

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y GEOGRAFÍA
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

Desempeño hidrodinámico de un sistema de cultivo suspendido de
Ostión del norte mediante simulación dinámica

Proyecto para optar al título de Ingeniero Acuicultor

por

Allan Solano Gómez Aravena

Valparaíso

2015

Comité de titulación:

Profesor Guía : Dr. Carlos Hurtado Ferreira

Profesor : Dr. Dante Queirolo Palma

Profesor : Ing. Tatiana Zúñiga Vicencio

AUTORICACION DE USO

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

Allan Solano Gómez Aravena

DEDICATORIA

A mi mujer y a mis padres.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres que me entregaron su amor incondicionalmente, me entregaron valores, educación y la oportunidad de ser un profesional.

Agradezco infinitamente a mi amor, Andrea, por su apoyo incondicional sobre todo en este largo proceso, por creer en mí y por demostrarme su amor cada día.

Gracias a todos mis profesores y amigos que fueron parte de la construcción de esta investigación. Gracias a Jesús López, Erick Gaete, Dante Queirolo, Felipe Hurtado, Tatiana Zuñiga por ayudarme cada vez que lo necesité.

CONTENIDO

Comité de titulación	ii
Autorización de uso	iii
Dedicado a	iv
Agradecimientos	v
Contenido	vi
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	ix
Índice de anexos	ix
Resumen	x
Abstract.....	xii
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. Antecedentes.....	4
3.1. Aspectos generales de los sistemas long-line.....	4
3.2. Componentes del long-line	5
3.3. Fuerzas hidrodinámicas.....	10
3.3.1. Corrientes.....	10
3.4. Método de elementos finitos	16
3.4.1. AquaSim	17
3.4.2. Sistema de formulación del análisis de los elementos	18
3.4.3. Descripción ambiental	19
4. Metodología.....	20
4.1. Sistemas de cultivo y condiciones ambientales.....	20
4.1.1. Construcción de los modelos.....	20
4.1.2. Simulación dinámica	24
4.1.2.1. Pre-proceso.....	24

4.1.2.2.	Parametrización.....	24
4.1.2.3.	Proceso	25
4.1.2.4.	Post-proceso	25
4.2.	Determinación del desempeño funcional y resistivo.....	25
4.2.1.	Ángulo de inclinación	25
4.2.2.	Tensión Máxima	26
4.2.3.	Área Sólida, área total y factor de solidez	27
4.3.	Análisis de la respuesta hidrodinámica de los sistemas de cultivo, bajo los distintos escenarios ambientales.....	31
5.	Resultados.....	33
5.1.	Simulación dinámica de long-line que emplea linternas.....	33
5.1.1.	Ángulo de inclinación	33
5.1.2.	Tensión.....	34
5.1.3.	Área sólida, área total y factor de solidez	36
5.2.	Simulación dinámica de long-line que emplea cuelga de pearl-net.	37
5.2.1.	Ángulo de inclinación	37
5.2.2.	Tensión.....	38
5.2.3.	Área sólida, área total y factor de solidez	40
5.3.	Análisis comparativo de los sistemas de cultivo	41
6.	Discusión	45
7.	Conclusiones.....	52
8.	Bibliografía.....	54
9.	ANEXOS	58

Índice de figuras

Figura 1: Sistema Long-line y sus componentes.....	6
Figura 2: Cuelga de pearl-net. (Fuente: Hardy, 1991, citado por Barrientos, 2000).....	8
Figura 3: Cuelga de linterna. (Fuente: Hardy, 1991, citado por Barrientos, 2000).....	9
Figura 4: Sistema de cultivo modelado con cuelga de pearl-net.	21
Figura 5: Sistema de cultivo modelado con linternas.....	22
Figura 6: Determinación de ángulo de inclinación en unidades de cultivo.....	26
Figura 7: Cambio de altura de la unidad de cultivo linterna cuando interactúa con la corriente.....	29
Figura 8: Cambio de altura de la unidad de cultivo pearl-net cuando interactúa con la corriente.....	30
Figura 10: Tensiones alcanzadas en fondeos de sistema con linterna a distintas velocidades de corriente y dos direcciones de ataque de la corriente (paralela y perpendicular a la línea madre).....	35
Figura 11: Área total, factor de solidez, área sólida y cambio relativo del área sólida de la primera linterna de la línea madre para velocidades de corriente de 0,2, 0,5 y 1 ms ⁻¹	37
Figura 13: Tensión alcanzada en fondeo de sistema con cuelga de pearl-net a distintas velocidades de corriente y dos ángulos de ataque de la corriente (paralela y perpendicular a la línea madre).	39
Figura 14: Área total, factor de solidez, área sólida y cambio relativo del área sólida de la primera cuelga con pearl-net de la línea madre para velocidades de corriente de 0,2, 0,5 y 1 ms ⁻¹	40
Figura 15: Comparación de desempeño de sistemas de cultivo con linternas y cuelga de pearl-net expuestos a distintas corrientes paralelas a la línea madre y sin corriente.....	41
Figura 16: Comparación de desempeño de sistemas de cultivo con linternas y cuelga de pearl-net expuestos a distintas corrientes perpendiculares a la línea madre y sin corriente.....	42

Índice de tablas

Tabla 1: Comparación de las tensiones en sistema con linterna respecto a sistema con cuelga de pearl-net.....	43
Tabla 2: resumen de resultados de área sólida, ángulo de inclinación de primera unidad de cultivo, y tensión en fondeo, para los sistemas con linternas y cuelgas con pearl-net.	44

Índice de anexos

ANEXO 1: Ángulo de inclinación de linternas a distintas velocidades de corriente y ángulo de incidencia de la corriente.	58
ANEXO 2: Tensión máxima registrada en fondeo de sistemas de cultivo que emplea linterna.	58
ANEXO 4: Ángulo de inclinación de cuelga de pearl-net a distintas velocidades de corriente y ángulo de incidencia de la corriente.	59
ANEXO 5: Tensión máxima en línea madre y fondeo en sistemas de cultivo con cuelga de pearl-net.	59
ANEXO 6: Área total, factor de solidez, área sólida y cambio relativo del área sólida de la primera cuelga de pearl-net de la línea madre para velocidades de corriente de 0,2, 0,5 y 1 ms ⁻¹	59
ANEXO 7: Cambio relativo de la tensión de los fondeos de los sistemas con el cambio de dirección de la corriente de paralela a perpendicular.	60

RESUMEN

Se evaluó el desempeño hidrodinámico en relación a la resistencia hidrodinámica y la inclinación de las unidades de cultivo sobre dos sistemas de cultivo de Ostión del norte, un sistema que emplea linterna con unidad de cultivo y otro sistema que emplea cuelga de pearl-net. Para ello se analizó la respuesta de los sistemas de cultivo al estar expuestos a tres velocidades de corriente, 0,2, 0,5 y 1 ms⁻¹, y a dos direcciones de incidencia de la corriente, paralela y perpendicular a la línea madre, comparando las respuestas de ambos sistemas.

Los resultados de la inclinación de las unidades de cultivo, muestran que, cuando la dirección de la corriente es paralela al sistema, en ambos sistemas se genera el efecto sombra en las unidades de cultivo a lo largo de la línea madre, inclinándose en mayor medida las que primero entran en contacto con la corriente. Cuando la corriente es perpendicular a la línea madre, en ambos sistemas, las unidades de cultivo se inclinan de igual manera en toda la línea madre. Sin embargo, para ambos escenarios, se presentó una mayor inclinación en las linternas para todas las velocidades de corriente, lo que se atribuye que en esta unidad de cultivo hay un mayor efecto de la fuerza de sustentación que eleva los extremos de las unidades de cultivo, en comparación con la cuelga con pearl-nets.

Por otro lado, los resultados muestran que al aumentar la velocidad de la corriente, se aumentó resistencia hidrodinámica en ambos sistemas. Además, sucedió que al cambiar la dirección de la corriente de paralela a perpendicular en relación a la línea madre. Las tensiones en ambos sistemas aumentaron considerable, ya que todas las unidades de cultivo es vieron directamente expuestas al flujo, ofreciendo una gran área expuesta que pone resistencia a la corriente. La mayoría de los casos se alcanzó una mayor tensión en los fondeos en el sistema con linterna, el cual se atribuyó a la mayor área solida que esta unidad de cultivo posee en comparación con la cuelga con pearl-nets.

Finalmente, bajo las condiciones de simulación y una vez analizados los resultados, se concluye que el sistema con cuelga de pearl-net tiene una mejor respuesta hidrodinámica ya que minimiza la inclinación en sus unidades de cultivo, condición que evita el fenómeno de

muerte por aplastamiento y la muerte de par, y además presenta menores tensiones en sus fondeos, minimizando el riesgo de colapso y/o pérdida del sistema.

Abstract

The hydrodynamic performance relative to the hydrodynamic resistance and inclination of the culture unit was assessed for two northern scallops aquaculture systems, one using lantern culture units and the other using hanging pearl-net culture units.

The assessment was based on a comparative analysis of the response of these culture systems when exposed to three water current velocities, 0.2, 0.5 and 1 ms⁻¹, and to two directions of incidence of the water flow, one parallel and one perpendicular to the main line.

Results showed that when the direction of the flow is parallel to the culture system, a shadow effect is generated along the main line of both type of culture units and, and a larger degree of inclination was observed in those culture units first in contact with the water flow. When the water flow is perpendicular to the culture system, all culture units showed the same degree of inclination along the main line. This being true for all the water flow velocities tested/modeled. Nonetheless, lantern type culture units showed a higher degree of inclination than pearl-net culture units, what is attributed to a greater effect of the lift which raises the ends of the lantern units but, not those of the pearl-net system.

Results also showed that increasing current speed, results in an increased resistance in both type of culture units. In addition, changing the water flow direction from parallel to perpendicular to the main line significantly increased tensions in both systems, as all culture units were exposed at the same time to the water flow, create a larger exposed area exerting resistance to the current.

In most cases, a larger tension was reached on the mooring for the lantern type aquaculture system, was attributed to the larger solid area present in this type of structure and not in the pearl-net systems.

Finally, given the simulation conditions and results obtained, it is possible to conclude that pearl-net type culture systems have a better hydrodynamic response as they minimize the culture unit inclination, thus preventing death by weight crash and “muerte de par”. Pearl-net type systems also presented lower mooring tensions, thus minimizing the risk of aquaculture system collapse or loss.

1. INTRODUCCIÓN

En Chile, el cultivo del Ostión del norte se realiza principalmente en la cuarta y tercera región, con un 65% y un 35% de la cosecha nacional respectivamente hasta el año 2012 (Sernapesca, 2013). En ambas regiones existen bancos naturales de este recurso, por lo que en esta zona, el cultivo del Ostión del norte se desarrolla en condiciones naturales favorables.

El sistema de cultivo que se emplea en la pectinicultura es el long-line y ya que estos sistemas se encuentran suspendidos en el agua, los organismos mantenidos son capaces de filtrar a las microalgas que les sirven de alimento, desde la columna de agua. El funcionamiento normal de este sistema de cultivo puede ser afectado por las corrientes y el oleaje, ya que la acción de estas fuerzas provoca la pérdida de la configuración ideal para el adecuado funcionamiento de las estructuras de cultivo.

Dentro del ciclo de cultivo del Ostión del norte se encuentra la etapa de captación, cultivo intermedio o pre-engorda y la etapa de engorda. Este estudio se basará en la etapa de pre-engorda ya que es aquella en donde los productores optan por emplear dos tipos de unidades de cultivo: el pearl-net y las linternas. Ya sea eligiendo uno de ellos o los dos a la vez.

En cuanto al uso de estas unidades, Garrido (2011) en su investigación concluyó que el pearl-net representa ser un medio más favorable para el crecimiento de los ostiones, ya que en su experiencia se registró mayor altura de la valva al final de período de estudio. Por su parte Soto (2012), plantea que si bien se obtiene mayor crecimiento valvar del ostión en pearl-net, en términos de costo para la empresa, las linternas son más convenientes de utilizar debido a los menores tiempos de manejo respecto a los usados con cuelga de pearl-net.

Hasta el momento, se desconocen estudios que realicen una comparación de estas dos unidades de cultivo en términos hidrodinámicos, de manera que se pueda evaluar el desempeño hidrodinámico de éstas, y así con ello esclarecer cuál sistema se desempeña mejor frente a distintas condiciones ambientales. Mientras exista esta incertidumbre, se

hace difícil mejorar la eficiencia en el uso de estas unidades de cultivo, de manera de reducir la mortalidad (por excesivo roce, por aplastamiento o por la “muerte de a dos”), mejorar las tasas de crecimiento y disminuir las probabilidades de pérdida del sistema.

Con el avanzar de la ciencia y la tecnología, es posible determinar el funcionamiento de las estructuras sumergidas mediante el método de elementos finitos. Un software especializado en ésta área es Aquasim ®, herramienta desarrollada por la empresa Aquastructures para el cálculo y simulación en tiempo real de la respuesta estructural de construcciones ligeras, configuraciones flexibles y sistemas de variados elementos expuestos a cargas ambientales tales como olas, corrientes, viento, además de cargas distribuidas y puntuales, entre otros (Berstad et al., 2003, 2004, 2012, Berstad & Tronstad 2005a, 2005b)

Es por ello que en la presente investigación se busca evaluar el desempeño hidrodinámico de unidades de cultivo modelo para el cultivo del Ostión del norte, que emplean cuelga de pearl-net y linternas, usando Aquasim como herramienta de simulación.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar el desempeño hidrodinámico de unidades productivas modelo para el cultivo de Ostión, específicamente cuelga de pearl-net y linterna, usando una herramienta de simulación dinámica.

2.2. Objetivos Específicos

- 1) Desarrollar un modelo de long-line que utilice la linterna como unidad de cultivo y otro long-line que emplee cuelga de pearl-net, sometiendo a ambos modelos a distintos escenarios de corriente.
- 2) Determinar el desempeño hidrodinámico frente a los escenarios de corriente simulados de los long-line que emplean linterna y cuelga de pearl-net, mediante los resultados obtenidos de la inclinación de las unidades de cultivo y las tensiones alcanzadas en los fondeos.
- 3) Comparar el desempeño de los long-line con linterna y con cuelga de pearl-net determinando las diferencias en su reacción frente a las diferentes condiciones de corrientes para seleccionar la mejor unidad de cultivo en términos hidrodinámicos.

3. ANTECEDENTES

3.1. Aspectos generales de los sistemas long-line

Las líneas de cultivo suspendido o long-line son ampliamente utilizados en la acuicultura ya que son altamente productivos y eficientes (Sala & Luchetti, 2008). Este sistema es de origen japonés y está estructurado sobre cabos, flotadores, pesos y anclajes. El long-line es instalado y utilizado en el mar, en áreas preferentemente protegidas, de aguas tranquilas, y mantiene suspendidas sus unidades de cultivo donde se encuentran los recursos ya sean moluscos, equinodermos y algas (Barrientos, 2000).

La industria del cultivo del ostión del norte utiliza este sistema long-line en todas las etapas del ciclo de producción del ostión, desde la recolección de semillas, pasando por el cultivo intermedio o pre-engorda y finalmente también se utiliza en la etapa final de engorda (Pereira, 1995).

Entre las características que los long-line poseen, se puede mencionar que permiten una libre circulación del agua y además, las unidades de cultivo empleadas otorgan un piso adecuado, de modo que los ostiones no se encuentren uno sobre el otro. El long-line tiene la característica que es flexible, pues, está formado sólo por cabos y sus unidades de cultivo, además puede localizarse de acuerdo a la dirección de la corriente principal (Pereira, 1995), lo cual minimiza los efectos del ambiente sobre el sistema de cultivo (Loland, 1991).

Entre alguno de los problemas que existen con el long-line, en lo que al cultivo del Ostión del norte se refiere, se puede mencionar que se producen movimientos no deseados en las unidades de cultivo, los cuales son causados por la acción de las olas y las corrientes. Factores climáticos que provocan en los organismos cultivados una disminución de la tasa de crecimiento o aumento la tasa de mortalidad, esto ocurre tanto en pearl-net como en linterna.

La razón de esto es que los ostiones son muy sensibles a los movimientos, ya que en presencia de agitación se sienten amenazados, cerrando sus valvas y cesando su

alimentación. Una solución a esto es posicionar a las unidades de cultivo y a los flotadores a una mayor profundidad para que no se vean afectados por la acción de las olas y las corrientes (Pereira, 1995).

Otro grave problema que existe en el cultivo del Ostión del norte, y que se genera por la inclinación excesiva de las unidades de cultivo, es la mortalidad “de a par” o “muerte de a dos” (Pereira, 1995). Este inconveniente consiste en que un ostión introduce una de sus valvas dentro de la cavidad paleal de otro ostión, dañando el músculo abductor y el manto, incluso pueden dañarse los bordes de las conchas por el aumento del roce con otros individuos. Este fenómeno se produce mayormente en etapa de pre-cultivo (Pereira, 1995).

