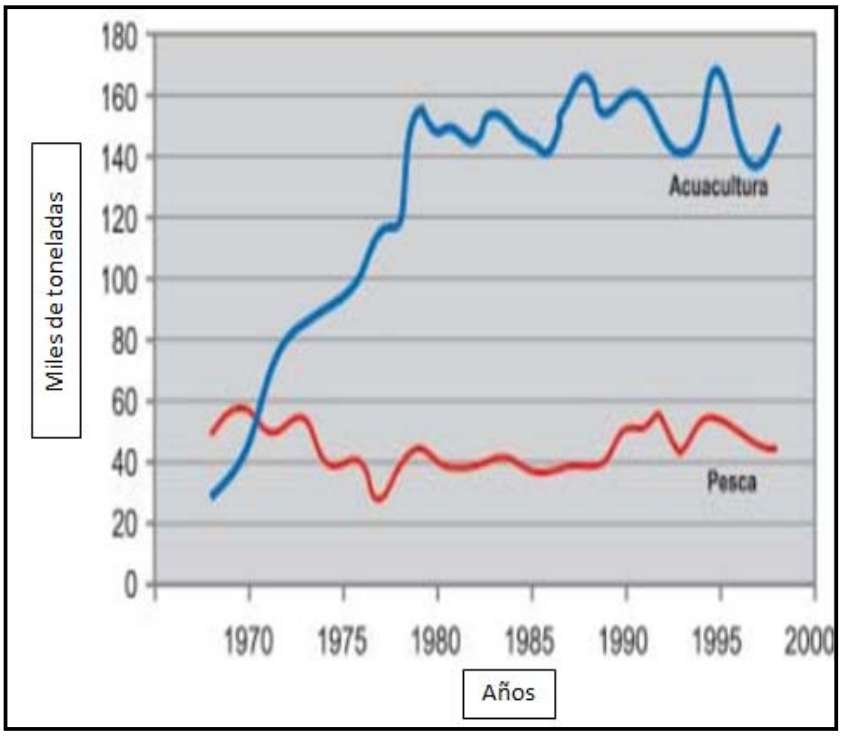

Fig.4. Pesca y cultivo de Seriola spp., *en Japón (FAO, 2000).*

2.3. La pesca de jurel en México por entidades federativas y por regiones

En México la captura de *S. dorsalis*, *S. rivoliana* y *S. lalandi (*comúnmente llamados madregal limón, pez fuerte y jurel de castilla o aleta amarilla, respectivamente*)* apenas alcanzó la cifra 2000 toneladas, de las cuales Baja California Sur y Baja California aportan el 64% de la producción nacional. Estas especies son capturadas a lo largo de la línea de costa del Pacífico Mexicano y sin ninguna restricción se pescan con; anzuelo, palangre de madia agua y red agallera de fondo durante todo el año (Rodríguez de la Cruz *et al*., 1994). A la fecha, son capturados por la pesca deportiva en varias zonas del Pacífico Mexicano donde se conoce como pez fuerte. En algunos estados de la república mexicana la pesca de jurel es una pesca dirigida a las especies del género *Seriola* (Fig. 5). La captura estatal se agrupa por regiones de la República Mexicana en el Pacífico para ilustrar la pesca total (SAGARPA, 2010a) (Fig. 6). En cuanto la producción pesquera y acuícola, B.C.S. está entre los primeros tres lugares de producción a nivel nacional (SAGARPA, 2010b) (Fig. 7). Por otro parte, una breve descripción del estado de las pesquerías en el litoral centro del pacífico mexicano *(*Arreguín y Huitrón, 2011*)* (Fig. 8a y Fig.8b).

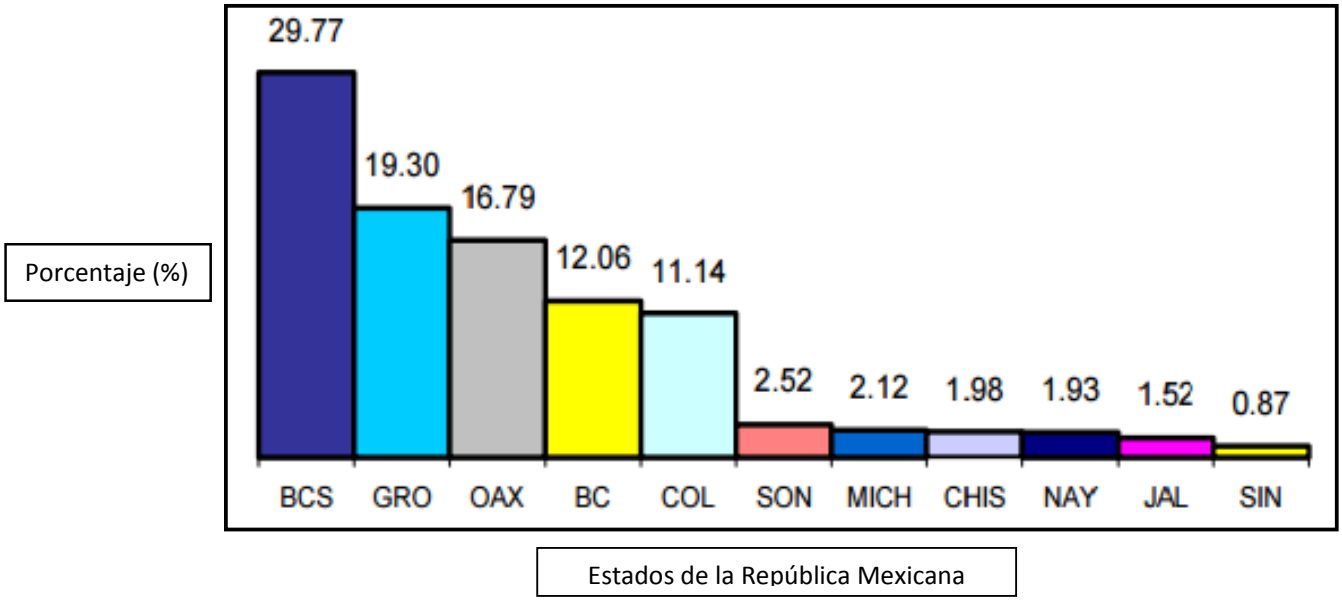

Fig.5. Pesca de jurel de 1986-2002 por entidades federativas (SAGARPA, 2006).

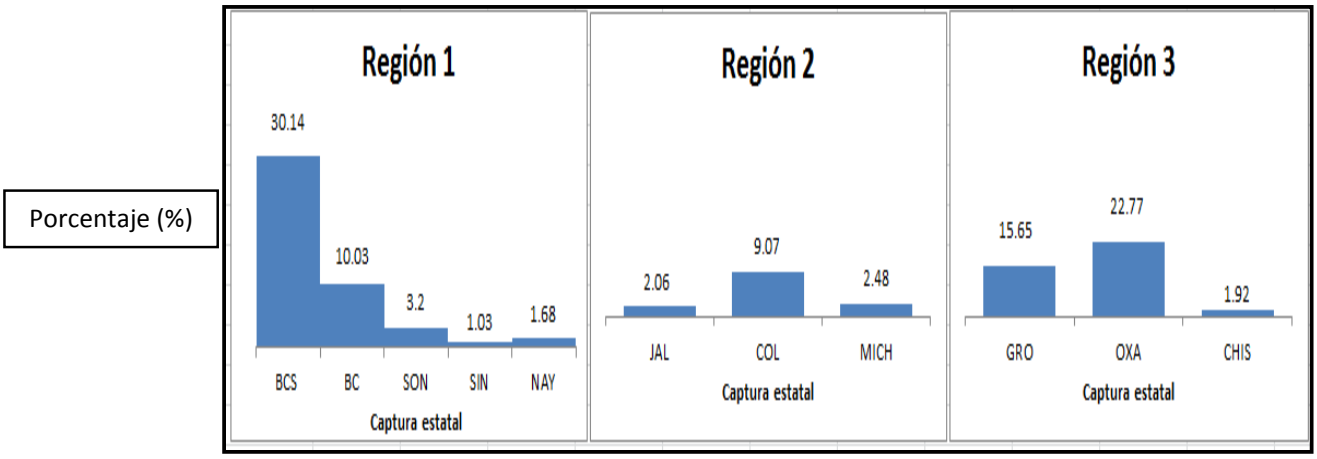

Fig. 6. Captura estatal del jurel en el Pacífico Mexicano de 1986-2007 (SAGARPA, 2010a).

2.4. Producción pesquera y acuícola por los Estados de la República Mexicana

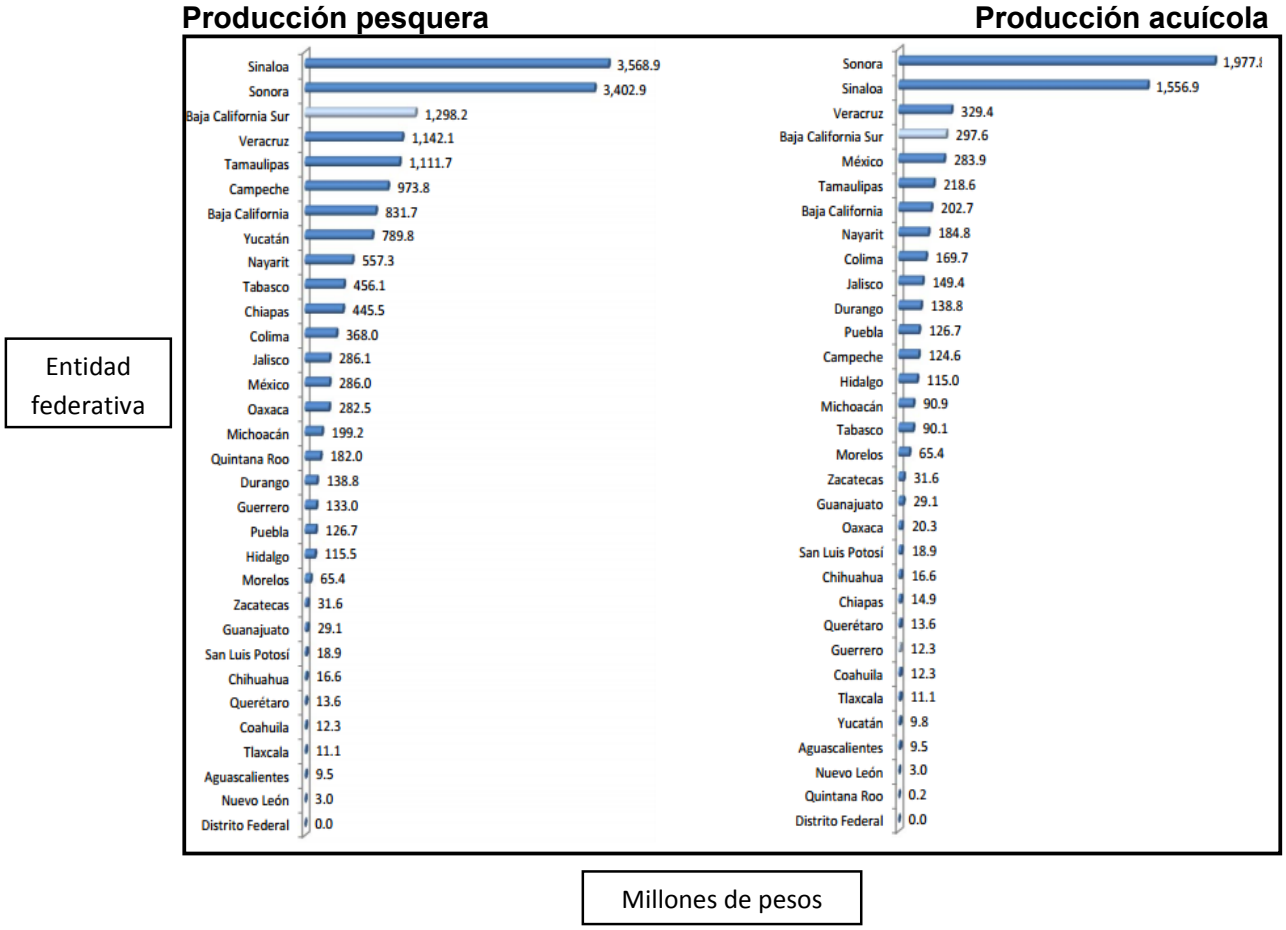

Fig. 7. Producción pesquera y acuícola por Estado de la República en el año de 2010 en millones de pesos (SAGARPA, 2010b).

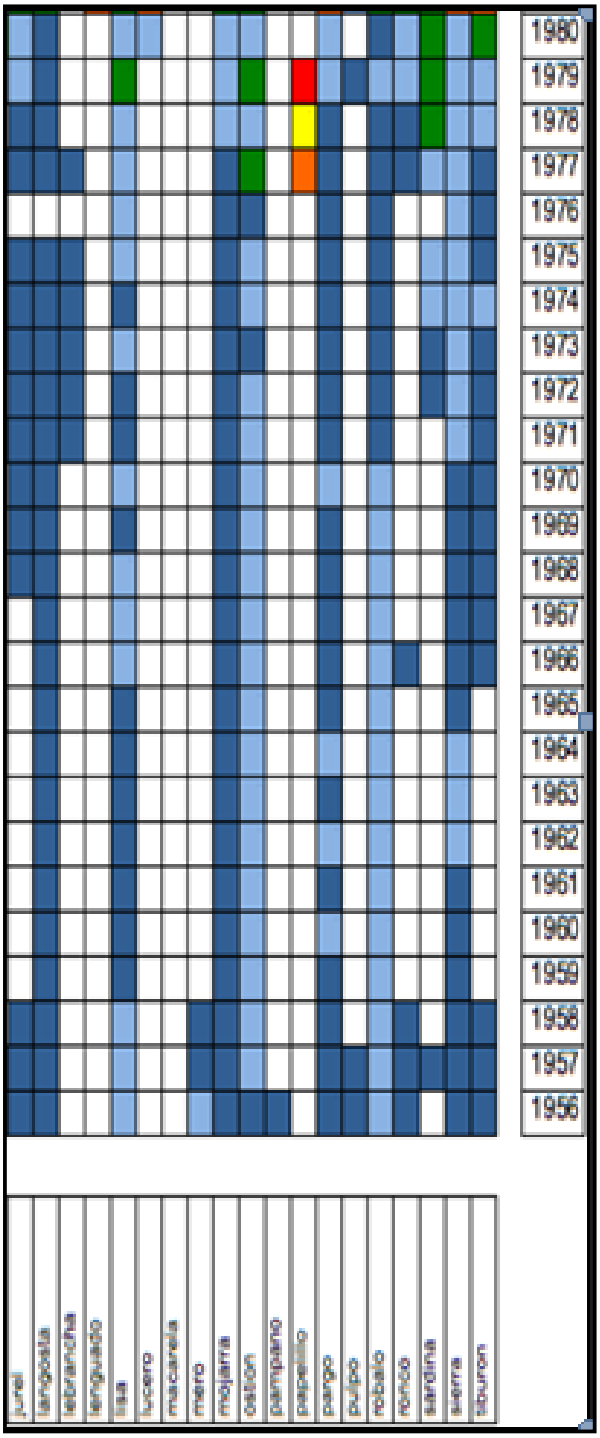

Fig. 8a. Estado de las pesquerías en el litoral centro del Pacífico mexicano (1956-1980). Azul oscuro: subdesarrollada; Azul claro, en desarrollo; Verde, máximo aprovechamiento; Amarillo, sobre-pesca; Rojo, colapso. (Arreguín y Huitrón, 2011).

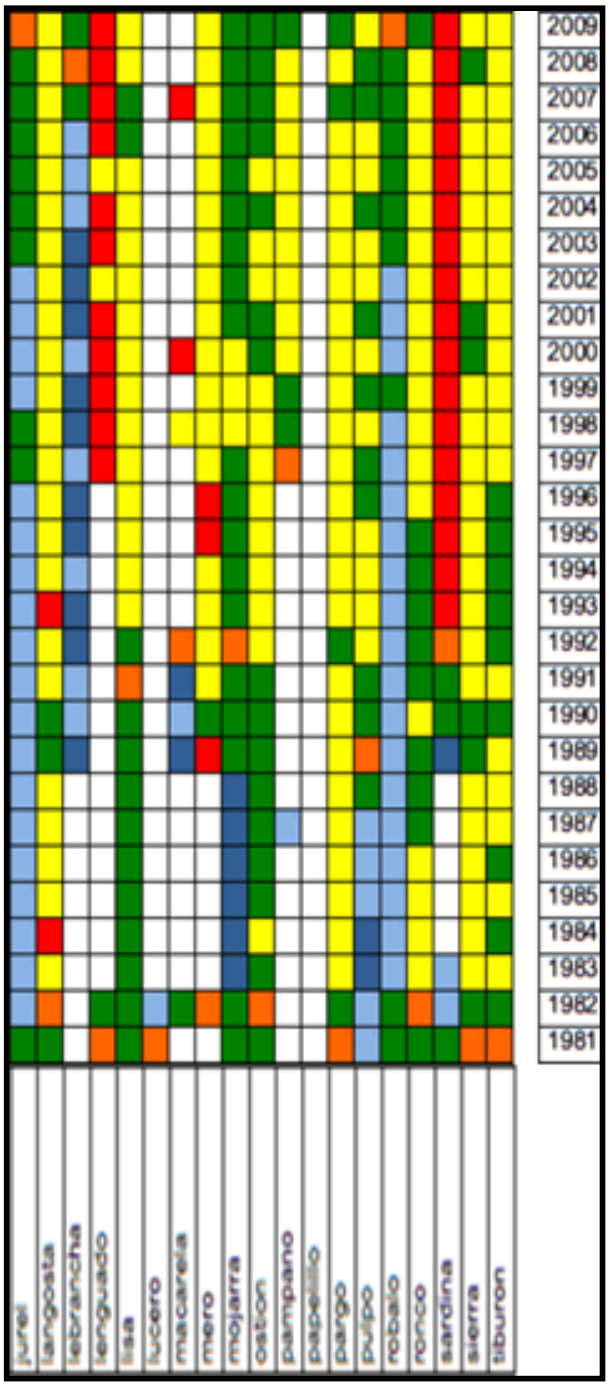

Fig. 8b. Estado de las pesquerías en el litoral centro del Pacífico mexicano (1981-2009). Las escalas de los colores representan el estado de la pesca. Azul oscuro: subdesarrollada; Azul claro, en desarrollo; Verde, máximo aprovechamiento; Amarillo, sobre-pesca; Rojo, colapso. (Arreguín y Huitrón, 2011).

2.5. Captura de jurel en Baja California Sur

En Baja California Sur la pesca deportiva se da en las especies de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*), cabrilla (Serranidae), dorado (*Coryphaena hippurus*), jureles (Carangidae), pez vela (*Istiophorus platypterus*) marlín rayado (*Tetrapturus audax*); marlín azul (*Makaira mazara*); marlín negro (*Makaira indica*), pez aguja corta (*Tetrapturus angustirostris*) y pez espada (*Xiphias gladius*) (García-Romero, 2011-2015) (Fig. 9). Por otro lado, la pesca ribereña de B.C.S., tiene el primer lugar de captura de jurel en el litoral del Pacífico mexicano. (SAGARPA, 2010a) (Fig. 10).

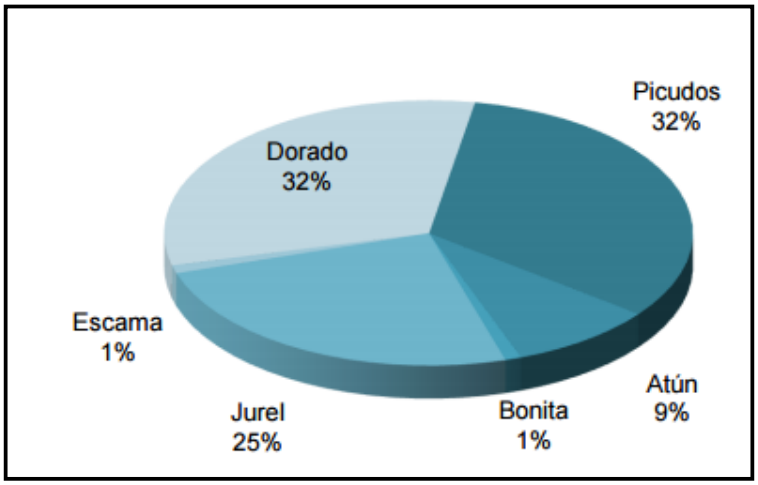

Fig. 9. Composición específica de especies que se capturan con pesca deportiva en B.C.S (2001-2010).

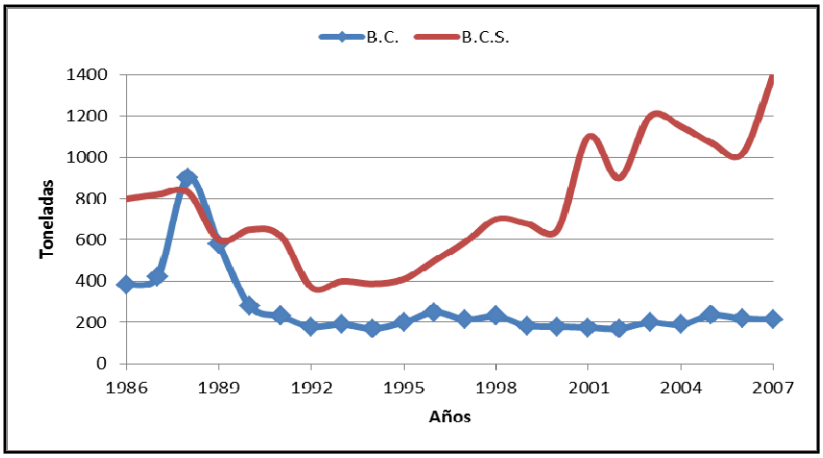

Fig. 10. Captura estatal de la pesca ribereña de jureles en toneladas de 1986-2007 (SAGARPA, 2010a).

2.6. El desarrollo del cultivo de peces marinos en México

En México, el desarrollo de la Piscicultura Marina se inició a finales de la década de los 80´s, cuando se realizaron estudios de engorda del pámpano (*Trachinotus paitiensis*) en jaulas flotantes por el Departamento de Acuacultura de la Delegación Federal de Pesca de Baja California Sur (Avilés-Quevedo, 2005).El cultivo de jurel del género *Seriola* se encuentra asociado a un conjunto de actividades que largo tiempo se han venido realizando.

El cultivo de esta especie comenzó en el Japón en 1927, en esta época por primera vez fueron cultivados juveniles en granjas cerca de la costa, esta actividad permaneció de manera artesanal en la escala local hasta el desarrollo de la tecnificación de la acuicultura –como ya se mencionó-, en la década de los 60´s. Hoy en día el cultivo continúa con la captura de juveniles en su hábitat marino debido a los problemas que hay en el periodo larvario donde se presenta la mayor mortalidad.

El cultivo de *Seriola* en México lleva al menos 15 años y hasta al momento se encuentran vigentes cinco concesiones de acuacultura comercial, una de ellas en la península de Baja California (B.C.), cuatro en Baja California Sur (B.C.S.), además de tres permisos de fomento para la acuicultura de fomento en los Estados de Sonora, B.C.S. y B.C. (SAGARPA, 2012) (Fig. 11).

*Fig. 11. Estados de la República donde se cultiva el jurel (Seriola) (*SAGARPA*, 2012).*

La crianza de jurel se realiza en jaulas flotantes circulares de 25.0 m de diámetro para juveniles y 38.0 metros para adultos, el volumen máximo es de 12,500 a 20,000 m^3. El tiempo de cultivo 19 a 20 meses, el peso comercial de cosecha es aproximadamente 1.5 kg – 2.5 kg. Tiene mercado a nivel local, nacional e internacional y se puede vender al mercado como producto fresco, congelado, salado o seco (SAGARPA, 2012).

En nuestra entidad hay varias empresas dedicadas al cultivo de peces comerciales empleando las técnicas asociadas con jaulas flotantes. Estos procesos no incluyen todo el ciclo de vida de las especies, se limita a la captura de juveniles y a la engorda de ellos.

2.7. Principales empresas que cultivan y engordan peces marinos en Baja California Sur

- Rancheros del Mar S.A. de C.V., trabaja en actividades de cultivo y engorda de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) y jurel (*Seriola sp*) en jaulas flotantes en La Paz, B.C.S., cerca de la playa Balandra y San Juan de la Costa, Bahía de La Paz (Salvador-Meza, 2009).

- La empresa Baja Seas Labs, trabaja con cultivo de jurel (*Seriola lalandi*) en Baja California en el centro de reproducción de jurel y producción de juveniles, ubicado en el ejido Eréndira en Ensenada, Baja California y el centro de engorda de jurel localizado en la inmediaciones de la Bahía Magdalena, Puerto San Carlos, Baja California Sur (Moreno-Alva, 2014).

- Kampachi Farm es una empresa que realiza actividades de cultivo y engorda de jurel *Seriola rivoliana* que manipula el ciclo de cultivo completo, esta empresa está colaborando con CIBNOR, trayendo tecnología completa y desarrollándola en el centro de investigación en La Paz, B.C.S. (Villarreal y Mercier, 2015).

- Earth Ocean Farms, empresa dedicada a la piscicultura marina sus operaciones se realizan en Pichilingue, Bahía de La Paz B.C.S., trabajan principalmente en la crianza y engorda de peces como el huachinango *Lutjanus peru* y la *Totoaba macdonaldi* (Konietzko, 2012).

- Aquacultivos de Cortez S.A. de C.V., trabaja con cultivo y engorda de jurel (*Seriola lalandi*) en San Juan de la Costa, Bahía de La Paz, B.C.S. (BIOPESCA, 2008).

En el CIBNOR se ha controlado la reproducción en cautiverio del *Seriola,* logrando completar su desarrollo hasta el periodo de juvenil a escala experimental. En el caso particular de los peces marinos, se ha observado una mortalidad alta en la primera semana de crianza larvaria. Esto se ha relacionado con varios factores, tales como, las variables fisicoquímicas (temperatura, salinidad, oxígeno, pH), la presencia de agentes patógenos, la calidad del desove, la calidad del alimento y las variables asociadas con el diseño del tanque. Todos

estos factores deben de ser controlados para asegurar el éxito del cultivo larvario (Roo *et al*., 2014). Por otro lado, en el CICIMAR se desarrollan trabajos en biología experimental enfocándos en la investigación en el desove en cautiverio, dieta larvaria y juveniles de peces marinos de importancia comercial. Como: cabrilla arenera *Paralabrax maculofaciatus* y el verdillo *Paralabrax* nebulifer y el híbrido (Martínez-Brown, 2012). En el mismo contexto la unidad piloto de maricultivos labora en el desarrollo de tecnología para el cultivo del huachinango *Lutjanus peru* y del pargo lunarejo *Lutjanus guttatus* (Casas-Valdez, 2015).

