

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**

FACULTAD DE INGENIERÍA PESQUERA Y CIENCIAS DEL MAR

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PESQUERA ACUÍCOLA



**Tolerancia de *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819) a la hipoxia severa y temperaturas en condiciones de laboratorio**

TESIS

Para optar el título profesional de ingeniera pesquera acuícola

Br. Cindy Alexandra Calderón Román

TUMBES, 2022

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**

FACULTAD DE INGENIERÍA PESQUERA Y CIENCIAS DEL MAR

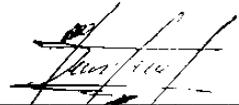
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PESQUERA ACUÍCOLA



**Tolerancia de *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819) a la hipoxia severa y temperaturas en condiciones de laboratorio**

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. Ing. Leocadio Malca Acuña

  
\_\_\_\_\_  
PRESIDENTE

Dr. Ing. Martin Amaya Ayala

  
\_\_\_\_\_  
SECRETARIO

Mtra. Ing. María Zoraida Ubillus Bravo

  
\_\_\_\_\_  
VOCAL

TUMBES, 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES  
FACULTAD DE INGENIERÍA PESQUERA Y CIENCIAS DEL MAR  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PESQUERA ACUÍCOLA



**Tolerancia de *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819) a la hipoxia severa y temperaturas en condiciones de laboratorio**

Los suscritos declaramos que la tesis es original en contenido y forma:

Br. Cindy Alexandra Calderón Román (Ejecutor)

Dr. David Edilberto Saldarriaga Yacila (Asesor)

Dr. Edgar Cruz Acevedo (Co-asesor)

TUMBES, 2022



"AÑO DEL FORTALECIMIENTO DE LA SOBERANÍA NACIONAL"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

En la localidad de Tumbes, a los veintiséis días del mes de agosto, siendo las once horas, en forma virtual, se reunió el jurado Dr. Leocadio Malca Acuña (Presidente), Dr. Martín Amaya Ayala (Secretario) y Mg. María Zoraida Ubillus Bravo (Vocal); y en su condición de asesor Dr. David Edilberto Saldarriaga Yacila (Resolución N° 0039-A-2021/UNTUMBES-FIPCM-D., del 28 de octubre del 2021), para escuchar, deliberar, evaluar y calificar la sustentación de la tesis titulada: "Tolerancia de *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819) a la hipoxia severa y temperaturas a condiciones de laboratorio", para optar el Título Profesional de INGENIERO PESQUERO ACUICOLA, presentado por la:

**Br. CINDY ALEXANDRA CALDERÓN ROMÁN**

Concluida la sustentación, absueltas las preguntas, por parte del sustentante y después de la deliberación, el jurado según el artículo N° 65 del Reglamento de tesis de pregrado y posgrado, declara a la:

**Br. CINDY ALEXANDRA CALDERÓN ROMÁN APROBADO** con calificativo de **SOBRESALIENTE**

En consecuencia, queda **EXPEDITO** para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del título profesional de Ingeniero Pesquero Acuicola, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria N° 30220, el Estatuto y el Reglamento de tesis de pregrado y posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes.

Se hace conocer a la sustentante, que deberá levantar las observaciones finales hechas al informe de la tesis, que el Jurado le indica.

Siendo las once y cincuenta y siete horas del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, procediendo a firmar el acta en señal de conformidad.

Tumbes, 26 de agosto del 2022

Dr. Leocadio Malca Acuña  
Presidente

Dr. Martín Amaya Ayala  
Secretario

Mg. María Zoraida Ubillus Bravo  
Vocal

C.C.:  
- Jurado (03)  
- Interesado

- Asesor: Dr. D. Saldarriaga Y.  
- Archivo Decanato.

Los Celbos S/N. Puerto Pizarro. Tumbes – Perú

# Tolerancia de *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819) a la hipoxia severa y temperaturas en condiciones de laboratorio

## INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>14%</b>	<b>14%</b>	<b>3%</b>	<b>2%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>repositorio.lamolina.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>4%</b>
<b>2</b>	<b>repositorio.unp.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>3</b>	<b>www.scielo.org.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>www.lamolina.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>cdn.www.gob.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>6</b>	<b>cybertesis.unmsm.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	<b>repositorio.concytec.gob.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	<b>Submitted to Universidad Nacional de Tumbes</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>

Dr. DAVID EDILBERTO SALDARRIAGA YACILA  
Asesor

9	Arturo Aguirre-Velarde, Gérard Thouzeau, Fred Jean, Jaime Mendo et al. "Chronic and severe hypoxic conditions in Paracas Bay, Pisco, Peru: Consequences on scallop growth, reproduction, and survival", Aquaculture, 2019 Publicación	<1 %
10	revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
11	agenciaorbita.org Fuente de Internet	<1 %
12	delfin.cicimar.ipn.mx Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.untumbes.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.upeu.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1 %
15	www.kaiseiken.or.jp Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.upch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %



Dr. DAVID EDILBERTO SALDARRIAGA YACILA  
Asesor

19	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://www.frontiersin.org">www.frontiersin.org</a> Fuente de Internet	<1 %
21	<a href="http://www.vliz.be">www.vliz.be</a> Fuente de Internet	<1 %
22	<a href="http://cibnor.repositorioinstitucional.mx">cibnor.repositorioinstitucional.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
23	<a href="http://livrosdeamor.com.br">livrosdeamor.com.br</a> Fuente de Internet	<1 %
24	<a href="http://www.scribd.com">www.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %
25	<a href="http://creativecommons.org">creativecommons.org</a> Fuente de Internet	<1 %
26	<a href="http://issuu.com">issuu.com</a> Fuente de Internet	<1 %
27	<a href="http://oa.upm.es">oa.upm.es</a> Fuente de Internet	<1 %
28	<a href="http://repositorio.cucba.udg.mx:8080">repositorio.cucba.udg.mx:8080</a> Fuente de Internet	<1 %
29	<a href="http://revistas.pucp.edu.pe">revistas.pucp.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
30	<a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %

  
 Dr. DAVID EDILBERTO SALDARRIAGA YACILA  
 Asesor

## DEDICATORIA

A Dios y mis santos por estar siempre presente en todo momento transcurrido de mi vida, dándome las fuerzas necesarias y estoy segura siempre estarán conmigo.

A mis amados padres Alex Manuel Caderón Cruz y Gloria Roman Tandazo por el esfuerzo y sacrificio que han hecho en todos mis años de estudio, por apoyarme y aconsejarme de la mejor manera en cada reto que me he propuesto.

A mis tres hermanos y sobrino por ser el motivo de mi superación día a día y al resto de mi familia por el apoyo moral.

## AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a CONCYTEC-FONDECYT “SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA DEL ECOSISTEMA MARINO-COSTERO FRENTE A LOS RIESGOS CLIMÁTICOS”, de la convocatoria E038-01, contrato 034-2019, por el financiamiento otorgado para el desarrollo de mi proyecto de tesis.

Al Centro de Investigación para el Desarrollo Integral y Sostenible (CIDIS), de la UNIVERSIDAD PERUANA CAYETANO HEREDIA (UPCH) por facilitar sus instalaciones, así como el apoyo logístico y operativo durante la realización de los experimentos.

A mis asesores: Dr. David Saldarriaga Yacila por su apoyo y confianza y en especial al Dr. Edgar Cruz Acevedo por su permanente apoyo, su orientación, su motivación, su paciencia, por ser un soporte fundamental para la culminación de mi tesis y por abrirme las puertas de su casa.

Al Dr. Arturo Aguirre Velarde por su orientación, estrategias y conocimiento para la realización de este trabajo y a todo el quipo en las diferentes areas del CIDIS: Adderly Aguirre, Eder Fiestas, Alejandra Jara, Ana Lucia Mares, Carlos Contreras, Jasmine Granda, Daniel Flores, Melissa Mejia, Natalie Bravo y Laura Estrella Salinas por apoyarme durante la experimentación y haberme brindado su Amistad.

A la Asociación de Maricultores de la Bahía de Sechura, en especial a los productores del campamento Bayóvar–Vichayo, de las asociaciones Juanita Elisa y Huamachuco, así como a Comtemar SAC, por la donación de los ejemplares de *Argopecten purpuratus* utilizados en la tesis.

A mi padres, hermanos, sobrinos, familia y amiga Victoria Moscol por su apoyo incondicional y motivarme a seguir adelante.