Zúñiga (com. pers.), asegura que la muerte de a par se genera cuando existe inclinación en los pisos de las unidades de cultivo, acumulando a los ostiones en un solo rincón. Este evento puede producirse por un mal diseño de las unidades de cultivo o una mala construcción de éstas. Desde esta perspectiva, las unidades de cultivo estarían perdiendo eficiencia en términos productivos, ya que no están brindando un ambiente estable que permita el normal desarrollo de los recursos cultivados.

Por lo tanto, el long-line será eficiente, siempre y cuando, permita el mínimo de movimientos de las unidades de cultivo, ya que estas perturbaciones generan una disminución de la tasa de crecimiento de los ostiones, y aumentan de la tasa de mortalidad. Tal eficiencia se favorece con un buen diseño del sistema, así como de un adecuado posicionamiento respecto a la dirección de la corriente y una construcción adecuada de las unidades de cultivo.

3.2. Componentes del long-line

El long-line es un sistema que está constituido por una línea madre, cabos de señalización, dos cabos de orinque y fondeo, dos elementos para el fondeo (anclas o bloques de hormigón), los elementos de flotación y las unidades de cultivo (Figura 1).

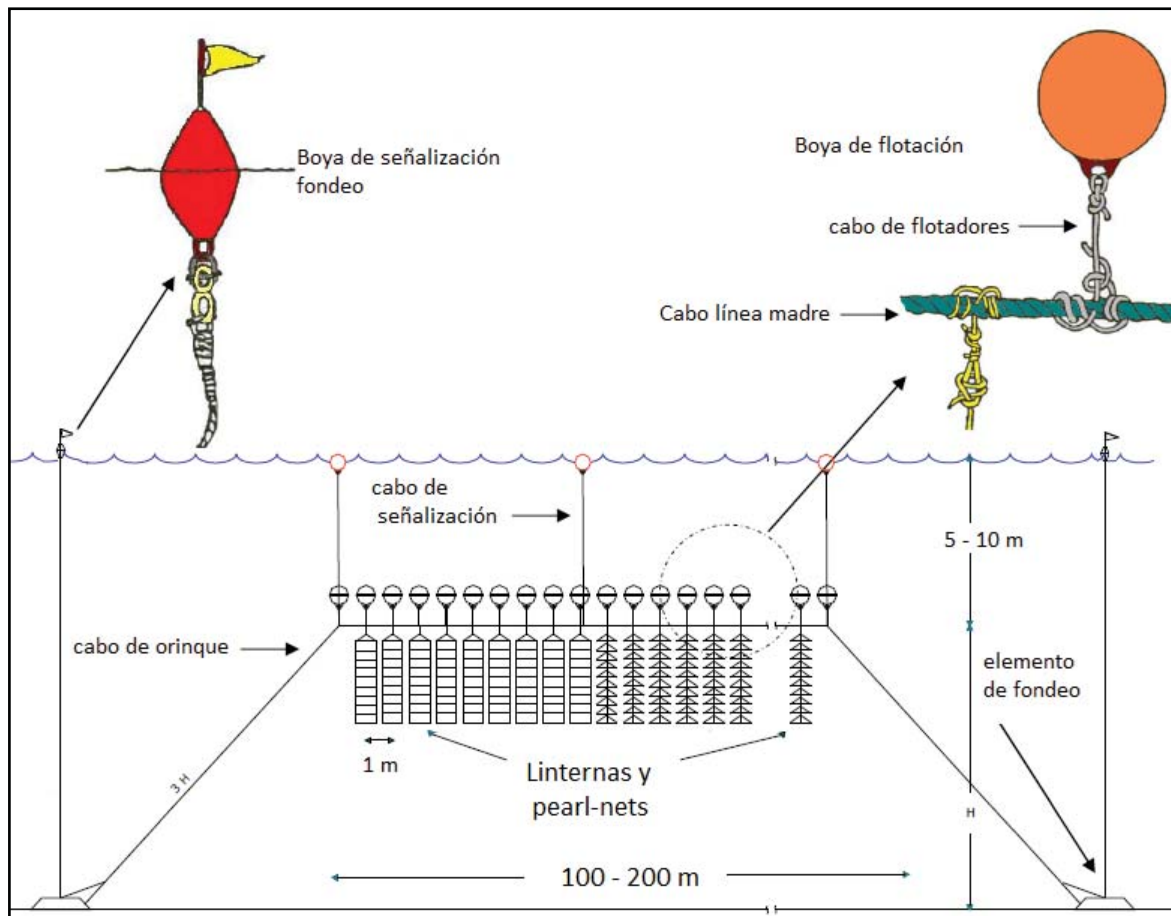


Figura 1: Sistema Long-line y sus componentes.

- Línea madre: es la principal de las líneas, teniendo como función, sostener a las unidades de cultivo, las que pueden ser colectores, pearl-nets o linternas. La longitud de la línea madre varía de los 40 y los 200 metros (Carroza, 1990).
- Cabos de señalización: son aquellos que unen a la línea madre con las boyas demarcadoras superficiales, estos cabos permiten determinar la ubicación y forma que tiene la línea madre (Barrientos, 2000).
- Cabos de orinque y fondeo: son los cabos utilizados para efectuar la tensión y readecuación del sistema, van desde el elemento de fondeo hasta una boya marcadora en la superficie que demarca los límites de la línea madre. Posee una longitud que varía dependiendo de la profundidad del sitio donde está ubicado el long-line (Barrientos, 2000).

- Elementos de Fondeo: ancla o bloque de hormigón que están en contacto con el fondo, atado al cabo de orinque.

El sistema de fondeo debe ser tan fuerte como para resistir las condiciones ambientales más adversas de corriente, oleaje y viento, sin que el sistema se mueva o se rompa y se pierda (Thoms, 1989). La eficiencia de este sistema dependerá tanto las características del material de construcción del “muerto” como de su coeficiente de agarre, así como de las características topográficas del sector, también de la inclinación del fondo y de las características físicas del sustrato del fondo (Barrientos, 2000).

- Cabo de flotadores: es el cabo de unión entre los elementos de flotación y la línea madre.

Todos los cabos del long-line deben ser dimensionados considerando que deben soportar cargas ambientales y cargas propias de los manejos sobre la línea de cultivo (Barrientos, 2000), por lo general, los cabos que conforman la línea madre y los fondeos son de polipropileno de 24 mm de diámetro.

- Elementos de flotación: son los encargados de darle fuerza boyante al sistema neutralizando el peso de los componentes (Barrientos, 2000), por lo general se emplean flotadores esféricos a media agua. El número de flotadores a utilizar en la línea de cultivo y la separación entre éstos, dependerá de los pesos de las unidades de cultivo. La fuerza boyante de estos elementos depende de su volumen y densidad, la cual varía de acuerdo al material con que está construido y si éste es hueco o no.
- Unidades productivas de cultivo: Las unidades de cultivo son las estructuras donde se depositan los organismos durante el ciclo de crecimiento, éstas se cambian a lo largo del ciclo de cultivo. En la captación se parte utilizando colectores, en la etapa intermedia se utiliza linterna y/o cuelga de pearl-net, y en la etapa final de engorda se utiliza linternas (Barrientos, 2000).

En esta oportunidad, como la etapa contemplada es el pre-cultivo, se detalla sobre las unidades pearl-net y linterna. En resumen, los pearl-net son bandejas piramidales confeccionadas con alambre galvanizado recubierto en polietileno, en forma de cruz en su base, con la finalidad de darle rigidez y durabilidad, la estructura está envuelta en una

mallas de fibra sintética de tamaño de malla variable de acuerdo con el tamaño de la semilla (Figura 2).

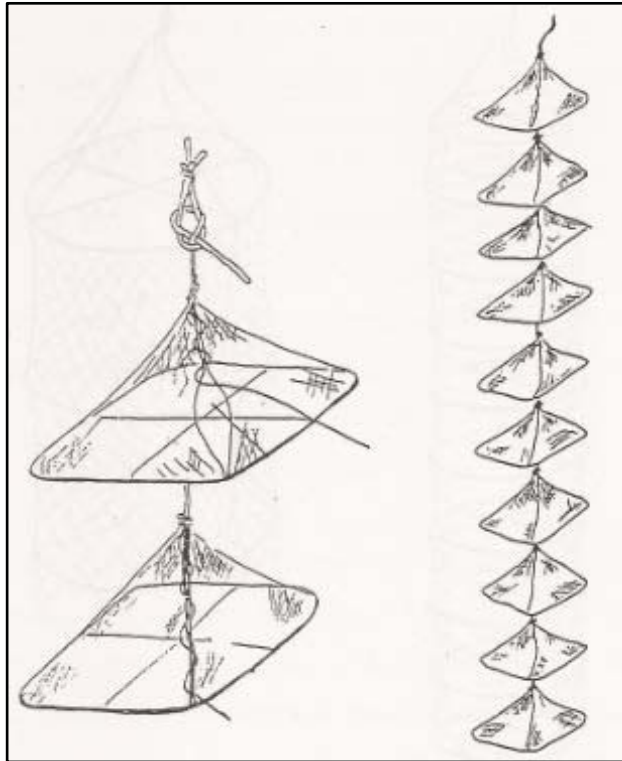


Figura 2: Cuelga de pearl-net. (Fuente: Hardy, 1991, citado por Barrientos, 2000)

Por otro lado, las linternas son cilindros de mallas compuestos por marcos circulares de alambre galvanizado y plastificado, que forman los pisos de la linterna, los que están separados verticalmente cada 20 centímetros, y cubiertos con malla, en total son 10 pisos. El tamaño de la malla depende del tamaño de los ostiones, va desde los 9 mm a los 30 mm (Figura 3).

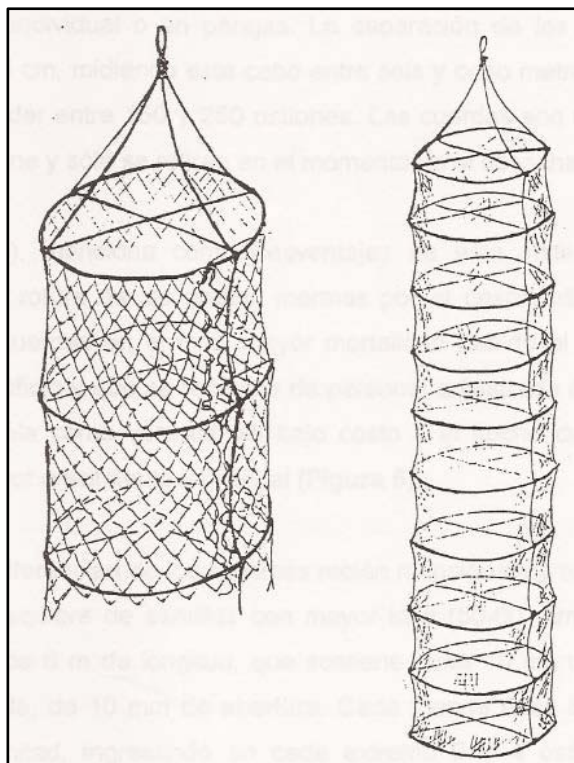


Figura 3: Cuelga de linterna. (Fuente: Hardy, 1991, citado por Barrientos, 2000)

En la industria acuícola ambas unidades de cultivo tienen cabida en el cultivo intermedio, la decisión de cual unidad de cultivo usar depende de cada productor y de la experiencia que ha tenido en términos de mortalidad, tasa de crecimiento, presencia de fouling, facilidad de manejo y desdoble, costos de producción asociado al uso de la unidad, vida útil, etc.

Moya (1998), realizó una experiencia de comparación en la etapa intermedia de cultivo del ostión del norte entre Febrero y Junio, donde determinó que en pearl-net se obtienen mayor tasa de crecimiento que en linterna. Garrido (2001), también comparó el crecimiento del ostión del norte en pearl-net y linterna, donde concluyó que luego de la etapa de cultivo intermedio, se obtiene una mayor masa muscular en ostiones cultivados en linterna, mientras que en pearl-net, se obtiene mayor crecimiento de la masa gonadal, por otro lado, también determinó que no existen diferencias significativas en la mortalidad presente en ambos tipos de unidades de cultivo.

Soto (2012), por su parte también comparó el crecimiento del ostión del norte en pearl-net y linterna, de donde concluyó que durante la fase de cultivo intermedio se presenta un mejor crecimiento en pearl-net, por sobre el crecimiento en linterna, lo que estaría dada porque el pearl-net al tener forma piramidal permite mejor flujo de agua por lo que se genera mayor renovación de agua y mayor suministro de alimento a los ostiones, sin embargo recomienda cultivar los ostiones en linternas, ya que en términos productivos este sistemas sería más conveniente, por que presenta menores costos asociados a los manejos propios de los desdobles.

3.3. Fuerzas hidrodinámicas

Las fuerzas hidrodinámicas son aquellas que son producidas por las corrientes, el oleaje y el viento (Izaguirre *et al.* 2007). Estas fuerzas afectan la configuración de las estructuras flotantes (Lader & Enerhaug, 2005) y las tensiones que se transmiten hacia los sistemas de fondeo y las boyas (López, 2013). En este sentido las peores consecuencias de la acción de las fuerzas hidrodinámicas que pueden ocurrir en la acuicultura es la rotura de los sistemas de fondeo y la posterior pérdida completa del sistema de cultivo (Izaguirre *et al.* 2007).

3.3.1. Corrientes

En este tema, es preciso mencionar que la corriente es uno de los factores ambientales que se deben considerar por diversos motivos en el uso de sistemas suspendidos para el cultivo de ostiones.

FAO (2005), indica que una de las desventajas del uso del cultivo suspendido del ostión del norte es que se generan inclinaciones de las unidades de cultivo por la interacción con las corrientes, lo que provoca el hacinamiento de los individuos. Fredriksson *et al.* (2010), experimentó con el cultivo de ostras en bandejas verticales en la

bahía de Chesapeake, donde indica que las estructuras de cultivo que se encuentran sumergidas verticalmente están sujetas a cargas hidrodinámicas como las corrientes, en este caso, el riesgo debe reducirse al mínimo, evitando al máximo la influencia de la corriente utilizando métodos de ingeniería.

En adición a lo anterior, se debe mencionar que la velocidad de la corriente altera el metabolismo de los organismos filtradores. Los Ostiones del norte son organismos filtradores, por lo que la velocidad del flujo puede influir en las tasas de ingestión y eficiencia de retención del alimento, por lo tanto en las tasas de crecimiento (Uribe y Blanco, 2001). Además de ello, Diarte (2007) menciona que una excesiva velocidad de corriente reduce el crecimiento por inhibición de la actividad de la alimentación, por otro lado la mayor reducción de la tasa de crecimiento se observó en áreas de baja velocidad de corriente y alta densidad de cultivo, lo que se asociaría a la reducción del alimento disponible.

Manzi *et al.* (1986) y Grizzle & Lutz (1989), observaron una relación positiva entre la velocidad del flujo de agua y el crecimiento de bivalvos en el medio natural. Por otro lado, Grizzle *et al.* (1992), en un estudio en laboratorio para la ostra *Crassostrea virginica*, obtuvo una relación negativa con la velocidad de flujo de 0,02 - 0,09 cms^{-1} , observando un crecimiento tres veces más rápido en una velocidad de 1 ms^{-1} . Del mismo modo Vera & Aldana (2000), observaron mejores resultados de crecimiento de *Crassostrea virginica* en los sitios de menores velocidades de flujo, pero asociado también a la alta presencia de nutrientes del sitio.

Las variaciones en la velocidad de la corriente en las Bahías, son afectadas principalmente por las mareas (Moraga & Olivares, 1993) pero en especial las que se producen por los ciclos diarios y anuales del viento en superficie. A esto se le debe añadir que en bahías, la topografía también pasa a cumplir un rol muy importante (Rodhouse & Roden, 1987).

Las zonas donde se ha concentrado el cultivo del ostión del norte en Chile, son la Bahía de Tongoy en la Cuarta región y la Bahía de Caldera en la Tercera región. Estudios de correntometría realizados en Caldera, han evidenciado que las máximas velocidades de

corriente registradas poseen una componente sur-este y alcanzan velocidad de $0,28 \text{ ms}^{-1}$ en verano (GEOMAR, 2001). Por otro lado, en Tongoy, los estudios de correntometría han evidenciado que las máximas corrientes se registran en verano, y tienen una velocidad de $0,2 \text{ ms}^{-1}$ (Uribe & Blanco, 2001).