2.8. Estudios relacionados con el flujo de aireación en larvas de peces marinos

En la evaluación del efecto de control de flujo por aireación en la supervivencia de las larvas de *Thunnus orientalis,* los altos niveles de mortalidad de las larvas son una barrera importante para la producción artificial del atún rojo del Pacífico (*T. orientalis*), la mortalidad puede ocurrir cuando las larvas se hunden y entran en contacto con la parte inferior del tanque de cría durante los primeros 10 días después de la eclosión. Estas larvas se mantuvieron en tanques de 500 litros, la tasa de aireación se hizo variar durante la noche y se aprecia un aumento en la supervivencia con el aumento del suministro de aire. Para ésta especie, se estudió el patrón de flujo transversal y la velocidad de hundimiento gravitacional de las larvas para evaluar la correlación entre la supervivencia y los patrones de circulación en el tanque (Nakagawa *et al*., 2011). La velocidad de hundimiento de larvas de *T. orientalis* en la noche aumenta con la densidad del cuerpo de la larva, la cual varía con el volumen de vejiga natatoria. Las larvas con vejiga natatoria desinflada se hundieron mucho más rápido que las larvas con vejiga natatoria inflada. Tanto la velocidad de circulación del agua y la supervivencia se incrementaron con tasas más elevadas de aireación. Los resultados sugieren que las tasas de aireación > 900 mL min^{-1} pueden aumentar la supervivencia de las larvas al contrarrestar el hundimiento (Nakagawa *et al*., 2011).

Shiotani *et al*. (2005) realizaron una serie de experimentos sistemáticos en los que se midió el flujo estacionario en tanques de polietileno de 1.0 m^3 para cría de mero siete bandas (*Epinephelus septemfasciatus*). Los experimentos con cría de larvas de esta especie de mero se realizaron con cuatro tasas de aireación (1000, 200, 50 mL/min, y sin aireación). Un aireador esférico se fijó en el centro de la parte inferior del tanque para generar el flujo en el tanque. Los efectos de la aireación en la supervivencia y muerte de larvas del mero fueron examinados mediante el conteo del número de larvas muertas flotando en el tanque. El experimento fue diseñado para confirmar el efecto del flujo en la mortalidad de larvas de esta especie. La aireación a 200 mL/min produjo la mayor supervivencia y mayor crecimiento en las larvas de mero. Este autor desarrolló un método

numérico computacional basado en diferencias finitas para estimar el campo de flujo estacionario en el tanque de cría. El problema lo simplificó tomando secciones verticales, con esto redujo el cálculo a dos dimensiones. Comparó estos resultados con los obtenidos mediante mediciones del patrón de flujo con una aireación de 200 mL/min, correspondiente al flujo con la mayor supervivencia observada en la crianza del mero (*Epinephelus septemfasciatus*), en un tanque de polietileno de 1.0 m^3.

El flujo de aireación de 200 mL/min presentó mayor supervivencia larvaria, contrarrestó la mortalidad por flotación y hundimiento en tanques de 1.0 m^3. Estos resultados exitosos, los trasladó a estanques de 100.0 m^3, los efectos fueron positivos, la supervivencia fue 3 veces mayor que en los antiguos métodos de cría. Estos logros pueden ser útiles para estimar el flujo estacionario en tanques de cultivo larvario y crear diseños de tanques adecuados para el cultivo (Ruttanapornvareesakul *et al*., 2007).

Fui *et al*. (2012) estudiaron el mero *Epinephelus bruneus* y realizaron una serie de experimentos en tanques de cultivo durante el día y la noche. Ellos evaluaron el flujo de aire con diferentes tasas (1000, 300, 50 mL/min y sin aireación). Se emplearon tanques de policarbonato cilíndricos con un volumen de 500 litros, con fondo plano para el cultivo larvario de *E. bruneus*. La aireación que presentó mayor supervivencia fue la de 300 mL/min, este flujo contrarrestó el hundimiento gravitacional de larvas y la mortalidad por flotación. En contraste, en el cultivo de la lubina *Dicentrarchus labrax* la supervivencia baja al reducir la aireación, pero el crecimiento no se ve afectado (Barahona-Fernández, 1978).

Estos antecedentes empíricos que relacionan la aireación, el diseño del tanque y la supervivencia conducen al planteo de una solución apegada a la hidrodinámica, que como se sabe, es una rama de la mecánica que estudia el comportamiento de los fluidos -líquidos y gases-, en una o en varias fases. Las aplicaciones hidrodinámicas han experimentado un notable crecimiento en las últimas tres décadas gracias al desarrollo de programas computacionales conocidos como CFD (Computational Fluid Dynamics) y también al explosivo desarrollo de las capacidades computacionales de los equipos.

Los modelos matemáticos basados en los CFD constituyen un nuevo paradigma que hace posible analizar problemas dinámicos de fluidos que hasta hace treinta años parecían irresolubles. Las aplicaciones cubren un amplio espectro del desarrollo tecnológico. En la ingeniería ambiental, para realizar prototipos y para tomar decisiones de diseño en múltiples problemas hidrodinámicos (Instituto Nacional de Hidráulica de Chile, 2010).

Ejemplos de lo anterior ocurre en estudios; hidroambientales, sistemas de alcantarillado, ríos, acuíferos y calidad de agua. Por otra parte, han sido desarrollados modelos matemáticos para la dispersión de productos de desechos vertidos en el mar, también para evaluar el impacto de los contaminantes en la acuicultura se ha empleado el programa TRIMODENA, que permite estudiar la hidrodinámica marina y la dispersión de sustancias en el mar (González *et al*., 2002).

Klapsis y Burley (1984) realizaron estudios sobre la distribución de flujo en tanques de cría de peces, mediante el análisis de las características: contenido de oxígeno, velocidad del fluido, temperatura y distribución del alimento. Posteriormente, Duarte *et al.* (2011) evaluó la influencia de la geometría del tanque y patrón de flujo en la distribución de los peces. Encontró que la geometría y las características de entrada y salida del agua, influyen de manera significativa en el patrón de flujo en el tanque, y sugiere que los tanques circulares proporcionan una calidad de agua más uniforme, adecuada para una buena distribución de los peces en el tanque de cultivo.

2.9. Descripción de la geometría en tanques de acuicultura

La geometría del tanque circular es muy común en la acuicultura, ya que proporciona un mayor auto limpieza y ayudan a tener una homogeneización de los parámetros fisicoquímicos en el tanque. Oca y Masalo (2013) analizaron la influencia de los parámetros de diseño en la distribución de velocidades del agua dentro del tanque circular de acuicultura. Proponen un modelo para estimar la distribución de velocidades mediante la determinación del momento angular por unidad de masa junto a la pared del tanque y alrededor del eje central. En el mismo contexto, Masalo y Oca (2014) estudiaron la hidrodinámica en un tanque de acuicultura multivórtice, con relación a los efectos deflectores y las características de entrada de agua. Concluyen que las velocidades altas crean condiciones de auto limpieza y esto ayuda a desplazar rápidamente los residuos biosólidos a la salida central de tanque. También encontraron que la distribución de velocidad es un parámetro importante para asegurar el bienestar de los animales y la homogeneidad en el tanque de cultivo.

2.10. Tanque de cultivo tradicional de peces marinos en la acuicultura

Actualmente los criterios de diseño y desarrollo de los tanques de cultivo de peces marinos, se hacen mayormente mediante el conocimiento basado en la experiencia (Fig. 12) y no se ha prestado suficiente atención al estudio hidrodinámico de los tanques de cultivo. Particularmente el efecto que produce la inyección de aire en el patrón de circulación del agua (Fig. 13), ya que controlando el flujo de aire, -como ya se ha mencionado-, se puede establecer condiciones más favorables en la actividad natatoria, especialmente en los periodos larvales de los peces marinos.

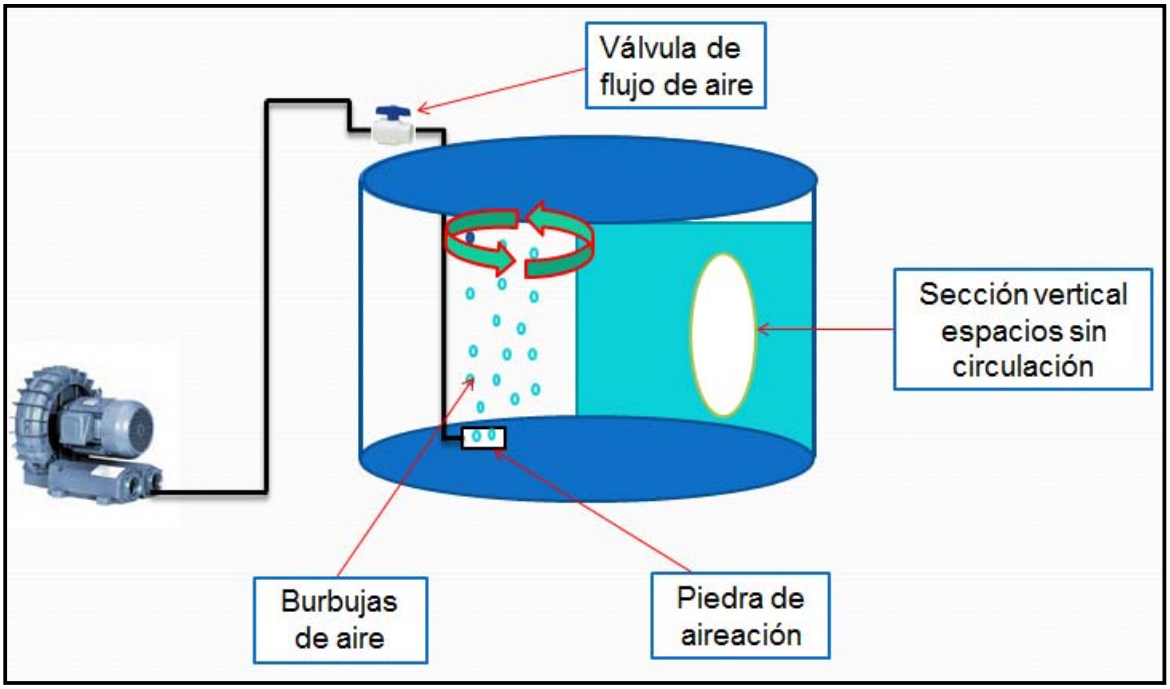

Fig.12. Ilustración de los componentes del tanque de cultivo de peces marinos que se utilizan con mayor frecuencia.

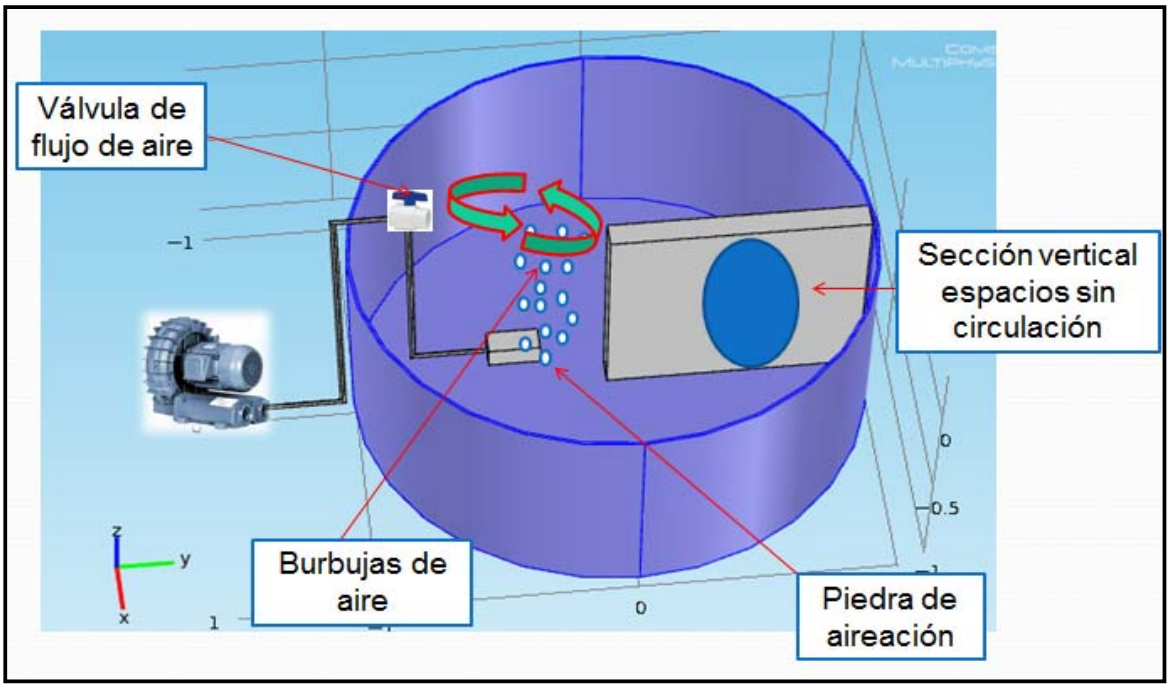

Fig.13. Imagen del tanque de cultivo de peces marinos con vista de la sección vertical para visualizar de mejor manera la circulación del tanque.

2.11. Métodos Numéricos

El método del elemento finito (MEF) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El MEF es un procedimiento diseñado para ser usado en computadoras y se emplea en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas y en donde concurren diferentes modelos acoplados según diversos procesos físico/químicos.

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) dividiéndolo en un número elevado de subdominios denominados “elementos finitos”.

El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados “nodos”.

Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se denomina “malla” en la cual se realizan las operaciones numéricas (Turner *et al*., 1956; Bathe *et al*., 1995).

La subdivisión de un dominio completo en partes más simples tiene varias ventajas:

- Representación precisa de geometría compleja
- Fácil representación de la solución total
- Captura de los efectos locales

Un trabajo típico del método implica:

- Primero: Dividir el dominio del problema en una colección de subdominios, con cada subdominio representado por un conjunto de ecuaciones de elementos del problema original.
- Segundo: Recombinación sistemática del conjunto de ecuaciones de los elementos en un sistema total de ecuaciones para el cálculo final.
- Un sistema total de ecuaciones se genera a partir de las ecuaciones de los elementos mediante una transformación de las coordenadas de los nodos locales a los nodos globales del dominio.
- Una vez conocido el sistema total de ecuaciones, entonces podemos aplicar las técnicas de solución y la respuesta numérica del problema puede ser calculada a partir de los valores iniciales.
- Este proceso se lleva a cabo a menudo usando el MEF utilizando datos de coordenadas generadas a partir de los subdominios (Reddy, 2005).

Guía para solucionar problemas complejos de dominios continuos usando el MEF.

1.- Discretizar el dominio continúo.
2.- Seleccionar funciones de interpolación apropiadas.
3.-Encontrar las propiedades de los elementos (ecuaciones que relacionan las condiciones de los elementos con la solución buscada, p. ej. Ecuaciones del movimiento y de continuidad en el caso de flujo de fluidos).
4.-Ensamblar las propiedades de los elementos para formar las ecuaciones del sistema (trasladar las ecuaciones del esquema local por elemento, al esquema global del sistema).
5.-Modificar las ecuaciones del sistema para tomar en cuenta las condiciones de frontera.
6.-Resolver el sistema de ecuaciones.
7.-Desplegar los resultados en manera gráfica conveniente (Reddy, 2005).

III.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA O HIPÓTESIS

3.1. JUSTIFICACIÓN

El jurel *Seriola rivoliana* es una especie importante de pez marino que tiene mercado a nivel local en B.C.S., nacional y mundial (Japón, Australia y E.U.A). Se cotizan a buen precio en el mercado y tienen una considerable demanda. Por otro lado, un rasgo favorable que tiene es su rápido crecimiento (Nakada, 2002). Se encuentra casi todo el año en las costas de Baja California Sur, presentando variaciones que limitan el esfuerzo pesquero. La principal causa de esta disminución es la aparente sobre explotación pesquera del recurso, el cual incide sobre los juveniles que no han alcanzado su primera madurez sexual. Una forma de disminuir este problema es realizando el cultivo de esta especie de manera comercial. El Instituto Nacional de la Pesca a través del Centro Regional de Investigación Pesquera, el CICIMAR y el CIBNOR han promovido proyectos de instalación de jaulas flotantes y han utilizado varias especies, de las cuales en sus primeras etapas contaron con juveniles para el inicio de engorda.

En los centros de investigación como el CICIMAR y el CIBNOR se han realizado cultivos utilizando alimento vivo como rotíferos (*Brachionus plicatilis*) que son utilizados usualmente porque es fácil de cultivar en el laboratorio (Rueda-Jasso, 1993) y copépodos (Ps*eudodiatomus euryhalinus*) que se utilizan en acuicultura, este último presenta un crecimiento poblacional lento pero tiene mayor aporte nutritivo para larvas de peces (Payán-Aguirre, 1994).

Algunos de estos proyectos de cultivo han sido exitosos y generaron buenas expectativas. Sin embargo, el abastecimiento de juveniles sigue siendo un problema que frena el desarrollo de esta actividad, por lo cual es fundamental desarrollar el cultivo larvario en todas sus etapas de manera eficiente para poder incrementar el número de juveniles. De igual manera en muchas especies marinas, el problema principal para el desarrollo de la tecnología de cultivo de especies marinas, ha sido las altas tasas de mortalidad en sus primeros días de cultivo (Álvarez-Lajonchére y Hernández-Molejón, 2001).

Las causas pueden deberse a múltiples factores, sin embargo, se han realizado cultivos larvarios en los que se observa que las larvas no han tenido éxito en sus primeras etapas, debido a que se ve afectado por las condiciones de flujo inadecuadas en el tanque y al deficiente diseño de los sistemas de cultivo, la falta de un sistema hidrodinámico que controle los flujos para distribuir las larvas homogéneamente en todo el tanque, así como de los parámetros fisicoquímicos y el transporte de larvas desde la parte inferior hasta la superficie.

Por otra parte, se ha documentado que los factores más importantes para que se lleve a cabo un cultivo exitoso de peces marinos son la temperatura, luz, calidad de agua, oxigeno, calidad de alimento, tamaño de alimento, calidad de desove y por supuesto, el patrón de flujo en el tanque de cultivo.

Se ha registrado una alta mortalidad en la primera semana de cultivo larvario de peces marinos. La mayoría de las larvas de peces marinos presentan problemas en la primera alimentación exógena, ya que se requiere una distribución homogénea, lo cual está en función del patrón de circulación. Con base a estas observaciones y reportes surge la necesidad de diseñar un sistema hidrodinámico que permita reducir la mortalidad larvaria, al evitar que las larvas viajen al fondo del tanque, lo que justifica la creación de nuevos diseños de sistema de aireación.

3.2. HIPÓTESIS

El patrón del flujo de agua generado por las burbujas de aire influye en la supervivencia de las larvas al distribuirlas homogéneamente e impide que permanezcan en el fondo del tanque.

IV.- OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Aplicar un modelo hidrodinámico para determinar el régimen del flujo de agua que optimice la supervivencia larvaria en un tanque de cultivo de peces marinos.

4.2. Objetivos específicos

1.- Utilizar la plataforma COMSOL Multiphysics para simular las condiciones del flujo de agua en tanques de cultivo con fuente de aire periférica y otra central.
2.- Analizar los patrones de circulación del agua en el tanque, así como la velocidad de las corrientes a diferentes profundidades.
3.- Determinar la tasa de supervivencia del cultivo larvario en cada uno de los sistemas.
4.-Establecer cuál de los dos diseños es el más apropiado para el cultivo larvario.

V.- METODOLOGÍA

COMSOL contiene herramientas –entre otras-, basadas en CFD que permiten analizar el flujo de fluidos en múltiples condiciones, en particular, puede resolver problemas de fluidos en dos fases acopladas de una manera generalizada. El modelo generado con COMSOL resuelve el problema para el volumen fraccional del fluido en cada una de las fases, líquida y gaseosa. Es decir, considera la interacción entre las dos fases como medios acoplados. En este trabajo se llevó acabo el análisis de la dinámica del flujo mediante la relación mutua entre las concentraciones de las fases con el propósito de determinar el patrón de flujo. Considerando que las burbujas se encuentran en equilibrio local con la presión del líquido, COMSOL obtiene el campo de velocidad del líquido y otras propiedades que se derivan del acoplamiento líquido-gas. Para obtener el modelo COMSOL incorpora: la ecuación de equilibrio de momentum, la ecuación de continuidad y la ecuación de transporte de fracción de volumen de gas a líquido, más adelante se explica con mayor detalle el modelo físico (Svante y Farhad, 1998).

El modelo de flujo burbujeante que adoptamos es una simplificación del modelo de dos fluidos. Apoyándonos en los siguientes supuestos:

- La densidad del gas es despreciable en comparación con la densidad del líquido.
- El movimiento de las burbujas de gas está acoplado al movimiento del líquido y viceversa lo cual se determina por el equilibrio entre la fuerza viscosa y presión.
- Las dos fases comparten el mismo campo de presión.
- El campo de velocidad de las dos fases es diferente.

Con base en estos supuestos se obtiene el conjunto de ecuaciones que gobiernan los procesos en las dos fases, estas son:

- Ecuación de momentum
- Ecuación de continuidad
- Ecuación de transporte de fracción de volumen de gas y líquido.

5.1. Ecuaciones utilizadas en el modelo COMSOL

5.1.1. Ecuación de momentum para fase líquida del flujo burbujeante.

$$\phi_l \rho_l \frac{\partial \mathbf{u}_l}{\partial t} + \phi_l \rho_l (\mathbf{u}_l \cdot \nabla)\mathbf{u}_l = \nabla \cdot \left[-p\,\mathbf{I} + \phi_l \mu \left(\nabla \mathbf{u}_l + (\nabla \mathbf{u}_l)^T \right) \right] + \phi_l \rho_l \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

Termino Temporal | Termino espacial | Caída de presión | Termino Viscoso | Fuerza del cuerpo | Fuerza volumétrica

Dónde:

ϕ_l = Fracción de volumen del líquido

ρ_l = Densidad del líquido (Kg/m^3)

V_l = Velocidad de la fase liquido (m/s)

∇ = Operador diferencial vectorial

$-\nabla P$ = Caída de presión

μ_l = Viscosidad dinámica del líquido (Pa*s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

F = Fuerza (N/m^2) (Yunus y John, 2012).

5.1.2. Ecuación de continuidad

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_l = 0.$$

Dónde:

Vl= Velocidad del líquido (m/s)

∇ = Operador nabla (Yunus y John, 2012).

5.1.3. Ecuación de transporte de la fracción de volumen de gas a líquido

$$\frac{\partial \phi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_g \rho_g \mathbf{u}_g) = -m_{gl}$$

Termino Temporal

Termino espacial

Transferencia de masa de gas a líquido

Dónde:

ϕ_g= Fracción de volumen de gas

ρ_g = Densidad de gas (Kg/m^3)

V_g = Velocidad de la fase de gaseosa (m/s)

$m_{g\,l}$ = Transferencia de masa de gas a líquido (kg / m^3 * s) (Yunus y John, 2012).

5.2. Plataforma COMSOL

La plataforma COMSOL Multiphysics 4.1, es un sistema computacional para el análisis y resolución de problemas empleando el acoplamiento de diferentes teorías físicas en el mismo modelo, en particular es aplicado para simular procesos de transporte de fluidos en una o en varias fases, tanto en condiciones estacionarias como dinámicas y en regímenes de flujo tanto laminar como turbulento.

Se utilizó la plataforma COMSOL Multiphysics 4.1 mediante el método de elementos finitos, para determinar el patrón de flujo de agua en el tanque de cultivo, posteriormente se realizaron simulaciones bajo condiciones controladas de flujo. Con esto, se ensayaron diferentes sistemas de aireación, tanto con fuente de aire central como perimetral variando el radio y la altura del tanque.

La experiencia obtenida nos ayudó establecer los criterios que optimizan el patrón de flujo. Este modelo se adoptó para representar el problema formulado, con base en la geometría y el burbujeo de aire en el tanque (Fig. 14) (Svante y Farhad, 1998).

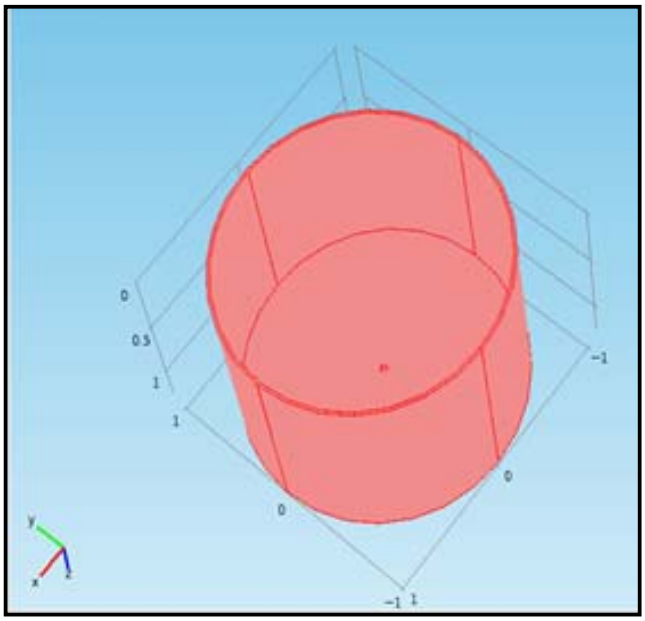

Fig.14. Esquema representativo del diseño del tanque que se utiliza en el proceso de modelación y simulación en el ambiente de COMSOL.

Así mismo, hay que tomar en consideración las restricciones que se tienen en relación a:

- Dimensiones y materiales del tanque.
- Diámetro y propiedades de la manguera.
- Presión manométrica entrada.
- Propiedades del agua y del aire.