Y finalmente, agradecer enormemente a Dios y a mis santos por siempre acompañarme y guiarme mi camino.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiv
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
I. INTRODUCCIÓN .....	17
1.1. El cultivo de la concha de abanico en el Perú .....	17
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	22
2.1. El fenómeno de El Niño .....	22
2.2. Afloramientos costeros .....	23
2.3. Producción de la concha de abanico en las costas peruanas .....	24
2.4. Respuestas metabólicas de los moluscos bivalvos a estresores ambientales .....	25
2.4.1. Tolerancia térmica .....	26
2.4.2. Tolerancia a la hipoxia .....	26
2.5. Estudios sobre el efecto de la hipoxia en la concha de abanico .....	27
2.6. Estudio sobre el efecto de la variación de la temperatura .....	28
2.7. Estudios sobre la hipoxia y temperatura en otras especies de moluscos bivalvos .....	30
2.8. Biología y ecología de <i>Argopecten purpuratus</i> .....	32
2.8.1. Clasificación taxonómica .....	32
2.8.2. Habitación .....	33
2.8.3. Características de la especie .....	33
2.8.4. Distribución .....	34
2.8.5. Ciclo biológico .....	34
2.8.6. Alimentación .....	35
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	37
3.1. Lugar de experimentación .....	37
3.2. Diseño experimental .....	38
3.3. Procedimiento de semilla y aclimatación .....	40
3.4. Limpieza y mantenimiento .....	41

3.5.	Índice de condición .....	41
3.6.	Instalación de sistema de experimentación .....	42
3.6.1.	Regulación del gas nitrógeno (N <sup>2</sup> ) .....	43
3.6.2.	Regulación de temperatura .....	45
3.7.	Temperatura letal media .....	46
3.8.	Experimentación de estimación del tiempo letal medio .....	48
3.9.	Análisis estadísticos .....	48
3.9.1.	Cálculo de las curvas de sobrevivencia .....	48
3.9.2.	Curvas de sobrevivencia por tallas .....	49
3.9.3.	Curvas de control de variables fisicoquímicas .....	49
IV.	RESULTADOS .....	50
4.1.	Temperatura letal medio bajo saturación de oxígeno normal .....	50
4.1.1.	Curvas de sobrevivencia de organismos control .....	50
4.1.2.	Curvas de sobrevivencia de organismos control por tallas ...	51
4.2.	Temperatura letal media a 20% de saturación de oxígeno .....	52
4.2.1.	Control de variables fisicoquímicos .....	52
4.2.2.	Curva de sobrevivencia por talla para el tratamiento de 20% de saturación de oxígeno .....	53
4.2.3.	Curva de sobrevivencia de organismos para el tratamiento de 20% de saturación por tallas .....	54
4.3.	Temperatura letal media a 5% de saturación de oxígeno .....	55
4.3.1.	Control de variables fisicoquímicos .....	55
4.3.2.	Curva de sobrevivencia por talla para el tratamiento de 5% de saturación de oxígeno .....	56
4.3.3.	Curva de sobrevivencia de organismos para el tratamiento de 5% de saturación por tallas .....	57
4.4.	Temperatura letal media a 2% de saturación de oxígeno .....	58
4.4.1.	Control de variables fisicoquímicos .....	58
4.4.2.	Curva de sobrevivencia por talla para el tratamiento de 2% de saturación de oxígeno .....	59
4.4.3.	Curva de sobrevivencia de organismos para el tratamiento de 2% de saturación por tallas .....	60

4.4.4.	Implicaciones de la teoría de la tolerancia térmica en la resistencia de la concha de abanico a la combinación hipoxia-temperatura.....	61
4.5.	Tiempo letal medio en simulaciones del afloramiento costero e hipoxia severa.....	62
4.5.1.	Control de variables fisicoquímicas.....	62
4.5.2.	Curva de sobrevivencia para la interacción afloramiento costero-hipoxia severa.....	64
4.6.	Tiempo letal medio en simulaciones de El Niño costero e hipoxia severa.....	67
4.6.1.	Control de condiciones fisicoquímicas.....	67
4.6.2.	Curva de sobrevivencia para la interacción El Niño costero - hipoxia severa.....	68
4.6.3.	Curva de sobrevivencia para la interacción El Niño costero-hipoxia severa.....	70
4.6.4.	Implicaciones de manejo en zonas de cultivo.....	71
V.	CONCLUSIONES .....	74
VI.	RECOMENDACIONES .....	75
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	76
VIII.	ANEXOS .....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tratamientos resultantes de la combinación de temperatura y saturación de oxígeno para los experimentos de temperatura letal media y tiempo letal medio .....	39
Tabla 2. Conversión de la saturación de oxígeno (%) a mg/l, de acuerdo con la ley de Henry .....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Morfología de la valva de <i>Argopecten purpuratus</i> .....	34
Figura 2. Ciclo de vida de la concha de abanico <i>A. purpuratus</i> .....	35
Figura 3. Vista satelital de la ubicación del lugar de experimentación: Centro de Investigación para el Desarrollo Integral y Sostenible (CIDIS), El Ñuro-Piura.....	37
Figura 4. Procedimiento de traslado de los ejemplares de conchas de abanico provistos de la Bahía de Sechura .....	40
Figura 5. Sistema de aclimatación a flujo abierto para los ejemplares de conchas de abanico .....	41
Figura 6. Obtención del peso fresco (A) y peso seco de la concha de abanico (B) para analizar el índice de condición y porcentaje de humedad. ....	42
Figura 7. Montaje del sistema de experimentación para los distintos tratamientos de hipoxia-temperatura en la concha de abanico .....	43
Figura 8. Sistema controlador de inyección de gas N <sub>2</sub> .....	44
Figura 9. Sistema regulador de temperatura para los distintos experimentos .....	45
Figura 10. Conteo y medición de conchas de abanico muertas por cada experimento .....	47
Figura 11. Montaje del experimento a temperatura gradual e hipoxia, cuando la temperatura estaba por encima de 27 °C .....	48
Figura 12. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> para el experimento de temperatura letal media bajo condiciones normales de oxígeno (>95 °C).....	51

Figura 13. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> para el experimento de temperatura letal media bajo condiciones normales de oxígeno (>95 °C), por tallas .....	52
Figura 14. A) Curva de control de temperatura y B) saturación de oxígeno (%) en el experimento de temperatura letal media a 20% de saturación de oxígeno.....	53
Figura 15. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> para el experimento de temperatura letal media a 20% de saturación de oxígeno.....	54
Figura 16. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> para el experimento de temperatura letal media a 20% de saturación de oxígeno, por tallas.....	55
Figura 17. A) Curva de control de temperatura y B) saturación de oxígeno (%) en el experimento de temperatura letal media a 5% de saturación de oxígeno.....	56
Figura 18. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> para el experimento de temperatura letal media a 5% de saturación de oxígeno.....	57
Figura 19. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> para el experimento de temperatura letal media a 5% de saturación de oxígeno, por tallas.....	58
Figura 20. A) Curva de control de temperatura y B) saturación de oxígeno (%) en el experimento de temperatura letal media a 2% de saturación de oxígeno.....	59
Figura 21. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> para el experimento de temperatura letal media a 2% de saturación de oxígeno.....	60
Figura 22. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> para el experimento de temperatura letal media a 2% de saturación de oxígeno, por tallas.....	61

Figura 23. A) Curva de control de temperatura y B) saturación de oxígeno (%) en el experimento de tiempo letal medio para la interacción afloramiento costero-hipoxia severa.....	63
Figura 24. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> en el experimento de interacción afloramiento costero-hipoxia severa.....	65
Figura 25. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> en el experimento de interacción afloramiento costero-hipoxia severa, por tallas.....	66
Figura 26. A) Curva de control de temperatura y B) saturación de oxígeno (%) en el experimento de tiempo letal medio para la interacción El Niño costero-hipoxia severa.....	67
Figura 27. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> en el experimento de interacción El Niño costero-hipoxia severa.....	69
Figura 28. Curva de sobrevivencia de <i>Argopecten purpuratus</i> en el experimento de interacción El Niño costero-hipoxia severa, por tallas.....	70

## **Tolerancia de *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819) a la hipoxia severa y temperaturas en condiciones de laboratorio**

Br. Cindy Alexandra Calderón Román

Dr. David Edilberto Saldarriaga Yacila

Dr. Edgar Cruz Acevedo

### **RESUMEN**

En épocas recientes, se han registrado mortalidades masivas en los cultivos de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en el Perú, principalmente en las bahías de Paracas y Sechura, debido a factores ambientales, como la hipoxia (<20 % de saturación de oxígeno; O<sub>Dsat</sub>), y el calentamiento del agua, principalmente durante la ocurrencia del Fenómeno El Niño. El objetivo de este trabajo fue determinar la tolerancia de *Argopecten purpuratus* a la combinación de diferentes niveles de hipoxia y temperaturas, mediante experimentos de laboratorio. Se utilizaron dos tamaños de organismos: chicos (< 35 mm) y grandes (> 50 mm). Primero se evaluó la temperatura letal media (TeL<sub>50</sub>) a 20%, 5% y 2% O<sub>Dsat</sub>, aumentando gradualmente la temperatura (1 °C por día), a partir de 16 °C, hasta obtener 100% de mortalidad; luego se evaluó el tiempo letal medio (TL<sub>50</sub>), simulando temperaturas del Sistema de Afloramiento Costero del Perú (16 °C) y El Niño costero (25 °C), bajo hipoxia severa (2% O<sub>Dsat</sub>). Las conchas de abanico tuvieron valores similares en la TeL<sub>50</sub> bajo normoxia (95% O<sub>Dsat</sub>: 31 °C), hipoxia moderada (20% O<sub>Dsat</sub>: 30 °C) y el límite superior de la hipoxia severa (5% O<sub>Dsat</sub>: 29 °C); sin embargo, la TeL<sub>50</sub> fue mucho menor a 2% O<sub>Dsat</sub>: 23 °C, donde posiblemente el metabolismo sufrió alteraciones debido a la reducción de la capacidad oxirreguladora; siendo las más pequeñas las más tolerantes. Los organismos fueron resistentes (LT<sub>50</sub>: 120 horas) a condiciones tipo afloramiento costero (25 °C; 2% O<sub>Dsat</sub>), sin embargo, al exponerlas a condiciones tipo El Niño (25 °C; 2% O<sub>Dsat</sub>), disminuyeron su oxirregulación, alcanzando la TL<sub>50</sub> a las 12 horas y el 100% de mortalidad a las 24 horas, sin importar su tamaño. La combinación temperaturas altas e hipoxia severa podrían ser los posibles causantes de las mortalidades reportadas en el Perú.