Por la existencia de las corrientes que interactúan con los sistemas de cultivo, se genera el concepto de resistencia hidrodinámica, que se define como la fuerza contraria al movimiento de la corriente que se mueve a una velocidad determinada dada por un área expuesta del cuerpo (Concha, 1998). La resistencia se ve afectada por la forma geométrica del cuerpo, por la rugosidad del material y por la orientación del cuerpo respecto a la dirección de la fuerza en movimiento. La resistencia hidrodinámica total estará influenciada por el coeficiente de arrastre (C_D) y el coeficiente friccional (C_L). El coeficiente de arrastre influenciará en la fuerza de arrastre de un cuerpo sumergido, la cual es normal a la dirección del flujo. Mientras que el coeficiente de fricción influenciará en la fuerza de fricción o sustentación, es decir, aquella resistencia que es perpendicular al flujo (Barrientos, 2000).

Los coeficientes de arrastre y friccional se obtienen de la siguiente expresión descrita por Rudi *et al.*, 1988 citado en Lader *et al.* (2003):

$$C_D = 0,04 + (-0,04 + Sn - 1,24 * Sn^2 + 13,7 * Sn^3) * \cos^2 \alpha$$

$$C_L = (0,57 * Sn - 3,54 * Sn^2 + 10,1 * Sn^3) * \sin 2\alpha$$

Donde:

Sn: es la solidez de la red

α : es el ángulo de ataque de la corriente respecto al plano de la red.

Estas fórmulas no se deben utilizar para valores de solidez mayores a 0,35. Queda claro por las ecuaciones que los valores de C_D y C_L , están determinados por el factor de solidez del plano de la red y el ángulo obtenido entre la dirección de la corriente y el plano de la red (Lader & Enerhaug, 2005, Loland 1991).

Lader & Enerhaug (2005), indica que el coeficiente de resistencia friccional es proporcional a $\sin(2\alpha)$, además la mayor fuerza de sustentación se obtiene cuando α es igual a $\pi/4$, es decir un ángulo igual a $51,75^\circ$ entre la dirección de la corriente y el plano de red de la unidad de cultivo. A partir de ello, se puede inferir que la resistencia friccional es dependiente del peso del cuerpo (Loland, 1991), ello es así, ya que el peso de la unidad de cultivo limitará la inclinación de las cuelgas de cultivo por la acción de la corriente. Por otro lado, la fuerza de arrastre es explicada en gran medida por el efecto que tienen los cambios en el área expuesta que poseen las unidades de cultivo (Lader & Enerhaug 2005).

Loland (1991), describió la fórmula general para la fuerza de arrastre (F_d) y para la fuerza de sustentación o friccional (F_l) en las siguientes expresiones:

$$F_d = 0.5 * (C_d * D * A * V^2)$$

$$F_l = 0.5 * (C_l * D * A * V^2)$$

Donde

C_D = Coeficiente de arrastre

C_L = Coeficiente friccional o sustentación

D = Densidad másica del agua ($\text{Kg s}^2 \text{m}^{-4}$)

A = Área sólida normal al flujo (m^2)

V = velocidad relativa de la corriente incidental entre el flujo y el elemento (ms^{-1})

Luego la fuerza total que actúa sobre la red de la unidad de cultivo se obtiene de la siguiente expresión planteada por Loland (1991):

$$F = F_d + F_l$$

Donde

F : es la fuerza total de la corriente sobre la red de la unidad de cultivo (KgF)

La interacción de las redes con la corriente ha sido estudiada por diversos autores, en estos estudios se menciona que los principales efectos de las corrientes sobre los sistemas de cultivo suspendido son la deformación de las unidades de cultivo y el aumento de las tensiones en los sistemas de fondeo (Lader *et al.*, 2003, Izaguirre, 2007).

En los sistemas long-line que utilizan linterna y cuelga de pearl-net, la deformación se observa en una inclinación de las unidades de cultivo. Esta inclinación será la resultante del equilibrio entre la acción de la corriente sobre los paneles de redes de las unidades de cultivo y la fuerza de inercia de éstas, la cual está condicionada por el peso que ejerce la unidad de cultivo (Loland, 1991). La deformación (inclinación) de las unidades de cultivo aumenta a medida que se incrementa la velocidad de la corriente, generando una disminución del área total expuesta a la corriente de la unidad de cultivo (Lader & Enerhaug, 2005).

Loland (1991), observó cómo los paneles de redes que se encontraban directamente en contacto con la acción de la corriente presentaban una mayor deformación, mientras que los paneles a lo largo del sistema de cultivo (en este caso, a lo largo de la línea madre), van mostrando una menor inclinación debido a que hay una disminución de la velocidad de la corriente, el denominado efecto sombra.

Lee *et al.* (2008), en su estudio realizó una simulación dinámica de un sistema de jaulas de cultivo sometidas a oleaje y corriente, en el cual indicó que el efecto sombra es aquel fenómeno que explica por qué la velocidad del flujo disminuye cuando va pasando a través de paneles de redes, ya que parte del flujo de agua es eliminado por el obstáculo creado por una red frontal, de esta manera la tasa de reducción de la velocidad depende de la solidez de la red, del ángulo de ataque, y de la velocidad del flujo. El factor de reducción de la velocidad de la corriente disminuye si aumenta la velocidad del flujo, mientras que se incrementa cuando se acrecienta el factor de solidez (Loland, 1991), también se disminuye el factor de reducción de velocidad cuando el ángulo de ataque se reduce.

Aarsnes *et al.* (1990), obtuvo una fórmula para determinar la tasa de reducción de la velocidad de corriente cuando hay efecto sombra en redes, en este estudio reportó que la tasa de reducción de la velocidad de la corriente se redujo en un 6% cuando el factor de

solidez de la red fue de 0,13, en cambio Lee *et al.* (2008), obtuvo una tasa de reducción de 7% para un factor de solidez de 0,15 para un ángulo de ataque de 90°.

Existen otros estudios que han investigado la interacción entre la corriente y paños de redes, tal como lo que ha realizado Berstad *et al.* (2012), quien indica que cuando un flujo pasa a través de una red, se generará una turbulencia en el flujo, perturbando su campo de velocidad por detrás de la red. En este caso un flujo laminar pasa a turbulento una vez que entra en contacto con la red.

En presencia de fouling, el factor de reducción de velocidad se incrementa aun mas, ya que el fouling aumenta la solidez de las redes (Loland, 1991), esto ocurre porque se genera un aumento del área solida de las hebras que componen el plano de red de las unidades de cultivo, dificultando el paso del flujo a través de la red.

La disminución de la velocidad de la corriente que atraviesa a las unidades de cultivo provoca un menor intercambio de agua, lo que genera un menor suministro de oxígeno dentro de la unidad de cultivo (Loland, 1991). De paso, se produce una menor remoción de los desechos que los organismos cultivados excretan, los cuales se pueden acumular en las unidades de cultivo.

Por otro lado, para el cultivo de los ostiones, que son organismos filtradores, una baja velocidad de corriente puede limitar el suministro de alimento, el cual está suspendido en la columna de agua. En este sentido, Loland (1991), indica que las velocidades de corriente no deberían ser menores a $0,1 \text{ ms}^{-1}$ dentro de las unidades de cultivo.

La resistencia hidrodinámica que presentan los sistemas de cultivo suspendido cuando interactúan con las corrientes, también queda evidenciada en las tensiones que los fondeos deben soportar para que el sistema no colapse. Izaguirre *et al.* 2007, indica que tanto las fuerzas hidrostáticas como las dinámicas se equilibran con las tensiones de las amarras y los fondeos. Por lo tanto, mientras mayor resistencia hidrodinámica presente el sistema, mayor será la tensión en los fondeos, del mismo modo, si mayor es el peso en las unidades de cultivo, mayor será la tensión en los fondeos. La tensión también puede aumentar cuando hay un aumento de la solidez de las redes que componen a las unidades de cultivo (como ocurre en presencia de fouling). Lader & Enerhaug (2005), plantea que hay

una relación lineal entre la fuerza de arrastre y la intensidad de la corriente para velocidades mayores a $0,2 \text{ ms}^{-1}$.

3.4. Método de elementos finitos

El uso del método de elementos finitos (MEF) fue desarrollado en 1960 por Ray Clough, quien introduce y describe el método por primera vez. El MEF es un método numérico que permite encontrar soluciones aproximadas a problemas físicos que están regidos por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (Clough, 1960). El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real más fácil y económico de modificar que un prototipo (Carnicero, 2001).

Este método permite encontrar un valor aproximado de la función de desplazamiento en el dominio del problema que satisface las ecuaciones de equilibrio y las condiciones de contorno (Clough, 1960). Para ello supone que para solucionar el problema, se debe discretizar el dominio de éste en subdominios denominados elementos (Carnicero, 2001). Así el dominio completo es representado por un número finito de elementos o malla (Clough, 1960).

Los elementos pueden adquirir varias formas dependiendo de la geometría del dominio total, por lo general son formas geométricas bastante simples (por ejemplo: puntos y líneas para problemas unidimensionales; triángulos y cuadriláteros para problemas bidimensionales; y tetraedros y hexaedros para problemas tridimensionales). De esta manera, la geometría de los elementos puede ser parametrizado en función de las coordenadas de los vértices o nodos de los mismos (Clough, 1960). Es sobre estos nodos que se materializan las incógnitas fundamentales del problema que se busca solucionar. En el caso de elementos estructurantes, como los sistemas de cultivo suspendido, estas incógnitas son los desplazamientos modales o los denominados grados de libertad (Carnicero, 2001), ya que a partir de éstos es posible calcular las tensiones o deformaciones de los elementos que componen el sistema.

Es evidente que la discretización del dominio en elementos de geometrías sencillas no puede representar completamente todos los detalles de la frontera del dominio global, ya que esta representa un primer acercamiento al método. Sin embargo esta aproximación es mejorable aumentando el número de elementos que se utilizan en la discretización del dominio, esto es conocido como refinamiento de la malla (Clough, 1960).

La selección de elementos, materiales, cargas, condiciones de frontera y el modelo de análisis viene dado por la experiencia de trabajo que se tenga con el MEF. El modelo de computadora nunca coincide con la realidad, es sólo una aproximación, debido a las hipótesis básicas del modelo (Carnicero, 2001).

Una vez que se tienen todos los parámetros geométricos y datos necesarios para el diseño del eje se procede a elaborar la geometría tridimensional que sirve de guía en un programa.

3.4.1. AquaSim

La herramienta que emplea el método de elementos finitos como motor de trabajo es AquaSim ®, el cual es un software simulador experto creado por AquaStructures, que permite modelar formulaciones teóricas de estructuras sumergidas y en superficie empleados en la acuicultura, también permite incorporar cargas ambientales pudiendo observar la respuesta que estas estructuras tendrían ante la exposición a dichas cargas.

En el 2006, el doctor en ingeniería de AquaStructures Are Berstad, quien validó los resultados obtenidos en AquaSim mediante un informe aprobado por la Norwegian Research Council, donde explica la formulación teórica del modelamiento de estructuras flotantes y cargas que se pueden simular sobre las mismas.

La validación de los resultados es un tema importante para todos los programas computacionales que realizan un análisis de MEF. La exactitud de los resultados predichos sin embargo, dependen de varios aspectos, entre los que encontramos la magnitud del error. La definición de “error” parte refiriéndose a que es la diferencia con “lo real” o “lo

observado” de una experiencia física y los resultados derivados de un análisis. Este tipo de errores pueden tener varios orígenes, entre los que se puede encontrar los dados en el modelo físico en comparación con el modelo analizado; en la descripción del medio ambiente; dada la diferencia entre la física real y la descripción matemática de la física utilizada; error en el archivo de entrada; en el código del computador; en la lectura de los resultados, etc. (González, *et al.*, 1993, Berstad, 2006).

AQUASIM ® también ha sido puesto a prueba comparándolo con un modelo a escala de prueba (Berstad *et al.* 2003 y 2004) y probado en varias oportunidades con estructuras flotantes reales (Berstad & Tronstad, 2005a y b, 2006, 2007 y 2008).

3.4.2. Sistema de formulación del análisis de los elementos

El objetivo del programa de análisis de elementos finitos, es establecer el momento de equilibrio entre las fuerzas externas y la reacción de las fuerzas internas que actúan sobre la estructura en un instante. Las estructuras flotantes que se pueden evaluar, poseen diversos nodos que forman elementos y que poseen diversas características propias de su condición.

Un nodo es un punto en el espacio 3D, y a su vez define de inicio y fin a los elementos que conforman a los componentes de los modelos. Por su parte un elemento puede ser formado por dos nodos o cuatro nodos.

- Cabos y Cadenas (Truss): Son aquellos elementos que solo pueden resistir fuerzas axiales, no pueden torcionarse, y está formado por dos nodos.
- Viga o Barra (Beam): Estos elementos de dos nodos, poseen momentos de inercia en el eje Y, en el eje X y un momento de inercia torsional en el eje Z, o sea, poseen resistencia a la torsión y flexión. Es el único tipo de componente que puede tener un comportamiento hidrodinámico.
- Redes (Membrane): Descritos por Tronstad (2000), indica que estos elementos están formados por 4 componentes o nodos.

3.4.3. Descripción ambiental

En los modelos elaborados se consideró a la corriente como la única variable ambiental presente, la cual puede ser aplicada en dos direcciones, desde el eje X o desde el eje Y. En este sentido Berteaux (1976), establece que la corriente no posee componentes verticales y posee una magnitud constante en toda la columna de agua, de la misma manera que AquaSim® aplica la corriente en los modelos de simulación.

4. METODOLOGÍA

La metodología planteada se formuló con la intención de evaluar el desempeño hidrodinámico de sistemas suspendidos de cultivo de Ostión del norte mediante un software de simulación dinámica.

Para ello, en primer lugar se desarrollaron los modelos de long-line que emplean linterna y cuelga de pearl-net. Los modelos se construyeron empleando las referencias técnicas reales que se aplican en el cultivo del Ostión del norte, especificando en el software de simulación los detalles de diseño y dimensionamiento de los sistemas de cultivo suspendido. Una vez contruidos los modelos, éstos fueron sometidos a distintos escenarios de corriente pudiendo observar la respuesta estructural ante la exposición del sistema a una carga ambiental.

Luego de obtenidos los resultados de la simulación, se determinó el desempeño hidrodinámico de los sistemas de cultivo mediante el análisis de la información que los modelos entregaron. Para los distintos escenarios se determinó el área sólida, el área total expuesta, y el factor de solidez de las unidades de cultivo, así como la inclinación alcanzada por las unidades de cultivo y las tensiones registradas en los fondeos.

Finalmente, se comparó la respuesta hidrodinámica de los sistemas que emplean linterna con los que emplean cuelga de pearl-net para determinar las diferencias en las respuestas frente a las distintas condiciones de corriente, para determinar qué sistema modelo es más favorable en términos hidrodinámicos para el cultivo del Ostión del norte.

4.1. Sistemas de cultivo y condiciones ambientales

4.1.1. Construcción de los modelos

Las características técnicas de los modelos se extrajeron de informes técnicos de las concesiones de acuicultura de ostión del norte que utilizan long-line. Para ambas unidades

de cultivo se empleó una malla de Poliamida de tamaño de malla 21 mm y 2 mm de diámetro. El alambre que le da rigidez a las unidades de cultivo es de acero y posee un diámetro de 4 mm.

Para el sistema con cuelga de pearl-net, se modeló una línea madre de 21 metros de longitud, en donde se ubicaron a lo largo 18 cuelgas con 10 pearl-net cada una, por lo que en total hay 180 pearl-net en toda línea madre. La separación entre las cuelgas con pearl-net fue de un metro, tal como se hace indica en los planos de los longline informados en las declaraciones de impacto ambiental para le cultivo del Ostión del norte. A lo largo de la línea madre (Figura 4), por sobre cada columna con pearl-net, se encuentra una fuerza puntual que representa una boya suspendida de 50 kilogramos de empuje sujetadas por cabos de Polipropileno de 12 mm, la cual es capaz de soportar el sistema y mantenerse a la línea madre en equilibrio.

En los extremos de la línea madre están amarrados los orinques o cabos de fondeo de polipropileno de 24 mm, hacia abajo y al final de los fondeos se ingresó un elemento que simula los anclajes del sistema. Del extremo de la línea madre hacia la superficie, se prolonga un cabo de polipropileno de 12 mm que sujeta la boya de demarcación de la línea madre, el cual fue simulado por una fuerza puntual que representa una boya de 1.000 m³.