Se Identificó la clase de modelo físico apropiado, que cuenta con las siguientes características:

1) Debido a que la presión del aireador y la velocidad del aire no son intensas consideramos que el aire se comporta en forma incompresible e isotérmica.
2) El flujo de la mezcla aire-agua es burbujeante, entonces el sistema se encuentra en dos fases y el régimen puede ser laminar o turbulento, pero con un número de Reynolds bajo, lo cual permite localizar las zonas de turbulencia, para tomar las medidas de diseño apropiadas.
3) La mezcla agua-aire es considerada isotérmica.
4) Consideramos que el gradiente de presión es moderado, pero puede ser un factor limitante en el desarrollo larvario.
5) Consideramos que las paredes del tanque, así como la tubería no experimentan deformaciones importantes, por lo que son tomadas como paredes rígidas.

5.3. Descripción del modelo

En la interface de COMSOL se siguió el siguiente procedimiento para aplicar el modelo.

I.- Seleccionar la dimensión de espacio en donde se busca la solución. Se adoptó una sección plana con una simetría axial, ver figura 16.

II.- Definir la Física del proceso:

1 Flujo de fluidos

2 Flujo polifásico

3 Flujo burbujeante

4 Flujo burbujeante laminar.

III.- Seleccionar estudio: Dependiente del tiempo.

IV.- Modelo

1.- Geometría: el área en donde se resuelve el problema físico.

2.- Materiales: agua y aire.

3.- Flujo burbujeante.

3.1.- Propiedades de los fluidos: (viscosidad, densidad, tensión superficial, diámetro de burbuja).

3.2.- Condiciones de frontera (paredes laterales, pared del fondo del tanque, superficie, manguera porosa y eje central).

3.3.- Valores iniciales (campo de velocidad, fase liquida, presión, densidad efectiva de gas y densidad de número de fase gaseosa).

3.4.- Fuerza volumétrica (Fuerza que actúa en dirección vertical en toda la columna de agua).

3.5.- Gravedad (vector de gravedad que actúa en dirección vertical en toda la columna de agua).

3.6.- Restricción del punto de presión (es delimitar la presión atmosférica en un punto del área de estudio).

3.7.- Mallado (para construir y calcular sobre la malla los valores en el área de estudio de la hidrodinámica del tanque).

V.- Estudio (es el tipo de procedimiento seguido para resolver el problema, que puede ser estacionario o no estacionario para realizar los cálculos y solucionar el modelo de flujo burbujeante, para comenzar a obtener los valores numéricos de las ecuaciones del modelo).

VI.- Resultados (mostrar los datos de los valores numérico y graficas del modelo físico del flujo burbujeante laminar tanto en magnitud, dirección y distribución en diferentes zonas y profundidades del tanque)(Svante y Farhad 1998).

5.3.1. La construcción del modelo burbujeante

Se adoptaron las siguientes condiciones para el flujo burbujeante de acuerdo con el tipo de modelos que genera COMSOL:

En la fase líquida el tipo de modelo es:

- El líquido es incompresible.
- El flujo es laminar.
- El líquido es isotérmico.

Condiciones de entrada del modelo de flujo burbujeante:

- La temperatura es de 300 °K
- La presión absoluta es de 109,700 Pa
- El tamaño de burbuja es de 2.0 mm de diámetro.

Las propiedades físicas de la fase líquida:

- La densidad del agua.
- La viscosidad dinámica.

Las propiedades de la fase gaseosa son:

- Densidad del aire.
- El diámetro de la burbuja.

Valores Iniciales: El valor inicial del campo de velocidad del agua es cero, el campo de presión manométrica se encuentra en el intervalo: 8,106 Pa.-24,130 Pa.

Condiciones de Frontera en el Modelo del Flujo Burbujeante.

Manguera Porosa: para la fase líquida, la condición de frontera es de flujo no deslizante y en la fase gaseosa es una condición de flujo a través de la superficie.

Eje central del tanque: como condición geométrica, no hay flujo ni deslizamiento de los fluidos.

Superficie superior del tanque para el líquido hay deslizamiento, pero no es así en el flujo de la fase gaseosa.

Las paredes laterales y fondo del tanque, para la fase liquida no hay deslizamiento y no hay flujo de aire.

Seleccionaron los dominios: La fuerza que actúa sobre el volumen de agua, es el peso específico (fuerza por unidad de volumen, en las unidades N/m^3).

La aceleración gravedad queda predeterminada y en la dirección z negativa.

Malla

El Análisis de elemento finito (AEF) tal como se aplica en la ingeniería es una herramienta computacional. Incluye el uso de técnicas de generación de malla para dividir un problema complejo en pequeños elementos, así como el uso de programa de software codificado con el algoritmo de MEF (Reddy, 2005).

La malla de discretización de un dominio continúo en un conjunto de subdominios discretos, generalmente llamados elementos.

Una estrategia de discretización se entiende por un conjunto claramente definido por procedimientos que cubren la creación de elementos finitos, la cual se adapta a las condiciones estructurales y a las condiciones de contorno del dominio, esto es obtenido por medio de un procedimiento matemático programado y codificado con algoritmos integrados a COMSOL.

Los cálculos se realizan sobre la malla y a partir de estas relaciones de conectividad se calcula el valor de un conjunto de variables incógnitas en cada nodo. Este conjunto se puede definir como un sistema de ecuaciones lineales o no lineales, siendo el número de ecuaciones proporcional al número de nodos.

En este caso, el programa generador de mallas está incluido en el software que resuelve estas ecuaciones, aunque es posible importar un dominio discretizado de otro sistema, por ejemplo, AUTOCAD.

Se generaron varias mallas, con resoluciones distintas y se optó por aquella que facilitara los cálculos, con este fin se utilizaron mallas triangulares que se afinan en la región alrededor del tanque y la manguera porosa, donde se presentan altas variaciones de velocidad.

Una propiedad importante del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge hacia la solución del sistema de ecuaciones. Por otro lado, si las relaciones entre cada nodo no superan la tolerancia incluida en el modelo, el proceso de cálculo tiende a ser divergente (Turner *et al*., 1956; Bathe *et al*., 1995).

El dominio del modelo del flujo burbujeante es una sección longitudinal del tanque (Fig.15). Esta región posee simetría axial, lo cual significa que cualquier solución obtenida en el dominio tiene el mismo aspecto que aquella obtenida al girar esta región alrededor del eje del tanque.

Se obtuvo la sección plana para resolver el problema hidrodinámico. La razón por la que empleamos este procedimiento es debido a la gran carga computacional que representa la geometría completa del tanque, en cambio en una sección con la simetría axial, se simplifican en gran medida los cálculos, reduciendo enormemente el tiempo de ejecución del modelo (Fig.16).

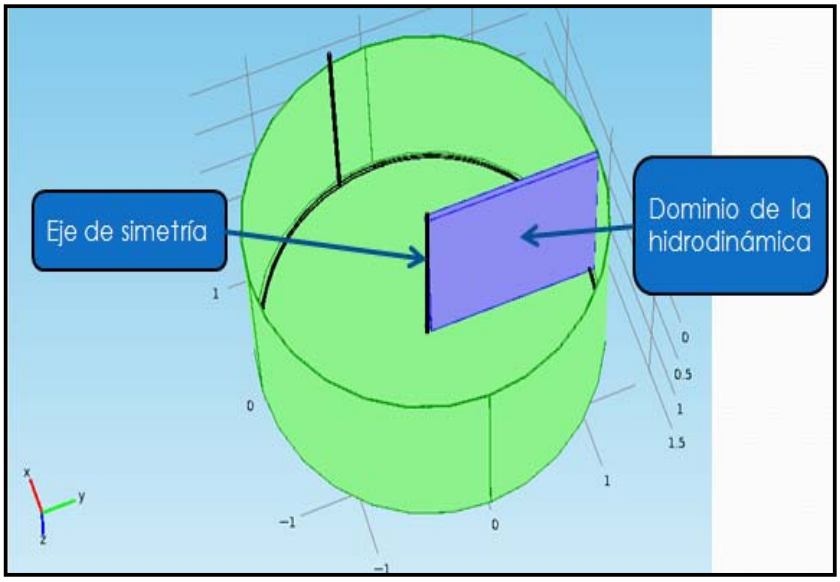

Fig. 15. Dominio de la hidrodinámica del tanque circular.

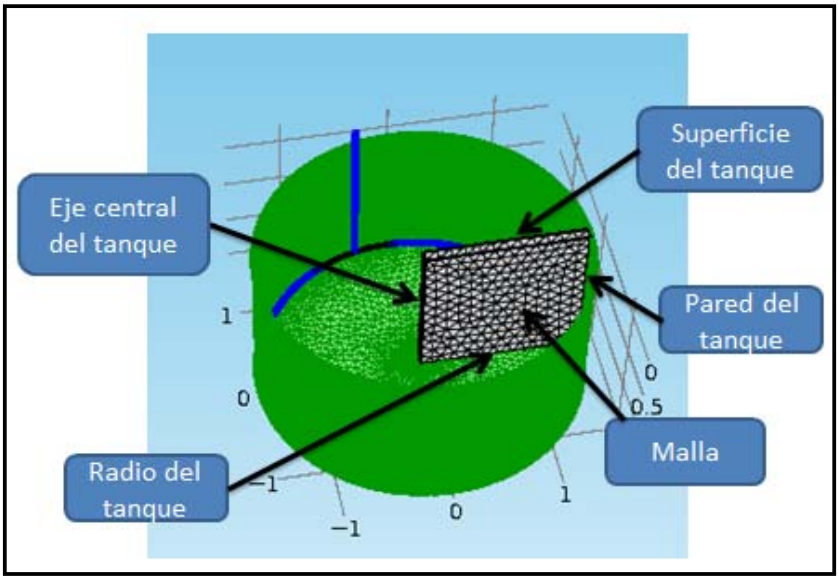

Fig.16. Malla que utiliza el modelo para realizar cálculos hidrodinámicos en el tanque.

Una vez establecidas las condiciones de diseño (definidas por la geometría y el tipo de materiales, en este caso el agua y el aire), se procedió a realizar pruebas con el modelo hidrodinámico siguiendo el siguiente plan:

A. Tanque A, se realizaron una serie de simulaciones variando los parámetros de diseño radio/altura, colocando la fuente de aire en el centro del eje del tanque, posteriormente se suministraron los valores iniciales como: la presión manométrica, temperatura y diámetro de burbuja con el propósito de terminar el patrón de flujo ideal para las larvas, con las simulaciones observamos que la circulación en el tanque era más ordenado y suave.

B. Tanque B, se procedió a realizar el proceso de simulaciones cambiando las proporciones del tanque como radio y altura, también se cambió la colocación de la fuente de aire en la parte perimetral en el fondo de tanque, después se declararon en el menú de COMSOL los valores iniciales como: diámetro de burbuja, temperatura y presión manométrica, todos estos datos de parámetros y las dimensiones influyen significativamente en la circulación del tanque, con las ilustraciones de las simulaciones analizamos que el patrón de flujo de agua era intenso y desordenado.

Posteriormente se obtuvo información visual del campo de flujo por medio de partículas trazadoras (unicel atado con balines) y colorante (azul de metileno), para ver el comportamiento de la circulación del agua en los tanques. Para validar los datos obtenidos de la simulación se comparó con los resultados obtenidos en la parte experimental del laboratorio realizando tres corridas para determinar la supervivencia larvaria.

5.4. La parte experimental

La actividad experimental se realizó en el Laboratorio de Biología Reproductora de Organismos Acuáticos del CIBNOR La Paz. Se utilizaron dos tanques de fibra de vidrio con pintura epóxica de color negro con fondo plano, con 1.0 m de altura, diámetro de 2.0 m y un volumen de agua de 3.0 m^3, los dos tanques están con la misma cantidad de aire por cm lineal, con distinta colocación de fuente de aireación. En el tanque A (Figs. 17 y 18) la aeración se suministra por un soplador a través de una manguera porosa de 6.35 mm de diámetro, con una longitud de 1.0 m y orificio de salida de 0.31 mm colocada en el fondo en la parte central del tanque. El agua se proporciona a través de un tubo de PVC de 12.7 mm de diámetro y una longitud de 1.0 m, colocado en la parte superior del tanque. La salida del desfogue del agua es por la parte superior del tanque, con un abertura de 38.1 mm de diámetro.

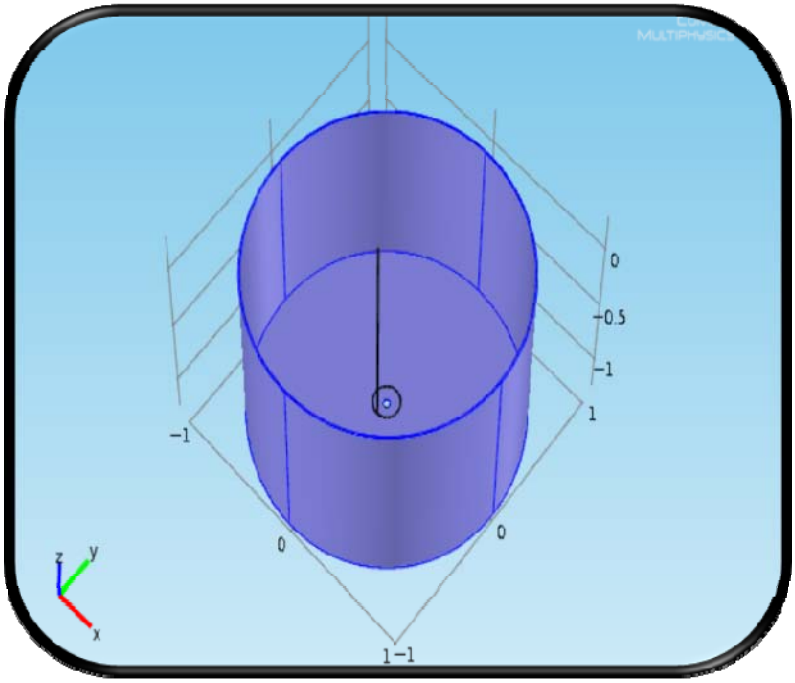

Fig.17. Imagen de la fuente de aire en la parte central (color negro) del fondo del tanque A, (Diámetro 2.0 m y Altura 1.0 m).

Fig.18. Fotografía de la fuente de aire central en el fondo del tanque en el laboratorio.

En el tanque B (Figs. 19 y 20) el flujo de aire es suministrado por un soplador a través de una manguera porosa de 6.35 mm de diámetro y una longitud de 6.0 m, con orificio de salida de 0.31 mm colocada en la periferia del fondo, el agua se suministra por un tubo de PVC de 12.7 mm de diámetro y una longitud de 1.0 m que se encuentra en la parte superior del tanque. La salida del desfogue del agua es por la parte superior del tanque, con un abertura de 38.1 mm de diámetro.

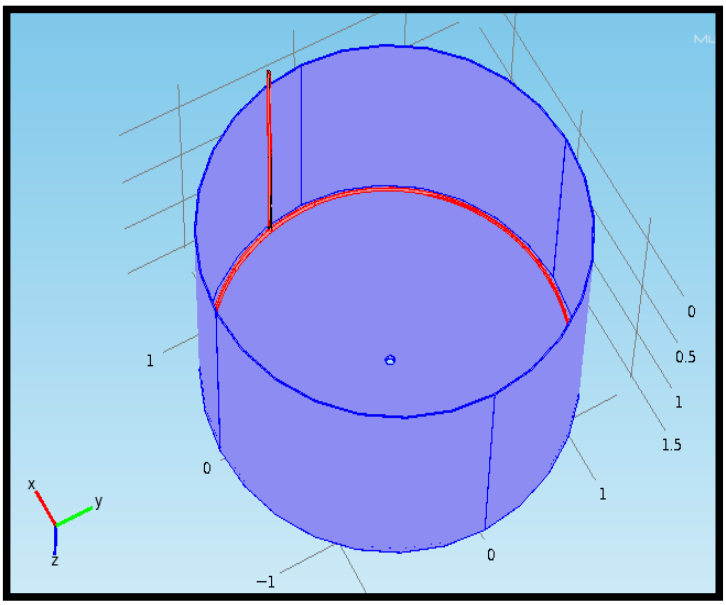

Fig. 19. Imagen de la fuente de aire en la parte perimetral (color rojo) en el fondo del tanque B, (Diámetro 2.0 m y Altura 1.0 m).

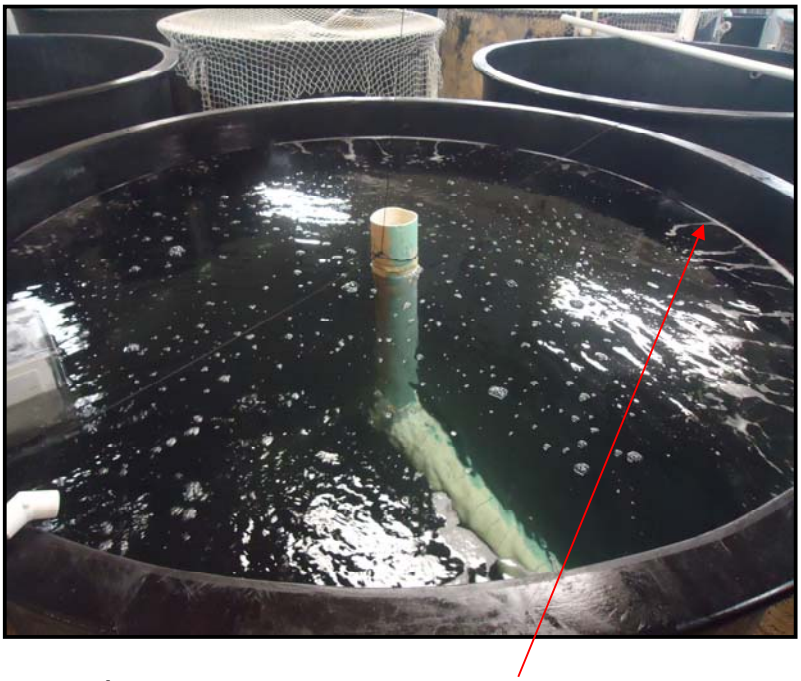

Fig. 20. Fotografía de la fuente de aire perimetral en el fondo del tanque en el laboratorio.

5.5. Captura de reproductores

Los reproductores de *Seriola rivoliana* fueron capturados a dos millas náuticas frente a la Isla Espíritu Santo en lugar conocido comúnmente como el Bajito, Baja California Sur., México, entre marzo y junio de 2013, mediante el arte de pesca conocido como línea de mano (piola y anzuelo) y caña con curricán. El número de ejemplares capturados fueron 15, en tres salidas al campo. Los reproductores capturados se colocaron en tanques de rotoplas de 5.0 m^3 con orificios de 2.54 cm para la circulación del agua y sirvieron de viveros, mientras era posible transportarlos al laboratorio, una vez en el Laboratorio de Biología Reproductiva de Organismos Acuáticos (CIBNOR) donde se mantuvieron durante un mes, se aplicaban tratamientos profilácticos: un baño de agua dulce de 5 minutos al llegar, 24 horas de antibiótico y después tres baños de formol a 200 ppm durante una hora cada 5 días. Después, se movieron a un estanque supralitoral de 200 m^3, donde se mantuvieron durante ocho meses aproximadamente y por último se cambiaron al sistema para la maduración (Fig. 21) y desove en tanques de dimensiones de 2.5 m de altura y 4.5 m de diámetro con un volumen de operación de 39.76 m^3, donde se controla la temperatura a 26.0ºC y fotoperiodo de 12/12 luz/obscuridad, cuenta con filtro de arena, filtro biológico, fraccionador de proteína y filtro ultravioleta, así como un enfriador y un calentador y con estas nuevas condiciones en el tanque se logra la maduración y desove de los reproductores. Durante este periodo de tiempo se ha suministrado alimento; sardina, macarela, lisa y calamar. De este lote de reproductores fueron obtenidas las larvas para los experimentos.

Fig.21. Fotografía de los tanques reproductores del jurel Seriola rivoliana en CIBNOR.

5.6. Primera corrida del cultivo larario

Las actividades de cultivo larvario del jurel *Seriola rivoliana*, se desarrollaron bajo las mismas condiciones iniciales para los dos tanques, un fotoperíodo de 24 horas de luz con una intensidad de 800 lux, salinidad 36.0 ups, recambio de agua de mar de 220.0 % cada 24 horas, todos estos parámetros permanecieron constante en el cultivo. La temperatura y el oxígeno se registraron a diario con un oxímetro portable de la línea YSI modelo 55, fabricación E.U.A. Para determinar la cantidad de desove se contaron los huevos contenidos en un mililitro, por triplicado, para obtener un valor promedio (863 embriones). Posteriormente se sembraron 20.0 mL de huevos en cada tanque, que equivalen aproximadamente a 17,290 huevos, con un porcentaje de eclosión del 92.0 %. Para calcular el porcentaje de eclosión después de 24 horas, se manejó una muestra representativa de 100 huevos del desove que se utilizó en la siembra del cultivo (Fig. 22).

La muestra correspondió a 15,879 larvas por tanque. La presión en cada tanque de cultivo fue distinta debido a la longitud de la fuente de aireación (manguera porosa), el Tanque A se le suministro una presión manométrica de 0.17 atm y Tanque B fue de 0.23 atm. La alimentación de las larvas consistió de rotíferos *Brachionus plicatilis y* copépodos *Pseudodiaptomus euryhalinus* dos veces al día. Antes de sembrar los embriones en el tanque, primero se desinfectaron con agua dulce para eliminar los parásitos y bacterias. Los datos de supervivencia larvaria fueron registrados el día quince del cultivo.

Fig. 22. Periodo embrionario en el día cero del cultivo del jurel Seriola rivoliana.

5.7. Segunda corrida del cultivo larvario

Este cultivo se realizó con un fotoperíodo de 24 horas de luz con una intensidad de luz de 800 lux, una salinidad 36.0 ups y un recambio de agua marina de 220.0 % en 24 horas, estos parámetros permanecieron constantes durante el cultivo. La temperatura y el oxígeno se registraron todos los días. Se trabajó con una cantidad de desove de 100.0 mL en cada tanque, lo que equivale aproximadamente a 86,300 huevos, con un porcentaje de eclosión del 89.0 %, con lo que se tienen alrededor de 76,807 larvas por tanque. En el mismo contexto, la alimentación de la larvas consistió de rotíferos *Brachionus plicatilis* y de copépodos *Pseudodiaptomus euryhalinus*.

5.8. Tercera corrida del cultivo larvario

Durante este cultivo el fotoperiodo fue de 24 horas de luz a una intensidad de 800 lux, una salinidad de 37.0 ups y un recambio de agua marina de 220.0% en 24 horas, estos parámetros fueron constantes a lo largo del cultivo. La temperatura y el oxígeno se registraron diario. Bajo estas condiciones se trabajó con el cultivo larvario de jurel utilizándose una cantidad de desove de 100.0 mL. Con respecto a la alimentación de larvas se utilizaron rotíferos *Brachionus plicatilis* y copépodos *Pseudodiatomus euryhalinus*. La cantidad de huevos que se sembraron en cada tanque, fue de 86,300 huevos, con una eclosión del 95.0 % que equivale a 81,985 larvas por tanque.

VI.- RESULTADOS

6.1. Simulación con fuente de aire central (Tanque A)

El modelo con fuente de aire central presenta las siguientes características de circulación de agua en el tanque: un patrón de flujo que va en dirección ascendente hacia la superficie del tanque con una velocidad máxima de 5.0 cm/s en el eje central del tanque, cambia de dirección en un ángulo de 90 grados sobre la superficie del agua y hacia la pared del tanque, después se curva y tiende a desplazarse a la parte central. También se observa la generación de un remolino intenso en sentido de las manecillas del reloj, después de los tres minutos de simulación localizada en la parte superior derecha del tanque y una contra corriente de menor velocidad abajo del remolino en dirección opuesta. En la parte inferior derecha del tanque es notoria una zona de velocidades muy pequeñas (Fig. 23). Esta simulación tiene las siguientes dimensiones del tanque: 0.5 m de radio y 1.0 m de altura.

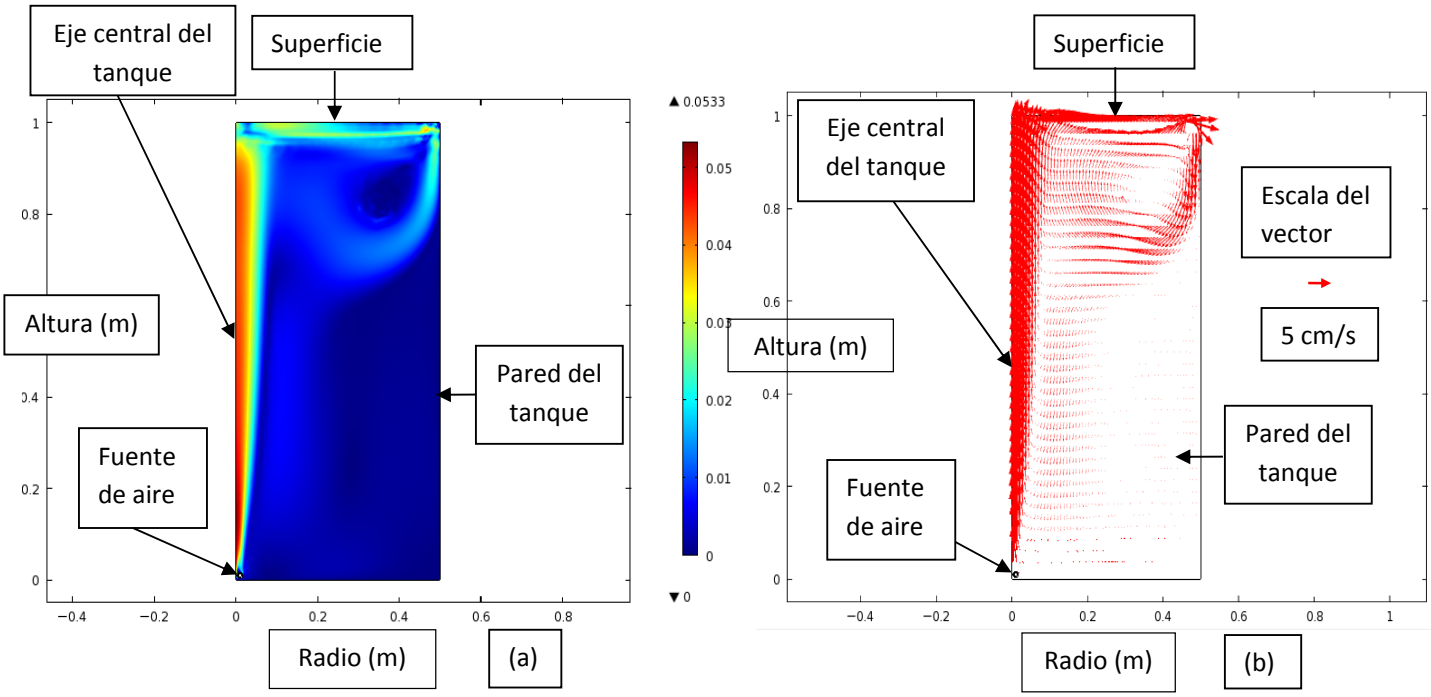

Fig.23. Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 0.5 m y H = 1.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.