**Palabras clave:** Hipoxia, altas temperaturas, El Niño, Sistema de Afloramiento Costero del Perú, manejo de cultivos.

## **Tolerance of *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819) to severe hypoxia and temperatures under laboratory conditions**

Br. Cindy Alexandra Calderón Román

Dr. David Edilberto Saldarriaga Yacila

Dr. Edgar Cruz Acevedo

### **ABSTRACT**

In recent times, massive mortalities have been recorded in scallop (*Argopecten purpuratus*) crops in Peru, mainly in the bays of Paracas and Sechura, due to environmental factors, such as hypoxia (<20% oxygen saturation; O<sub>Dsat</sub>), and the warming of the water, mainly during the occurrence of the El Niño Phenomenon. The objective of this work was to determine the tolerance of *Argopecten purpuratus* to the combination of different levels of hypoxia and temperatures, through laboratory experiments. Two sizes of organisms were used: small (< 35 mm) and large (> 50 mm). First, the mean lethal temperature (TeL<sub>50</sub>) was evaluated at 20%, 5% and 2% O<sub>Dsat</sub>, gradually increasing the temperature (1 °C per day), starting at 16 °C, until obtaining 100% mortality; then the mean lethal time (TL<sub>50</sub>) was evaluated, simulating temperatures of the Peruvian Coastal Upwelling System (16 °C) and coastal El Niño (25 °C), under severe hypoxia (2% O<sub>Dsat</sub>). Fan shells had similar TeL<sub>50</sub> values under normoxia (95% O<sub>Dsat</sub>: 31 °C), moderate hypoxia (20% O<sub>Dsat</sub>: 30 °C), and the upper limit of severe hypoxia (5% O<sub>Dsat</sub>: 29 °C). ; however, the TeL<sub>50</sub> was much lower at 2% O<sub>Dsat</sub>: 23 °C, where the metabolism possibly suffered alterations due to the reduction of the oxyregulatory capacity; the smallest being the most tolerant. The organisms were resistant (LT<sub>50</sub>: 120 hours) to coastal upwelling-type conditions (25 °C; 2% DO<sub>sat</sub>), however, when exposed to El Niño-type conditions (25 °C; 2% DO<sub>sat</sub>), their oxyregulation decreased, reaching the LT<sub>50</sub> at 12 hours and 100% mortality at 24 hours, regardless of size. The combination of high temperatures and severe hypoxia could be the possible cause of the mortalities reported in Peru.

**Keywords:** Hypoxia, high temperatures, El Niño, Peruvian Coastal Upwelling System, crop management.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. El cultivo de la concha de abanico en Perú

*Argopecten purpuratus* (Lamarck 1819), conocida en el Perú como concha de abanico, es una especie de molusco bivalvo de la Familia Pectinidae, de ambientes marinos costeros, que desde 1982 se extrae mediante buceo y también se cultiva con éxito en distintas zonas del Perú (Wolff, 1988). Este recurso es de gran importancia socioeconómica para pescadores artesanales y empresas privadas que han encontrado una fuente ocupacional y de ingresos económicos a través de la extracción y cultivo de esta especie, la cual además tiene un alto valor nutritivo y es de gran aceptación en los Estados Unidos, Japón y Europa, particularmente en Francia (Mendo & Quevedo, 2020).

Actualmente, la concha de abanico se mantiene como el segundo producto acuícola de mayor importancia económica, solo detrás del langostino *Litopenaeus vannamei* (US\$ 203 millones), con un valor de exportación de US\$ 97 millones en 2021, que representa el 28.7% del total del valor económico de las 43,691 toneladas exportadas por el Perú ese año (Comexperú, 2022). Las principales zonas de cultivo son los departamentos de Ancash, Ica y Piura, con alrededor del 80% de la producción proveniente de la Bahía de Sechura, Piura (ITP, 2021).

Debido a su importancia económica, se han realizado diversos trabajos sobre el cultivo de esta especie en las diferentes zonas de producción en el Perú, evaluando principalmente aspectos sobre su crecimiento y sobrevivencia, reportando diferentes resultados, dependiendo del área y a la semilla usada en dichos estudios, pero coincidiendo en que hay estresores ambientales y antropogénicos que influyen en la producción. En general, las diferencias que se

han observado en las tasas de crecimiento entre las diferentes zonas de cultivo, estaciones del año y profundidad, se deberían a tres factores principales: la temperatura, el oxígeno disuelto y la disponibilidad de alimento (Bricelj, V. M., Shumway, 1991; Cueto-Vega et al., 2021; Emerson, C. W., Grant, J., Mallet, A., & Carver, 1994; Lodeiros C., Maeda Martínez A., Freitas L. & M, 2001; Mendo & Quevedo, 2020).

Durante eventos fuertes de El Niño, caracterizados por aumento de la temperatura del agua, principalmente en zonas costeras, como ocurrió en 1982/83 y 1997/98, se registraron aumentos en los volúmenes de desembarco de la concha de abanico, aparentemente relacionados con un incremento en la tasa de crecimiento y el reclutamiento de individuos (Mendo, J. & Wolff, 2003; Tarazona et al., 2007). Sin embargo, estudios recientes han demostrado una relación entre altas mortalidades de la concha de abanico en las bahías de Sechura (2012, 2015, 2017 y 2019) y Paracas (2012, 2013, 2015 y 2017), con el aumento de la temperatura y bajas concentraciones de oxígeno (hipoxia), estas últimas relacionadas con eutrofización, florecimientos algales nocivos y aguas blancas (Cueto-Vega et al., 2021).

El término de hipoxia en el agua marina ha sido definido por diversos autores y generalmente se refiere a concentraciones de oxígeno menores o iguales a 0.2 mL/L, aunque las zonas de mínimo oxígeno en el medio marino son consideradas a partir de 0.5 mL/L (Aguirre-Velarde et al., 2016a; Levin, 2003). Para este trabajo, se consideró como hipoxia moderada a partir de 20% de saturación de oxígeno disuelto (ODsat) (2.01 mg/L a 16 °C) e hipoxia severa a partir de 5% ODsat (0.5

mg/L a 16 °C), que, en el caso de la concha de abanico, pueden representar situaciones de mortalidad masiva (Aguirre-Velarde et al., 2016b).

La Bahía de Paracas es una de las zonas costeras donde se desarrollan actividades de maricultura de concha de abanico. Cerca de la entrada de esta bahía, se genera una alta productividad primaria, debido a una zona de afloramiento (agua fría y cargada de nutrientes que emerge del fondo), constituyéndose como una zona para el desarrollo de la maricultura (Romero, V. & Orrego, 1986). Desde el año 1983, con la llegada del fenómeno de El Niño, la Bahía de Paracas alcanzó su récord histórico con 13 000 t, y dos años después, alcanzó un pico de 47 000 t. Sin embargo, un año después sufrió un fuerte descenso en la pesquería y acuicultura debido a las condiciones oceanográficas, que volvieron a su normalidad (García, 1989).

Después de este fuerte golpe a la producción de concha de abanico, en 1998 se volvió a marcar un nuevo pico de producción de poca duración, llegando hasta las 22 117 t, pero a inicios del año 2000, las producciones empezaron a bajar, extrayendo solo 4 708 t; y entre los años 2003 y 2004 se marcaron nuevos puntos de baja producción, con tan solo 122 t y 186 t respectivamente (González, 2010).

Se han venido realizando varios estudios en la Bahía de Paracas, y manifiestan que está expuesta a hipoxia crónica y eventos anóxicos acompañados por la ocurrencia de eventos de agua de color turquesa lechoso, conocidos como "aguas blancas", relacionados con la mortalidad de las conchas de abanico (Aguirre-Velarde, Thouzeau, et al., 2019; Ohde, T., Siegel, H., Reißmann, J., Gerth, 2007).