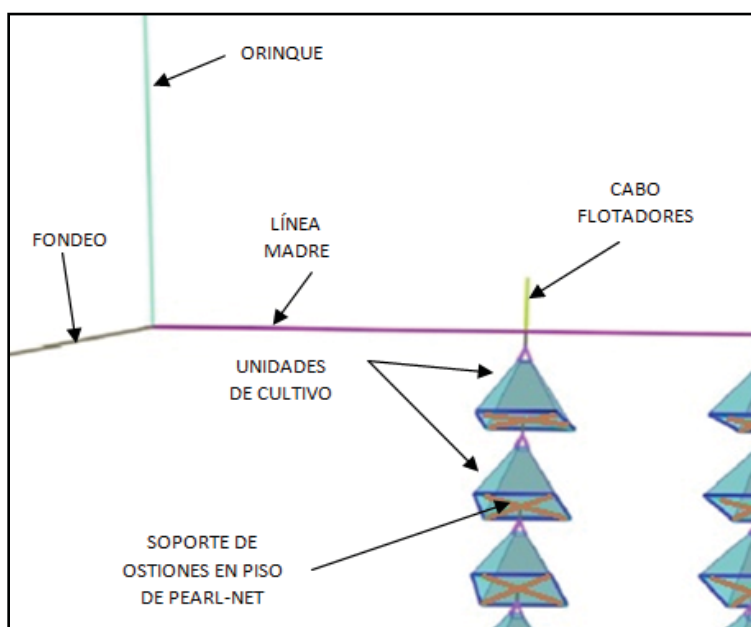


Figura 4: Sistema de cultivo modelado con cuelga de pearl-net.

La presencia de los ostiones está simulada con elementos vigas que poseen un peso lineal de 3 kgm^{-1} . Este peso equivale al que los ostiones alcanzan antes de pasar a la etapa final de engorda, que corresponde aproximadamente a 50 individuos por piso, con un peso individual de 60 gramos por ostión.

El modelo del sistema con linternas también posee una línea madre de 21 metros de longitud, donde se ubicaron 18 linternas separadas cada un metro, como se indica en los planos de los longline informados en las declaraciones de impacto ambiental para le cultivo del Ostión del norte, tal como se detalla en la Figura 5.

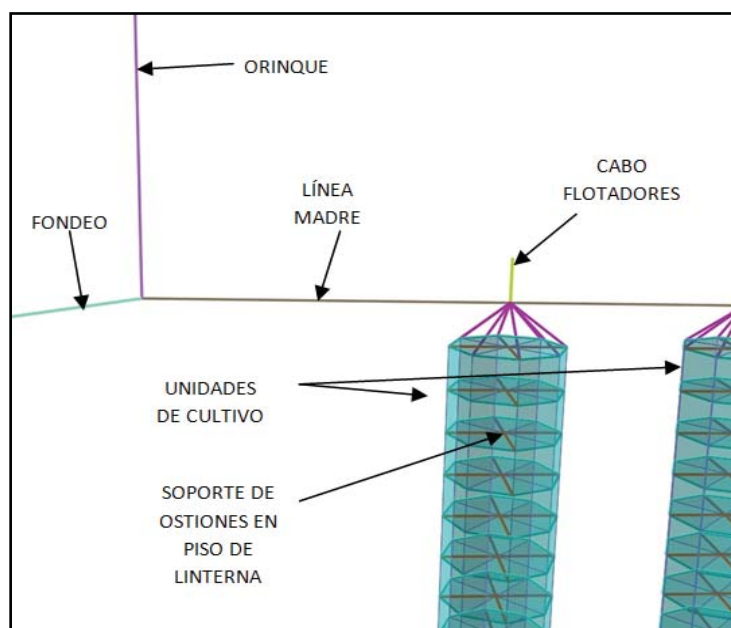


Figura 5: Sistema de cultivo modelado con linternas

A lo largo de la línea madre, por sobre cada linterna, se encuentra una fuerza que simula una boya suspendida de 50 kilogramos de empuje sujetadas por cabos de polipropileno de 12 mm de diámetro, la cual mantiene a la línea madre en equilibrio. En los extremos de la línea madre están amarrados los orinques o cabos de fondeo de polipropileno de 24 mm, en el cual hacia abajo y al final del cabo se encuentra un elemento que simula el anclaje del sistema. Del extremo de la línea madre hacia la superficie, se prolonga el cabo de

polipropileno de 12 mm que sujeta la boya de demarcación de la línea madre, el cual fue simulado por una fuerza puntual que equivale a una boya de 1.000 m³.

De la misma manera que en el sistema con cuelga de pearl-net, los ostiones son simulados con elementos vigas que poseen un peso lineal de 3 kgm⁻¹. El cual equivale al que los ostiones alcanzan antes de pasar a la etapa final de engorda.

Se consideró la no presencia de fouling en los sistemas de cultivo suspendido, ya que como un primer acercamiento al estudio de la respuesta hidrodinámica en longline, se busca evaluar la respuesta de las unidades de cultivo sólo con la acción de la corriente. La incorporación de este factor, que es un grave problema que el cultivo del ostión del norte posee en la actualidad, en teoría, habría influenciado en los resultados de los análisis, ya que en presencia de fouling se produce un aumento de peso del sistema.

Izaguirre *et al.* (2007), menciona que al modificar el área sólida y el C_D de las mallas de las unidades de cultivo, el fouling genera un aumento directo sobre la resistencia hidrodinámica del sistema al disminuir tamaño del entramado y limitar el intercambio de agua. Este mismo autor menciona que también hay un aumento del peso de las unidades de cultivo, lo que influenciaría en la configuración que adopta el sistema de cultivo long-line cuando hay interacción con la corriente.

Los sistemas tampoco se sometieron a la acción del oleaje ni del viento, ya que se busca cuantificar la influencia específicamente de la acción de las corrientes. Los ángulos de incidencia fueron seleccionados de acuerdo a la mejor condición, es decir, la que ofrece menor área expuesta a la corriente y la condición más crítica, o sea, la que ofrece una mayor área expuesta a la corriente.

Las dimensiones del sistema de cultivo modelado, es decir, la longitud de la línea madre así como el número de unidades de cultivo, estuvo limitada por la capacidad de procesamiento de datos de los equipos computacionales disponibles, la cual puede trabajar con número máximo limitado de nodos. Si esta cantidad de nodos se excede, colapsa el funcionamiento normal del software y esto no permite el desempeño esperado del equipo. El computador empleado utiliza un procesador AMD Phenom (tm) II X6 1090T processor 3.2GHz, con una memoria RAM instalada de 8 GB, con un sistema operativo de 64 bits.

4.1.2. Simulación dinámica

La simulación dinámica de los sistemas de cultivo fue realizada tras una serie de pasos metodológicos complementarios, que están basados en la metodología de análisis de elementos finitos (Moisés, 2007) los cuales se mencionan a continuación:

4.1.2.1. Pre-proceso

En esta etapa se trabajó con el programa Superdraw, software donde se obtuvo la configuración geométrica de los sistemas de cultivo, así como el número de nodos necesarios de acuerdo a la configuración del sistema modelado. En la misma instancia se especificó qué tipo de elementos eran los que componían los sistemas, determinando si estos eran viga, cadena o cabo, o red.

Finalmente se validó la construcción del primer bosquejo virtual mediante un análisis de estrés realizado por Superdraw, el cual verificó que no existieran elementos duplicados, ni problemas geométricos ni desconexión de nodos en el modelo.

4.1.2.2. Parametrización

En esta etapa se trabajó en el programa AquaBase de AquaSim. En esta instancia se ingresó al procesador de datos las características de los materiales y las dimensiones físicas de los elementos antes especificados. Para las fuerzas puntuales, se ingresó al modelo la magnitud del empuje de las boyas, de manera que el sistema quede en equilibrio.

La solidez de las mallas que forman las unidad de cultivo, se considera a partir de una malla que es cuadrada ($\mu = 0.707$) y deformable. Se consideró una malla cuadrada porque la forma que permite el mayor flujo a través de la red de las unidades de cultivo.

Otro parámetro es el coeficiente de arrastre (C_D) de las mallas que componen las unidades de cultivo, el cual se consideró como 1,2, valor que viene por defecto en el software AquaSim y el cual es cercana a los valores considerados en otros estudios con mallas (López, 2013).

Finalmente se ingresaron las magnitudes para la corriente, la cual fue de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, $0,5 \text{ ms}^{-1}$ y 1 ms^{-1} en una instancia con una dirección del flujo que fue paralela al sistema y otra con una corriente perpendicular al sistema.

4.1.2.3. Proceso

En esta fase, Aquasim generó las iteraciones de cálculo estructural al modelo previamente parametrizado, específicamente se refiere al módulo de procesamiento numérico para las fuerzas dinámicas y análisis de movimiento de las estructuras flotantes.

4.1.2.4. Post-proceso

Esta interface comenzó con la estructuración de los datos de salida, etapa que se desarrolla en AquaConvert. Este programa conectó y envió los resultados hacia AquaView, que es la última fase del Post-proceso. AquaView permite la organización de los resultados mediante su visualización en el modelo interactivo 3D.

4.2. Determinación del desempeño funcional y resistivo

4.2.1. Ángulo de inclinación

Para determinar el ángulo de inclinación de las unidades de cultivo sometidas a corriente, en primera instancia se formó el ángulo (a^1), el cual está compuesto por la vertical, que es la posición original de la unidad de cultivo y por el perfil de la cuelga de pearl-net o linterna adquieren una vez que se inclinan. Por ángulos complementarios, se obtiene el ángulo ($90^\circ - a^1$), proyectando el ángulo (a^1) al otro lado del ángulo ($90^\circ - a^1$), se obtiene que el ángulo de inclinación de la cuelga de pearl-net o linterna, es equivalente al ángulo de inclinación del piso de la unidad de cultivo, tal como lo muestra la (Figura 6).

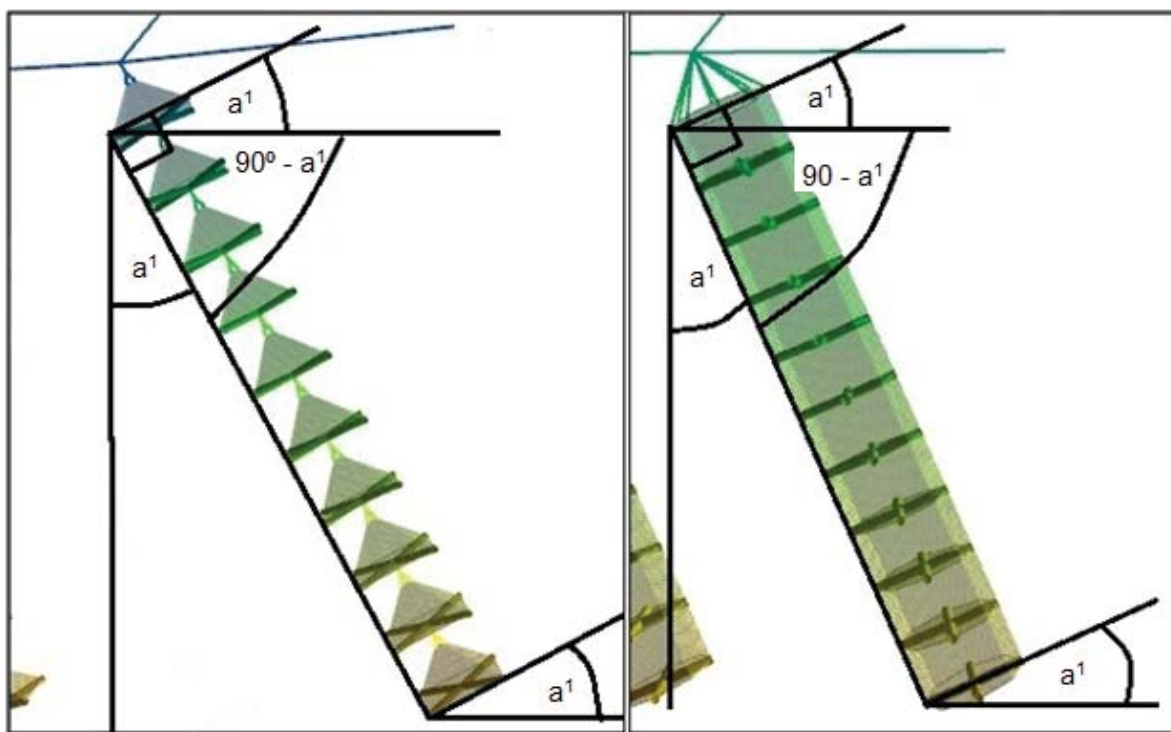


Figura 6: Determinación de ángulo de inclinación en unidades de cultivo.

Cuando la corriente fue paralela al sistema, se determinó la inclinación en el eje X del modelo. En cambio, cuando la corriente posee una incidencia perpendicular, la inclinación se determinó en el eje Y del modelo.

4.2.2. Tensión Máxima

Se obtuvo como resultado de la modelación la tensión máxima transmitida en los cabos de fondeo. Esta magnitud se estableció en el instante que las fuerzas externas e internas que interactuaban con el sistema de cultivo alcanzaron el punto de equilibrio.

Se determinó el cambio relativo de la tensión a medida que aumentó la velocidad de la corriente, esto se hizo para cuando el flujo fue paralelo al sistema y para cuando fue perpendicular al sistema. El cálculo se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Cambio relativo de la tensión} = \frac{\text{Tension final} - \text{Tension inicial}}{\text{Tension inicial}} * 100$$

La tensión inicial corresponde a la condición de corriente anterior, es decir, para la velocidad de corriente de $0,5 \text{ ms}^{-1}$, la tensión inicial es la alcanzada con la corriente a $0,2 \text{ ms}^{-1}$, mientras que para 1 ms^{-1} , la condición inicial es $0,5 \text{ ms}^{-1}$.

4.2.3. Área Sólida, área total y factor de solidez

En base a las inclinaciones alcanzadas por las unidades de cultivo a medida que aumentó la intensidad de la corriente, se calculó el área sólida de las unidades de cultivo, el área total y el factor de solidez. Ello para analizar el efecto de la corriente sobre la respuesta hidrodinámica de las unidades de cultivo. Las ecuaciones empleadas en el cálculo del área sólida se basaron en las propuestas por Aarnes *et al.* (1990), citado por López (2013):

$$N^{\circ} \#_v = \frac{HRJ}{\lambda * 0.707}$$

Donde:

$N^{\circ} \#_v$: número de mallas verticales.

HRJ: Altura de la red de la unidad (m)

λ : tamaño de la malla (m)

$$N^{\circ} \#_h = \frac{LPJ}{\lambda * 0.707}$$

Donde:

$N^{\circ} \#_h$: número de mallas horizontales.

LPJ: longitud perimetral de la red de la unidad (m)

$$N^{\circ} \#_t = N^{\circ} \#_h * N^{\circ} \#_v$$

Donde:

$N^\circ \#_t$: Número de mallas totales de la unidad.

$$N^\circ_b = N^\circ \#_t * 2$$

Donde:

N°_b : número de barras de la unidad.

$$L_b = \frac{\lambda}{2}$$

Donde:

L_b : longitud de una barra (m).

$$A_b = L_b * \phi$$

Donde:

A_b : área de la barra (m^2).

ϕ : diámetro del hilo (m).

$$A_s = A_b * N^\circ_b$$

Donde:

A_s : Área sólida (m^2)

El área sólida corresponde a la sombra de la malla que es perpendicular al plano de la red (Berstad *et al.* 2012). Por otro lado, para la determinación del factor de solidez se empleó la ecuación propuesta por Lobos (2006):

$$S_n = \frac{A_s}{A_t}$$

Donde:

S_n : Factor de solidez de la red.

A_t : Área total expuesta de la red (m^2).

El área sólida expuesta de la unidad de cultivo se consideró a partir de la forma geométrica de la cara frontal que ésta ofrece a la corriente (**Figura 7**). Para la linterna, la cara frontal se consideró como un cilindro, por lo tanto, el cálculo del área sólida expuesta está determinado por la mitad del perímetro de la linterna y por su altura transversal. Cuando la linterna se inclinó al interactuar con la corriente, el área sólida expuesta de la linterna se volvió a determinar con la nueva altura de la cara de la unidad. Tal como lo ejemplifica la Figura 7, ya que la altura de la unidad de cultivo cambia de H a H' a medida que la velocidad de la corriente aumentó.

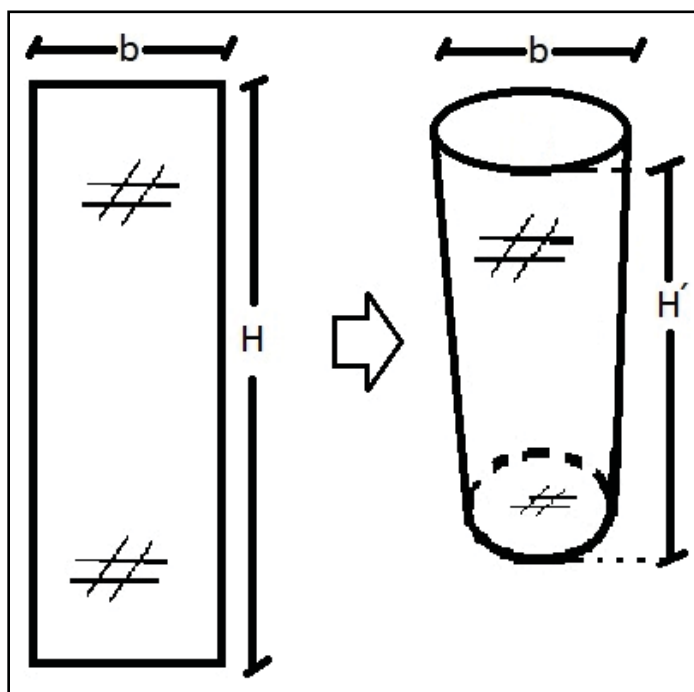


Figura 7: Cambio de altura de la unidad de cultivo linterna cuando interactúa con la corriente.