En esta simulación la circulación es desde el fondo en el eje central del tanque hacia la superficie con una velocidad máxima de 5.0 cm/s, cambia su curso hacia la pared del tanque con dirección a las manecillas del reloj, en donde se observa un remolino en la parte derecha del tanque y su centro se ubica a una altura de 0.5 m con un radio de 1.5 m (Fig. 24). Se observan zonas de menor velocidad en el centro del remolino y en las esquinas inferiores y en la parte adyacente del centro del tanque. Comparado este resultado con la simulación mostrada en la figura 23, se puede decir que el patrón de flujo de éste tanque presenta zonas de mayor velocidad en el eje central, en la superficie y en las partes superiores de las paredes, con un campo de distribución de menor tamaño. Esta simulación se realizó tomando las siguientes dimensiones del tanque: 2.0 m de radio y 1.0 m de alto.

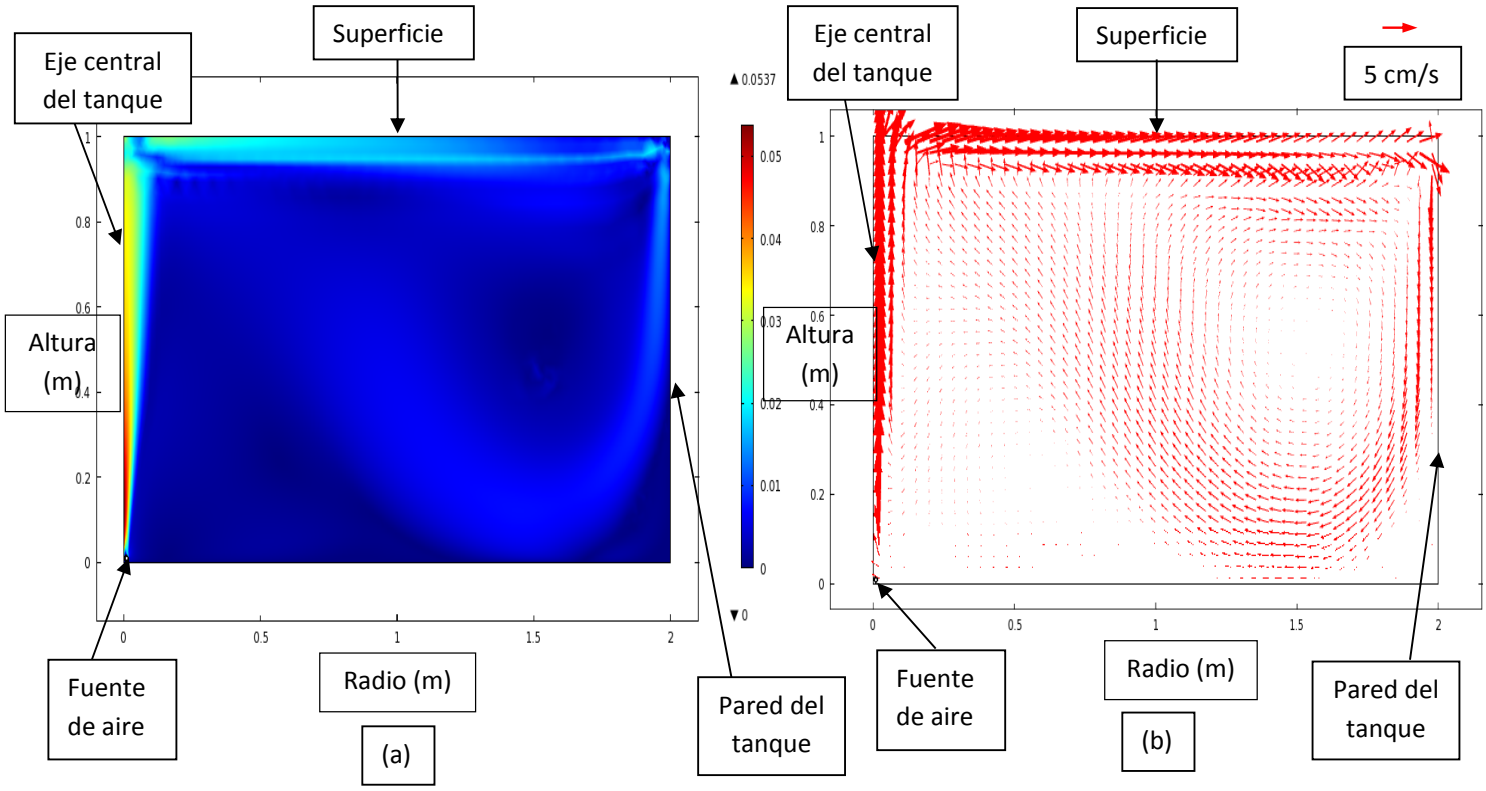

Fig.24. Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 2.0 m y H = 1.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.

En un tanque con una altura de 0.5 m y un radio de 1.0 m (Fig. 25) se tiene el mismo patrón de circulación que en la figura 24, con la velocidad máxima de 5.0 cm/s en el eje central, 3.0 cm/s en la superficie y 1.5 cm/s en la parte inferior del remolino que se localiza a una altura de 25.0 cm y una distancia del eje central de 80.0 cm en la parte derecha.

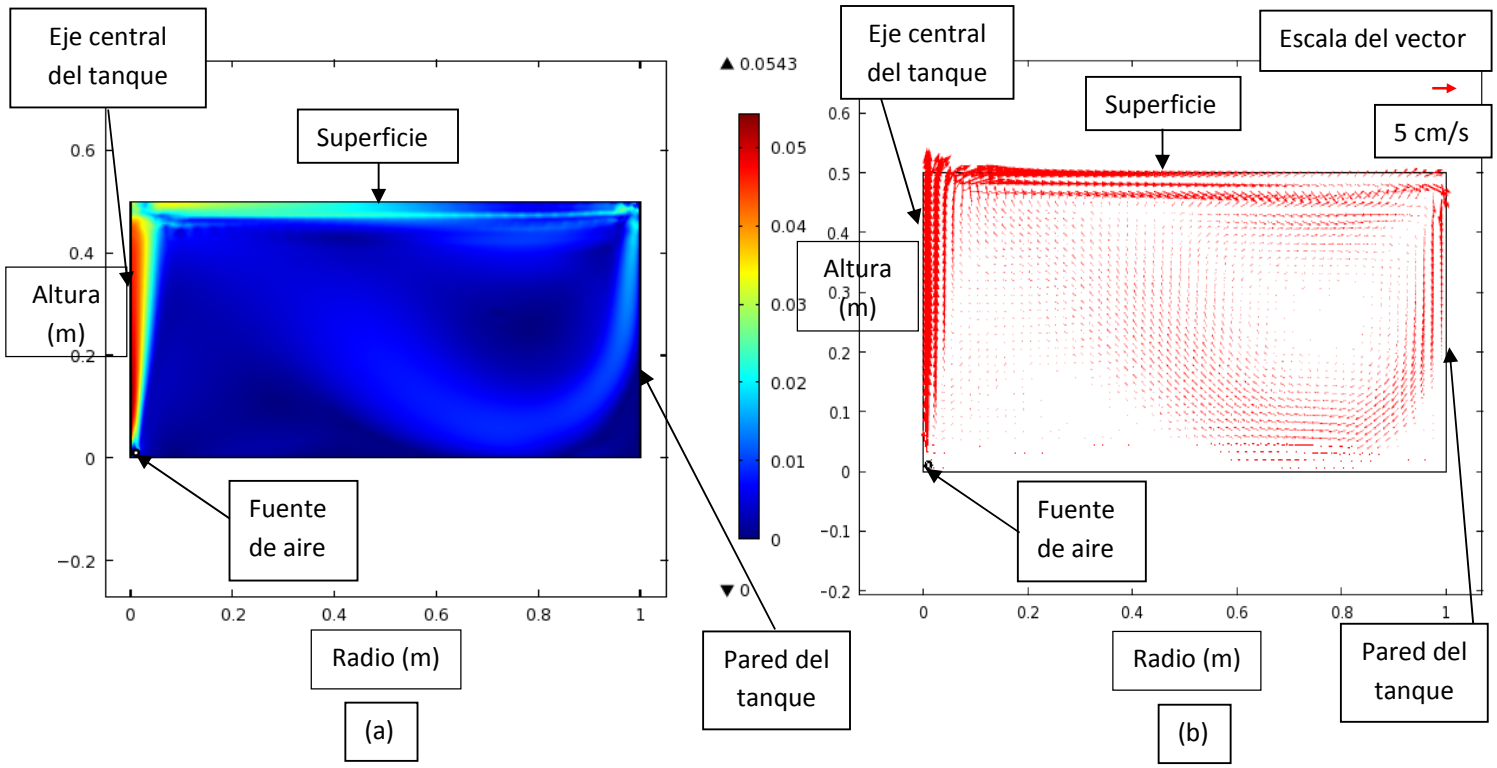

Fig.25. Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 1.0 m y H = 0.5 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.

En la simulación en un tanque de 2.0 m de altura y 1.0 m de radio y fuente de aire central se simuló una circulación con la mayor intensidad en el fondo del eje central con una velocidad de 5.0 cm/s, 2.0 cm/s en la superficie, periferia del remolino localizado en la porción superior derecha y 1.0 cm/s en la parte inferior del remolino y en la zona adyacente al eje central (Fig. 26).

.

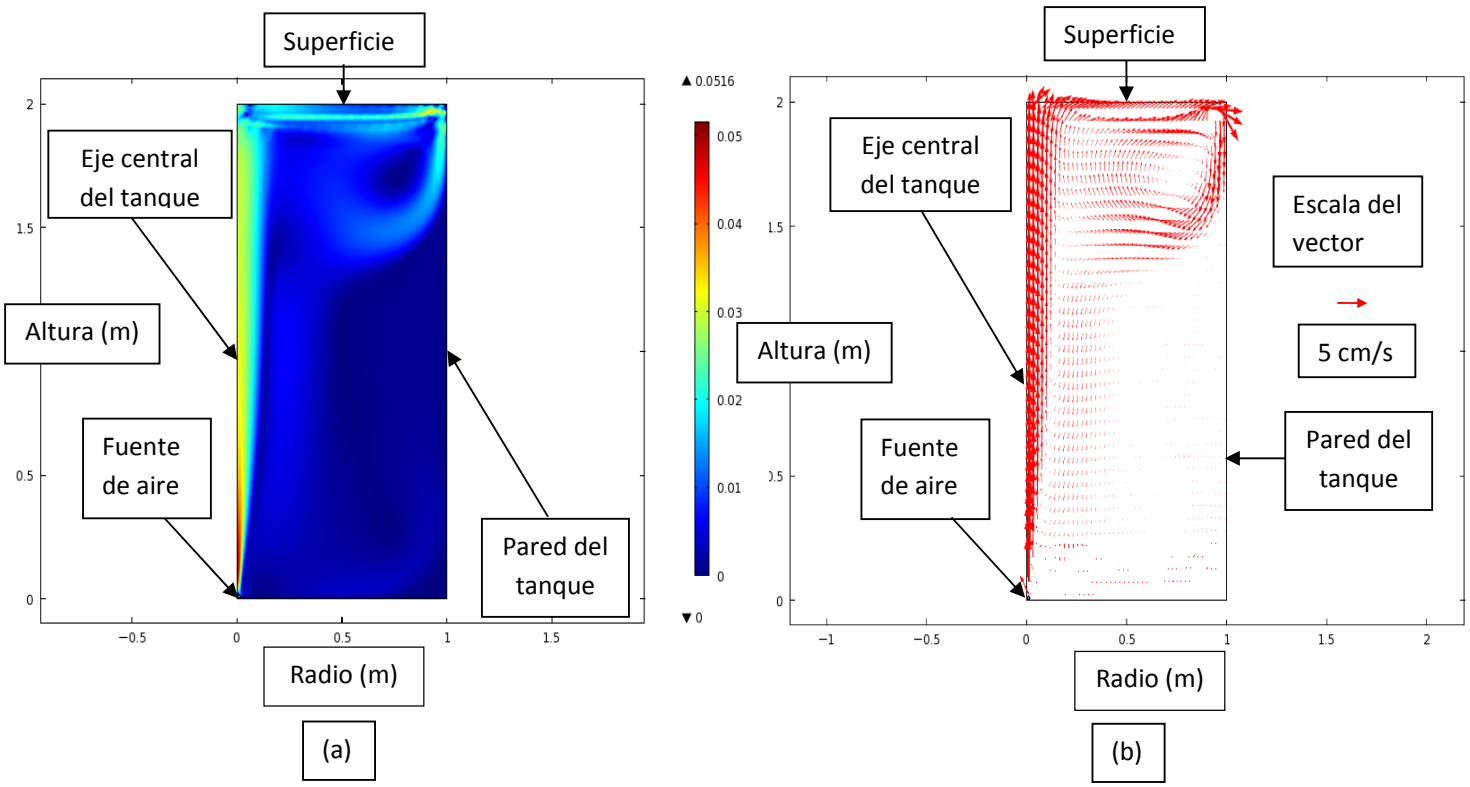

Fig.26. Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 1.0 m y H = 2.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.

6.2. Simulación con fuente de aire perimetral (Tanque B)

La simulación con fuente de aire perimetral en un tanque de 1.0 m de altura y 0.5 m de radio, presenta una circulación del agua que empieza en el fondo del tanque en la parte perimetral, asciende verticalmente hasta la superficie con velocidades de 10.0 cm/s, formándose dos remolinos: uno superficial intenso en sentido de las manecillas del reloj con velocidades máximas de 25.0 cm/s en la parte superior derecha del tanque y el otro en el resto del tanque en sentido contrario a las manecillas del reloj, con un núcleo de muy baja velocidad a los 40.0 cm de altura (Fig. 27).

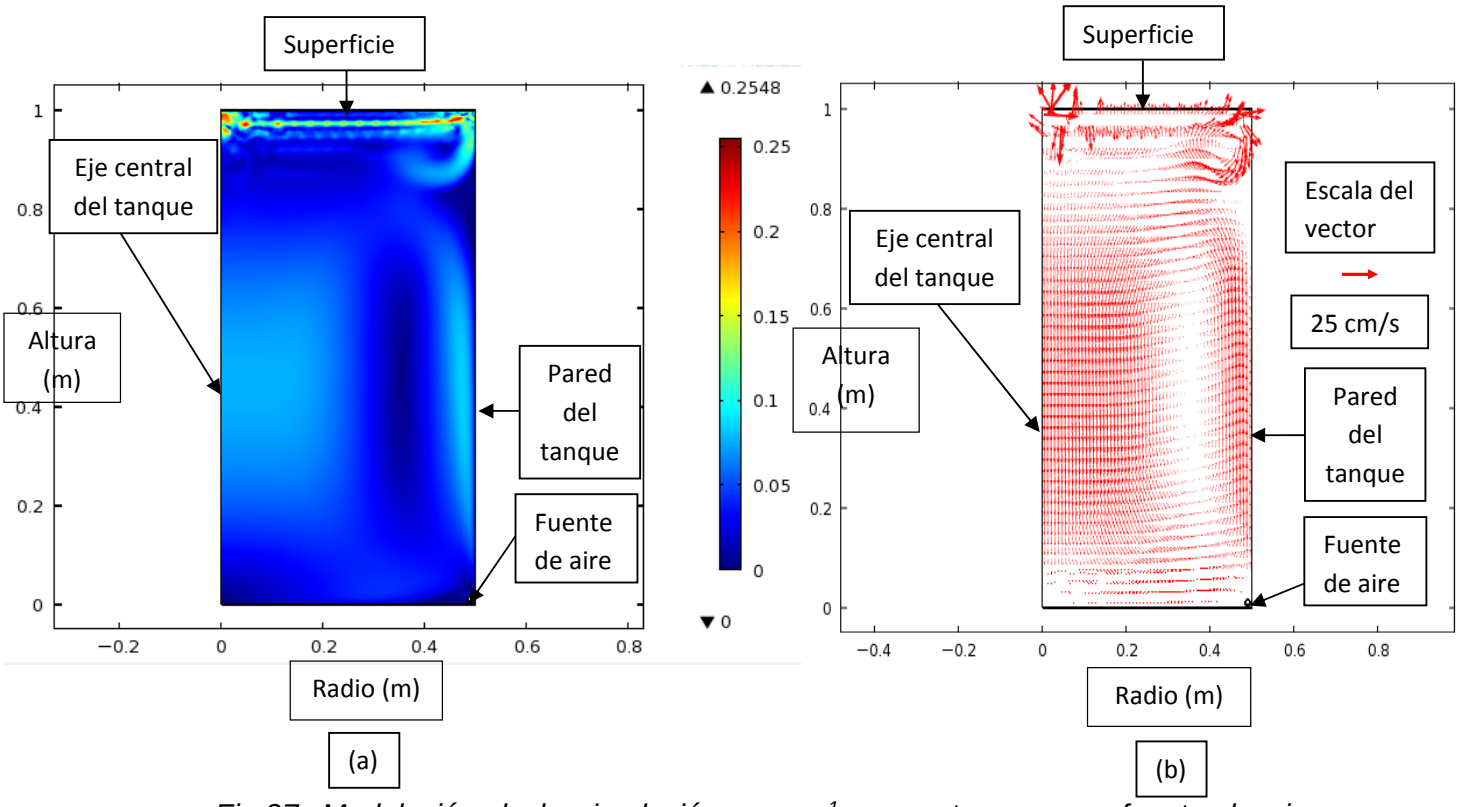

Fig.27. Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 0.5 m y H = 1.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.

En esta simulación con fuente de aire perimetral en un tanque de 1.0 m de altura y 2.0 m de radio, presenta una circulación del agua que empieza en el fondo del tanque en la parte perimetral, asciende verticalmente hasta la superficie con velocidades de 5.0 cm/s, formándose dos remolinos: uno superficial intenso en sentido de las manecillas del reloj con velocidad de 20.0 cm/s en la parte superior derecha del tanque y el otro en el resto del tanque en sentido contrario a las manecillas del reloj, con un núcleo de baja velocidad a los 50.0 cm de altura, la velocidad máxima de 30.0 cm/s se presenta en la superficie de la parte superior del eje. (Fig. 28).

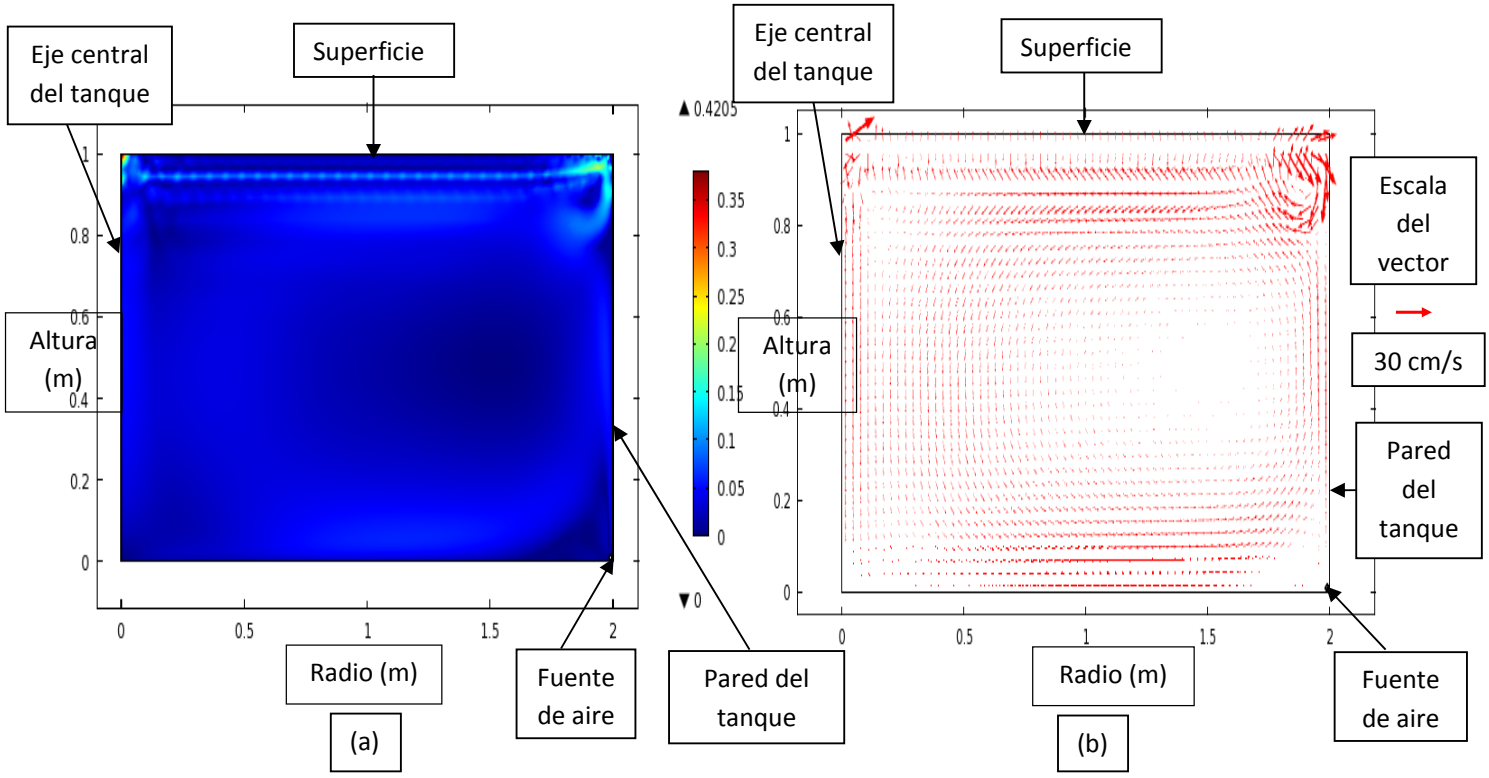

Fig.28. Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 2.0 m y H = 1.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.

En un tanque con fuente de aire perimetral en un tanque de 0.5 m de altura y 1.0 m de radio, presenta una circulación del agua que empieza en el fondo del tanque en la parte perimetral, asciende verticalmente hasta la superficie con velocidades de 5.0 cm/s, formándose dos remolinos: uno superficial intenso en sentido de las manecillas del reloj con velocidades de 20.0 cm/s en la parte superior derecha del tanque y el otro en el resto del tanque en sentido contrario a las manecillas del reloj, con un núcleo de baja velocidad a los 25.0 cm de altura, la velocidad máxima de 35.0 cm/s se muestra en la superficie de la parte superior del eje (Fig. 29).

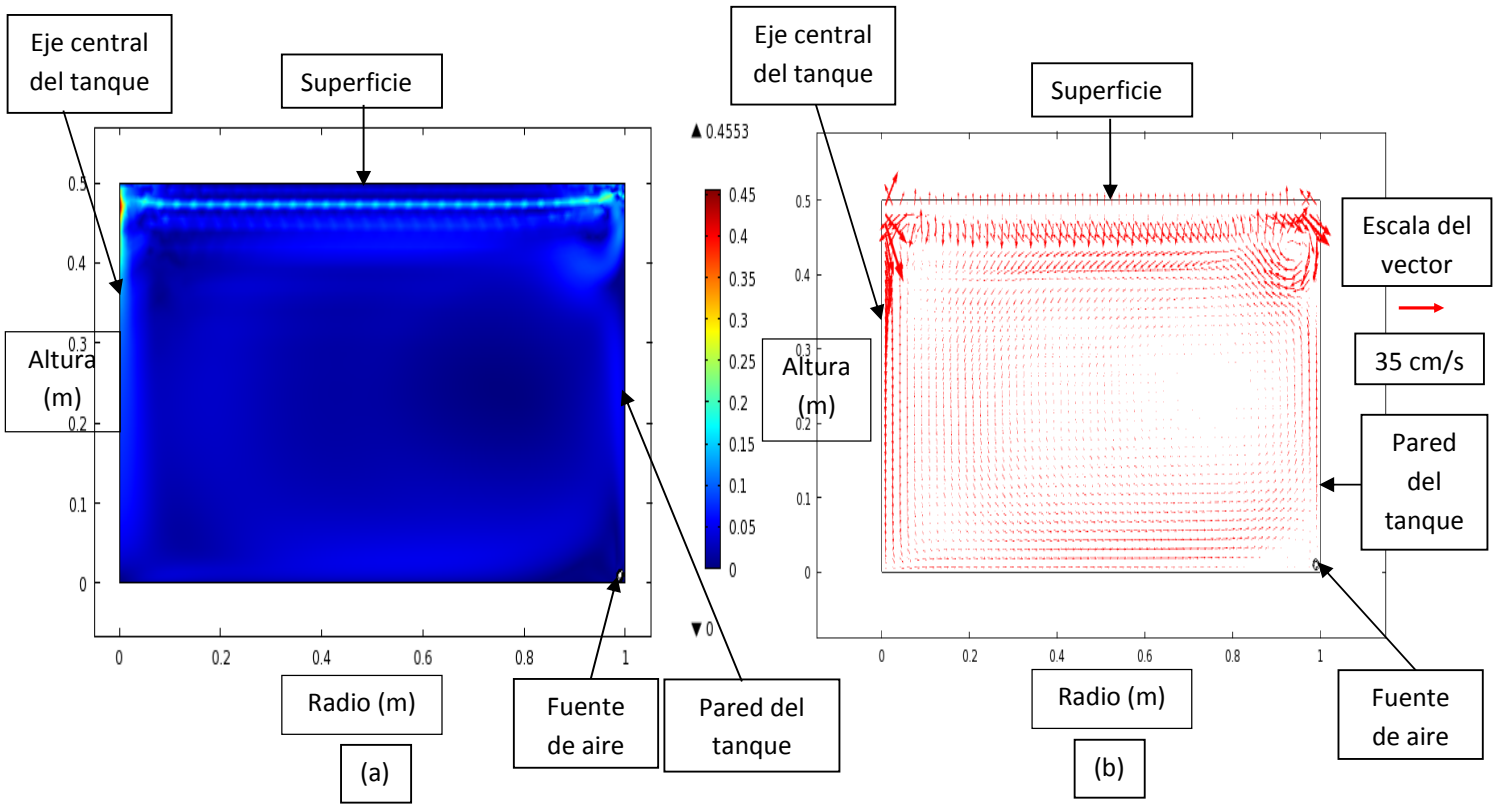

Fig.29. Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 1.0 m y H = 0.5 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.