La Bahía de Sechura, en Piura, se ha convertido en la zona más importante en producción de concha de abanico, tras el descenso fuerte de los desembarques

en la región Pisco. En el 2013, la producción de conchas de abanico fue de 48 000 t, sin embargo, en el año 2016 disminuyó drásticamente debido a las condiciones oceanográficas (disminución del oxígeno y falta de recambio de agua en la bahía), además del aumento de temperatura, en gran medida debido a la presencia del Fenómeno El Niño “costero”, que afectaron la producción de semillas y provocaron la muerte de hasta el 100% de la producción (Mendo et al., 2008; Mendo & Quevedo, 2020). Actualmente, Sechura se mantiene como la principal zona de producción de concha de abanico, con 80% de la exportación anual de la especie, aunque los eventos de mortalidad siguen ocurriendo en las zonas de cultivo (Cueto-Vega et al., 2021; Mendo & Quevedo, 2020).

Factores ambientales, tecnológicos y ecológicos repercuten en la productividad del cultivo de concha de abanico, los cuales se pueden ver reflejados en su crecimiento y mortalidad. Dentro de los factores ambientales, la hipoxia y las temperaturas asociadas a El Niño y afloramientos costeros, podrían estar implicadas en las altas mortalidades que se han registrado en épocas recientes en el Perú (Cueto-Vega et al., 2021; Mendo & Quevedo, 2020). Por tal motivo es de suma importancia obtener información científica que ayude al maricultor y a las empresas pesqueras identificar señales de alarma, respecto a los niveles de hipoxia y temperaturas críticas para la sobrevivencia de la especie, con lo que podrían tomar medidas de manejo en respuesta a dichos factores.

El objetivo general de esta tesis es:

- Determinar la tolerancia de *Argopecten purpuratus* a la combinación de la hipoxia severa y distintas temperaturas, al simular condiciones asociadas a el

Fenómeno de El Niño y el Sistema de Afloramiento Costero del Perú, en experimentos de laboratorio.

Los Objetivo específicos son:

- Determinar la temperatura letal media y el límite superior de la tolerancia térmica de *A. purpuratus* a distintos niveles de oxígeno disuelto en el agua.
- Evaluar la tolerancia de *A. purpuratus* a una temperatura asociada al Fenómeno de El Niño (25 °C), en combinación con hipoxia severa (2% saturación de oxígeno).
- Evaluar la tolerancia de *A. purpuratus* a una temperatura asociada al Sistema de Afloramiento Costero del Perú (16 °C), en combinación con hipoxia severa (2% saturación de oxígeno).

De acuerdo con la problemática planteada, se espera que:

La hipoxia severa en combinación con temperaturas tipo El Niño y afloramientos, tengan un efecto sinérgico en la mortalidad de la concha de abanico, bajo condiciones de laboratorio.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. El fenómeno de El Niño**

El fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (El Niño ENSO) es una variación en el sistema climático que ocurre periódicamente, que se refleja en el incremento de la temperatura superficial del agua del mar (TSM) en el litoral de la costa del Pacífico Americano, con ocurrencias de lluvias intensas (NOAA, 2014). Sin embargo, cuando los efectos de El Niño ocurren solo en las costas de Ecuador y Perú, este fenómeno es catalogado como El Niño costero. Para este trabajo, se mencionará el Fenómeno de El Niño, pudiendo referir a cualquiera de las dos fases aquí explicadas. El impacto del Fenómeno de El Niño propicia condiciones favorables para el desarrollo de algunas especies, como ocurrió históricamente con la concha de abanico, pero que ahora, aparentemente se relaciona con eventos de mortalidad masiva (Cueto-Vega et al., 2021).

La relación entre las capturas mensuales de concha de abanico y los cambios de temperatura superficial del mar durante los años 1983 a 2002, permitió concluir que en muchos casos los niveles altos o bajos de captura no son explicados por los cambios de temperatura; sin embargo, existe una correlación muy alta cuando se trata de periodos con eventos fuertes de El Niño (Mendo, J. & Wolff, 2003).

En 1983/84, bajo el impacto del Fenómeno El Niño, la temperatura superficial del mar en los bancos de concha de abanico, de 16°C durante un verano normal, se incrementaron hasta casi los 25°C; con ello muchas áreas fueron recolonizadas y la población de concha de abanico se incrementó enormemente de unos cientos de toneladas a cerca de 30 000 t en pocos meses (Wolff, 1985, 1987). Estudios realizados sobre la dinámica poblacional de esta especie en años normales y con

El Niño (Mendo, J. & Jurado, 1993; Wolff, M. & Wolff, 1983; Wolff, 1985, 1987) han sugerido que el crecimiento poblacional de concha de abanico se debió principalmente a: 1) incremento en la tasa de crecimiento; 2) la reducción del periodo larval y así la mortalidad larval; 3) incremento de la mortalidad natural de predadores; 4) incremento de los productos sexuales y 5) reducción de los competidores filtradores.

Sin embargo, en épocas recientes, el calentamiento del agua ha estado relacionado con fuertes disminuciones del oxígeno disuelto (hipoxia) y eventos de mortalidad en las zonas de cultivo de concha de abanico en las bahías de Sechura (2012, 2015, 2017 y 2019) y Paracas (2012, 2013, 2015 y 2017), lo cual está relacionado con eutrofización (debido al poco recambio de agua, sobre todo en Sechura, y el aumento de materia orgánica en las bahías), la estratificación del agua (debido a la disminución de vientos), y con la presencia de aguas blancas (compuestos de azufre presentes en el agua y en el bentos) (Cueto-Vega et al., 2021; Mendo, J. & Quevedo, 2020; Ohde, T., Siegel, H., Reißmann, J., Gerth, 2007).

## **2.2. Afloramientos costeros**

Las zonas de afloramiento costero son sitios donde emergen aguas profundas, conteniendo grandes cantidades de nutrientes, por lo que son altamente productivas, sin embargo, se han caracterizado por el aporte de bajas concentraciones de oxígeno (Helly & Levin, 2004). Este fenómeno se debe al consumo de oxígeno en aguas profundas asociado a la descomposición de la

abundante materia orgánica materia procedente de la capa productiva superficial (Gewin, 2010; Zhang et al., 2010).

Las costas peruanas, desde su extremo sur hasta la región de Piura, pertenecen al Sistema de Afloramiento Costero del Perú, influenciado directamente por la Corriente de Humboldt (Gutiérrez, Bertrand, Wosnitza-mendo, Dewitte, Purca, Peña, Chaigneau, Tam, et al., 2011). Un aspecto importante de este sistema es que se presentan características oceanográficas particulares, ya que por su posición geográfica, las costas peruanas deberían ser más calientes, de características más tropicales (Montecino & Lange, 2009). Las aguas de afloramiento son frías y ricas en nutrientes, además que debido a las aguas sub superficiales que emergen se proporcionan una gran productividad primaria (plancton), lo cual, combinado con los intervalos de salinidad, temperatura y oxígeno disuelto, crean condiciones adecuadas para el cultivo de concha de abanico, lo que aunado a la presencia de algunas zonas protegidas y semi-protegidas del litoral, ha favorecido su producción (Paredes Guerrero, 2018).

### **2.3. Producción de la concha de abanico en las costas peruanas**

Mendo y Wolff (2003), analizaron los desembarques durante las dos últimas décadas en la Bahía de Independencia-Pisco y determinaron cuales eran los factores que afectan las grandes producciones de concha de abanico. Observaron que con eventos del El Niño fuertes, como en 1983 y 1998, las producciones de concha de abanico fueron afectadas de forma positiva; determinando que estos “booms” se deben al efecto combinado de (1) aceleración de la maduración y el aumento del desove; (2) reducción de periodo y aumento de la supervivencia

larval; (3) aumento en crecimiento individual; (4) aumento de la supervivencia por la disminución de biomasa de los depredadores; (5) aumento de la capacidad de carga de los bancos de concha de abanico debido a los incrementos de niveles de oxígeno. Por ello consideran que el impacto de la pesquería es un factor que contribuye al desarrollo de la población, ya que el volumen de captura no solo depende de la abundancia relativa de la especie si no de la disponibilidad de organismos reproductores.

## **2.4. Respuestas metabólicas de los moluscos bivalvos a estresores ambientales**

### **2.4.1. Tolerancia térmica**

La tolerancia térmica es un factor clave para explicar la distribución actual de las especies y pronosticar el efecto del cambio climático en épocas futuras, por lo tanto, es muy importante conocer los intervalos de tolerancia térmica de las especies. El aumento de la temperatura y los cambios en el uso de energía en los organismos tienen una relación directa en los modelos de tolerancia térmica, determinados por la frecuencia, tasa de cambio y tiempo de exposición (horas, días, semanas) (Anguilletta Jr, M J y Anguilletta, 2009), ya que, al aumentar la temperatura, la capacidad aerobia disminuye al momento de aprovisionar el oxígeno a los tejidos de los organismos. Esta reducción aerobia y la pérdida de la energía (ATP), se caracteriza por el incremento de requerimiento de glucosa (H. O. Pörtner et al., 2017).