Los pearl-net tienen forma de pirámide truncada (Figura 8), tomando en consideración esto, para la determinación del área expuesta se considera solo la cara frontal que se ubica transversal a la corriente. Para determinar el área de la forma geométrica del pearl-net, se dividió la cara lateral en tres secciones: la sección central que se proyecta desde la arista superior de la pirámide hasta el piso de la unidad, formando un rectángulo, y las otras dos secciones son dos triángulos ubicados de manera opuesta a cada lado del rectángulo central.

Por lo tanto, el área sólida expuesta es el área del rectángulo central de la pirámide más el área de los dos triángulos rectángulos laterales.

Para el cálculo del área total de cada triángulo se multiplicó la altura (h) por la sección c, que es el límite del rectángulo central, y todo ello dividió por dos. La sección central de la pirámide se calculó como la sección d por la altura h. Al igual que con la linterna, el área sólida expuesta se volvió a determinar cada vez que la altura de la cara frontal cambió cuando hubo interacción con la corriente, para ejemplificar este último punto, la altura frontal de la unidad de cultivo cambia de h a h' con el aumento de la velocidad de la corriente.

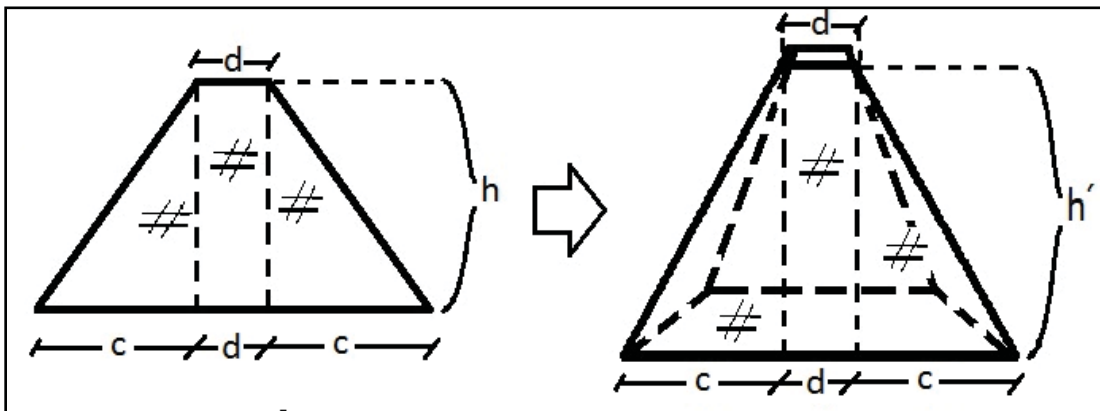


Figura 8: Cambio de altura de la unidad de cultivo pearl-net cuando interactúa con la corriente.

Se determinó el cambio relativo del área sólida expuesta, expresado de manera porcentual. Esto se hizo para todas las velocidades de corriente. El cálculo se realizó de la siguiente forma:

$$\text{Cambio relativo del área sólida} = \frac{\text{área sólida final} - \text{área sólida inicial}}{\text{área sólida final}} * 100$$

El área sólida inicial corresponde al área que adquieren las unidades de cultivo cuando la velocidad de corriente es cero, es decir cuando las cuelgas se encontraban totalmente

verticales. La determinación de la nueva área sólida expuesta se efectuó sobre la primera cuelga con unidades de cultivo de la línea madre, para ambos modelos. Se decidió observar estas unidades porque son las primeras estructuras en tener contacto con la corriente, de manera que reciben la mayor influencia del flujo, por ende son las que registraron los mayores cambios de inclinación.

4.3. Análisis de la respuesta hidrodinámica de los sistemas de cultivo, bajo los distintos escenarios ambientales

Para realizar el análisis del desempeño funcional de los sistemas de cultivo, se observó la respuesta de los modelos frente a las distintas condiciones de corriente. Esto se llevó a cabo mediante el programa de visualización Aquaview, el cual permitió variar el ángulo de la vista y distancia de la visualización. De esta manera, para ambas direcciones de corriente, se pudo observar la respuesta de los sistemas en el eje X, Y y Z. Se observó la respuesta hidrodinámica a lo largo de la línea madre, puntualizando la observación en la primera unidad de cultivo, la novena (que corresponde a la unidad central del sistema) y a la última unidad.

Una vez obtenidos los resultados mediante Aquaview, se extrajo una imagen instantánea de la respuesta estructural de los sistemas a la corriente. Dichas imágenes se exportaron al software Autocad ®, donde se dibujaron los perfiles de las unidades de cultivo para formar los ángulos de inclinación. Los perfiles se compararon con la vertical que se proyecta hacia abajo desde el punto de unión de la unidad de cultivo con la línea madre.

Como parte del análisis, también se determinó el cambio relativo en el área sólida proyectada de las unidades de cultivo, lo que se efectuó cada vez que varió el ángulo de inclinación de la linterna o cuelga con pearl-net. Se estableció como punto inicial, el área sólida proyectada y la tensión del sistema cuando no hubo corriente, la cual varió medida que aumentó la velocidad de la corriente y cambió la dirección del flujo. Del mismo modo, se determinó la diferencia relativa de las tensiones alcanzadas entre ambos sistemas de

cultivo, estableciendo arbitrariamente como punto inicial de referencia a las tensiones obtenidas en el fondeo del sistema con linternas.

5. RESULTADOS

5.1. Simulación dinámica de long-line que emplea linternas

5.1.1. Ángulo de inclinación

Al observar los ángulos de inclinación que alcanzaron las linternas (Figura 9) se apreció que cuando la corriente fue paralela al sistema, la inclinación de las unidades de cultivo fue disminuyendo progresivamente desde la primera unidad hasta la última.

Cuando la corriente tuvo una velocidad de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, la primera linterna alcanzó los 2° de inclinación, mientras que la unidad central se inclinó en $0,2^\circ$ y la última unidad no se inclinó. Cuando la velocidad de la corriente aumentó a $0,5 \text{ ms}^{-1}$ los ángulos alcanzados por la primera, la linterna central y última linterna fueron 14° , 1° y 0° respectivamente.

Por último cuando el sistema se enfrentó a una velocidad de 1 ms^{-1} , el ángulo de inclinación de la primera linterna fue de 46° mientras que los ángulos de inclinación de la unidad central de la línea madre y la última unidad son 22° y 17° respectivamente.

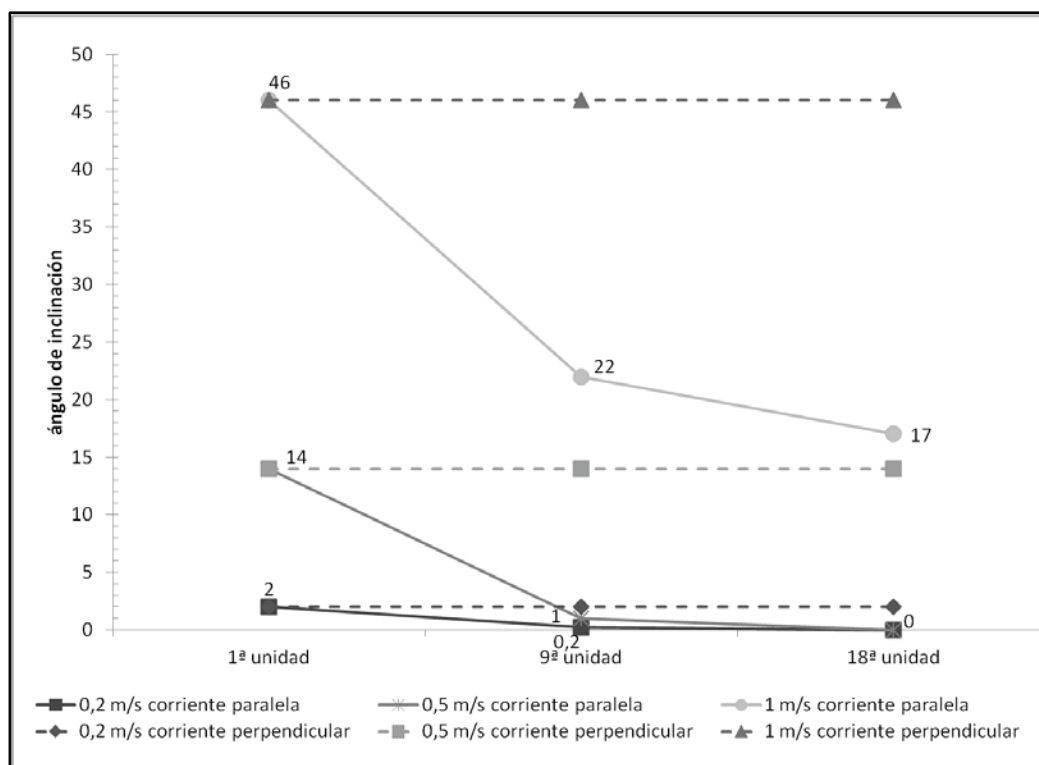


Figura 9: Ángulos de inclinación de las linternas a lo largo de la línea madre para distintas velocidades de corriente y para dos direcciones de corriente (paralela y perpendicular a la línea madre).

Cuando la corriente fue perpendicular al sistema, en todos los escenarios el ángulo de inclinación fue el mismo para todas las unidades de cultivo a lo largo de la línea madre. A una velocidad de corriente de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, el ángulo de inclinación de todas las unidades de cultivo es de 2° , a una velocidad de $0,5 \text{ ms}^{-1}$, el ángulo de inclinación para todas la linternas fue de 14° , finalmente, cuando aumentó la velocidad de corriente a 1 ms^{-1} , las unidades alcanzaron los 46° de inclinación (ANEXO 1).

5.1.2. Tensión

El sistema alcanzó una tensión en la línea de fondeo de 74 KgF cuando no hubo corriente (Figura 10). Por otro lado, cuando hubo una corriente paralela al sistema, con una velocidad de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, la tensión máxima registrada en el fondeo fue de 172 KgF. A una velocidad de $0,5 \text{ ms}^{-1}$, la tensión registrada en el sistema de fondeo fue de 257 KgF, que equivale a un aumento de un 49% respecto a la condición inicial. Mientras que a una

velocidad de corriente de 1 ms^{-1} , la tensión máxima fue de 595 KgF, aumentando la tensión 1,3 veces respecto a la condición a $0,5 \text{ ms}^{-1}$ (ANEXO 2).

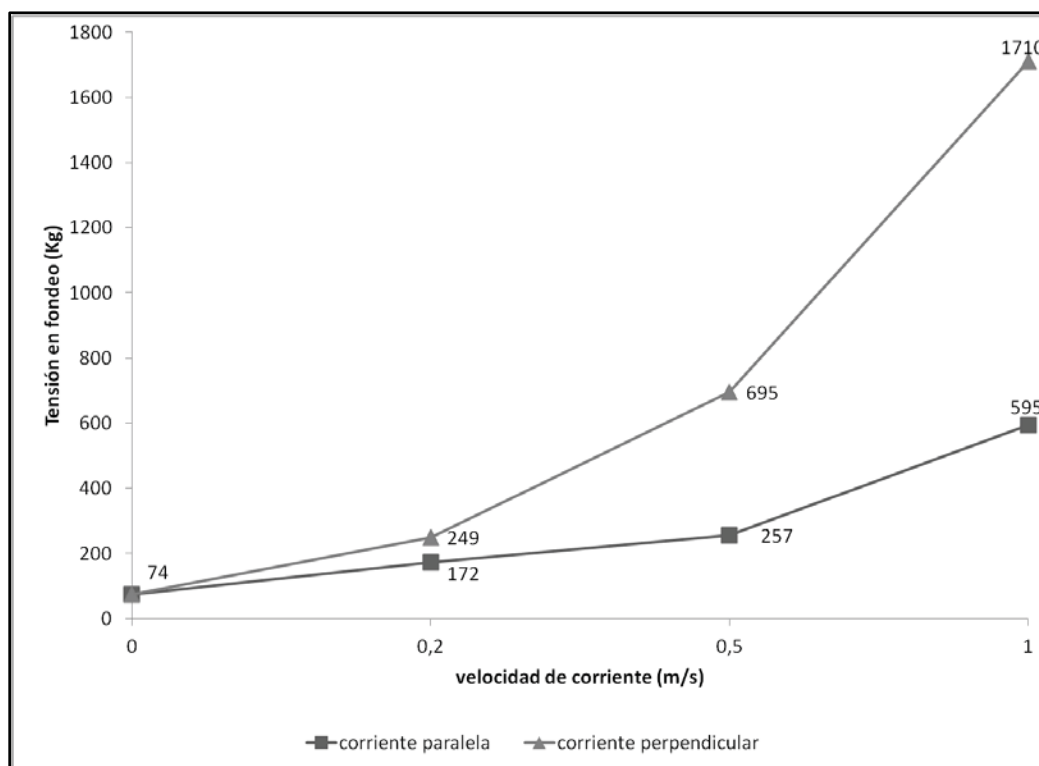


Figura 10: Tensiones alcanzadas en fondeos de sistema con linterna a distintas velocidades de corriente y dos direcciones de ataque de la corriente (paralela y perpendicular a la línea madre).

Cuando el sistema de cultivo con linternas estuvo perpendicular a la corriente, a una velocidad de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, la magnitud de la fuerza transmitida en los fondeos alcanzó los 249 KgF. La tensión aumentó a 695 KgF cuando la velocidad de la corriente alcanzó los $0,5 \text{ ms}^{-1}$, es decir, la tensión se incrementó en 1,7 veces respecto a la condición anterior.

Finalmente cuando la velocidad de la corriente fue de 1 ms^{-1} , la tensión en sistema de fondeo fue de 1.710 KgF, que equivale a un aumento de 1,4 veces respecto a la condición de corriente de $0,5 \text{ ms}^{-1}$.

Por otro lado, comparando el cambio de dirección de la corriente, a una velocidad de corriente de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, la tensión en el fondeo del sistema con linterna aumentó en un 45%

cuando la dirección cambió de paralela a perpendicular, mientras que a $0,5 \text{ ms}^{-1}$, la tensión en los fondeos aumentó 1,7 veces y a 1 ms^{-1} , la tensión se incrementó en 1,9 veces.

5.1.3. Área sólida, área total y factor de solidez

El área total de la linterna es $0,7 \text{ m}^2$, en tanto que el factor de solidez para la linterna es de 0,1791. Siendo relevante mencionar que estos dos valores no varían para los distintos escenarios (Figura 12).

Por otro lado, el área sólida de la linterna varió en la medida que la velocidad del flujo aumentó. En el escenario sin corriente, la unidad de cultivo registró un área sólida de $0,419 \text{ m}^2$, la que disminuyó a $0,4187 \text{ m}^2$ cuando la velocidad de corriente fue de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, es decir una disminución equivalente a un 0,1% respecto a la condición sin corriente. A una velocidad de corriente de $0,5 \text{ ms}^{-1}$, el área sólida disminuyó en un 3% en comparación al área sólida sin corriente, es decir alcanzó los $0,4063 \text{ m}^2$. Finalmente, a una velocidad de 1 ms^{-1} , el área sólida fue de $0,2822 \text{ m}^2$, equivalente a una disminución en un 33% del área sólida del escenario inicial sin corriente (ANEXO 3).