La simulación con fuente de aire perimetral en un tanque de 2.0 m de altura y 1.0 m de radio, presenta una circulación del agua que empieza en el fondo del tanque en la parte perimetral, asciende verticalmente hasta la superficie con velocidades de 10.0 cm/s, formándose dos remolinos: uno superficial intenso en sentido de las manecillas del reloj con velocidades máximas de 30.0 cm/s en la parte superior derecha del tanque y el otro en el resto del tanque en sentido contrario a las manecillas del reloj, con un núcleo de baja velocidad a un 1.0 m de altura (Fig. 30).

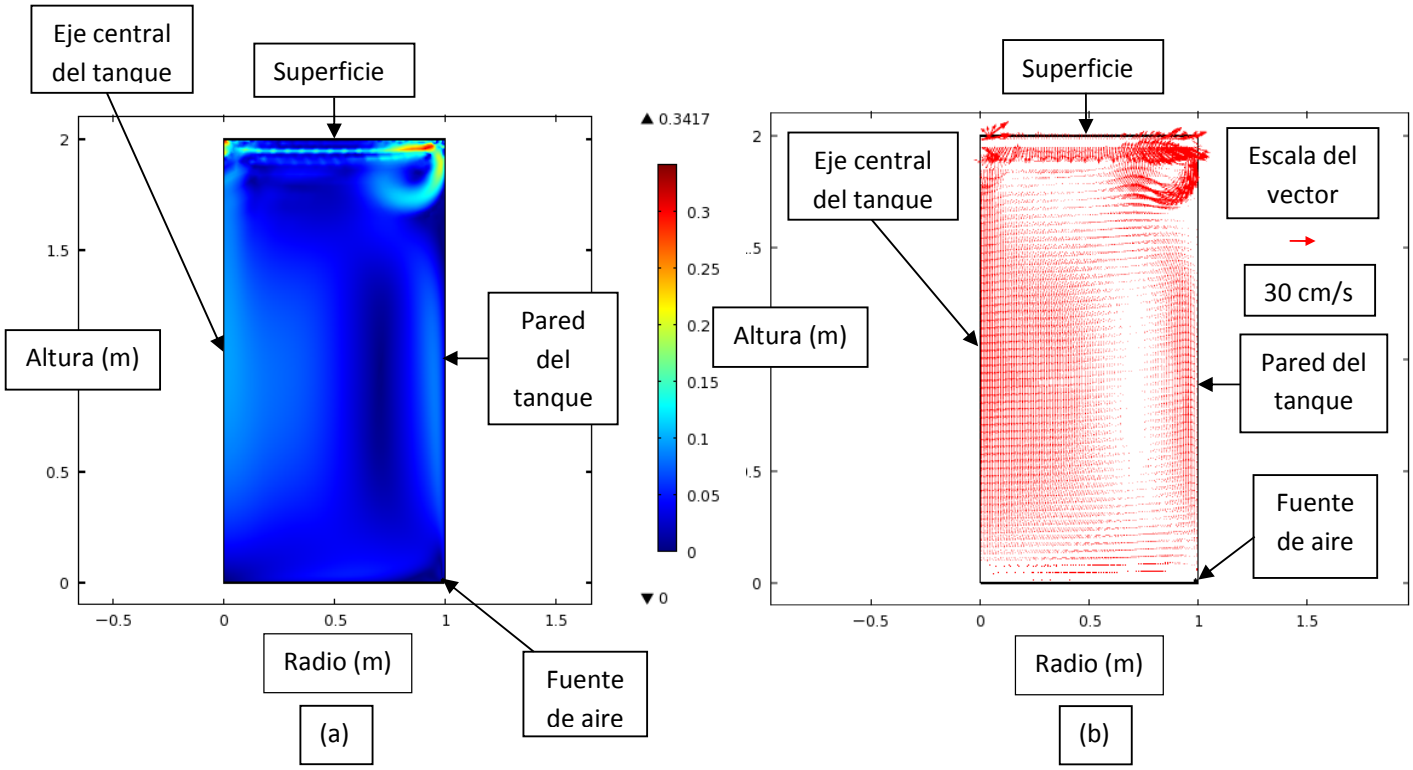

Fig.30. Modelación de la circulación en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 1.0 m y H = 2.0 m. (a) Imagen de la distribución de corrientes, (b) Distribución vectorial de corrientes.

6.3. Simulación en el Tanque A utilizado en el laboratorio

La simulación con fuente de aire central en un tanque de 0.8 m de altura y 1.0 m de radio, presenta una circulación del agua que empieza en el fondo del tanque en el eje central, asciende hasta la superficie con velocidad máxima 5.0 cm/s, formándose un remolino en sentido de las manecillas del reloj con una velocidad de 2.0 cm/s en la parte derecha del tanque, con núcleo a los 55.0 cm (Fig. 31a).

Se puede destacar que la simulación del patrón de flujo del agua con la fuente de aire central, genera un flujo relativamente suave (Fig. 31b). Por otra parte, se analizaron algunos puntos muestreados del tanque, en donde se calcula la magnitud de la velocidad del agua (Tabla 1). En la figura 32 se observa la ubicación de los puntos muestreados en el tanque A y la figura 33 muestra las magnitudes de las velocidades de la fase liquida en los puntos muestreados.

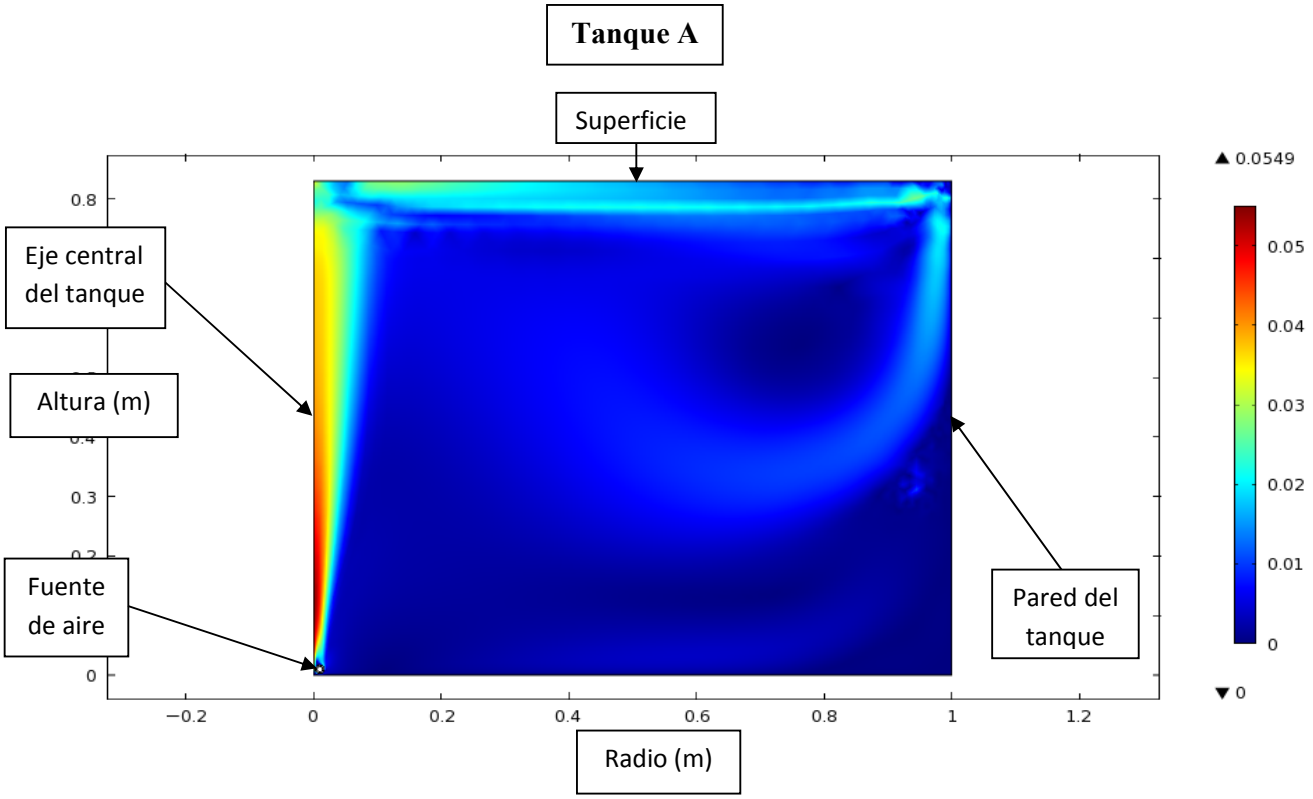

Fig.31a. Imagen de la modelación de la distribución de corrientes, en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 1.0 m y H = 0.8 m.

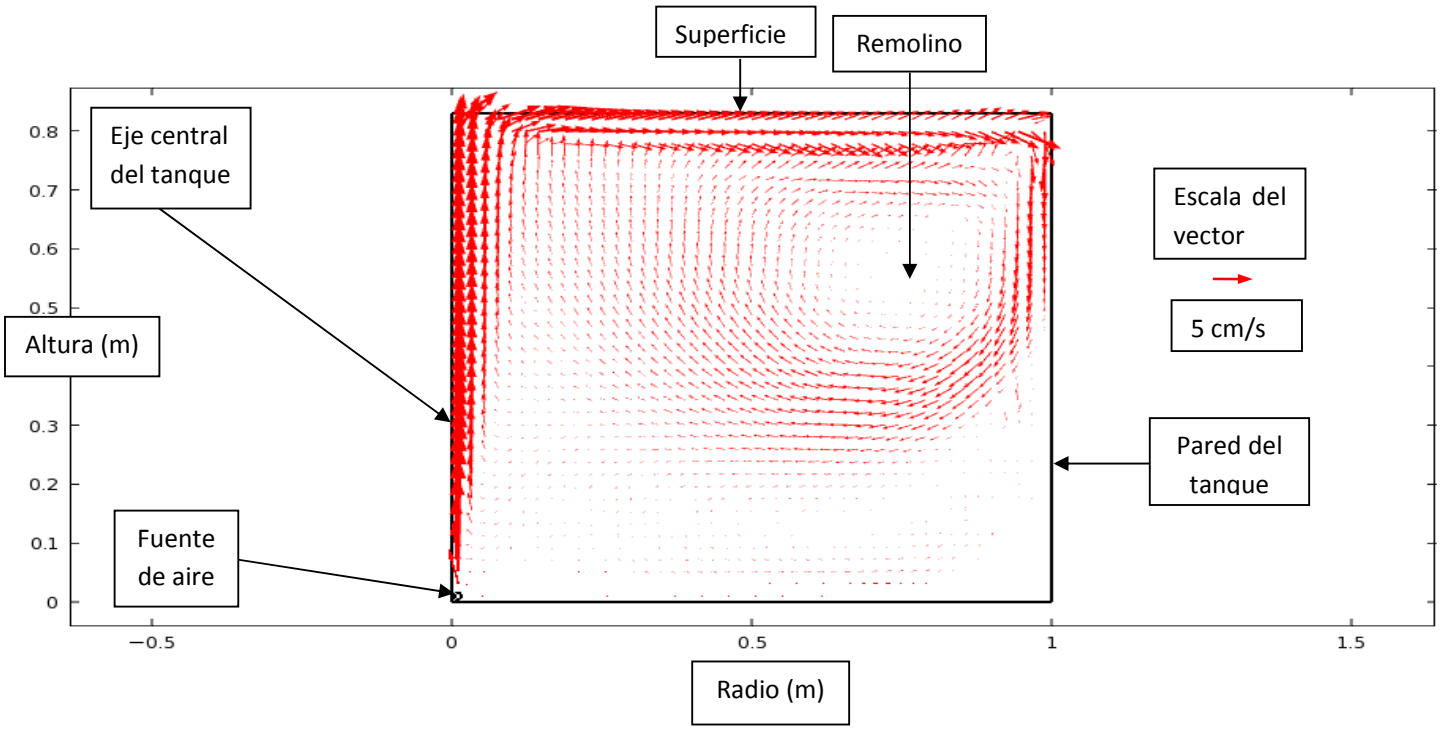

Fig.31b. Modelación de la distribución vectorial de corrientes en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire central, R = 1.0 m y H = 0.8 m.

Tabla 1. Descripción de puntos muestreados en el Tanque A.

Coordenadas		Descripción
Eje X	Eje Y	
0.98 m	0.81 m	Punto en la parte superior derecha del tanque.
0.02 m	0.81 m	Punto en la parte superior del eje del tanque.
0.50 m	0.42 m	Punto en la mitad del radio y la altura del tanque.
0.02 m	0.42 m	Punto en la mitad del eje dentral del tanque.
0.98 m	0.02 m	Punto en la parte enferior derecha del tanque
0.98 m	0.42 m	Punto en la mitad de la pared dercha del tanque.
0.03 m	0.02 m	Punto en la parte del fondo del eje central del tanque.

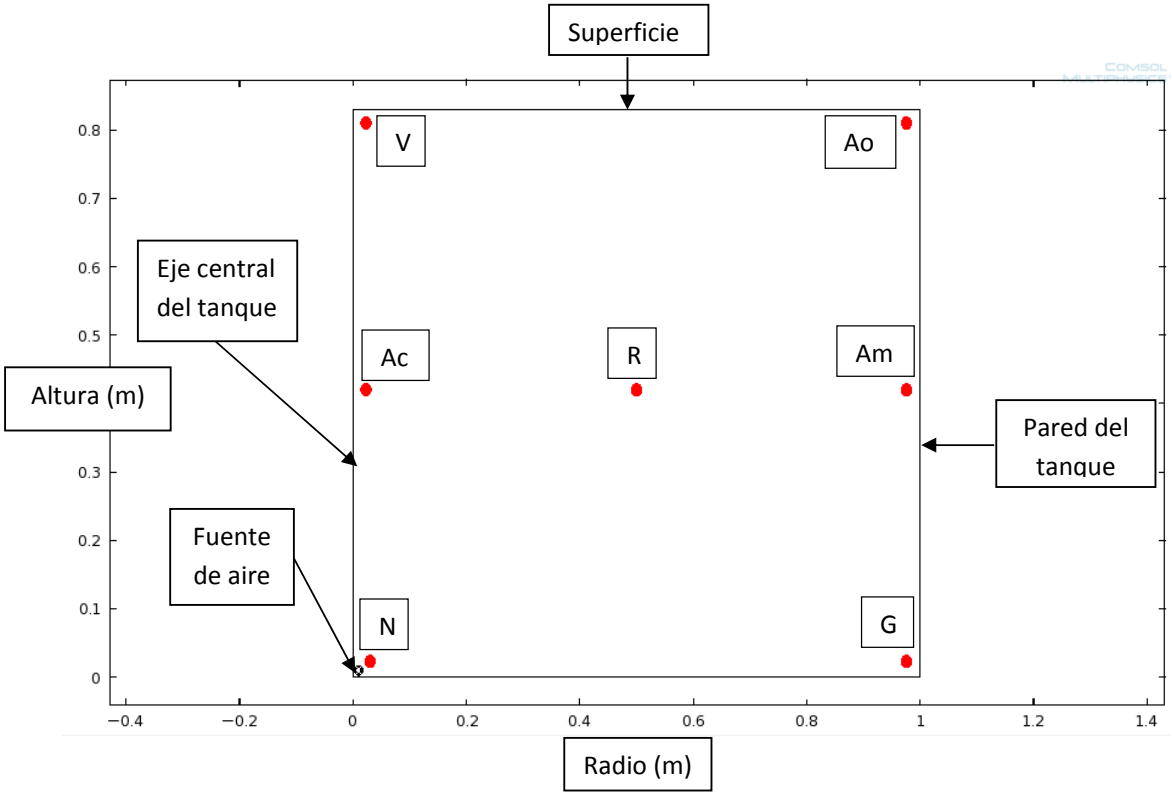

Fig. 32. Puntos muestreados donde se calcula la magnitud de velocidad del agua en el Tanque A.

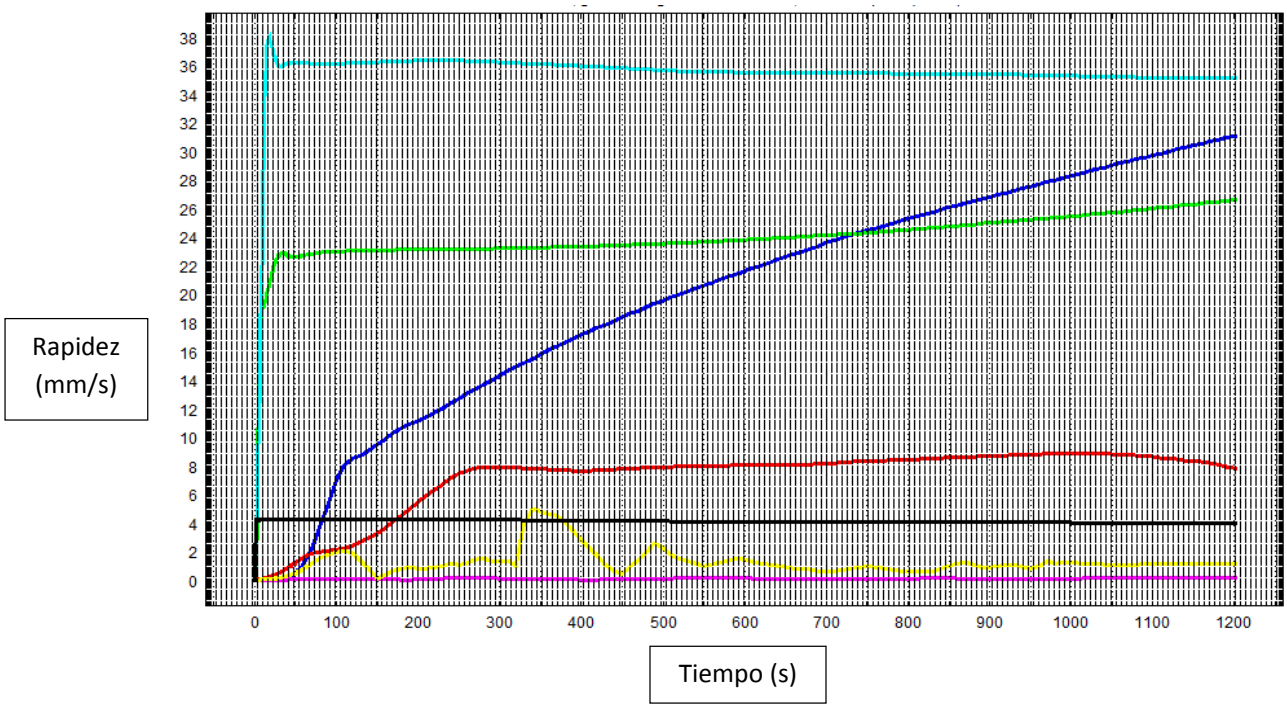

Fig. 33. Magnitud de velocidad de la fase líquida en los puntos muestreados en el Tanque A. Las letras de los puntos muestreados representan las iniciales de los colores empleados en la gráfica de cada función: Negro = N, Azul claro = Ac, Verde = V, Rojo = R, Azul oscuro = Ao, Amarillo = Am, Guinda = G.

6.4. Simulación en el Tanque B utilizado en el laboratorio

La simulación con fuente de aire perimetral en un tanque de 0.8 m de altura y 1.0 m de radio, presenta una circulación del agua que empieza en el fondo del tanque en la parte perimetral, asciende verticalmente hasta la superficie con velocidades de 8.0 cm/s, formándose dos remolinos: uno superficial intenso en sentido de las manecillas del reloj con velocidades máximas de 27.0 cm/s en la parte superior derecha del tanque y el otro en el resto del tanque en sentido contrario a las manecillas del reloj, con un núcleo de muy baja velocidad a los 40.0 cm de altura (Fig. 34b). En el mismo contexto, se analizaron algunos puntos muestreados del tanque en donde se calcula la magnitud de la velocidad del agua (Tabla 2). En la figura 35 se observan los puntos muestreados en el tanque B y la figura 36 muestra las magnitudes de las velocidades de la fase liquida en los puntos seleccionados.

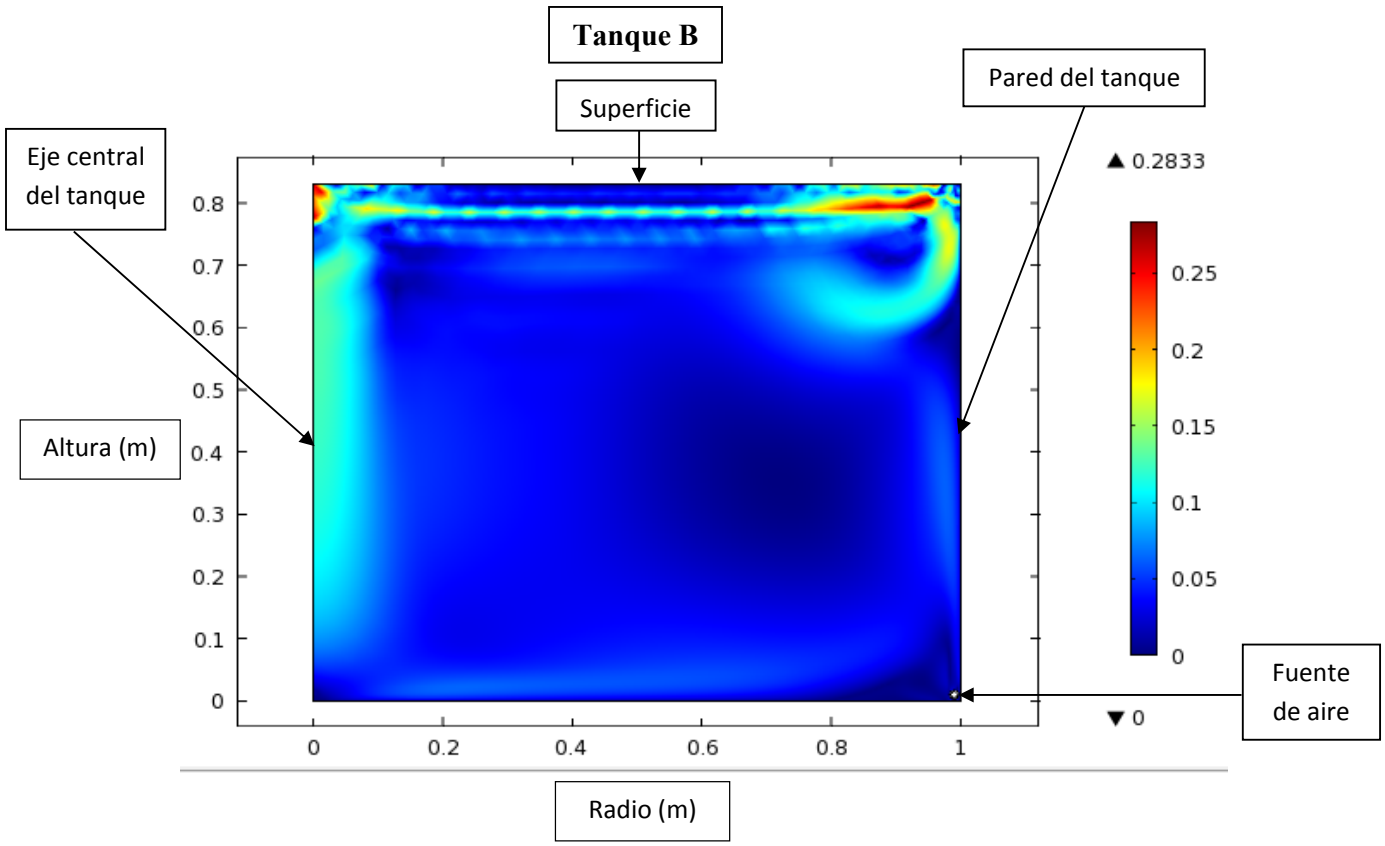

Fig.34a. Imagen de la modelación de la distribución de corrientes, en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 1.0 m y H = 0.8 m.

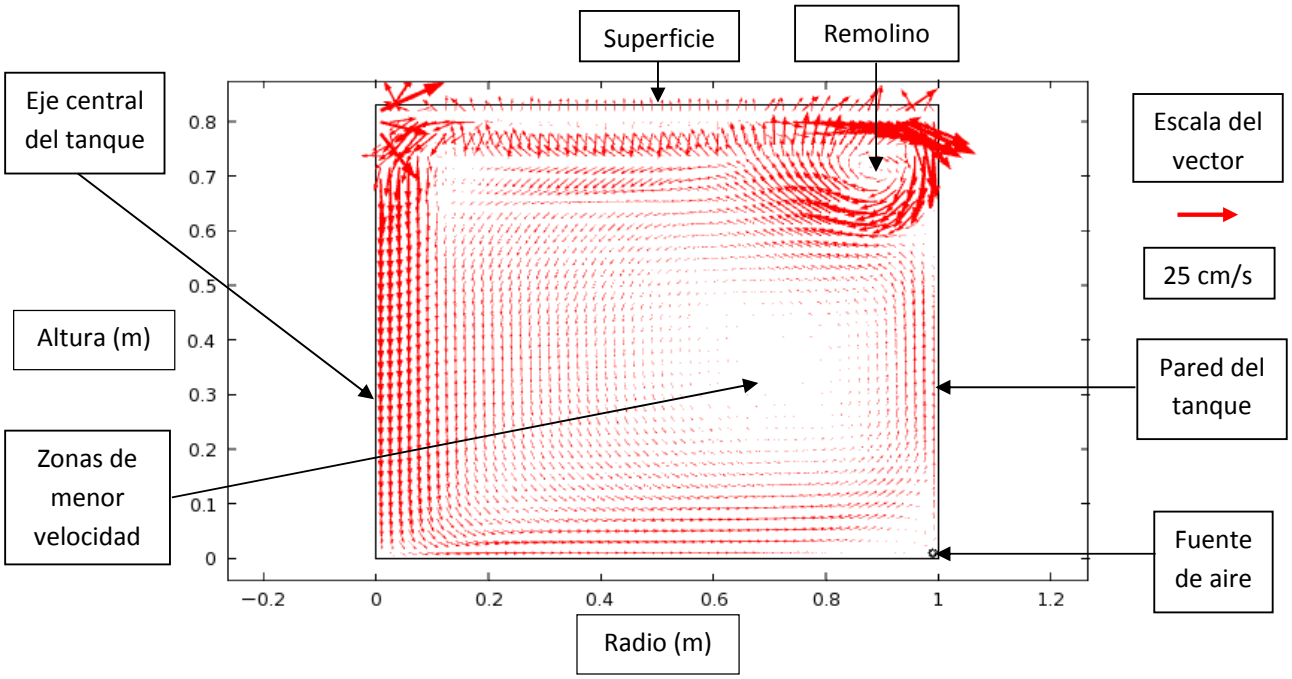

Fig.34b. Modelación de la distribución vectorial de corrientes en ms^{-1} en un tanque con fuente de aire perimetral, R = 1.0 m y H = 0.8 m.