El principal factor del metabolismo energético es la temperatura y es el que determina el límite de tolerancia de los organismos, donde la temperatura alta estimula un aumento energético significativo del consumo de oxígeno, como se ha observado en

de *Pecten yessoensis* (Jiang, W., Li, J., Gao, Y., Mao, Y., Jiang, Z., Du, M., Zhang, Y., & Fang, 2016), *Pecten maximus* (Artigaud et al., 2014) y *A. purpuratus* (Aguirre-Velarde et al., 2016b; Navarro, J. M., Fernández-Reiriz, M. J., & Labarta, 2004). Así mismo, Urban (1994), realizó un estudio frente a Perú y Chile sobre el efecto de El Niño en 10 especies de bivalvos (*Gari solida*, *Semele solida*, *Semele corrugata*, *Protothaca thaca*, *Venus antiqua*, *Tagelus dombeii*, *Ensis macha*, *Aulacomya ater*, *Choromytilus chorus* y *Argopecten purpuratus*), donde la LT50% fue mayor en Perú en comparación con Chile debido a la distribución geográfica, sin embargo, concluyó que todas las especies estudiadas son tolerantes a las condiciones de El Niño.

#### **2.4.2. Tolerancia a la Hipoxia**

En los procesos metabólicos para los organismos ectotermos marinos, el oxígeno es un factor muy importante; ya que al comenzar la exposición a hipoxia los organismos elevan su respiración y la circulación, realizando un sobre esfuerzo para que sus tejidos logren mantenerse estables. A estos organismos que logran regular el consumo de oxígeno se les llama oxirreguladores (Storey, JM y Storey, 2004).

Los organismos bivalvos tienen adaptaciones energéticas variables según las limitaciones ambientales como la intensidad, frecuencia y adaptación de los eventos hipóxicos (Aguirre-Velarde et al., 2017). La producción de energía (ATP) por las vías aeróbicas, es afectada por las condiciones de limitación de energía, sin embargo, los bivalvos son capaces de reconocer una diversidad de vías bioquímicas anaeróbicas (Grieshaber, MK, Hardewig, I., Kreutzer, U., Portner, 1994). Un estudio informó que la hipoxia reduce el metabolismo energético de *A. purpuratus*, ya que utiliza los

carbohidratos del musculo aductor para el abastecimiento en la energía anaeróbica (Brokordt, k., Pérez, H. y Campos, 2013).

## **2.5. Estudios sobre el efecto de la Hipoxia en la concha de abanico**

Brokordt et al. (2013), evaluaron los efectos de la hipoxia ambiental de conchas de abanico en juveniles (20-30 mm) y adultas (70-80 mm), utilizando 3 ensayos. El primer ensayo consistió en la evaluación de los efectos combinados de las demandas de energía durante 24 horas, en el segundo ensayo el efecto antes y después de los ciclos hipóxicos expuestas a su principal depredador (estrella del mar) y en el ensayo 3 evaluaron la exposición a varios ciclos hipóxicos diarios durante 7 días; para ello evaluaron 6 indicadores de la respuesta de escape: tiempo de reacción, número total de aplausos (entrecierre continuo de valvas), duración de la respuesta de aplausos hasta el agotamiento, velocidad de aplausos, la proporción de aplausos y la tasa de recuperación de aplausos de 5 min o 10 min. Posterior a eso obtuvieron el 15% y 25% en el número de aplausos en juveniles y adultos, respectivamente. Sin embargo, para segundo ensayo los juveniles fueron afectados en el número y la tasa de aplausos, mientras en el tercer ensayo los adultos solo mostraron una capacidad de escape reducida; logrando entender que la hipoxia reduce la capacidad de escape y un estado fisiológico de *A. purpuratus*.

Aguirre et al. (2016), analizaron los efectos progresivos sobre la captación de oxígeno frente a la disminución de la saturación de 100% a 5%, en juveniles de *Argopecten purpuratus* en tallas de 24 a 32 mm, a temperaturas de 16 °C y 25 °C. De esta manera determinaron que en condiciones cálidas la tasa de absorción de oxígeno fue más alta ( $0.20 \pm 0.004 \text{ mgO}_2 \text{ ind}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) que en condiciones normales ( $0.12 \pm 0.007 \text{ mgO}_2 \text{ Ind}^{-1}$ )

$h^{-1}$ ); paradójicamente los puntos críticos de oxígeno en condiciones cálidas fueron menores ( $21.4\% \pm 0.7$ ) en comparación con condiciones normales ( $24.4 \pm 1.9$ ), concluyendo que *A. purpuratus* es una especie de bivalvo que puede regular su frecuencia respiratoria similar y eficientemente a estas temperaturas. Sin embargo, también demuestran que las conchas de abanico en algunas temporadas pasan más del 70% de su tiempo expuesto a hipoxia, siendo estas condiciones negativas para su metabolismo.

Aguirre-Velarde et al. (2017), evaluaron los efectos de la hipoxia cíclica-severa en la energía de juveniles de conchas de abanicos (24 y 32 mm) a temperatura de 16°C para cuatro tratamientos: alimentados, en inanición, con hipoxia severa nocturna (5% de saturación de oxígeno) y sin hipoxia severa nocturna, en un tiempo de 21 días. Observaron un aumento promedio de la altura de las valvas de 3.27 mm (alimentadas), 2.13 mm (hipoxia cíclica) y no hubo diferencias entre los otros tratamientos. Por otra parte, los resultados indicaron que las conchas de abanico son capaces de mantener su filtración incluso expuestas a concentraciones bajas de oxígeno durante las primeras 12 horas. Sin embargo, al estar expuestas al 10% O<sub>Dsat</sub> la tasa de aclaramiento disminuyó abruptamente; siendo afectado el crecimiento de las valvas por la condición hipóxica, determinando que la concha de abanico presenta adaptaciones eficientes metabólicas/bioenergéticas para enfrentar estas condiciones recurrentes en las bahías costeras peruanas.

## **2.6. El efecto de la variación de la temperatura en la concha de abanico**

Dionicio y Flores (2015), determinaron el efecto de las temperaturas (17 y 22 °C) en las tasas de aclaramiento (TA), ingestión (TI) y tasa de consumo específico de oxígeno

(CEO) en ejemplares de conchas de abanico en tallas de ( $7.6 \pm 0.265$  cm), ( $4.9 \pm 0.058$  cm) y ( $3.7 \pm 0.173$  cm). Observaron un aumento de 2.5 y 1.5 veces en la tasa de aclaramiento y la tasa de ingestión respectivamente, en los ejemplares de tallas de ( $7.6 \pm 0.256$  cm) frente a la temperatura de 22 °C, debido al incremento del metabolismo por efecto de la temperatura; sin embargo, para los ejemplares de tallas pequeñas no hubo diferencias entre la tasa de aclaramiento y la tasa de ingestión. En la determinación del consumo de oxígeno a temperatura 22 °C se observaron valores máximos (0.64062, 1.42052 y 8.04801 mg O<sub>2</sub>.h<sup>-1</sup>. g<sup>-1</sup>) respectivamente a los grupos de tallas. Concluyeron que la temperatura incrementa la tasa de consumo de oxígeno, siendo este un indicador de la tasa metabólica y su condición fisiológica.

Cueto-Vega et al. (2021), realizaron un estudio de campo donde analizaron los parámetros ambientales relacionados con la saturación de oxígeno en las zonas de la bahía de Paracas y la bahía de Sechura; mostrando que la hipoxia es persistente durante el verano y principios de otoño. Señalaron también, que la exposición de las conchas de abanico a hipoxia y otros factores estresores ambientales pueden afectar la supervivencia de la especie. Para ello realizaron un experimento donde utilizaron conchas de abanico en dos tamaños diferentes (31 y 80 mm altura valvar) frente a niveles reducidos de oxígeno (1% de saturación de oxígeno) a temperatura de 16 °C, resultando que las conchas más pequeñas son más tolerantes a la hipoxia severa que las grandes, esto debido a tener una mayor relación superficie-volumen, lo que le da más posibilidades de extraer el oxígeno del agua. Por otro lado, los organismos con mayores índices de condición sobrevivieron por más tiempo, ya que pudieron mantener su metabolismo basal por más tiempo. Finalmente, concluyen que la hipoxia en combinación con otros factores estresantes, como las temperaturas altas y eventos

de baja salinidad, podrían ser los causantes de las mortalidades de las conchas de abanico en las zonas de cultivo.