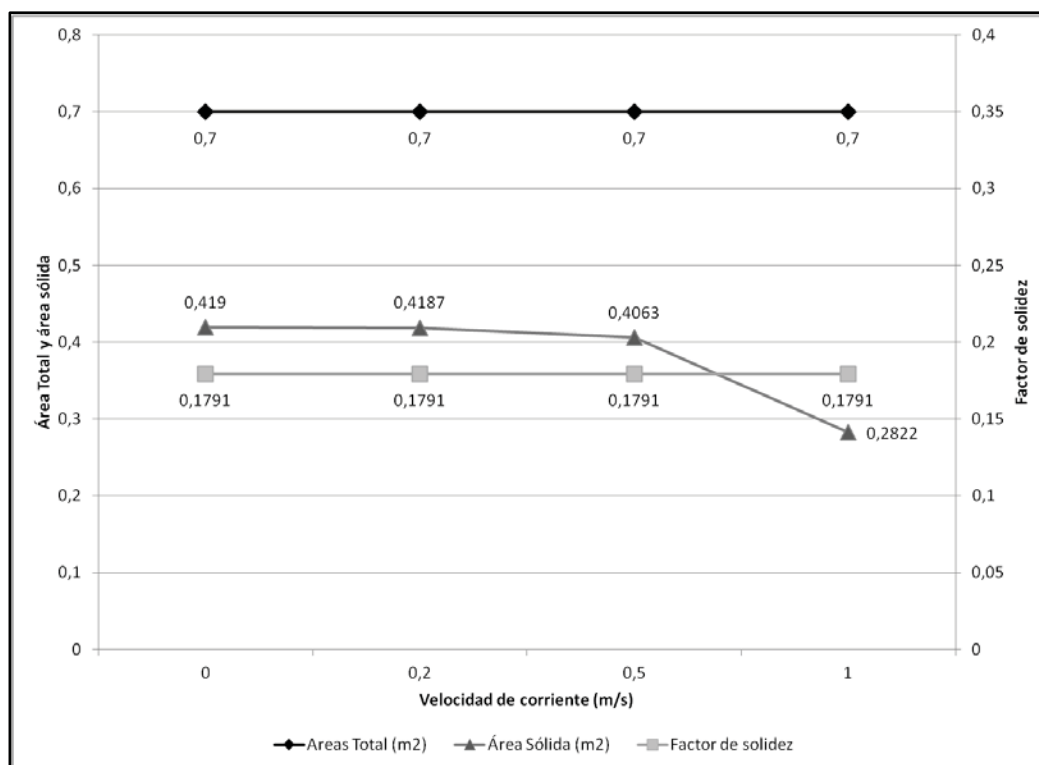


Figura 11: Área total, factor de solidez, área sólida y cambio relativo del área sólida de la primera linterna de la línea madre para velocidades de corriente de 0,2, 0,5 y 1 ms⁻¹.

5.2. Simulación dinámica de long-line que emplea cuelga de pearl-net.

5.2.1. Ángulo de inclinación

Por otro lado, de los resultados obtenidos en el modelo con cuelgas de pearl-net, cuando la corriente es paralela se observó que a una velocidad de corriente de 0,2 ms⁻¹, el ángulo de inclinación de la primera columna con pearl-net fue de 0,6°, mientras que la novena columna lo hizo en 0,1° y la última columna no registró inclinación (Figura 4). Al aumentar la velocidad de la corriente a 0,5 ms⁻¹ los ángulos de la primera, la novena y la última columna alcanzaron 6°, 0,3° y 0,2° respectivamente. Finalmente, con una velocidad de corriente de 1 ms⁻¹, los ángulos alcanzados fueron 38° para la primera columna, mientras que para la novena se inclinó en 2°, finalmente la última columna con pearl-net registró una inclinación de 1°.

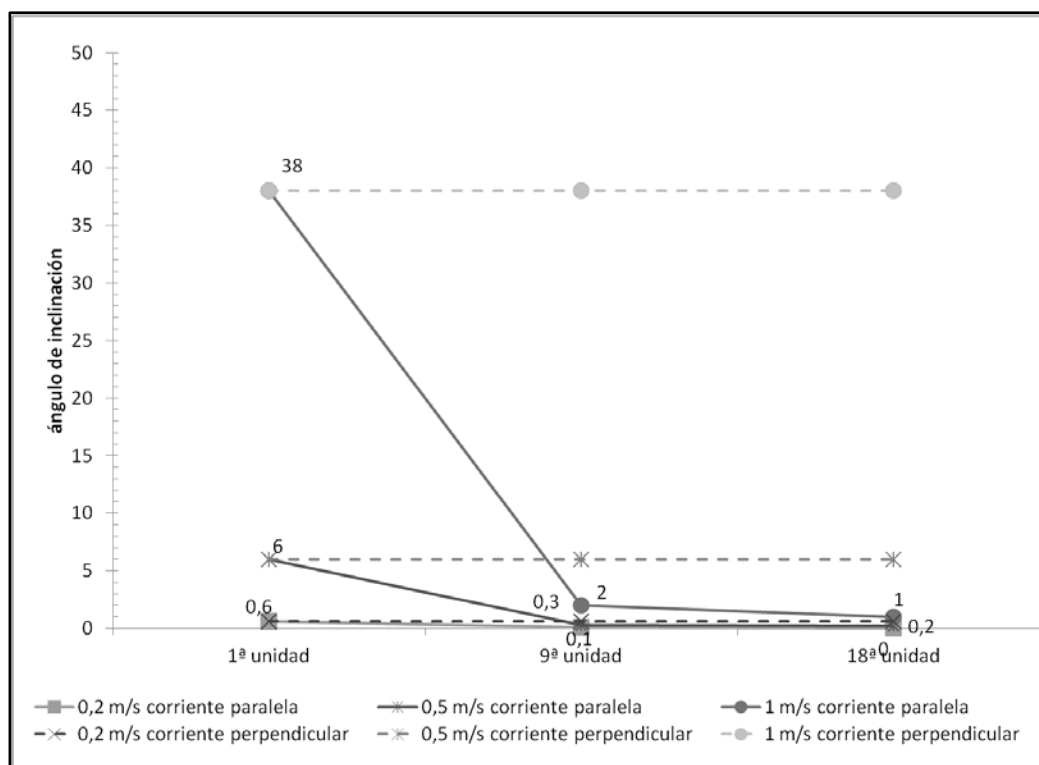


Figura 12: Ángulos de inclinación de los pearl-net a lo largo de la línea madre para distintas velocidades de corriente y para dos direcciones de corriente (paralela y perpendicular a la línea madre).

Con una dirección de la corriente perpendicular al sistema, se observó el mismo ángulo de inclinación en todas las cuelgas de pearl-net a lo largo de la línea madre. Cuando la velocidad fue de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, la inclinación fue de $0,6^\circ$ a lo largo de toda la línea madre. A una velocidad de $0,5 \text{ ms}^{-1}$, la inclinación de las cuelgas de pearl-net fue de 6° . Finalmente cuando la velocidad de la corriente fue de 1 ms^{-1} , el ángulo de inclinación de todas las cuelgas fue de 38° (ANEXO 4).

5.2.2. Tensión

En lo que respecta a las tensiones en el sistema de fondeo, en la condición inicial sin corriente, la tensión alcanzó los 84 KgF (Figura 13). Mientras que frente una corriente paralela al sistema y con una velocidad de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, la tensión fue de 199 KgF. Cuando la velocidad de la corriente fue $0,5 \text{ ms}^{-1}$ hubo un aumento de la tensión equivalente a un 1,4

veces respecto al escenario anterior, llegando a registrar 242 KgF en el sistema de fondeo. Finalmente, cuando la velocidad de corriente fue 1 ms^{-1} , la tensión de los fondeos aumentó a 412 KgF, o sea, se incrementó en 4 veces respecto a la condición anterior de corriente.

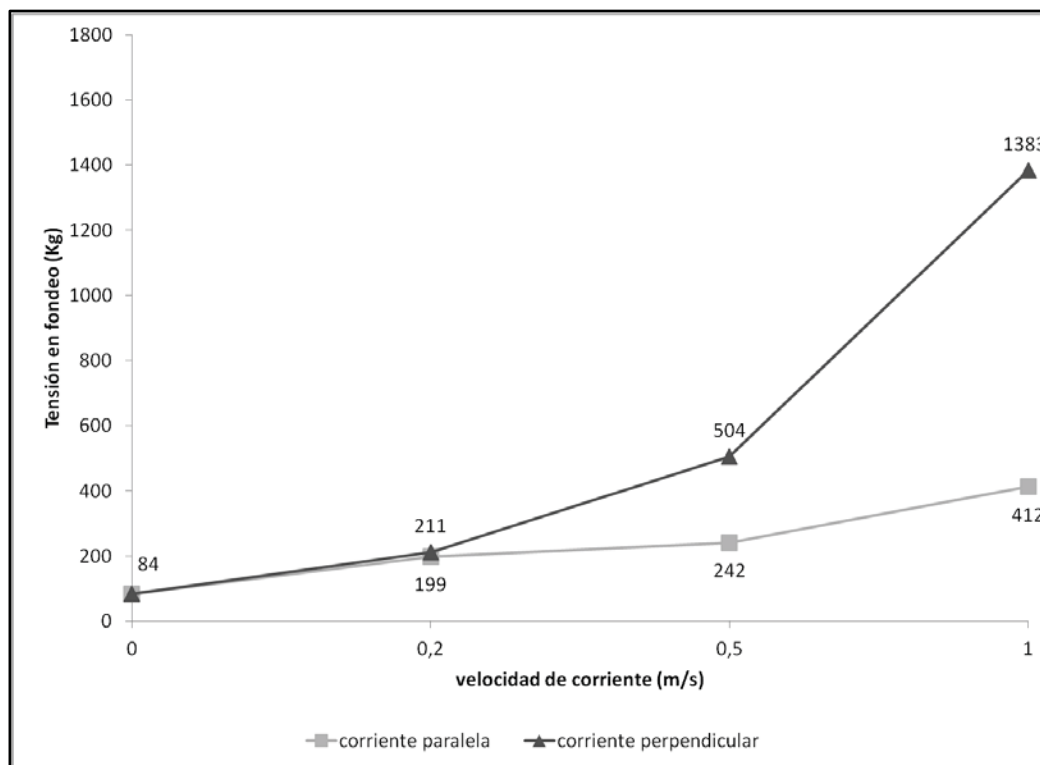


Figura 13: Tensión alcanzada en fondeo de sistema con cuelga de pearl-net a distintas velocidades de corriente y dos ángulos de ataque de la corriente (paralela y perpendicular a la línea madre).

En el otro escenario, cuando la dirección de la corriente fue perpendicular respecto al sistema, a una velocidad de $0,2 \text{ ms}^{-1}$ la tensión alcanzada en el sistema aumentó a 211 KgF. A $0,5 \text{ ms}^{-1}$ la tensión aumentó en 1,4 veces, alcanzando los 504 KgF. Finalmente, cuando la velocidad de corriente fue 1 ms^{-1} , la tensión del sistema de fondeo fue de 1383 KgF, aumentando en 1,7 veces respecto a la condición anterior de corriente (ANEXO 5).

En cuanto al sistema con cuelga de pearl-net, la tensión del sistema de fondeo aumentó en un 6% con el cambio de dirección de corriente de paralela a perpendicular a una velocidad de corriente $0,2 \text{ ms}^{-1}$. Mientras que a $0,5 \text{ ms}^{-1}$ la tensión aumentó en el doble y finalmente, a 1 ms^{-1} la tensión aumentó en 2,4 veces.

5.2.3. Área sólida, área total y factor de solidez

Para la cuelga con 10 pearl-net, el área total de la cara frontal de la cuelga fue de $0,4 \text{ m}^2$ (Figura 14). Mientras que el factor de solidez fue de $0,114$. Ambos parámetros son invariables para el resto de escenarios simulados. Por otro lado, ante un escenario sin corriente el área sólida de la cuelga con pearl-nets fue de $0,152 \text{ m}^2$. Mientras que a una velocidad de corriente de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, el área sólida alcanzada fue de $0,154 \text{ m}^2$, equivalente a un aumento en un $0,8 \%$ del área sólida registrada en el escenario inicial sin corriente. A una velocidad de $0,5 \text{ ms}^{-1}$, el área sólida de la cuelga fue de $0,165 \text{ m}^2$, es decir, el área sólida inicial aumentó en un 8% . Por último, a una velocidad de 1 ms^{-1} , el área sólida alcanzada fue de $0,206 \text{ m}^2$, aumentando en un 35% el área sólida inicial del escenario sin corriente (ANEXO 6).

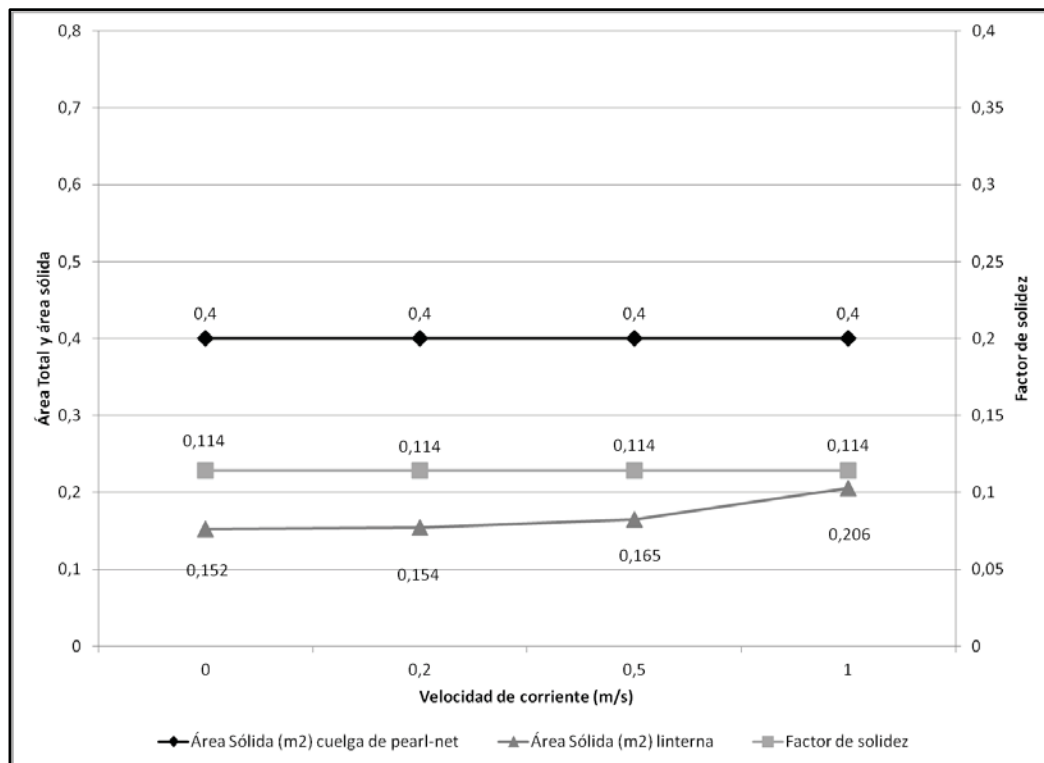


Figura 14: Área total, factor de solidez, área sólida y cambio relativo del área sólida de la primera cuelga con pearl-net de la línea madre para velocidades de corriente de $0,2$, $0,5$ y 1 ms^{-1} .

5.3. Análisis comparativo de los sistemas de cultivo

La Figura 15 permite observar y comparar la respuesta de las unidades de cultivo ante las distintas intensidades de corriente aplicadas de manera paralela al sistema. Frontalmente se puede apreciar cómo el ángulo de inclinación de las unidades aumentó (sobre todo en las primeras unidades que se enfrentan a la corriente) a medida que aumentó la velocidad de la corriente desde $0,2 \text{ ms}^{-1}$ hasta llegar a 1 ms^{-1} . También, es posible observar cómo la inclinación de las unidades de cultivo disminuye a lo largo de la línea madre.

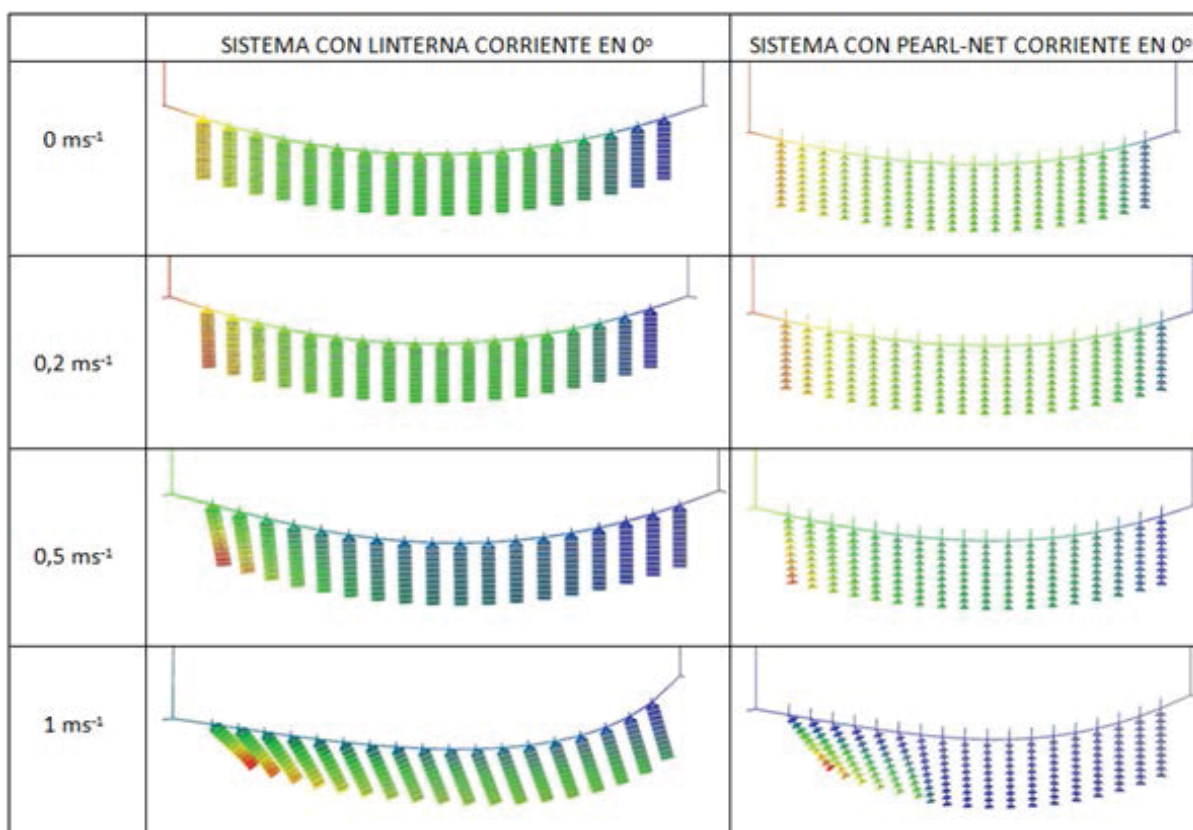


Figura 15: Comparación de desempeño de sistemas de cultivo con linternas y cuelga de pearl-net expuestos a distintas corrientes paralelas a la línea madre y sin corriente.