Tabla 2. Descripción de puntos muestreados en el Tanque B.

Coordenadas		Descripción
Eje X	Eje Y	
0.99 m	0.82 m	Punto en la parte superior derecha del tanque.
0.5 m	0.42 m	Punto en la mitad del radio y la altura del tanque.
0.02 m	0.42 m	Punto en la mitad del eje dentral del tanque.
0.99 m	0.42 m	Punto en la mitad de la pared dercha del tanque.
0.02 m	0.02 m	Punto en la parte del fondo del eje central del tanque.
0.97 m	0.02 m	Punto en la parte enferior derecha del tanque.
0.02 m	0.82 m	Punto en la parte superior del eje del tanque.

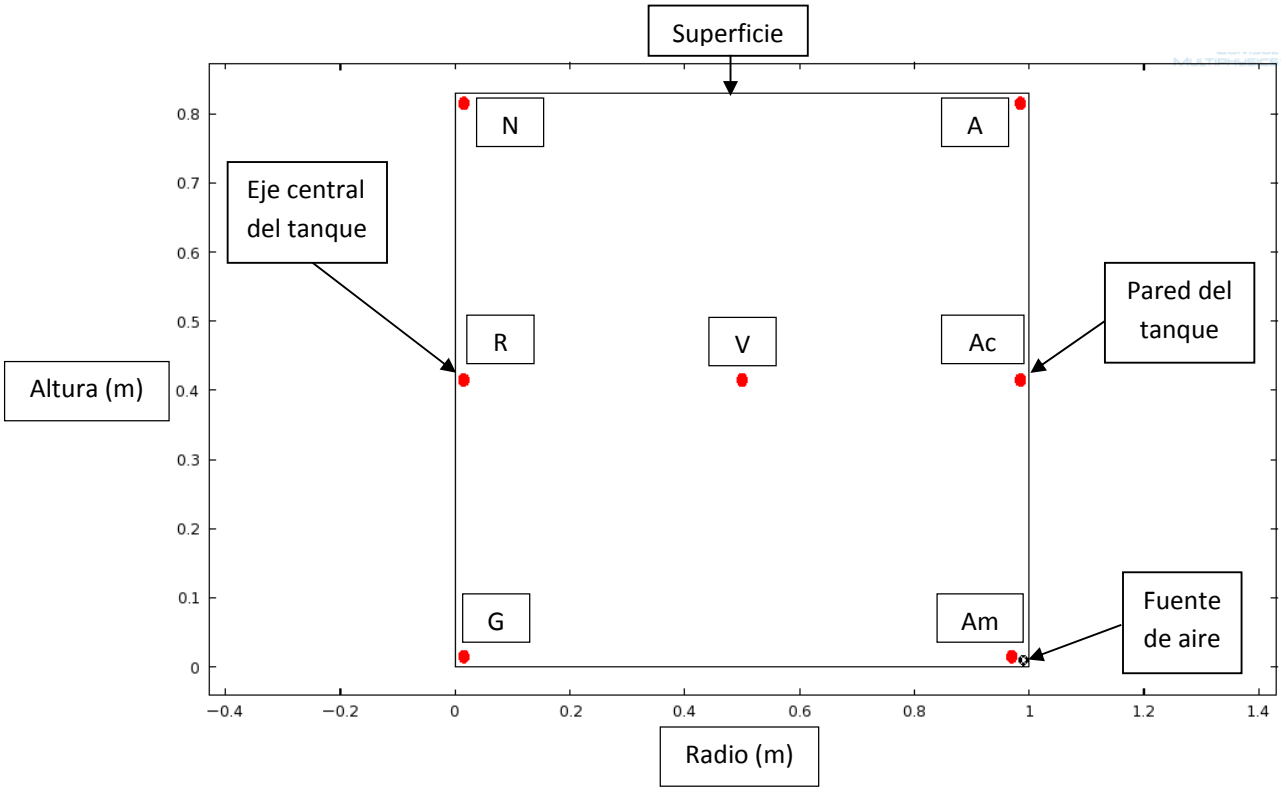

Fig. 35. Puntos muestreados donde se calcula la magnitud de velocidad del agua en el Tanque B.

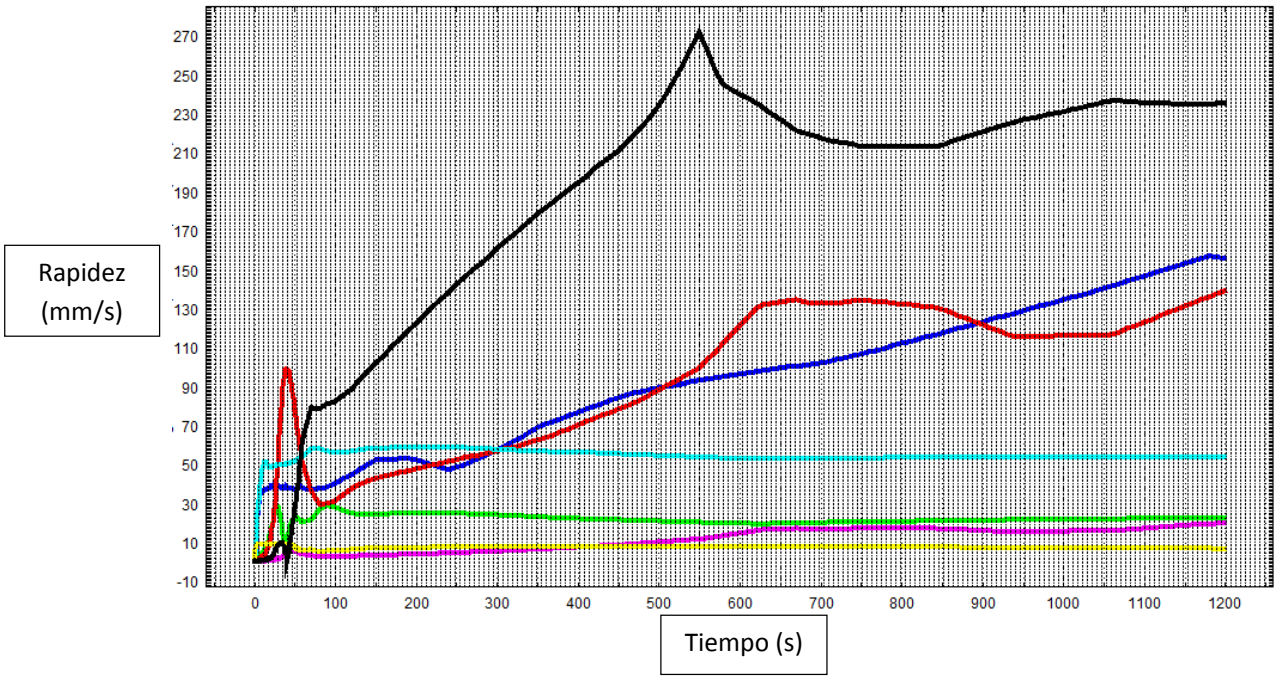

Fig. 36. Magnitud de velocidad de la fase líquida en los puntos muestreados en el Tanque B. Las letras de los puntos muestreados representan las iniciales de los colores empleados en la gráfica de cada función: Negro = N, Azul claro = Ac, Verde = V, Rojo = R, Azul oscuro = Ao, Amarillo = Am, Guinda = G.

6.5. Primera corrida del cultivo larvario de *Seriola rivoliana*

En la primera corrida con fuente de aire central se obtuvo una supervivencia de seis larvas hasta el día 15 posterior a la siembra (Figs. 37 y 38), mientras que en la circulación con fuente perimetral no sobrevivió ninguna larva. En la figura 39, la temperatura máxima es de 28.8ºC en el cuarto día del cultivo. La temperatura inferior es de 26.0ºC en el día 15. En cuanto al oxígeno presenta dos picos máximos en los días tres y nueve con valores de 6.1 mg/l y 6.0 mg/l, respectivamente. Con dos valores inferiores de oxígeno de 5.4 mg/l en los días uno y cuatro de la corrida. Por otro lado, la figura 40, se observa que la temperatura menor fue de 26.0ºC en el día 15 del cultivo y la temperatura máxima fue de 28.8ºC en el día 4. En cuanto la cantidad menor de oxígeno fue de 6.1 mg/l en los días 4, 5 y 8 del cultivo, la máxima fue de 6.8 mg/l en el día 15. La alimentación de las larvas fue proporcionada con base a la composición que se muestra en la Tabla 3. Donde la concentración de alimento promedio fue de 0.03 C/mL, 0.52 N/mL y 0.07 R/mL.

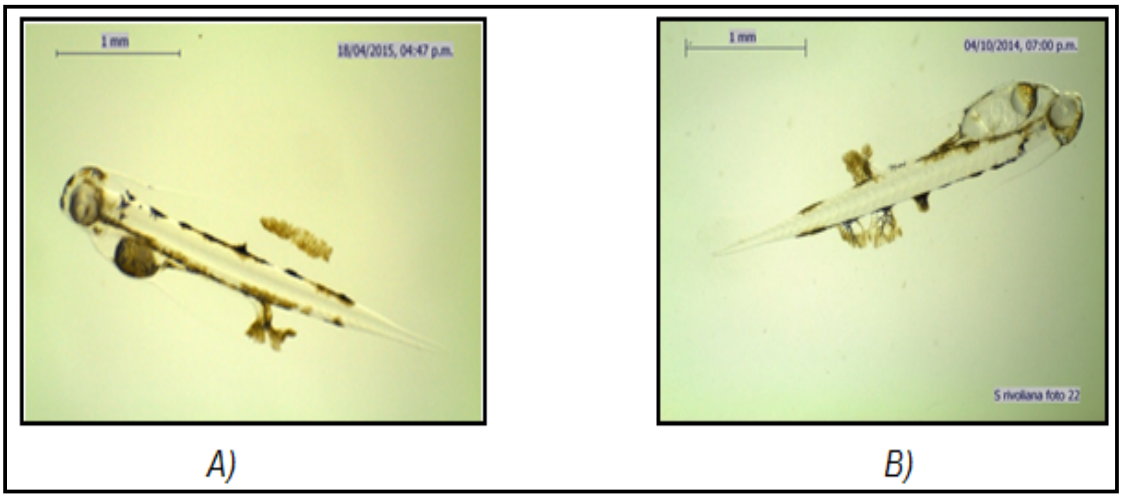

Fig. 37. Período larvario del jurel Seriola rivoliana: en (A) Eleuteroembrión día 1, (B) el saco vitelino comienza a reducirse, los ojos y el aparato digestivo van desarrollándose.

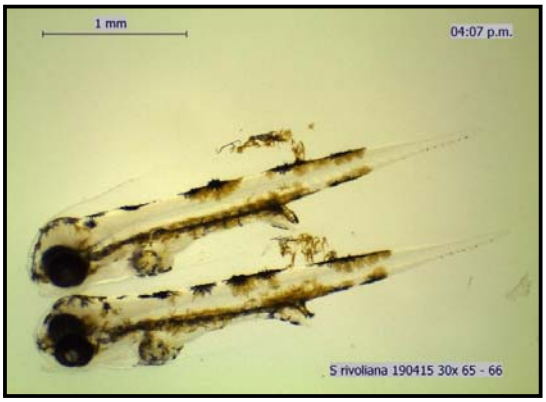

Figura 38. Larva preflexión día 3, se ven los ojos pigmentados, además abren la boca para capturar a su presa y se abre el ano, aún conserva parte de la gota de aceite.

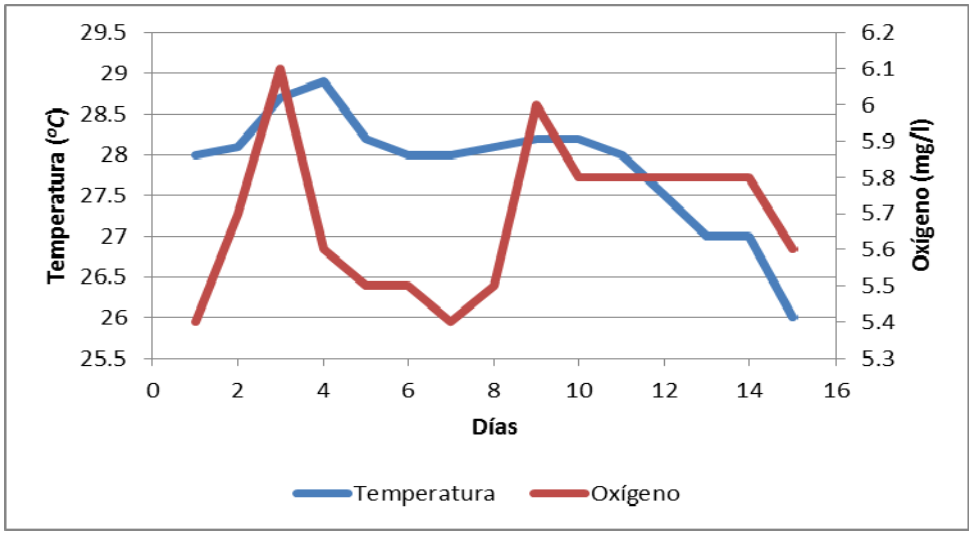

Fig.39. Temperatura y oxígeno disuelto en la primera corrida tanque A.

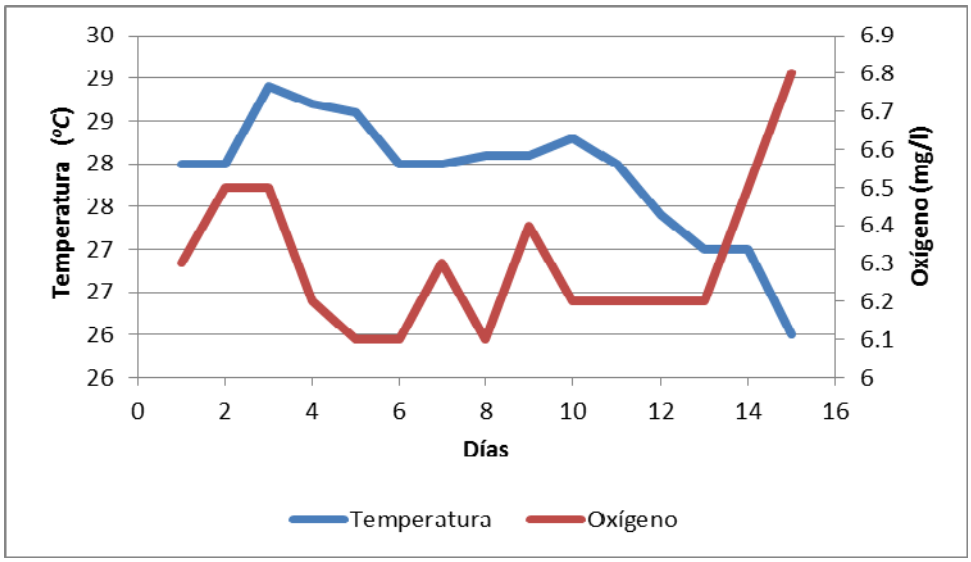

Fig.40. Temperatura y oxígeno disuelto en la primera corrida tanque B.

Tabla 3. Calendario de actividades de alimentación de la corrida 1.

Día	Total de Copépodos Adultos	Copépodo Adulto /mL	Sumado: Adultos/mL	Total de Nauplios	Nauplios /mL	Sumado: Nauplios/mL	Total de Rotíferos	Rotíferos / mL	Sumado: Rotíferos/mL
0	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
1	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
2	0	0.00	0.00	315,000	0.11	0.11	1,190,00	0.04	0.04
3	0	0.00	0.00	276,000	0.09	0.20	1,200,00	0.04	0.08
4	9,000	0.00	0.00	1,836,000	0.61	0.81	297,000	0.10	0.18
5	80,000	0.03	0.03	3,140,000	1.05	1.86	100,000	0.03	0.21
6	180,000	0.06	0.09	3,020,000	1.01	2.86	60,000	0.02	0.23
7	440,000	0.15	0.24	9,960,000	3.32	6.18	520,000	0.17	0.41
8	40,000	0.01	0.25	840,000	0.28	6.46	100,000	0.03	0.44
9	36,000	0.01	0.26	792,000	0.26	6.73	216,000	0.07	0.51
10	20,000	0.01	0.27	790,000	0.26	6.99	280,000	0.09	0.60
11	14,000	0.00	0.27	420,000	0.14	7.13	224,000	0.07	0.68
12	272,000	0.09	0.36	384,000	0.13	7.26	480,000	0.16	0.84
13	256,000	0.09	0.45	160,000	0.05	7.31	256,000	0.09	0.92
14	27,600	0.01	0.46	46,000	0.02	7.33	184,000	0.06	0.99
15	32,000	0.01	0.47	48,000	0.02	7.34	104,000	0.03	1.02
Total	1,406,600			22,027,000			3,060,000		

6.6. Segunda corrida del cultivo larvario de *Seriola rivoliana*

Los resultados muestran que la fuente con aire central presenta una supervivencia de 76 larvas hasta el día 15 posterior a la siembra, mientras que en el tanque con fuente de aire perimetral tuvo una supervivencia de 46 larvas. En la figura 41, la temperatura máxima es de 25.0ºC, se presenta en el día 1 al 5 y después tiende a disminuir con el paso de los días. La temperatura inferior es de 23.0ºC en el día 15. En cuanto al oxígeno presenta cuatro picos máximos en los días dos, cuatro, cinco y catorce con valores de 6.9 mg/l. Con un valor inferior de oxígeno de 5.3 mg/l en el día seis de la corrida. Por otro lado, la figura 42, se observa que la temperatura menor fue de 23.0ºC en el día 15 del cultivo y la temperatura máxima fue de 25.0ºC en los días del 1 al 5. En cuanto la cantidad menor de oxígeno fue de 6.1 mg/l en los días 4, 5 y 8 del cultivo, la máxima fue 7.0 mg/l en los días 2, 14 y 15 de la corrida. La alimentación de las larvas fue establecida por la composición que se muestra en la Tabla 4. Donde la concentración de alimento promedio fue de 0.10 C/mL, 0.18 N/mL y 0.35 R/mL.

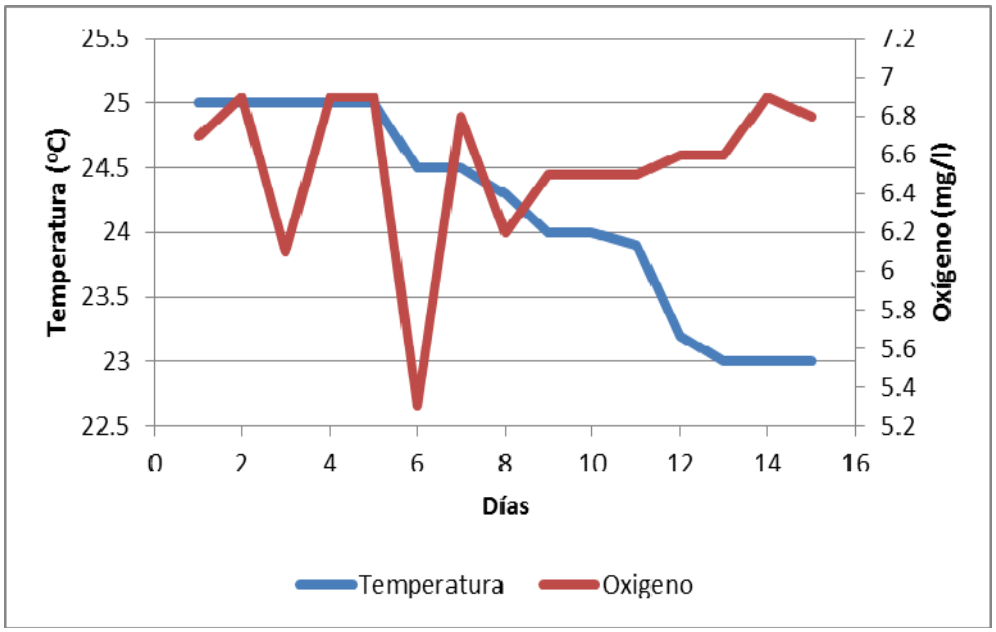

Fig.41. Temperatura y oxígeno disuelto en la segunda corrida tanque A.

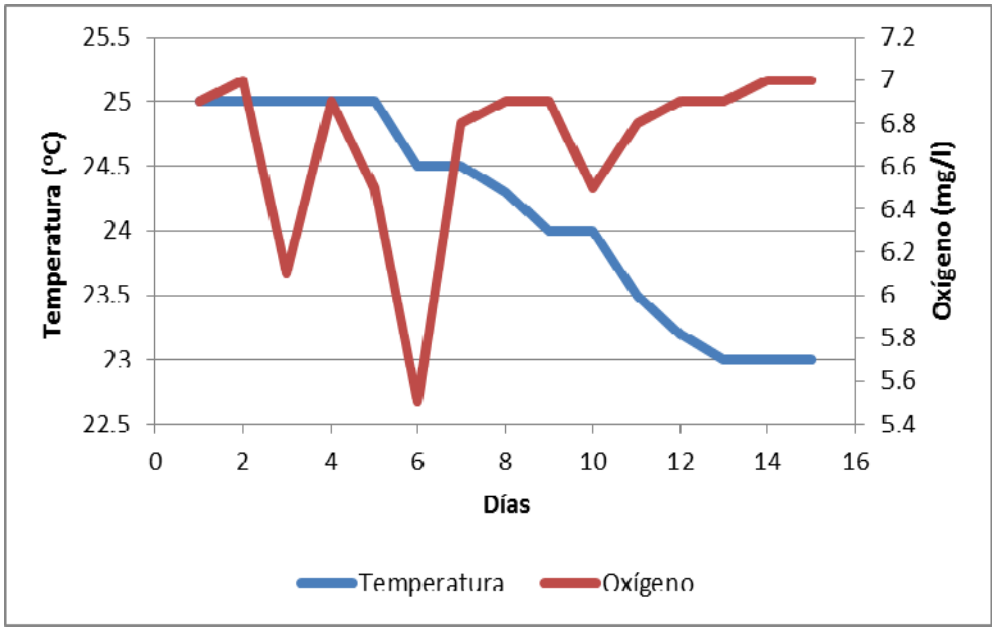

Fig.42. Temperatura y oxígeno disuelto en la segunda corrida tanque B.

Tabla 4. Calendario de actividades de alimentación de la corrida 2.

Día	Total de Copépodos Adultos	Copépodo Adulto /mL	Sumado : Adultos/mL	Total de Nauplios	Nauplios /mL	Sumado: Nauplios / mL	Total de Rotíferos	Rotíferos /mL	Sumado: Rotíferos/ mL
0	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
1	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
2	73,500	0.02	0.02	514,500	0.17	0.17	241,500	0.08	0.08
3	1,360,00	0.05	0.07	424,000	0.14	0.31	304,000	0.10	0.18
4	64,000	0.02	0.09	128,000	0.04	0.36	464,000	0.15	0.34
5	600,000	0.20	0.29	512,500	0.17	0.53	600,000	0.20	0.54
6	442,000	0.15	0.44	442,000	0.15	0.67	1,581,000	0.53	1.06
7	400,000	0.13	0.57	360,000	0.12	0.79	2,140,000	0.71	1.78
8	90,000	0.03	0.60	127,500	0.04	0.84	975,000	0.33	2.10
9	390,000	0.13	0.73	660,000	0.22	1.06	2,170,000	0.72	2.83
10	640,000	0.21	0.95	660,000	0.22	1.28	1,260,000	0.42	3.25
11	410,000	0.14	1.08	1,100,000	0.37	1.64	1,650,000	0.55	3.80
12	270,000	0.09	1.17	740,000	0.25	1.89	1,170,000	0.39	4.19
13	310,000	0.10	1.28	660,000	0.22	2.11	1,180,000	0.39	4.58
14	110,000	0.04	1.31	550,000	0.18	2.29	970,000	0.32	4.90
15	60,000	0.02	1.33	480,000	0.16	2.45	160,000	0.05	4.96
Total	3,995,500			7,358,500			14,865,500		

6.7. Tercera corrida del cultivo larvario de *Seriola rivoliana*

En esta corrida, se obtuvo una supervivencia de 130 larvas en el Tanque A con fuente de aire central hasta el día 15 posterior de la siembra. Por otro lado, el Tanque B con fuente de aire perimetral se obtuvo una supervivencia de 65 larvas. En la figura 43, la temperatura máxima 27.7ºC se presenta en el día 15. Por otra parte, la temperatura menor se presenta en dos ocasiones la primera en el día uno y seis con 25.0ºC. En cuanto al oxígeno presenta dos valores máximos en los días uno y nueve con cantidad de 5.9 mg/l. En el mismo contexto el valor mínimo de oxígeno es 5.4 mg/l en los días 2, 3 y 10 del cultivo. Con respecto a la figura 44, se observa que la temperatura menor fue de 25.0ºC en dos ocasiones en los días 1 y 6 del cultivo, la temperatura máxima fue de 27.7ºC en el día 15. En cuanto la cantidad menor de oxígeno fue de 5.7 mg/l en el día 13, la máxima fue 6.08 mg/l en el día 1 de la corrida. La alimentación de las larvas fue definida por la composición que se muestra en la Tabla 5, donde la concentración de alimento promedio fue de 0.06 C/mL, 0.28 N/mL y 0.11 R/mL.