## **2.7. Estudios sobre la hipoxia y temperatura en otras especies de moluscos bivalvos.**

Artigaud et al. (2014), compararon y describieron las respuestas respiratorias a la hipoxia (10% saturación de oxígeno) y a temperaturas (10, 18 y 25 °C) en ejemplares de *Pecten maximus* en tallas (57.3 ± 5.3 cm de longitud) y *Mytilus spp.* en tallas (32.5 ± 3.4 cm de longitud), utilizando seis cámaras acrílicas equipadas de (0.59 L), para registrar la concentración de oxígeno cada 30 segundos. Teniendo como resultados que *P. maximus* con oxígeno máximo tiene las tasas de respiración más bajas frente a la temperatura de 25 °C, indicando una disminución del rendimiento aeróbico y mostrando una mayor capacidad oxireguladora a comparación de *Mytilus spp.*, que aumento drásticamente a temperaturas de 10 °C y 18 °C. Sin embargo, al encontrarse frente a la disminución de la concentración de oxígeno, *Mytilus spp.* disminuyó moderadamente con el nivel de oxígeno, por el contrario *P. maximus* mantuvo alto la tasa de respiración antes de cambiar a oxiconformidad. Concluyendo que *P. maximus* podría ser más vulnerable a esta combinación y otros factores ambientales a diferencia de *Mytilus spp.*

Gurr et al. (2018), evaluaron las respuestas cardíacas de *Argopecten irradians* en condiciones de hipoxia. Utilizaron sensores infrarrojos para medir la actividad cardíaca en respuestas a la hipoxia durante periodos de un mes. Se obtuvo una frecuencia cardíaca en organismos bien oxigenados de 23.0 ± 1.8 latidos por minuto, mientras que organismos expuestos a hipoxia eran más altas y más variable (sitio 1: 34.5 ± 3.1 latidos por minuto y sitio 2: 48.4 y 45.8 latidos minuto). Se observó un aumento de la

actividad cardiaca cuando el OD estaba por debajo de 5 mg/l; sin embargo, cuando el OD se encontraba por debajo de 2 mg/l, disminuyo hasta alcanzar estados de bricardia y acardia durante la anoxia, observando una mortalidad a las 23 – 32 horas en anoxia.

Yoann et al. (2019), estudiaron las consecuencias de la hipoxia en las funciones metabólicas de organismos marinos, observando patrones y la teoría del presupuesto de energía dinámica (DEB). Para ello propusieron un conjunto de hechos biológicos que dieron información sobre los efectos de la hipoxia en las funciones metabólicas basándose en hallazgos empíricos y luego poder incorporarlos en los organismos marinos en el marco de la teoría DEB. Dentro de los principales problemas identificaron a las escalas de tiempo, las respuestas ontogénicas y los efectos de estrés; llegando a la conclusión que teniendo estos patrones se debía seguir investigando para determinar el efecto de la hipoxia en organismos marinos.

Palacios (2019), evaluó el efecto de la hipoxia y pH acido en la tasa de aclaramiento de juveniles de *Argopecten purpuratus* de tallas ( $12.69 \pm 1.57$  mm de altura valvar), para cuatro tratamientos: hipoxia y acidez (20% + pH 7.4), hipoxia (20% + pH 7.8), acidez (100% + pH 7.4) y control (100% + pH 7.8), adicionando para la simulación de la hipoxia (N<sub>2</sub>) y la acidez (CO<sub>2</sub>). Encontró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la tasa de aclaramiento: T. control (2.84 L.h<sup>-1</sup>), T. hipoxia (2.17 L.h<sup>-1</sup>), acidez (1.69 L.h<sup>-1</sup>) y para hipoxia + acidez fue (2.84 L.h<sup>-1</sup>) demostrando que hay un ajuste fisiológico frente a la exposición de estrés. Concluyó que el pH acido tiene efectos más perjudiciales que estrés por hipoxia, dando evidencias del efecto sinérgico negativo de la especie.

Salgado (2020), evaluó la respuesta metabólica de *Nodipecten subnodosus* a temperaturas críticas (30 °C) en combinación con hipoxia a 40% de saturación de oxígeno, en fases iniciales (primavera) y avanzadas (verano) de su desarrollo gonádico. Se analizó el estado energético a través de la medición del consumo de oxígeno (VO<sub>2</sub>), la carga adenilica energética (CEA), el contenido de nucleótidos y fosfoarginina (ArgP), así como la actividad de siete enzimas metabólicas. *Nodipecten subnodosus* tuvo una respuesta oxiconformadora con una disminución del 50% del VO<sub>2</sub> de los organismos. En este trabajo se confirmó que los juveniles y reproductores de *N. subnodosus* exhiben una capacidad metabólica para compensar los cambios ambientales dentro de su rango de tolerancia térmica, ya que el efecto sinérgico de eventos de hipoxia o esfuerzo reproductivo disminuyen la probabilidad de sobrevivir.

## **2.8. Biología y ecología de *Argopecten Purpuratus***

### **2.8.1. Clasificación Taxonómica**

De acuerdo con el “World Register of Marine Species” (WORMS, 2022), la concha de abanico tiene la siguiente clasificación taxonómica:

Phylum: Mollusca

Clase: Bivalvia

Subclase: Autobranchia

Infraclase: Pteriomorphia

Orden: Pectinida

Superfamilia: Pectinoidea

Familia: Pectinidae

Subfamilia: Pectininae

Tribu: Aequipectinini

Género: *Argopecten*

Especie: *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819)

### **2.8.2. Hábitat.**

La concha de abanico habita en zonas protegidas del submareal entre los 3 y 30 m de profundidad, con temperaturas óptimas entre los 14 y 20 °C, con niveles de oxígeno de 0.2 a 8 mg/l, pH de 6.8 a 7.9 (Bermudez Corcuera, P. I., & Aquino Bravo, 2004), a una salinidad promedio de 34.4 a 34.9 y corrientes de baja velocidad. Se encuentran en fondos arenosos, de conchuela con algas, sin embargo, también se les puede encontrar sobre sustratos fangosos y pedregosos (Mendo, J., & Wolff, 2002). La concha de abanico es un ectotermo marino, esto quiere decir que no es capaz de generar calor internamente, por lo que su regulación de temperatura corporal es dependiente de la temperatura del medio (Sunday, 2010). Es una especie de ambientes templados, desde el norte de Chile al norte de Perú, con grandes variaciones de temperatura en el medio, por lo que tiene una amplia tolerancia térmica: de 8 °C a 29 °C (Urban, 1994).

### **2.8.3. Características de la especie.**

*Argopecten purpuratus* es una especie hermafrodita, es decir que presenta una gónada con parte femenina (ovocitos) teniendo como característica el color naranja y una parte masculina (espermatozoides), de color blanco. La gónada que contiene ambos sexos se le conoce con el nombre de coral, funcionalmente la producción de gametos es alternada y su ciclo reproductivo es continuo (FONDEPES, 2016).

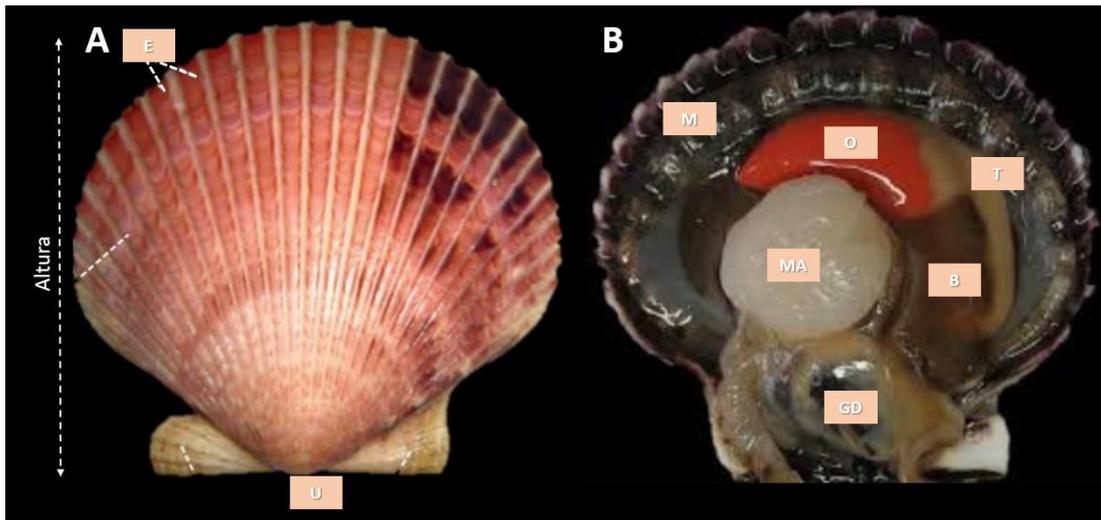


Figura 1. A) Morfología de la valva de *A. purpuratus*. (E) Costillas radiales. (U) Umbo. B) Anatomía interna de *A. purpuratus*. (MA) Músculo aductor. (M) Manto. (B) Branquias. (GD) Glándula digestiva. (T) Teste. (O) Ovario. Fuente: Modificado de IMARPE (2015).

#### 2.8.4. Distribución

La concha de abanico se encuentra distribuida a lo largo de la costa del Pacífico tropical, encontrándose registros desde Corinto, Nicaragua hasta Valparaíso en el norte de Chile. En el Perú presenta mayor concentración poblacional en las regiones de Piura, Ancash e Ica, siendo mayor su incidencia en los bancos naturales de Sechura, Samanco, Tortugas, Paracas, Independencia, no obstante, ante la presencia del Fenómeno del Niño esta especie se desarrolla en diversas zonas de nuestro litoral (FONDEPES, 2016).