Por otro lado la Figura 16 permite observar y comparar la respuesta de las unidades de cultivo ante la variación de la velocidad de la corriente aplicada de manera perpendicular

al sistema. Se observó que, para cada sistema, todas las unidades de cultivo presentan prácticamente el mismo ángulo de inclinación a lo largo de la línea madre.

Condición 1	SISTEMA CON LINTERNA CORRIENTE EN 90°	SISTEMA CON PEARL-NET CORRIENTE EN 90°
0 ms ⁻¹		
0,2 ms ⁻¹		
0,5 ms ⁻¹		
1 ms ⁻¹		

Figura 16: Comparación de desempeño de sistemas de cultivo con linternas y cuelga de pearl-net expuestos a distintas corrientes perpendiculares a la línea madre y sin corriente.

Comparando el desempeño de las tensiones alcanzadas por ambos sistemas en el escenario sin corriente, es decir solo con la influencia de las fuerzas hidrostáticas, el sistema con cuelga de pearl-net presentó una tensión un 11% mayor que el sistema con linterna (Tabla 1).

Con la corriente paralela a la línea madre y a una velocidad de 0,2 ms⁻¹, el sistema con cuelga de pearl-net registró una tensión un 14% mayor que la registrada en el sistema con linterna. Mientras que a 0,5 ms⁻¹, la tensión en el sistema con linterna fue un 6% mayor

que la tensión del sistema con cuelga de pearl-net. A una velocidad de 1 ms^{-1} , la tensión en el sistema con linternas fue un 44% mayor que la tensión registrada en el otro sistema.

Tabla 1: Comparación de las tensiones en sistema con linterna respecto a sistema con cuelga de pearl-net.

Velocidad corriente (ms^{-1})	Dirección de la corriente	Diferencia relativa de tensiones sistema con linterna v/s sistema con cuelga de pearl- net
-	-	Menor en un 11%
0,2	paralela	Menor en un 14%
0,5	Paralela	Mayor en un 6%
1	Paralela	Mayor en un 44%
0,2	perpendicular	Mayor en un 18%
0,5	Perpendicular	Mayor en un 38%
1	perpendicular	Mayor en un 24%

En cambio, cuando la dirección de la corriente es perpendicular al sistema, a una velocidad de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, el sistema con linternas registró una tensión un 18% mayor que lo registrado en el sistema con cuelga de pearl-net. A una velocidad de corriente de $0,5 \text{ ms}^{-1}$, el sistema con linterna tuvo una tensión en los fondeos un 38% mayor a la tensión en el sistema con cuelga de pearl-net. Finalmente a 1 ms^{-1} , la tensión registrada en el sistema de fondeo de la línea con linterna fue un 24% mayor que la obtenida en el otro sistema.

La siguiente Tabla 2 resume los resultados obtenidos de área sólida, ángulo de inclinación de la primera cuelga y tensión en fondeos para el sistema con linterna y sistema con cuelga de pearl-net.

Tabla 2: resumen de resultados de área sólida, ángulo de inclinación de primera unidad de cultivo, y tensión en fondeo, para los sistemas con linternas y cuelgas con pearl-net.

Velocidad corriente (ms ⁻¹)	Área Sólida (m ²)		Dirección de la corriente	Ángulo de inclinación (°)		Tensión máxima (KgF)	
	Linterna	Cuelga de Pearl-net		1° linterna	1° cuelga de pearl-net	Sistema con Linterna	Sistemas con cuelga de Pearl-net
0	0,419	0,152				74	84
0,2	0,4187	0,154	paralela	2	0,6	172	199
0,5	0,4063	0,165	paralela	14	6	257	242
1	0,2822	0,206	paralela	46	38	595	412
0,2			perpendicular	2	0,6	249	211
0,5			perpendicular	14	6	695	504
1			perpendicular	46	38	1710	1383

6. DISCUSIÓN

Cuando existen cuerpos que están expuestos a corrientes, estos reaccionan a la fuerza hidrodinámica que se genera por la interacción con el flujo. Estos cuerpos se pueden inclinar o deformar (Loland, 1991). Eso es exactamente lo que ocurrió en ambos sistemas de cultivo modelados al entrar en contacto con la corriente.

Frente a un flujo de corriente paralelo a la línea madre, tanto el sistema con linterna como el sistema con cuelga de pearl-net, presentaron la mayor inclinación en las unidades que primero están en contacto con la corriente, observándose una disminución de la inclinación a medida que el flujo va pasando a través de las unidades de cultivo suspendidas en la línea madre, esto se explica por el denominado efecto sombra. Loland (1991), explica que el efecto sombra es aquel en el que se aprecia cómo las primeras estructuras que se encuentran con la corriente se ven mayormente influenciadas (deformadas o inclinadas), y a medida que la corriente avanza, las estructuras a lo largo del sistema evidencian un menor efecto del flujo sobre ellas.

En este sentido Lee et al. (2008), explica que el efecto sombra ocurre porque la velocidad del flujo disminuye en la medida que atraviesa una serie de paneles de redes, como lo son las paredes de las unidades de cultivo. La tasa de disminución de velocidad o factor de reducción de velocidad de corriente, depende de la velocidad del flujo, del ángulo de ataque de la corriente al panel de red de la unidad de cultivo, y también depende del factor de solidez de la red (Lader & Enerhaug, 2005).

Este efecto sólo se presenta en los escenarios en que la corriente es paralela al sistema. Ya que cuando la corriente es perpendicular al sistema, toda la corrida de unidades de cultivo se enfrenta al mismo tiempo con la corriente, pudiendo observar el mismo ángulo de inclinación en todas las unidades de cultivo a lo largo de la línea madre.

Lader *et al.* (2003), describe cómo la resistencia hidrodinámica tiene dos componentes, la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación. La fuerza de arrastre es normal al flujo y la fuerza de sustentación es perpendicular al flujo. Loland (1991), indica que la fuerza de sustentación es inversamente dependiente del peso, es decir, a mayor peso

de un cuerpo sumergido, menor será la influencia de la fuerza de sustentación capaz de elevar el cuerpo.

En el caso de los sistemas modelados, el peso de la linterna fue de 31,5 kg, mientras que el de la cuelga de pearl-net fue de 31,7 kg. En relación con ello, los resultados obtenidos en los modelos concuerdan con lo indicado por Loland (1991), ya que la linterna, se inclinó más que la cuelga con pearl-nets en todos los escenarios de corriente, es decir, la componentes de sustentación se manifestó con mayor intensidad en el sistema que emplea linterna, unidad que ofrece menor resistencia a ser levantado. Sumado a eso la diferencia en la forma geométrica que también influencia en el tipo de respuesta, la cuelga con pearl-net posee espacios (entre pearl-nets) por los que fluye el agua mas fácilmente, no así la linterna que actúa mas como una pared.

Por consiguiente, bajo estas condiciones de simulación, la cuelga de pearl-net sería más factible de usar, ya que, al ser más pesado que la linterna y por su forma geométrica, se minimiza el efecto de la fuerza de sustentación por parte de la corriente y por consiguiente se inclina menos. Ello porque la cuelga de pearl-net presenta una respuesta hidrodinámica más favorable que evita en mayor medida el acumulamiento de los ejemplares, disminuyendo la probabilidad de generar roce entre los individuos y rotura de los bordes de sus conchas, o, en el peor de los casos, la muerte de a par o muerte por aplastamiento (Pereira, 1995).

Los resultados de estos modelamientos pueden dar explicación a lo observado y descrito por Moya (1998) y Soto (2012), donde en cultivo de etapa intermedia, ambos concluyen que en pearl-net se obtiene mayor tasa de crecimiento en comparación con linterna. Lo puede tener relación con la menor inclinación que alcanza la unidad pearl-net cuando entra en contacto con la corriente. Por lo tanto se generan menos perturbaciones que interrumpen el normal crecimiento del ostión, ya que el ostión del norte es muy sensible a estímulos externos.

Respecto a los demás escenarios, en la medida que aumentó la velocidad de la corriente, las unidades de cultivo se inclinaron cada vez más. Tal evento ocurre porque al aumentar la velocidad de la corriente, se incrementa la resistencia hidrodinámica y aumenta

la componente de sustentación, fuerza que eleva a las unidades de cultivo (e inclinándolas) ya que es una fuerza perpendicular al flujo.

En cuanto a los resultados de los modelos, a una velocidad de corriente de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, el ángulo de inclinación de ambas unidades de cultivo es muy pequeño. La linterna alcanzó un ángulo de 2° y el pearl-net un ángulo de $0,6^\circ$, ángulos muy pequeños que no presentarían problemas para el desarrollo del cultivo del ostión del norte.

En relación con ello, es importante mencionar que las velocidades de corriente registradas en la Bahía de Tongoy y Bahías de Caldera, lugares donde se concentra el cultivo de ostión del norte en nuestro país, presentan una velocidad de corriente que no supera los $0,3 \text{ ms}^{-1}$ a lo largo de todo el año. De hecho, los estudios de correntometría realizados por GEOMAR (2011), indican que la mayor parte del tiempo a lo largo del año (80% de los días del año), las velocidades de corriente en la Bahía de Caldera no superan los $0,27 \text{ ms}^{-1}$. A su vez Uribe & Blanco (2001), mencionan que la máxima velocidad de corriente de la Bahía de Tongoy se registra solo en Verano y posee una velocidad de $0,16 \text{ ms}^{-1}$. En resumidas cuentas, estos últimos antecedentes son bastantes positivos ya que se asemejan mucho a las condiciones simuladas en el presente estudio.

Para velocidad de corriente de $0,5$ y 1 ms^{-1} , el ángulo de inclinación de ambos sistemas de cultivo aumentó considerablemente, ofreciendo un medio de cultivo que no facilitaría el óptimo desarrollo en términos de crecimiento y mortalidad. Por un lado, ante la presencia de perturbaciones los ostiones dejan de alimentarse (Pereira, 1995), disminuyendo su tasa de crecimiento, esto ocurre porque los ostiones cierran sus valvas como un acto reflejo de protección ante movimientos externos, estrés que para ellos representa una amenaza. Además, las inclinaciones en las unidades de cultivo aumentan la probabilidad de que se produzca mayor mortalidad, dado que se genera los fenómenos de la "muerte de par" y la "muerte por amontonamiento".

Ante un escenario real que presente estas velocidades de corriente, una alternativa sería poner un peso en el extremo inferior de las unidades de cultivo, de manera de disminuir la influencia de la fuerza de sustentación que eleva a las unidades y las inclina. Así como lo hace López (2013) y Lader & Enerhaug (2005), que disminuyeron el efecto de

deformación en las redes de las jaulas de cultivo con un aumento en el peso de un anillo cortacorrientes. Además de eso, se debería reforzar el sistema de flotación de las unidades en las cuales se agregue peso, ello para compensar el peso agregado al sistema con un mayor empuje por parte de las boyas.

Si la corriente es paralela al sistema, el peso debería ser incorporado sólo en las unidades de cultivo ubicadas en los extremos de la línea madre ya que por efecto sombra, la corriente disminuye su influencia sobre las unidades de cultivo que están más hacia el centro de la línea madre, de manera que no se inclinan de manera significativa.

A velocidades de 1 ms^{-1} , en el sistema con cuelga de pearl-net deberían incorporarse pesos hasta la decima unidad, ya que a partir de esa unidad, el ángulo de inclinación de las unidades de cultivo baja considerablemente a 2° . Mientras que para el sistema con linterna deberían reforzarse al menos las primeras 18 unidades de cultivo, ya que por lo observado en los resultados de los modelos, todas las unidades de la línea madre registran ángulos de inclinación desde los 46° hasta los 17° .

En el otro caso, o sea, que la corriente tuviese una incidencia perpendicular al sistema de cultivo, todas las unidades de cultivo a lo largo de la línea madre debiesen llevar peso en su extremo inferior. Ello siempre resguardando el equilibrio interno del sistema, lo cual se consigue con un mayor empuje en el sistema de boyantes que soporta a las unidades de cultivo en la línea madre.

Cabe señalar que las velocidad de corriente de $0,5$ y 1 ms^{-1} , son velocidades que se pueden registrar en los canales del sur de Chile, precisamente en los períodos de cambios de marea. Por lo tanto, debiesen tenerse en cuenta las recomendaciones que pueden surgir de este estudio, en el caso de que un cultivo con similares características se quiera llevar a cabo en estas latitudes. Tal como ocurre en Chiloé, donde se desarrolla el cultivo de ostra japonesa y ostra chilena. Estos cultivos emplean el mismo sistema de cultivo long-line con las mismas unidades de cultivo.

Por otra parte, en lo que guarda relación con las tensiones, se observó que cuando no hay corriente, el sistema con cuelga de pearl-net presentó una tensión un 11% mayor que la registrada en el sistema con linterna. Esto guarda relación a lo que plantea Izaguirre *et al.*

(2007), quien indica que las fuerzas hidrostáticas internas de un sistema de cultivo también influirán en las tensiones de los fondeos. Por lo que un mayor peso registrado en la línea madre, se reflejará en una mayor tensión de equilibrio en los fondeos.

En general y en concordancia con lo que plantea Lader & Enerhaug (2005), en ambos modelos las tensiones aumentaron a medida que aumentó la velocidad de la corriente. Dado que la velocidad de la corriente está contenida de manera cuadrática en la función que explica la resistencia hidrodinámica. Por lo que, ante un aumento de la velocidad de la corriente, el efecto sobre la resistencia hidrodinámica será exponencial (Reyes, 1993, citado por López, 2013).

Con una corriente paralela y con una velocidad de $0,2 \text{ ms}^{-1}$, el sistema que emplea cuelga de pearl-net sigue registrando una mayor tensión que el sistema con linterna. Esto podría ser explicado por la presencia de la baja velocidad de corriente, la cual permite que el peso de la cuelga de pearl-net tenga una mayor influencia sobre las tensiones, por sobre lo que hace la resistencia hidrodinámica.

Si bien, la tendencia de la reacción en el sistema con linterna, es que a medida que aumenta la velocidad de corriente, ésta disminuye su área sólida expuesta, es preciso indicar que, en todos los escenarios simulados, la linterna posee una mayor área sólida en comparación con la cuelga con pearl-nets, y es por ese motivo que este sistema registra mayores tensiones en los fondeos, para velocidades de $0,5$ y 1 ms^{-1} . Tal como lo menciona Lader & Enerhaug (2005), quien indica que a mayor área sólida expuesta de la red, mayor será la resistencia hidrodinámica, por ende mayor la tensión que deberá soportar tal fuerza en los fondeos.

Por el contrario, en lo que se refiere al sistema que emplea cuelga de pearl-nets, a medida que aumentó la velocidad de la corriente, el área sólida de la unidad de cultivo, aumentó. Ello ocurre, ya que al aumentar a velocidad del flujo, la cuelga de pearl-net comienza a inclinarse cada vez más, al mismo tiempo que la cara frontal de cada pearl-net, que ya está inclinada hacia atrás, comienza a hacerse cada vez mas vertical, de modo similar a como lo hace una persiana, por ende cada pearl-net ofrece al flujo un área expuesta cada vez más grande. Sin embargo, el área sólida alcanzada por la columna con

pearl-net no supera el área sólida ofrecida por la linterna, por lo que la resistencia hidrodinámica que presenta este sistema es menor que el sistema con linternas.