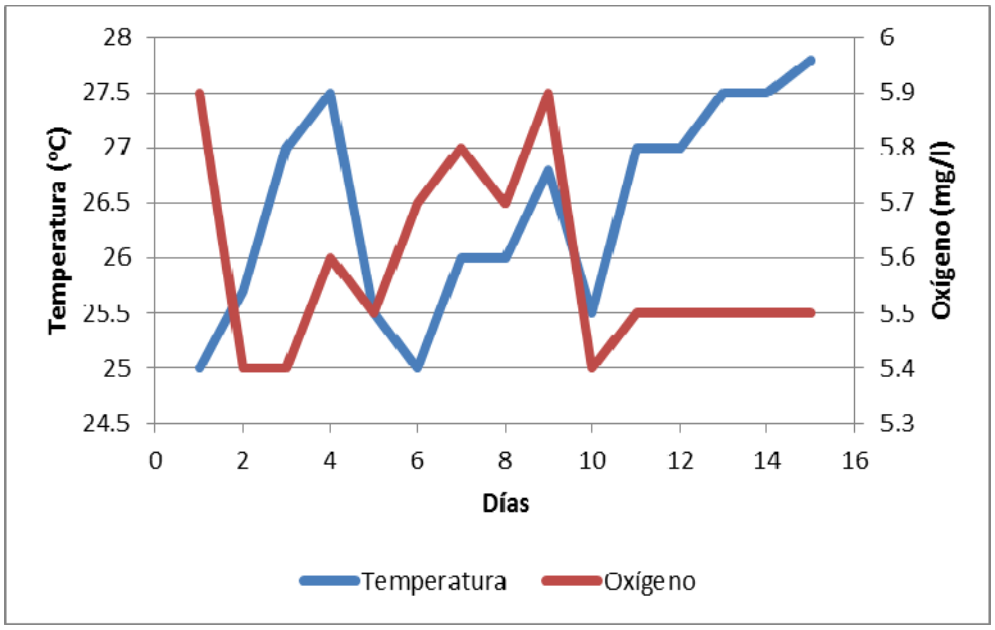

Fig.43. Temperatura y oxígeno disuelto en la tercera corrida tanque A.

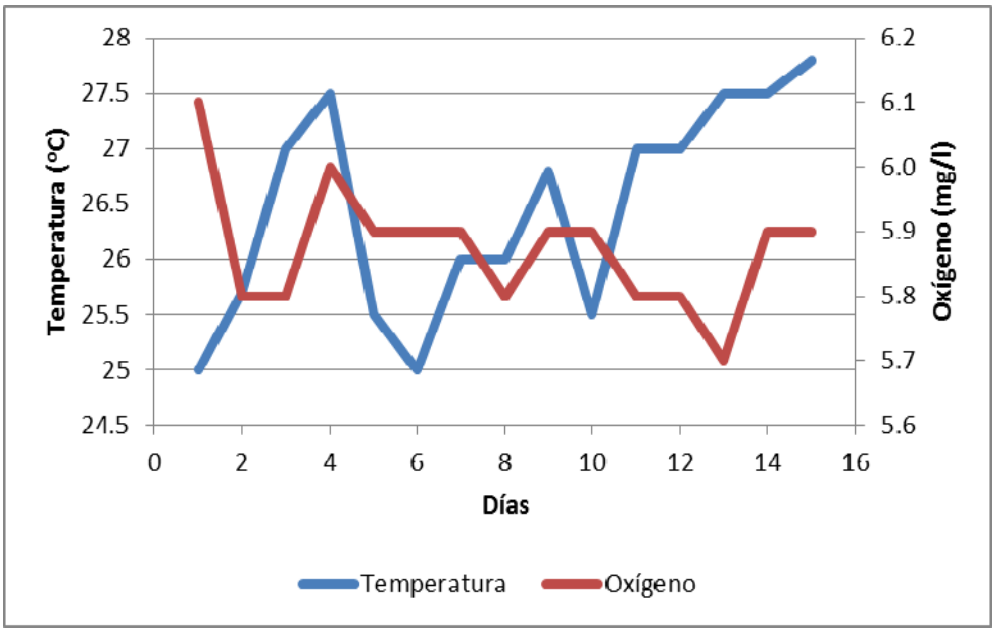

Fig.44. Temperatura y oxígeno disuelto en la tercera corrida tanque B.

Tabla 5. Calendario de actividades de alimentación de la corrida 3.

Día	Total de Copépodos Adultos	Copépodo Adulto /mL	Sumado : Adulto/ mL	Total de Nauplios	Nauplio / mL	Sumado : Nauplios/mL	Total de Rotíferos	Rotífero / mL	Sumado: Rotíferos/mL
0	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
1	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
2	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
3	110,000	0.04	0.04	595,000	0.20	0.20	240,000	0.08	0.08
4	155,000	0.05	0.09	1,160,000	0.39	0.59	285,000	0.10	0.18
5	205,000	0.07	0.16	1,605,000	0.54	1.12	330,000	0.11	0.29
6	275,000	0.09	0.25	1,560,000	0.52	1.64	80,000	0.03	0.31
7	225,000	0.08	0.32	1,390,000	0.46	2.10	65,000	0.02	0.33
8	270,000	0.09	0.41	1,020,000	0.34	2.44	75,000	0.03	0.36
9	75,000	0.03	0.44	430,000	0.14	2.59	5,000	0.00	0.36
10	335,000	0.11	0.55	1,340,000	0.45	3.03	190,000	0.06	0.42
11	305,000	0.10	0.65	925,000	0.31	3.34	255,000	0.09	0.51
12	260,000	0.09	0.74	510,000	0.17	3.51	245,000	0.08	0.59
13	55,000	0.02	0.76	180,000	0.06	3.57	140,000	0.05	0.64
14	100,000	0.03	0.79	195,000	0.07	3.64	845,000	0.28	0.92
15	40,000	0.01	0.80	140,000	0.05	3.68	1,475,000	0.49	1.41
Total	2,410,000			11,050,000			4,230,000		

VII.- DISCUSIÓN

La circulación del agua es modificada por las dimensiones geométricas del tanque. En acuicultura se trabaja con tanques cilíndricos, hidrodinámicamente ayudan a generar una circulación estable de mayor auto limpieza, con una homogeneidad en los parámetros fisicoquímicos y con una distribución de velocidad relativamente homogénea. En el caso de tanques con geometría cúbica sucede lo contrario. De acuerdo a lo reportado por Duarte *et al*. (2011), la geometría de los tanques influye en el patrón de circulación, esto fue corroborado en las simulaciones numéricas con fuente central y perimetral realizadas en este trabajo, demostrándose que la fuente central proporciona una velocidad y distribución más favorable para la supervivencia del jurel.

Las simulaciones muestran que al variarse las dimensiones del tanque en radio y altura es posible modificar los patrones de flujo según el diseño particular del tanque. Encontramos que un tanque con un radio menor que la altura, generó un patrón de corriente de mayor profundidad en la columna de agua, entonces, la magnitud de la velocidad presentó valores heterogéneos en la mayor parte del tanque. Según Tani *et al*. (1961) y Oca y Masalo (2013), el patrón de circulación en tanques cilíndricos es modificado por la proporción altura/ radio, esto fue confirmado en la simulación realizada en los tanques con fuente central y perimetral. Se observó que si se reduce el radio, la velocidad se incrementa con velocidad máximas en la superficie y en el eje central y alcanza mayor profundidad. También se observó que los tanques que tienen un radio menor que la altura, tienen una reducción de zonas con mínima velocidad.

Esto coincide con la serie de experimentos de cría de larvas de mero y del aguijón negro realizados por Ruttanapornvareesakul *et al*. (2007), quienes obtuvieron mayor supervivencia en los tanques con mayor altura que radio, debido a que se reduce el área de la superficie libre del tanque, en este caso particular la mortalidad está relacionada a la tensión superficial.

Al realizar la segunda corrida se tomó la decisión de reducir la presión en ambos tanques, ya que en la primera corrida, en el Tanque A la supervivencia fue mínima (6 ejemplares) y en el Tanque B fue nula. Esto fue producto del estrés provocado por el flujo burbujeante, lo cual es adverso en el cultivo larvario. La reducción de la presión en el Tanque A fue de 58.82% y en el Tanque B fue de 73.91%. En el mismo contexto, la experiencia que tuvimos en la segunda corrida del cultivo larvario, donde los dos tanques (A y B) presentaron mayor supervivencia con respecto a la primera corrida, al reducir la presión. Se procedió a reducir la presión manométrica del aire en la tercera corrida en el tanque con fuente de aire central a 0.05 atm y en el tanque con fuente aire perimetral a 0.10 atm.

En el cultivo de jurel con la fuente de aire central en el Tanque A se obtuvo la mayor densidad de larvas de jurel en las tres corridas. Lo que está de acuerdo con lo reportado por Sakakura *et al*. (2006), quienes realizaron varios experimentos con larvas de mero con el fin de ver el efecto del flujo de aire en la supervivencia. Utilizaron una fuente de aire esférica, fija en el fondo-centro del tanque. Trabajaron con diferentes porcentajes de aireación de los cuales, 200 mL/min fue el que obtuvo mayor supervivencia del mero. Condiciones similares fueron reportadas por Fui *et al*. (2012) y Sumida *et al*. (2013) al estudiar el mero *Epinephelus bruneus* en una serie de experimentos en tanques de cultivo, ellos evaluaron diferentes porcentajes de aireación de los cuales, 300 mL/min generó la mayor supervivencia de larvas, con lo que contrarrestaron el hundimiento de las larvas y la mortalidad por flotación.

El jurel presenta una problemática al hundirse en los tanques de cultivo en los primeros días de vida, si la circulación no es la adecuada. La fuente de aireación utilizada fue una manguera porosa en los tres cultivos realizados durante esta investigación. Una condición adversa hubiese resultado al utilizar piedras de aireación las que influyen en la mortalidad larvaria, al no tener un patrón de flujo adecuado.

El exceso de flujo de aire puede ocasionar estrés en las larvas y por lo tanto aumenta la mortalidad, como en el caso del mero *Epinephelus septemfasciatus*, en el que se encontró que después de la eclosión se produce una mortalidad masiva causada por la flotación en el tanque de cultivo según (Shiotani *et al*., 2005). Una condición similar fue reportada por Backhurst y Harker (1988) y Yamaoka *et al*. (2000) quienes encontraron que las burbujas de aire causan mortalidad masiva como consecuencia de la flotación, particularmente para la especie de mero.

En el Tanque B con fuente de aire perimetral, se simuló un patrón de flujo intenso y desordenado con velocidades máximas de 25.0 cm/s en la superficie y la parte central del tanque, lo cual podría ser conveniente para especies pelágicas que se desplazan grandes distancias, como por ejemplo el atún. Este escenario fue confirmado por Nakagawa *et al*. (2011), quienes estudiaron el flujo de aire en tanques cilíndricos con larvas de atún, en donde realizaron diversos experimentos manipulando el flujo de aire. Encontraron que el flujo de aire mayor de 900 mL/min, puede aumentar la supervivencia larvaria por satisfacer sus necesidades natatorias y de alimentación. Según Masalo y Oca (2014), quienes estudiaron la hidrodinámica en un tanque de acuicultura, encontraron que velocidades altas crean condiciones de auto limpieza y esto ayuda a desplazar los residuos biosólidos a la salida central de tanque y sugieren que la distribución de velocidad es una variable importante, debido a que influye en el bienestar de algunos organismos.

En el Tanque B con fuente de aire perimetral en la primera corrida, el flujo de agua fue intenso y desordenado generando remolinos, uno a pequeña escala en la parte superior derecha del tanque y el otro de mayor tamaño en la parte central, con menor velocidad, lo que generó la muerte de todas las larvas. Este ambiente coincide con lo reportado por Tucker (1998), quien encontró que un flujo de aire intenso puede ser la causa de mortalidad a edad temprana debido a una fuerte turbulencia, por lo que las larvas necesitarían mayor energía para desplazarse de una zona a otra y al cazar su presa, lo que genera estrés y puede causar la muerte del organismo.

VIII.- CONCLUSIONES

La plataforma COMSOL es una herramienta de gran utilidad para simular la circulación del agua en tanques de cultivo larvario, con fuente de aireación y salida en una manguera porosa en forma circular.

El flujo de aire es la variable responsable de generar la dinámica del agua en los tanques de cultivo, situación que influye en la supervivencia larvaria, dependiendo de la especie que se cultiva.

El patrón de circulación que se generó con la fuente de aire central proporcionó la mejor distribución de larvas en el tanque con la mayor supervivencia en los tres experimentos (6, 76, 130) larvas de jurel, en comparación con la fuente perimetral. El jurel necesita de una circulación suave (un flujo de tipo laminar), tal como la obtenida con el diseño del Tanque A.

En el tanque con fuente de aire perimetral se tuvo una mayor turbulencia, lo que generó un flujo inadecuado para el jurel, con un aumento de estrés en los organismos que influyó en la disminución de la supervivencia larvaria.

En esta investigación se confirmó que estas larvas pueden sobrevivir en un ambiente con un flujo aproximadamente de tipo laminar.

La colocación de la fuente de aireación determina el modelo de circulación en los tanques. Una fuente central generará una circulación del centro del tanque hacia las paredes, mientras que una fuente perimetral creará una distribución desde la pared hacia la parte central del tanque. Entretanto, las dimensiones de los tanques influyen en la distribución e intensidad de la circulación, así como en el tamaño de los remolinos y de las zonas de baja velocidad que se generan en la columna de agua.

En esta investigación se comprobó la hipótesis de trabajo planteada, puesto que se ha verificado que la circulación en los tanques de cultivo influye en la supervivencia larvaria del jurel.

IX.- RECOMENDACIONES

- Este modelo se puede aplicar a otras especies de peces, variando el flujo de aireación y los parámetros de diseño del tanque, hasta obtener la circulación óptima para la supervivencia larvaria.
- Estudiar a la especie que se va cultivar de manera exhaustiva (hábitat, alimentación, reproducción y morfología), para determinar la circulación que le permita la supervivencia y su desarrollo.
- Tomar en cuenta el factor hidrodinámico en tanques de cultivo larvario, debido a que se demostró que influye de manera significativa en la supervivencia de los organismos, la colocación de la manguera y la presión de la fuente de aireación intervienen en el patrón de circulación en el tanque.
- Revisar todos los días los parámetros fisicoquímicos del cultivo, los organismos y alimentar las larvas tres veces al día.
- Disponer de un cultivo masivo externo de microalgas para poder alimentar al zooplancton con el fin de sostener el cultivo.
- Disponer de un cultivo masivo de alimento vivo de rotíferos y copépodos antes de comenzar cualquier experimento con larvas de peces, para poder abastecer el consumo de comida a los organismos.

X.- LITERATURA CITADA

Álvarez-Lajonchére, L.S. 2005. La escala piloto: una etapa esencial que asegura el éxito de los planes comerciales. Panorama Acuícola Magazine, 13: 14-16.

Álvarez-Lajonchére, L. y O.G. Hernández-Molejón. 2001. Producción de peces estuarinos para un Centro en América Latina y el Caribe: Diseño, Operación y Tecnología. The World aquaculture society, Baton Rouge, 424 p.

Avilés-Quevedo, A. 2005. Calidad de huevo y larvas según el manejo de los reproductores de la cabrilla arenera (*Paralabrax maculatofasciatus*, Pisces: Serranidae). Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, España, 187 p.

Avilés-Quevedo, A. 1995. Biología y cultivo de la cabrilla arenera (*Paralabrax maculatofasciatus*). Centro Regional de Investigación Pesquera de La Paz. Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 85 p.

Arreguín, S. F. y E. A. Huitrón. 2011. La pesca en México: estado de la explotación y uso de los ecosistemas. Hidrobiológica, 21: 431-462.

Barahona-Fernández.1978. Effect of aeration on the survival and growth of sea bass *(Dicentrarchus labrax* l.) larvae: a preliminary study. Aquaculture, 14: 67-74.

Baldor, J. A. 2004. Geometría y trigonometría. Vigésima reimpresión. Publicaciones culturales. 405 p.

Backhurst, J.R. y J.H. Harker. 1988. Suspension of feed in aerated rearing tanks: effect of tank geometry and aerator design. Aquacult. Eng., 7: 379–395.

Bathe, K. J., H. Zhang y M. H. Wang. 1995. Finite element analysis of incompressible and compressible fluid flows with free surfaces and structural interactions. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, U.S.A. Elsevier Science, 56: 193-213.

BIOPESCA. 2008. Cultivo y engorda de jurel (*Seriola* spp.) en San Juan de la Costa, Bahía de La Paz, La Paz, B.C.S., México. 164 p.

Casas-Valdez, M. M. 2015. Laboratorios de desarrollo de tecnología. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, B.C.S., México. (http://www.cicimar.ipn.mx/OfertaEducativa/mcmrm/RecInfraestructura/Paginas/Laboratorio-de-Desarrollo-de-Tecnologias.aspx) [Consulta en línea: 9 de febrero de 2015].

Droste, D., F. Lindner, Ch. Mundt y M. Pfitzner. 2013. Numerical Computation of Two-Phase Flow in Porous Media. Universität der Bundeswehr, Munich, Bavaria, Germany. Conference COMSOL 2013 in Rotterdam.

Duarte, S., L. Reig., I. Masaló y J. Oca. 2011. Influence of tank geometry and flow pattern in fish distribution. Aquacult. Eng., 44: 48-54.

FAO. 2000. Indicadores para el desarrollo sostenible de la pesca de captura marina. Orientaciones Técnicas para la Pesca Responsable. Roma. 8, 92 p.

FAO. 2014. El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura. Parte 1. Examen Mundial de la Pesca y la Acuicultura. Roma. 77 p.

Fui, F., M. Akira, N. Yoshizumi, K. Keitaro, S. Shigeharu, S. Wataru, T. Kenji, y M. Shigeru. 2012. Flow field control via aeration adjustment for the enhancement of larval survival of the kelp grouper *Epinephelus bruneus* (Perciformes:Serranidae). Fisheries Laboratory, Kinki University, Japan. Aquacult. Res., 1–8.

Fulks, W. y L. Main. 1992. Rotifer and microalgae culture systems. Argent Press. 364 p.

García-Mendoza, J. A. 2007. Análisis de las inestabilidades del flujo bifásico en terrenos ondulados. Tesis de maestría, Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica-IPN, D.F., México. 137 p.

González, M., P. Gyssels, J. Mader, A. Borja, I. Galparsoro y A. Uriarte. 2002. Modelización numérica de la dispersión de productos de desecho vertidos desde explotaciones de acuicultura: una herramienta para la adecuada gestión medioambiental del sector. Boletín Instituto Español de Oceanografía, 18: 59-65.

Garcia-Ortega, A., D. Muy-Rangel, A. Puello-Cruz, Y. Villa-López, M. Escalantes-Rojas y K. Preciado-Iñiguez. 2010. Uso de ingrediente de origen vegetal como fuente de proteína y lípidos en alimentos balanceados para peces marinos carnívoros. Centro de Investigación en Alimento y Desarrollo (CIAD). Mazatlán, Sin., México. 321-340 p.

García-Romero, J.F. 2011. Secretario de Pesca y Acuacultura de B.C.S., Plan de desarrollo 2011-2015. Programa Sectorial de Pesca y Acuacultura. La Paz, B.C.S., MÉXICO, 32 p.

Haoulo-Mubayed, M. 2007. Estudio experimental de patrones de flujo bifásico gas-líquido en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas. Tesis de Maestría. Universidad Central de Venezuela, Venezuela, 100 p.

Houde, E.D. 1987. Fish early life dynamics and recruitment variability, 17-29. En Hoyt, R.D. (ed) American Fisheries Society Symposium, 2.

INAPESCA. 2004. Manual para el cultivo de *Seriola lalandi* (PISCES: CARANGIDAE) en Baja California Sur, México.35 p.

Instituto Nacional de Hidráulica de Chile. 2010. Modelo matemático hidrodinámico de calidad de agua. Gobierno de Chile, 16 p.

Ikenoue, H. y T. Kafuku. 1992. Modern methods of aquaculture in Japan. Elsevier, Ámsterdam, 274 p.

Klapsis, A. y R. Burley. 1984. Flow distribution studies in fish rearing tanks. Aquacult. Eng., 3:103-118.

Konietzko, P. 2012. Una compañía que utiliza tecnología avanzada y soluciones innovadoras para la acuicultura mar abierto. Earth Ocean Farms. (http://www.earthoceanfarms.com/es/equipo-eof) [Consultado: 6 de noviembre 2014].

Lalli, C.M. y T. R. Parsons, 1993. Biological oceanography: an introduction. Pergamon Press. Walton Hall, Milton Keynes; Oxford, Gran Bretaña. 301 p.

Moreno-Alva, M. 2014. Cultivo de jurel (*Seriola lalandi*) en Baja California y Baja California Sur. Una visión técnica sanitaria. 32 p. (http://www.cesabcs.org/sitio/pdf/baja_seas_mc_moreno_100215201802.pdf) [Consultado en línea: 18 de agosto de 2014].

Martínez-Brown, J.M. 2012. Hibridación como un mecanismo de cambio de trayectorias ontogénicas: comparación de ontogenia de *Paralabrax maculatofasciatus, P. nebulifer* (Serranidae) y la de sus híbridos. Tesis de Doctorado, CICIMAR-IPN, La Paz, B.C.S., México.134 p.

Masalo I. y J. Oca. 2014. Hydrodynamics in a multivortex aquaculture tank: Effect of baffles and water inlet characteristics. Aquacult. Eng., 58: 69-76.

Matus-Nivón, E., R. Ramírez-Sevilla, R. Martínez-Pecero y J. L. Ortíz-Galindo 1990. Potencial acuacultural de ocho especies de peces marinos del Pacífico Mexicano, con base en su biología temprana. 68-74 p. En: De la Lanza, G., E., Arredondo-Figueroa, J. L. (Eds.), La acuacultura en México: de los conceptos a la Producción. II. Universidad Nacional Autónoma de México.

Nakada, M. 2000. Yellowtail and related species culture. Encyclopedia of Aquaculture, 1007-1035 p.

Nakada, M. 2002. Yellowtail culture development and solutions for the future. Rev. Fish. Sci., 10: 559–575.

Nakagawa, Y., M. Kurata, Y. Sawada, W. Sakamoto y S. Miyashita. 2011. Enhancement of survival rate of Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) larvae by aeration control in rearing tank. Aquatic living Resources, Fisheries Laboratory, Kinki University, Japan, 24: 403–410.

Oca J. y I. Masalo. 2013. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. Aquacult. Eng., 52: 65-72.

Payán-Aguirre, J.C. 1994. Aspecto-biológico poblacionales de *Pseudodiaptomus euryhalinus* (Copepoda: Calanoidea) para su utilización en acuacultura. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S. México. 63 p.

Reddy, J.N. 2005. An introduction to the finite element method. Third Ed., McGraw-Hill. Department of Mechanical Engineering. University College Station, Texas. 419 p.

Rodríguez de la Cruz, M.C., M.R. Palacios-Fest., R, Cruz – Santabalbina y C.I. Díaz-Pulido.1994. Atlas pesquero de México. SEPESCA.INP (ed). México. 234 p.

Roo, J., H. Fernández-Palacios, C.M. Hernández- Cruz, A. Mesa-Rodríguez, D. Schuchardt y M. Izquierdo.2014. First results of spawning and larval rearing of longfin yellowtail *Seriola rivoliana* as a fast-growing candidate for European marine finfish aquaculture diversification. Aquacult. Res., 45: 689–700.

Rueda-Jasso, R.A. 1993 Efecto del alimento en el cultivo del rotífero *Brachionus plicatilis* (Muller: 1876) en un sistema semicontinuo, Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN, La Paz, B. C. S., México. 85 p.

Ruttanapornvareesakul, Y., Y. Sakakura y A. Hagiwara. 2007. Effect of tank propor-tions on survival of seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* (Thunberg) and devil stinger *Inimicus japonicus* (Cuvier) larvae. Aquacult. Res., 38:193–200.

Svante, L. y S. Farhad. 1998. Lanzaron la primera versión del producto de COMSOL Multiphysics. (http://www.comsol.com/comsol-multiphysics). [Consultado en línea: 17 de febrero de 2014].

Salvador-Meza. 2006. Cultiva CICESE lenguados, Ensenada, México. Panorama Acuícola Magazine. (http://www.panoramaacuicola.com/noticias/2006/05/22/cultiva_cicese_lenguados_ensenada_mexico.html). [Consultado en línea: 12 de septiembre de 2014].

Salvador-Meza. 2009. El cultivo de jurel reporta crecimiento en baja california. Panorama Acuícola Magazine. (http://www.panoramaacuicola.com/noticias/2009/07/06/el_cultivo_de_jurel_reporta_crecimiento_en_baja_california.html). [Consultado en línea: 12 de septiembre de 2014].

Salvador-Meza. 2010. Impulsa SAGARPA proyecto de maricultura de peces en Sonora. Panorama Acuícola Magazine. (http://www.panoramaacuicola.com/noticias/2010/05/13/impulsa_sagarhpa_proyecto_de_maricultura_de_peces_en_sonora_.html). [Consultado en línea: 12 de septiembre de 2014].

SAGARPA (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2006. Carta Nacional de Pesca. Diario Oficial (México).Viernes 25 de agosto de 2006. Segunda Sección. 1-128 p.

SAGARPA (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación).2010a. Carta Nacional de Pesca. Diario Oficial (México).Viernes 2 de diciembre de 2010. Segunda sección. 1-112 p.

SAGARPA. (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación).2010b. Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca. 7-75 p.

SAGARPA. (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación).2012.Carta Nacional Acuícola. Diario Oficial (México).Miércoles 6 de junio de 2012.Segunda sección. 33-106 p.

SEMARNAT. (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales).2010. Especie en Peligro de Extensión por la NOM-SEMARNAT-059.2001. Apéndice 1 de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre. (http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/vidasilvestre/Documents/Proyecto_Cultivo_Totoaba.pdf).[Consultado en línea: 20 de abril de 2015].

Sorgeloos, P. y J. Sweetman. 1993. Acuaculture success stories. World Aquaculture Society, 24: 4-4.