#### 2.8.5. Ciclo Biológico

El ciclo de vida de la concha de abanico presenta dos fases importantes: una larval pelágica que tiene una duración aproximada de 30 días desde la fecundación, la cual

depende de variables ambientales, y una bentónica que empieza cuando la postlarva cae al fondo y busca un substrato para su fijación mediante filamentos llamados biso a los 12-22 días (Navarro, 2002), mientras en la fase adulta se alcanza a los 180 días (Gutiérrez, Bertrand, Wosnitza-mendo, Dewitte, Purca, Peña, Chaigneau, Graco, et al., 2011).

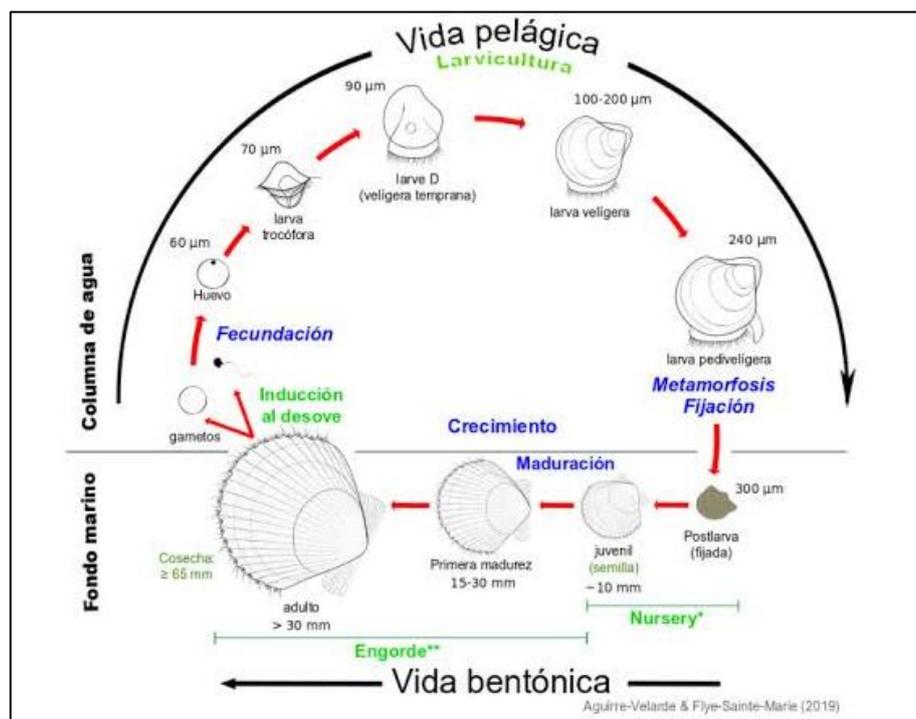


Figura 2. Ciclo de vida de la concha de abanico *A. purpuratus*. Fuente: (Aguirre-Velarde, A. y Flye-Sainte-Marie, 2019).

### 2.8.6. Alimentación

El alimento de la concha de abanico está constituido principalmente de microalgas. En cultivos a nivel laboratorio, generalmente se les alimenta con microalgas de los géneros *Isochrysis*, *Chaetoceros* y *Coscinodiscus*. La concha de abanico se alimenta por filtración, que consiste en capturar el alimento por los cilios branquiales, que, al moverse, provocan una corriente que conducen las partículas por el canal inhalante

hasta los palpos labiales, donde ocurre una selección. Las partículas mayores son acumuladas y, posteriormente, expulsadas como pseudoheces. Las partículas menores a 10 micrones, son transferidas a la boca, después pasan por el esófago, para luego ser digeridas en el estómago. Para complementar este proceso, las partículas pasan por el estilete cristalino, donde, con el auxilio de enzimas digestivas, son degradadas en partículas menores para finalmente ser absorbidos en el intestino. El material orgánico rechazado y los productos del metabolismo son expulsados como heces (FONDEPES, 2016).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio es de tipo experimental y se realizó entre los meses de noviembre del 2021 hasta enero del 2022. La población evaluada fue la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) cultivada en la Bahía de Sechura, Piura. Se utilizaron aproximadamente 840 ejemplares de esta especie, procedentes de la región de Vichayo, dentro de la Bahía de Sechura.

#### 3.1. Lugar de experimentación

La experimentación se llevó a cabo, en las instalaciones del Centro de Investigación para el Desarrollo Integral y Sostenible (CIDIS) de la Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH), El Ñuro –Piura.



Figura 3. Vista satelital de la ubicación del lugar de experimentación: Centro de Investigación para el Desarrollo Integral y Sostenible (CIDIS), El Ñuro - Piura. (Fuente: Google Maps, 2022)

### **3.2. Diseño experimental**

Para el diseño experimental se consideraron dos factores: saturación de oxígeno (%; ODSat) y temperatura (°C) (Tabla 1). Los experimentos se realizaron en dos etapas:

- Primera etapa. Estimar la temperatura letal media (TeL50) y el límite superior de su tolerancia térmica (>95% de mortalidad) de la concha de abanico a diferentes grados de hipoxia (a 20%, 5% y 2% ODSat) y un aumento gradual de temperatura, de 16 °C a 31 °C, a razón de 1°C por día.
- Segunda etapa. Estimar el tiempo letal medio (TL50) a dos temperaturas, una representando los sistemas de afloramiento (16 °C) y otra a las temperaturas que ocurren en eventos El Niño Costero (25 °C). Ambos tratamientos fueron expuestos a hipoxia severa (2% de saturación de oxígeno). Para la conversión ODSat (%) a concentración (mg/l), se aplicó la fórmula de la ley de Henry (Mora Orozco, C. D. L., Flores López, H. E., Durán Chávez, Á., & Ruiz Corral, 2011) (Tabla 2).

Tabla 1. Tratamientos resultantes de la combinación de temperatura y saturación de oxígeno para los experimentos de temperatura letal media y tiempo letal medio

Tratamiento	Temperatura (°C)	Saturación de oxígeno (%)
Temperatura letal media-Control	16 – 31	>95
Temperatura letal media-20%	16 – 31	20
Temperatura letal media-5%	16 – 31	5
Temperatura letal media-2%	16 – 31	2
Tiempo letal medio-Afloramiento	16	2
Tiempo letal medio-El Niño	25	2
Control-Afloramientos	16	>95
Control-El Niño	25	>95

Tabla 2. Conversión de la saturación de oxígeno (%) a mg/l, de acuerdo con la ley de Henry.

Temperatura	Oxígeno (mg/l)		
	20%	5%	2%
16	2.01	0.50	0.20
17	1.97	0.49	0.20
18	1.93	0.48	0.19
19	1.90	0.47	0.19
20	1.86	0.47	0.19
21	1.83	0.46	0.18
22	1.80	0.45	0.18
23	1.76	0.44	0.18
24	1.74	0.43	0.17
25	1.70	0.43	0.17
26	1.67	0.42	0.17
27	1.65	0.41	0.17
28	1.62	0.41	0.16
29	1.60	0.40	0.16
30	1.57	0.39	0.16
31	1.55	0.39	0.16

### 3.3. Procedencia de semilla y aclimatación

Los individuos utilizados fueron provistos por Consultoría y Manejo Técnico en Maricultura SAC (COMTEMAR), provenientes de cultivos de la Bahía de Sechura, ubicada al norte del país, Piura. Los organismos se transportaron en coolers, usando esponjas humedecidas con agua de mar y gel packs para disminuir la temperatura alrededor de los 18 y 20 °C durante el traslado al CIDIS-UPCH (Figura 4).



Figura 4. Procedimiento de traslado de los ejemplares de conchas de abanico provistos de la Bahía de Sechura.

Al momento de arribar al CIDIS, los individuos se limpiaron de materia orgánica, epibiontes y macroalgas, y posteriormente se aclimataron durante cinco días para reducir el estrés generado por la manipulación y el transporte. Estos organismos fueron colocados en jabas a una temperatura de 20°C con agua de mar filtrada hasta 1  $\mu\text{m}$  y esterilizada mediante una lámpara UV, con un sistema de flujo abierto donde se utilizará dos tanques de 500 ml. Se alimentaron con dos tipos de microalgas *Isochrysis galbana* y *Chaetoceros calcitrans*. El suministro de alimento se detuvo un día antes de la experimentación (Figura 5).



Figura 5. Sistema de aclimatación a flujo abierto para los ejemplares de conchas de abanico.

#### **3.4. Limpieza y mantenimiento**

La limpieza de las jabas de mantenimiento se realizó a las 9:00 am y 4:00 pm, que consistió en retirar por sifoneo las heces producidas por los individuos a través de una manguera. El porcentaje de agua extraída por el sifoneo fue menor al 15% del volumen de la jaba.

#### **3.5. Índice de condición**

Para tener un control de la condición a la que entraban los ejemplares a los experimentos, antes de iniciar cada uno de ellos, se seleccionaron organismos de conchas de abanico (10 de tallas mayores a 50 mm y 10 de talla menores a 35 mm), para obtener el peso seco, el índice de condición (IC) y el índice gonadosomático (IGS).