Con respecto al cambio relativo de las tensiones, se puede mencionar que a medida que aumentó la velocidad de la corriente, en general, la tensión registrada en los fondeos fue mayor en el sistema con linterna. Esto ocurre principalmente, porque al tener una mayor área sólida que la columna con pearl-net, el efecto sobre la resistencia hidrodinámica ante el aumento de la velocidad de corriente, es mayor en una estructura que ofrece una mayor resistencia al flujo ya que actúa más como una pared.

En cuanto al cambio relativo en las tensiones de los fondeos cuando la dirección del flujo pasó de paralela a perpendicular, la mayor diferencia se presentó en el sistema con linternas, excepto cuando la velocidad de corriente fue de 1 ms^{-1} . Este último resultado se explica porque, a 1 ms^{-1} el área sólida que alcanzaron las columnas con pearl-net aumentó en un 35% en comparación al área sólida sin corriente, lo que se ve reflejado en el gran aumento de la tensión. Al mismo tiempo, con la misma velocidad de corriente, el sistema con linterna disminuía su área sólida en un 33% respecto a la condición sin corriente, y eso se refleja en el menor cambio relativo de la tensión.

Es importante recordar que los modelos de los sistemas de cultivo poseen sólo 21 metros de longitud, por lo que los resultados en las tensiones de los fondeos son solo referentes a los sistemas modelados, lo razonable sería que las magnitudes de las tensión en la realidad alcancen valores mayores, en directa relación al número de unidades productivas que poseen los sistemas long-line. Ya que en la realidad las dimensiones de los sistemas long-line alcanzan longitudes de línea madre igual o superior a los 100 metros.

El presente estudio analizó como varió el área sólida sólo en las caras que son transversales y se encuentran de frente a la corriente. Dejando los paneles que se encuentran paralelos a la corriente (caras laterales y piso de las unidades de cultivo) fuera del análisis. Considerando que estos paneles pueden influenciar en los resultados de las tensiones, sobre todo cuando las unidades de cultivo se inclinan.

Otra consideración que se debe tener es que la linterna es un solo cuerpo, el cual reacciona a la corriente en base a las características estructurales de la red empleada, la

forma que posee, su peso, etc. Mientras que el sistema que emplea pearl-net, utiliza una cuelga que está compuesta por 10 unidades de cultivo, en la que cada una está unida con la otra a través de un cabo. Por lo tanto son 10 unidades que están influenciando sobre la reacción hidrodinámica de las unidades que se encuentran atadas a ella.

7. CONCLUSIONES

Cuando la corriente fue paralela a la línea madre de los sistemas, la máxima inclinación de las unidades de cultivo se alcanzó en aquellas que primero entraron en contacto con la corriente. Para el longline con linterna, la primera unidad alcanzó una inclinación de 2°, 14° y 46°, para las velocidades de corriente de 0,2, 0,5 y 1 ms⁻¹ respectivamente. Para esas velocidades de corriente, la tensión alcanzada en los fondeos fue de 172, 257 y 595 KgF respectivamente.

Por otro lado, la primera cuelga de pearl-net alcanzó una inclinación de 0,6°, 6° y 38° para las velocidades de corriente de 0,2, 0,5 y 1 ms⁻¹ respectivamente. Al mismo tiempo que en los fondeos se registraban tensiones de 199, 242 y 412 KgF para las respectivas velocidades de corriente.

En términos de la respuesta hidrodinámica de los sistemas cuando la dirección de la corriente fue perpendicular a la línea madre, en ambos sistemas se observó que las unidades de cultivo se inclinaron en igual medida a lo largo de toda la línea madre. Por su parte, las linternas se inclinaron en 2°, 14° y 46° cuando la velocidad de corriente fue de 0,2, 0,5 y 1 ms⁻¹ respectivamente. Al mismo tiempo que en los fondeos se alcanzaban tensiones de 249, 695 y 1710 KgF para las corrientes referidas.

En cuanto a la respuesta de los pearl-nets, la inclinación de estas unidades fue de 0,6°, 6° y 38° para las respectivas velocidades de corriente de 0,2, 0,5 y 1 ms⁻¹. Mientras que las tensiones registradas para los mismos escenarios de corriente fueron de 211, 504 y 1383 KgF.

Se aprecia que para la mayoría de los escenarios, la respuesta hidrodinámica del sistema con linterna presenta mayor ángulo de inclinación en sus unidades de cultivo, en comparación con los pearl-net, lo que se debe a que posee un menor peso, que permite que la fuerza de sustentación tenga un mayor efecto en la inclinación. Lo que se puede disminuir con un aporte de peso en el extremo de las unidades de cultivo, sin olvidar reforzar el sistema de flotación.

Por otro lado, en el sistema con cuelga de pearl-net se registra mayor tensión en sus fondeos, esto se debe principalmente a que las unidades linterna presentan mayor área sólida, por ende mayor resistencia al flujo de agua. Lo cual se debe tener en cuenta principalmente en zonas donde se presentan altas velocidad de corriente.

En base a todo lo anterior, y bajo las condiciones de simulación se concluye que el sistema con cuelga de pearl-net tiene una mejor respuesta hidrodinámica ya que hay menor inclinación en sus unidades de cultivo, condición que evita el fenómeno de muerte por aplastamiento y la muerte de par, y además presenta menores tensiones en sus fondeos, minimizando el riesgo de colapso y/o pérdida del sistema, por lo que en este caso, dicho sistema sería más favorable de usar en la pectinicultura.

8. BIBLIOGRAFÍA

Aarsnes, J., G. Løland & H. Rudi. 1990. Current forces on cage, net deflection. In: Engineering for Offshore Aquaculture, Thomas Telford, Glasgow, pp. 137–152

Barrientos, 2000. Diseño de un sistema de fondeo de peso muerto para el anclaje de un long-line de cultivo. Tesis para optar al título de ingeniero pesquero. PUCV. Valparaíso. Chile. 3- pp

Berstad, A. J., H. Tronstad & A. Ytterland, 2003. “Safety of aquaculture facilities in rough sea environment- bringing aquaculture beyond fjords and sheltered areas”, Aquaeuro 2003 Trondheim Norway. (Headlines and summary only)

Berstad, A. J., H. Tronstad & A. Ytterland, 2004” Design Rules for Marine Fish Farms in Norway. Calculation of the Structural Response of such Flexible Structures to Verify Structural Integrity.” OMAE 2004, The 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering Vancouver, Canada, 20-25 June, 2004. Paper 51577. ISBN #: 0791837386.

Berstad, A. J. & H. Tronstad, 2005a. “Enhancement of Design Criteria for Fish Farm Facilities Including Operations” OMAE 2005, The 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering Khalkidhiki, Greece, 12-17 June, 2005. Paper 67451. ISBN #: 0791837599.

Berstad, A. J. & H. Tronstad, 2005b. “Response from current and regular/irregular waves on a typical polyethylene fish farm “Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources. Eds. C. Guedes Soares, Y. Garbatov, N. Fonseca. 2005. Taylor & Francis Group London. ISBN #: 0 415 39036 2.

Berstad, A. J., J. Walaunet & L. F. Heimstad. 2012. Loads from currents and waves on net structures. In: Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2012, July 1-6, 2012, Rio de Janeiro.

Berteaux, H. 1976. Buoy engineering. John Wiley & Sons, New York, 305 pp.

Carnicero, A. (2001). Introducción al Método de los Elementos Finitos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI (Universidad Pontificia Comillas, Madrid). España.

Carroza, L. 1990. Determinación de una metodología para la selección y dimensionamiento de un sistema para un long-line de cultivo. Tesis de Pesquerías. Escuela de Ciencias del Mar, UCV, 194 pp.

Clough, R. W. (1960). The finite element method in plane stress analysis, Proceedings, 2nd Conference on Electronic Computation, A.S.C.E. Structural Division, Pittsburgh, Pennsylvania.

Concha, M. 1998. Diseño y dimensionamiento de un long-line de cultivo utilizando la ingeniería del conocimiento. Tesis para optar al título de ingeniero pesquero. PUCV, pp. 18-36

Diarte, G. 2007. Cultivo experimental de la almeja mano de león *Nodipecten subnodosus* (Sowerby, 1835) en la costa Norte de Sinaloa, México. Tesis para obtener el grado de maestro en recursos naturales y medio ambiente. 87pp.

FAO. 2005. National Aquaculture Sector Overview. Perú. National Aquaculture Sector Overview Fact Sheets. Text by Soto Cárdenas, G. I. disponible en sitio web en: http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso_peru/en

Fredriksson, D. W., C. Steppe, L. Wallendorf, S. Sweeney & D. Kriebel. 2010. Biological and hydrodynamic design considerations for vertically oriented oyster grow out structures. *Aquacultural Engineering* 42: 57–69

Garrido, R. (2011). Crecimiento y sobrevivencia del Ostión del norte *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819), en dos sistemas de cultivo, pearl-nets y linternas modificadas. Tesis para optar al grado de ingeniero acuicultor. UCN. 23 pp.

GEOMAR, 2001. Estudios correntometría Euleriana en Punta Fuerte- Caldera III Región de Atacama. Chile. 43 pp.

González, C., R. Manzanilla & R. Feijoo. 1993. El método de elementos finitos adaptable, estimaciones de error. *Rev. Int. de Met. Núm. para Calc. y Dis. en Ing.* Vol. 9, 4, 417-437 pp.

Grizzle, R.E., R. Langan, & W. H. Howell. 1992. Growth responses of suspension-feeding bivalve molluscs to changes in water flow: differences between siphonate and nonsiphonate. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 162: 213-228.

Grizzle, R. E. & R. A. Lutz, 1989. A statistical model relating horizontal seston fluxes and bottom sediment characteristics to growth of *Mercenaria mercenaria*. *Mar. Biol.* 102: 95-105.

Izaguirre, P., Serván, B., Núñez, J., Lara, J., Soto, A. 2007. Cálculo de esfuerzos en jaulas de cultivo y líneas de fondeo. Artículo Técnico. JAULAS CULTIVO 96-104 19/3/07 10:32 Página 96. CEHINAV. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). 96-104 pp.

Lader, P.F., Enerhaug, B., Fredheim, A., Krokstad, J. 2003. Modeling of 3D Net Structures Exposed to Waves and Current. 3rd International Conference on Hydroelasticity in Marine technology, Oxford, UK, 15-17 pp.

Lader P. & B. Enerhaug. 2005. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow. *IEEE J. Ocean Eng.* 30: 79–84.

Lee, C., Kim, Y., Lee, G., Choe, M., Lee, M. & Koo, K. 2008. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves. *Ocean Engineering* 35. 1521–1532 pp.

Loland, G., 1991. Current forces on cage, net deflection. In: Division of Marine Hydrodynamics, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.

López, J. 2013. Análisis del desempeño de un módulo de balsas jaulas en términos de fuerzas resistivas y volúmenes de cultivo. Tesis para optar al grado de ingeniero acuicultor. PUCV. 52 pp.

Manzi, J. J., N. H. Hadley & M. B. Maddox. 1986. Seed clam, *Mercenaria*, culture in an experimental-scale up flow nursery system. *Aquaculture* 54: 301-311.

Moisés, L. 2007. Análisis del diseño en elemento finito del amortiguador para el tren principal de una aeronave de radio control para la competencia SAE Aero Design. Tesis para obtener el título en Licenciatura en Ingeniería Mecánica. UDLAP. México

Moya, L .1998. Efecto del fouling en el crecimiento de ostiones *Argopecten purpuratus* (Lamarck,1819), cultivados en pearl-net en bahía Tongoy IV región, Coquimbo. 100pp.

Pereira, L. 1995. Tecnología de cultivos de bivalvos en ambiente natural. Curso internacional de cultivo de moluscos. UCN-JICA. Coquimbo. PP. 135-166.

Sala, A. & A. Lucchetti (2008). Low-cost tool to reduce biofouling in oyster long-line culture. *Acuicultura Ingeniería* 39 53-58

Soto, M. (2012). Comparación del crecimiento del Ostión del Norte (*Argopecten purpuratus*) en dos sistemas alternativos de cultivo: pearl-net y linternas. Tesis para optar al grado de ingeniero acuicultor. PUCV. Pp- 18.

Thoms, A. 1989. *Pointers to safer moorings*. Fish Farmer. 12 (3), 27-28.

Rodhouse, P.G. & C.M. Roden. 1987. Carbon budget for a coastal inlet in relation to intensive cultivation of suspension-feeding bivalve molluscs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 36:225-236.

Tronstad, H. (2000) “Nonlinear Hydroelastic Analysis and Design of Cable Net Structures Like Fishing Gear Based on the Finite Element Method” PhD thesis. Institute of Marine Technology NTNU, Trondheim.

Uribe, E., & J. Blanco. 2001. Capacidad de los sistemas acuáticos para el sostenimiento del cultivo de pectínidos: el caso de *Argopecten purpuratus* en la bahía Tongoy, Chile. Capítulo 12. Pp. 1-16.

Vera, D. A. & D. Aldana. 2000. Crecimiento y sobrevivencia de semillas del ostión *Crassostrea virginica* en una granja camaronícola en Yucatán, México. *Rev. Biol. Trop.* 48.Supl. pp. 1-17

9. ANEXOS

ANEXO 1: Ángulo de inclinación de linternas a distintas velocidades de corriente y ángulo de incidencia de la corriente.

Velocidad corriente (ms ⁻¹)	Ángulo de incidencia (°)	Ángulo de inclinación de la unidad de cultivo (°)		
		Linterna 1	Linterna 9	Linterna 18
0,2	0	2	0,2	0
0,5	0	14	1	0
1	0	46	22	17
0,2	90	2	2	2
0,5	90	14	14	14
1	90	46	46	46

ANEXO 2: Tensión máxima registrada en fondeo de sistemas de cultivo que emplea linterna.

Velocidad corriente (ms ⁻¹)	Ángulo de incidencia (°)	Tensión máxima (KgF) línea con linternas	Cambio relativo de la tensión
0	0	74	-
0,2	0	172	-
0,5	0	257	Aumentó en 49%
1	0	595	Aumentó en 132%
0,2	90	249	-
0,5	90	695	Aumentó en 179%
1	90	1710	Aumentó en 146%

ANEXO 3: Área total, factor de solidez, área sólida y cambio relativo del área sólida de la primera linterna de la línea madre para velocidades de corriente de 0,2, 0,5 y 1 ms⁻¹.

Velocidad corriente (ms ⁻¹)	Área Total (m ²)	Factor de solidez	Área Sólida (m ²)	Cambio relativo del área sólida
0	0,700	0,1791	0,4190	
0,2	0,700	0,1791	0,4187	Disminuyó en un 0,1%
0,5	0,700	0,1791	0,4063	Disminuyó en un 3%
1	0,700	0,1791	0,2822	Disminuyó en un 33%

ANEXO 4: Ángulo de inclinación de cuelga de pearl-net a distintas velocidades de corriente y ángulo de incidencia de la corriente.

Velocidad corriente (ms ⁻¹)	Ángulo de incidencia (°)	Ángulo de inclinación de la unidad de cultivo (°)		
		cuelga de pearl-net 1	cuelga de pearl-net 9	cuelga de pearl-net 18
0,2	0	0,6	0,1	0
0,5	0	6	0,3	0,2
1	0	38	2	1
0,2	90	0,6	0,6	0,6
0,5	90	6	6	6
1	90	38	38	38

ANEXO 5: Tensión máxima en línea madre y fondeo en sistemas de cultivo con cuelga de pearl-net.

Velocidad corriente (ms-1)	Ángulo de incidencia (°)	Tensión máxima (KgF) línea con cuelga de Pearl-net	Cambio relativo de la tensión
0	0	84	-
0,2	0	199	-
0,5	0	242	Aumentó en 22%
1	0	412	Aumentó en 70%
0,2	90	211	-
0,5	90	504	Aumentó en 139%
1	90	1383	Aumentó en 174%

ANEXO 6: Área total, factor de solidez, área sólida y cambio relativo del área sólida de la primera cuelga de pearl-net de la línea madre para velocidades de corriente de 0,2, 0,5 y 1 ms-1.

Velocidad corriente (ms-1)	Área Total (m2)	Factor de solidez	Área Sólida (m2)	Cambio relativo del área sólida
0	0,400	0,1140	0,152	
0,2	0,403	0,1140	0,154	Aumentó en 0,8%
0,5	0,429	0,1140	0,165	Aumentó en 8%
1	0,500	0,1140	0,206	Aumentó en 35%

ANEXO 7: Cambio relativo de la tensión de los fondeos de los sistemas con el cambio de dirección de la corriente de paralela a perpendicular.

Velocidad corriente (ms^{-1})	Sistema con linternas	Sistema con cuelga de pearl-net
	Cambio relativo de la tensión modificando la dirección de la corriente de 0° a 90°	Cambio relativo de la tensión modificando la dirección de la corriente de 0° a 90°
0,2	aumentó en 45%	aumentó en 6%
0,5	aumentó en 171%	aumentó en 108%
1	aumentó en 187%	aumentó en 235%