Sosa-Solis, S.A. 2010. Aplicación de modelos mecanísticos para la optimización del diámetro de tuberías flexibles como sartas de velocidad. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México, 166 p.

Shiotani, S., A. Hagiwara, Y. Sakakura y H. Chuda. 2005. Estimation of flow in a rearing tank of marine fish larvae by simplified numerical computation a case of two dimensional flow. Aquacult. Eng., 32: 465–481.

Sumida, T., H. Kawahara, S. Shiotani, Y. Sakakura y A. Hagiwara. 2013. Observations of flow patterns in a model of a marine fish larvae rearing tank. Aquacult. Eng., 57: 24– 31.

Sakakura, Y., S. Shiotani, H. Chuda y A. Hagiwara. 2006. Improvement of the survivalin the seven-band grouper *Epinephelus septemfasciatus* larvae by optimizing aeration and water inlet in the mass-scale rearing tank. Fish. Sci., 72: 939–947.

Tani, I., M. Iuchi y H. Komoda, 1961. Experimental investigation of flow separation associated with a step or a groove. Aeronautical Research Institute, University of Tokyo, 119–136 p.

Tucker Jr, J.W. 1998. The rearing environment. In: Tucker Jr., J.W. (Ed.), Marine Fish Culture. Kluwer Academic Publishers, London. 148 p.

Turner M., R.W. Clough, H.C. Martin y L. J. Topp. 1956. Stiffness and deflection analysis of complex structuures. J. Aeronautical Sci., 23 (9): 805-823.

Vermillon R. 1975. A look at some rising bubbles. Am. J. Phys., 43 (2):177-179.

Villarreal, H. y L. Mercier. 2015. BioHelis Parque de Innovación Tecnológica de CIBNOR. (http://www.cibnor.mx/es/vinculacion-y-servicios/parqueinnovatec/empresas). [Consultado en línea: 7 de julio de 2015].

Yamaoka, K., T. Nanbu, M. Miyagawa, T. Issiki y A. Kusaka. 2000. Water surface tension-related deaths in pre larval red seven band grouper. Aquaculture, 189:165–176.

Yunus A. y A. Michael. 2009. Termodinámica. Sexta edición. Mc Graw Hill. 993 p.

Yunus, A. y M. John. 2012. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones. Segunda edición. Mc Graw Hill. 978 p.

XI.- ANEXO

11.1. Fuerzas que actúan en una burbuja de aire

Para realizar este tipo de estudio del modelo físico de flujo burbujeante, en el que participan dos fluidos, en este caso se trata de aire y agua. Primero iniciaremos analizando las fuerzas que participan en la velocidad de ascenso de una burbuja de aire. La fuerza de empuje (flotabilidad o buoyancidad) y la fuerza de arrastre en la columna de agua (Vermillon, 1975).

Estas fuerzas dependen de:

a) Las propiedades del fluido

b) La gravedad

c) El diámetro de burbuja.

d) Las interacciones entre las fuerzas generan la: tensión superficial, viscosidad dinámica, inercia y fuerza de empuja (flotabilidad), en conjunto producen efectos tales como la forma de la burbuja y su trayectoria.

Queremos obtener la velocidad de ascenso de una burbuja de aire en un líquido estático. Con esto en mente, primero queremos determinar los grupos adimensionales que influyen en la velocidad de la burbuja, para ello realizamos un análisis dimensional.

Físicamente la velocidad de la burbuja depende de los siguientes parámetros: Aceleración de gravedad (g), diámetro de burbuja (db), densidad efectiva ($\Delta\rho = \rho_l - \rho_g$), densidad en la fase liquida (ρ_l), (viscosidad dinámica (μl) y la tensión superficial ($\sigma_{l/g}$) (Vermillon, 1975).

Este es un caso particular en donde se simula, el movimiento ascendente de una pequeña burbuja en la parte central de la columna del fluido viscoso.

Se observa que la burbuja, -tras cierto tiempo- ascendiendo en dirección de la superficie con velocidad constante, además, la rapidez se incrementa con el tamaño de la burbuja.

Se asume que el recipiente es tubular y está hecho de vidrio y que está completamente lleno del fluido viscoso (por ejemplo, aceite) (Vermillon, 1975).

La parte de arriba del tubo, se conecta a una bomba de vacío, que disminuye la presión a un valor cercano a cero. La presión en el interior del fluido a una profundidad X es debida solamente a la presión hidrostática de la columna de fluido (Fig. 45) (Vermillon, 1975).

Ejemplo: El movimiento de una burbuja de aire en un fluido de aceite

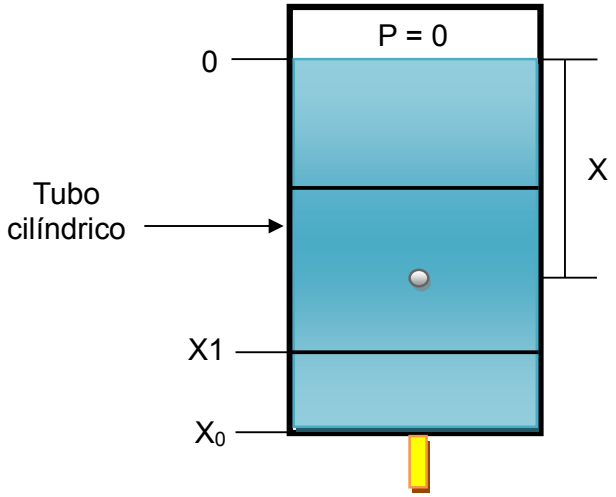

Fig.45. Movimiento ascendente de una burbuja de aire en un fluido viscoso, P = 0 (Presión de vacío), X1 = Profundidad en el punto X1 y X0 = Profundidad cero (Vermillon, 1975).

Las burbujas de aire se generan por medio de la inyección de la fase gaseosa en la parte inferior del tubo. Una vez que la burbuja alcanza su velocidad terminal continua su movimiento siguiendo una trayectoria rectilínea ascendente y su radio está entre 0.1 y 0.3 cm. Por otra parte, las burbujas de mayor diámetro empiezan a fluctuar a medida que van subiendo en la columna del fluido, con ello a medida que se acerca a la superficie del líquido viscoso van perdiendo la forma geométrica esférica original (Vermillon, 1975).

Suposiciones:

- La presión dentro de la burbuja de aire es igual a la presión debida a la columna de fluido de altura X (Fig. 46).
- La burbuja se expande a medida que asciende.
- El aire dentro de la burbuja es un gas ideal.
- Le temperatura es constante.

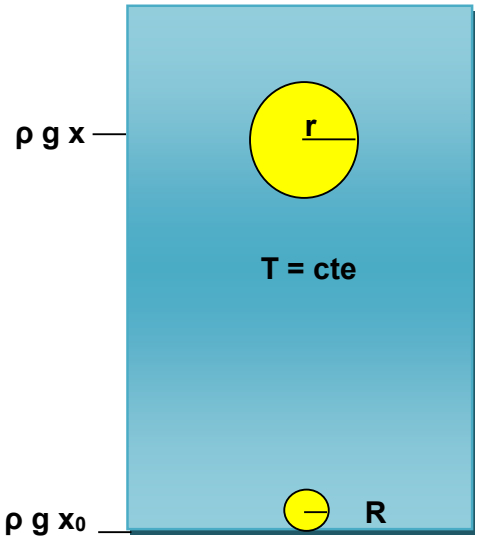

Fig.46. Burbuja de aire ascendiendo en una columna de aceite. R y r radios de la burbujas según la posición (Vermillon, 1975).

El radio de la burbuja aumenta con la altura, el radio de la burbuja en la posición x (r), radio de la burbuja en la posición xo (R), ρgx =Presión hidrostática en x y ρgxo =Presión hidrostática en xo (Vermillon, 1975).

Fuerzas que actúan en una burbuja de aire:
Fa = Fuerza de arrastre o Fuerza de rozamiento
E = Fuerza de empuje

Consideramos que la velocidad de ascenso de la burbuja es constante y depende de la viscosidad del fluido, el aceite es ideal para este propósito ya que hace que el movimiento sea lento. En la burbuja participan:

La fuerza de arrastre (Fa), que actúa en dirección contraria a la velocidad de ascenso de la burbuja (Fig. 47) (Vermillon, 1975).

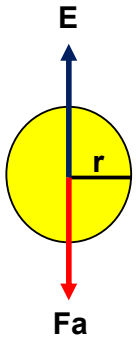

Fig.47. Fuerzas que gobiernan el movimiento ascendente de una burbuja de aire, Fa = Fuerza de arrastre, E = Fuerza empuje y r = radio de la burbuja.

La fuerza de arrastre o fuerza de rozamiento se expresa como $-Fa = 6\pi r\eta v$, donde:

r = Radio de la burbuja

η = Viscosidad del fluido

v =Velocidad de la burbuja

π= Constante pi

La otra fuerza que actúa sobre la burbuja es la fuerza de empuje (E) (principio de Arquímedes).

Fe = Fuerza de empuje

ρ = Densidad del fluido

g = Aceleración de la gravedad

π = Constante pi

r = Radio de la burbuja

Formula

$$E = \rho g \frac{4}{3}\pi r^3$$

Si se considera que la masa *(*m*)* y el peso (mg*)* de la burbuja de aire son despreciables y expresamos la velocidad de la burbuja como (dx/dt), según la segunda ley de Newton, podemos escribir:

$$E - F = ma \approx 0$$

$$\rho g \frac{4}{3}\pi r^3 + 6\pi r\eta \frac{dx}{dt} = 0$$

La resultante de las fuerzas que actúan sobre dicho cuerpo es cero cuando se alcanza la velocidad terminal, en estas condiciones la burbuja se encuentra en estado de equilibrio, tanto la fuerza de empuje y la fuerza de rozamiento son iguales y opuestas (Vermillon, 1975).

Como el radio *r* de la burbuja es función de la profundidad *x*, la ecuación del movimiento se escribe en forma diferencial.

$$\frac{dx}{dt} + \frac{2}{9}\frac{\rho g}{\eta}\left(\frac{x_0}{x}\right)^{\frac{2}{3}} R^2 = 0$$

Separando variables e integrando, con la condición de que se empieza a contar el tiempo t = 0 en el instante en el que la burbuja pasa por la marca situada a una profundidad x_1 en la figura 45.

$$\int_{x1}^{x} x^{\frac{2}{3}}\,dx = -\frac{2\rho g x_0^{\frac{2}{3}} R^2}{9\eta}\int_{0}^{t} dt$$

$$x^{\frac{5}{3}} = x_1^{\frac{5}{3}} - \frac{10}{27}\frac{\rho g}{\eta} x_0^{\frac{2}{3}} R^2 t$$

Ejemplo 1:

- Densidad ρ = 870 kg/m^3
- Viscosidad η = 1.18 Pa * s
- Supongamos que el radio de la burbuja en la posición x_0=0.25 m es R = 0.0015 m.

Calculamos el tiempo t que tarda la burbuja en desplazarse desde la posición x_1 = 0.2 hasta la posición x = 0.05 m.

Formula

$$x^{\frac{5}{3}} = x_1^{\frac{5}{3}} - \frac{10}{27}\frac{\rho g}{\eta} x_0^{\frac{2}{3}} R^2 t$$

Sustitución:

$$(0.05\ \mathrm{m})^{\frac{5}{3}} = (0.2\ \mathrm{m})^{\frac{5}{3}} - \left(\frac{10}{27}\right)\frac{\left(\left(870\,\frac{kg}{m^3}\right)\left(9.8\,\frac{kg}{m\ s_2}\right)\right)}{(1.18\ \mathrm{Pa*s})}(0.25\ \mathrm{m})^{\frac{2}{3}}(0.0015\ \mathrm{m})^2(\mathrm{t})$$

Resultado

$$\mathrm{t} = 25.8\ \mathrm{s}$$

11.2. Flujo burbujeante

En un flujo bifásico, las dos fases (liquida y gaseosa) están mutuamente acopladas, espacial y temporalmente. Este es un fenómeno común en muchos procesos industriales, tales como: la producción de alimento, la cavitación, en el flujo de crudo en la industria petrolera o durante la producción, transporte de aceite y gas en conductos horizontales, inclinados y/o verticales, también, en la industria del papel, plantas nucleares, intercambiadores de calor y sistemas de refrigeración (Sosa-Solis, 2010). El flujo bifásico ha sido un tema analizado extensamente, pero debido a la complejidad del fenómeno no se ha podido tener un modelo analítico completo. Lo cual es un obstáculo que puede salvarse empleando los recursos computacionales.

En el flujo bifásico es necesario especificar el campo de presión inicialmente en el ducto. Esto produce un campo de velocidades que depende de los siguientes factores:

- La geometría del conducto.
- Las propiedades físicas de las dos fases.
- Las condiciones iniciales y de frontera prevalecientes del sistema.
- La ubicación espacial del conducto.
- El empleo del método adecuado para determinar la presión a la largo del conducto.

En el flujo bifásico se toman en cuenta las variables que actúan en el problema físico, como son: la velocidad, presión, temperatura, gasto volumétrico, el diámetro del tubo y de la burbuja. También afecta el grado de inclinación del conducto o tuberías (Sosa-Solis, 2010). En la dinámica de flujos en dos fases, influye de manera directa las propiedades físicas de cada fase involucrada como la tensión superficial, viscosidad dinámica y la densidad. El gas y el líquido pueden existir como una mezcla homogénea o fluir conjuntamente en fases separadas, produciendo patrones de flujo. La distribución de una fase con respecto a la otra es muy importante para poder hacer una distinción entre los diversos patrones de flujo. Es necesario tener un modelo que relacione la velocidad con las propiedades físicas de cada fluido. De esta manera es posible conseguir los patrones de flujo del sistema. Una vez obtenido esto es posible analizar las soluciones más favorables (Haoulo-Mubayed, 2007).

11.3. Patrón de flujo burbujeante en tubería vertical

Se presenta cuando la tubería se encuentra llena de líquido (agua, en nuestro caso) y el gas (aire) se encuentra distribuido en pequeñas burbujas que se mueven a velocidades diferentes. La pared de la tubería esta siempre en contacto con la fase líquida.

Este acoplamiento entre las dos fases del flujo se genera por la características físicas que presenta ambas, ya que la burbuja de aire es mucho menos densa en comparación con la fase liquida, por tal motivo y debido a su flotabilidad, tiende a moverse en forma vertical.

En la mayoría de los casos la fase líquida tiene mayor fracción de volumen que la fase gaseosa, en estas condiciones la dinámica del sistema líquido-gas es dominada por el acoplamiento del ascenso del gas al desplazar al líquido y la densidad del sistema es prácticamente la misma que la del líquido. Por consiguiente, esperamos observar patrones del movimiento del líquido como efecto de este acoplamiento.

La burbuja lo que hace es desplazar el volumen ocupado de la columna de agua mediante la interconexión de las fases. Debido a que experimenta una fuerza de arrastre al ascender en la columna de agua y sin dejar de un lado a la fuerza de tensión superficial de la burbuja, lo cual produce una corriente debido a las fuerzas que actúan y la presión manométrica que se aplica a la fase gaseosa que debe ser mayor a la presión hidrostática, para poder desarrollar un patrón de flujo burbujeante (Haoulo-Mubayed, 2007).

Ejemplo 2:

El programa interactivo no nos proporciona el valor del radio inicial R de la burbuja a la profundidad x_0=0.25 cm, pero podemos medir mediante un cronómetro el tiempo t que tarda la burbuja en desplazarse entre las posiciones x_1=0.2 y x=0.05 m, a partir de esta ecuación podemos despejar el radio R.

Datos:

- Densidad ρ = 870 kg/m^3
- Viscosidad η = 1.18 Pa * s

Se pone en marcha el cronómetro cuando la burbuja pasa por la posición x_1=0.2, se para el cronometro cuando pasa por la posición x = 0.05 m.

El tiempo t medido es de 14.60 s.

Calcular el radio inicial R de la burbuja.

Formula

$$x^{\frac{5}{3}} = x_1^{\frac{5}{3}} - \frac{10}{27}\frac{\rho g}{\eta} x_0^{\frac{2}{3}} R^2 t$$

Sustitución:

$$(0.05\ \mathrm{m})^{\frac{5}{3}} = (0.2\ \mathrm{m})^{\frac{5}{3}} - (\frac{10}{27})\frac{((870\ \frac{kg}{m^3})(9.8\frac{kg}{m\ s_2}))}{(1.18\ \mathrm{Pa*s})}(0.25\ \mathrm{m})^{\frac{2}{3}}(\mathrm{R})^2(14.60\ \mathrm{s})$$

Resultado

$\mathrm{R} = 0.2\ \mathrm{cm}$

11.4 Evaluación de la supervivencia en un cultivo de larvas en un tanque con fuente de aire central.

Las actividades de cultivo se realizaron de la siguiente manera bajo condiciones controladas: con fotoperiodo de 24 horas de luz, con la utilización de dos lámparas de 800 lux, una salinidad de 37.0 ups y el recambio de agua marina de 220.0% por día. La temperatura y el oxígeno se registraron diario.

En cuanto a la cantidad de desove que se utilizó en la cuarta corrida fue de 400 mL de huevos, cada mililitro contiene 800 huevos. El número de huevos que sembramos en el tanque, fue de 320, 000 huevos. El porcentaje de eclosión se determinó con base a los huevos no eclosionas, con un 80.0% que nos dio un total de 256,000 larvas. Esta evaluación se realizó al día dos de la siembra, posteriormente se trabajó con un segundo tanque con el fin de transportar las larvas de un recipiente a otro, por medio de una manguera de 50.8 mm de diámetro y 4.0 m de longitud para evitar la manipulación de las larvas y eliminar el estrés ocasionado por este procedimiento. Las larvas fueron alimentadas con rotíferos (*Brachionus plicatilis)* enriquecidos con ácido decosahexaenoico (DHA) y ácido eicosapentaenoico (EPA), copépodos *Pseudodiaptomus euryhalinus* dos veces al día, con una composición que se muestra en la Tabla A. Se manejó un presión manométrica de 0.05 atm en el tanque con fuente de aire central. La diferencia de este cultivo es que se le agrego al tanque la microalga con el propósito de mantener la población de zooplancton, con un promedio de 20 litros de microalga cada día (*Isochrysis galbana y Chaetoceros calcitrans)* dentro del tanque de cultivo, adicionalmente se colocaron dos lámparas por encima de él.

Tabla 6. Calendario de actividades de alimentación.

Día	Copépodo Adulto /mL	Rotífero/ mL	Microalga (*Isochrysis G.*)	Microalga (*Cheatoceros C.*)	Alimento total por día
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0.05	0	10,000 mL	5,000 mL	135,000
4	0.07	1	10,000 mL	10,000 mL	2,700,000
5	0.28	9	20,000 mL	20,000 mL	24,300,000
6	0.1	16	20,000 mL	20,000 mL	43,200,000
7	0.23	15	20,000 mL	20,000 mL	40,500,000
8	0.49	17	20,000 mL	20,000 mL	45,900,000
9	1.08	20	20,000 mL	20,000 mL	54,000,001
10	1.49	17	20,000 mL	20,000 mL	45,900,001
11	0.71	16	20,000 mL	20,000 mL	43,200,001
12	0.19	23	20,000 mL	20,000 mL	62,100,000
13	0.17	23	20,000 mL	20,000 mL	62,100,000
14	0.57	35	20,000 mL	20,000 mL	94,500,001
15	0.22	17	20,000 mL	20,000 mL	45,900,000

Con base en los resultados de supervivencia en el Tanque A, que fueron mayores en las tres corridas. Se observó un patrón de circulación más homogéneo, de mayor estabilidad y con una distribución de organismos más homogénea, lo cual creemos que representa un flujo de corriente favorable para las características hidrodinámica de la especie *Seriola rivoliana* y acorde a las necesidades de las larvas que se presenta en ese período de vida.

Los resultados de las tres corridas favorecen los cultivos empleando el tanque A. Por lo tanto, se procedió a desarrollar un cuarto cultivo larvario de jurel de mayor densidad de organismos, solamente trabajando con el tanque con fuente de aire central y únicamente evaluar la supervivencia larvaria durante un período de 15 días. La evaluación de la supervivencia larvaria se realizó hasta el día quinceavo, presentó un valor de 7200 lavas de jurel *Seriola rivoliana* en el tanque (Fig. 48). Los parámetros fisicoquímicos que fueron anotados durante el proceso del cultivo en la figura 49, la temperatura (27.0ºC) permanece constante del día 1-12 del cultivo, pero se presenta una temperatura máxima 28.0ºC el día 15. En cuanto al oxígeno se registraron tres veces la misma concentración de 5.3 mg/l en los días 1,3 y 4 de la corrida larvaria con una oxigenación máxima de 5.8 mg/l.

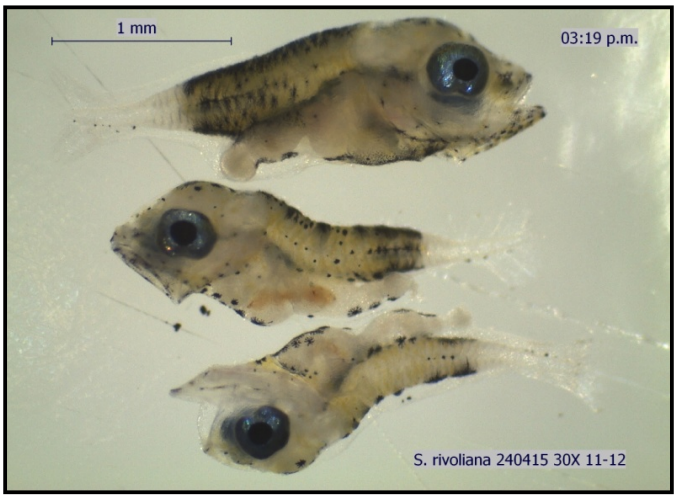

Fig. 48. *Fotografía del octavo día del cultivo larvario del jurel Seriola rivoliana.*

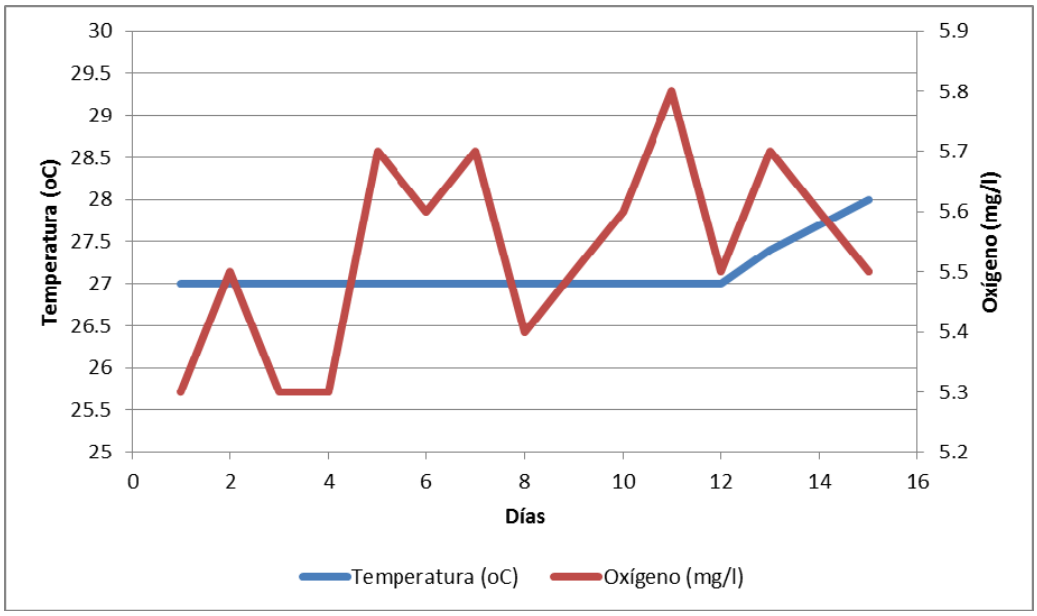

Fig.49. La relación entre la temperatura y oxígeno del tanque con fuente de aire central.

11.5. Cultivo masivo de rotíferos

Es oportuno mencionar que se llevó a cabo un cultivo masivo de zooplancton (rotífero *Brachionus plicatilis)* en el interior del CIBNOR en el lugar denominado patio de cultivo, donde, se utilizó un tanque con un volumen de trabajo de 18 000 litros, el cual se le adicionaban microalgas en la primera semana del cultivo cada tercer día, *Tetraselmis suecica* y *Isochrysis galbana*, adicionándoles sus respectivos nutrientes (fosfato y urea) para proliferar el cultivo de microalgas y poder así tener alimento suficiente para los rotíferos. Se manejó un recambio de flujo de agua de 14 % durante 7 horas diarias.

11.6. Cultivo masivo de copépodos

Se realizó el cultivo masivo de copépodos (*Pseudodiaptomus euryhalinus*) en el patio de cultivo en un tanque cilíndrico de fibra de vidrio de color negro con fondo plano, con un volumen de 18 000 litros, el cual se alimentaba de microalga *(Tetraselmis suecica y Isochrysis galbana*) en la primera semana de cultivo (Fig. 50). Además, se le agregaba nutrientes (fosfato y urea) para aumentar la producción de microalgas. Manteniendo un flujo de recambio de agua de 15 % durante 6 horas diarias. El cultivo de copépodos (*Pseudodiaptomus euryhalinus*) se vino abajo en el tanque masivo de (18.0 m^3), con respecto a los rotíferos su densidad era muy baja en ese tiempo, por lo cual, no se podía realizar el experimento. Por lo tanto, se retrasó tres semanas la tercera corrida del cultivo. Así mismo, se volvió a levantar el cultivo de microalgas (*Isochrysis galbana y Tetraselmis suecica*) con una cantidad de 80 litros mezcladas en el tanque masivo, que al inicio se empezó a trabajar con un volumen de agua de 8 000 litros que posteriormente se sembró el copépodo para aumentar la población.

En los siguientes días el cultivo de zooplancton se dejó con un flujo de entrada de agua de 14% y constante, para que aportara los nutrientes necesarios al cultivo y a la vez, ir llenando el tanque poco a poco. Con el fin de ayudar al crecimiento y reproducción de copépodo para aumentar la población y rotíferos con el propósito de alimentar y nutrir de mejor manera a las larvas.

a)

b)

Fig. 50. Fotografías (a y b) del tanque de cultivo masivo de copépodos en el patio de cultivo en el CIBNOR.