Las conchas se identificaron colocándole códigos de identificación y posterior a eso se tomó la medición de la altura valvar (mm) y el peso total (g), del musculo y de la gónada (Figura 6). Los tejidos se llevaron a la estufa por 72 horas a una temperatura de 60 °C, para obtener el peso seco de cada una de ellas (Johnstone, 1912).

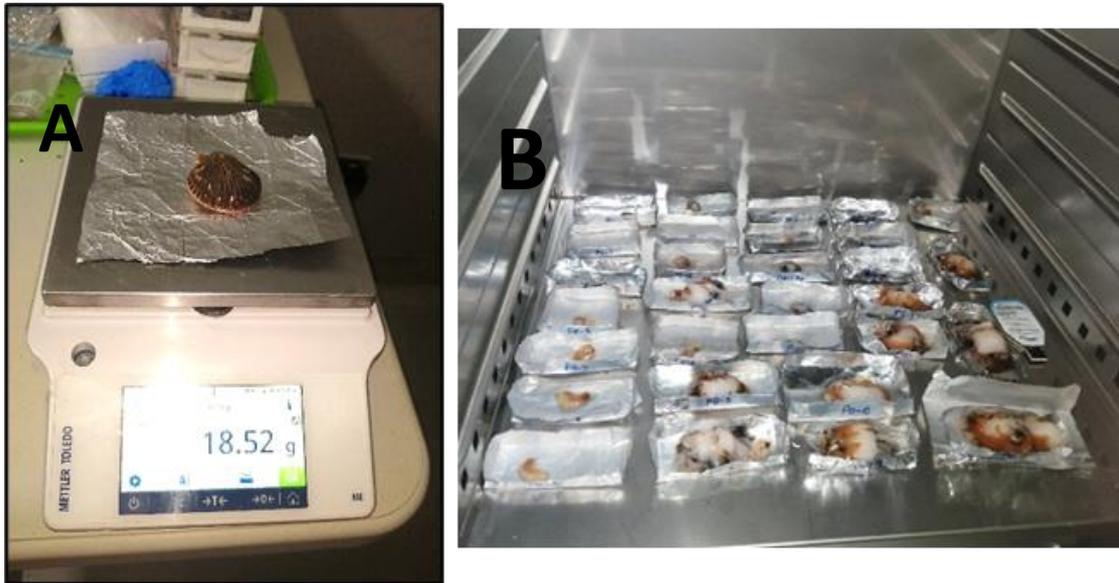


Figura 6. Obtención del peso fresco (A) y peso seco de la concha de abanico (B) para analizar el índice de condición y porcentaje de humedad.

### 3.6. Instalación del sistema de experimentación

Se instaló un sistema de flujo abierto de agua de mar compuesto por 4 peceras acrílicas de 8mm con capacidad de volumen de agua de 94 L cada uno, donde se colocaron 30 individuos de *A. purpuratus* por pecera, 15 de tallas mayores a 50 mm de altura valvar, denominados dentro de los experimentos como “Conchas grandes”, y 15 conchas de tallas menores a 35 mm de altura valvar, denominadas como “Conchas chicas”. Este procedimiento se realizó en cada tratamiento de todos los experimentos (Figura 7).

El agua de mar fue previamente filtrada, utilizando tres filtros de cartucho colocados en serie (10, 5 y 1  $\mu\text{m}$ ) acoplados a una lámpara (JECU STU-36 W, 220 V, 60Hz) que emitía luz ultravioleta (Anexos 1, 2 y 3).

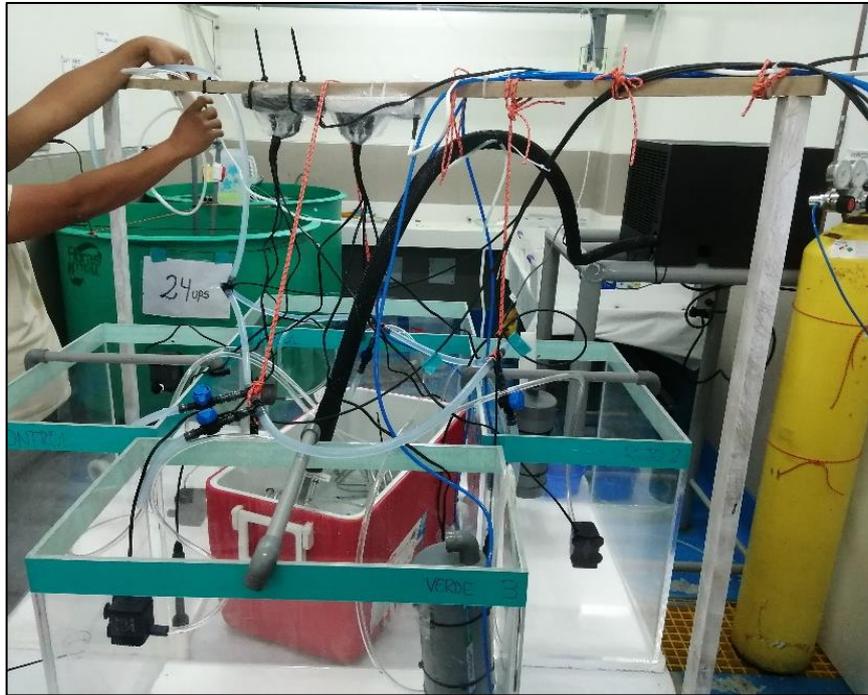


Figura 7. Montaje del sistema de experimentación para los distintos tratamientos de hipoxia-temperatura en la concha de abanico.

### 3.6.1. Regulación del gas nitrógeno ( $\text{N}_2$ )

Cada uno de los cuatro acuarios acrílicos fue cubierto con una tapa de “tecnopor” para evitar la alteración de la temperatura y disminuir el intercambio gaseoso entre el agua de los tratamientos y el ambiente circundante.

Mediante la inyección controlada de gas nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) se disminuyó progresivamente la saturación de oxígeno hasta alcanzar el valor de 2% en 3 de los acuarios. Para ello se instaló un balón de nitrógeno de 10 m<sup>3</sup> conectado a un sistema regulador de paso de gases. Este sistema fue compuesto por válvulas solenoides controladas por un software programado en una computadora Raspberry Pi 3, donde se reguló el paso

del gas. Este sistema regulador de paso de gases estuvo conectado a un multiparámetro WTW 3430 Set G que utiliza tres sensores (FDO® 925) para el registro del porcentaje de saturación de oxígeno. Estos sensores estuvieron permanentemente sumergidos en los acuarios y registraron la saturación de oxígeno del agua a intervalos de cinco segundos. Cuando el agua alcanzaba niveles de oxígeno mayores al 2% de saturación (programados en el software) el sensor lo detectaba y mandaba una señal que a través de las válvulas solenoides se prendía y se realizaba una inyección controlada de gas N<sub>2</sub> hasta que el nivel de saturación regresaba a 2% (Figura 8).

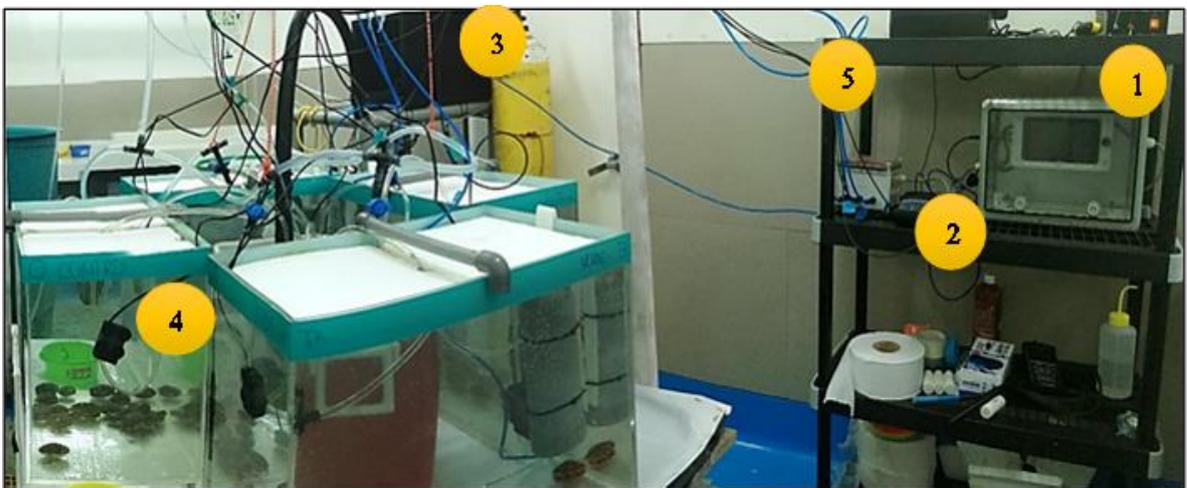


Figura 8. Sistema controlador de inyección de gas N<sub>2</sub>; 1) software Raspberry, 2) equipo multiparámetro, 3) cilindro de gas nitrógeno, 4) sensor de oxígeno y 5) válvulas solenoides.

### 3.6.2. Regulación de temperatura

Para el mantenimiento de temperatura a lo largo de los experimentos, se siguieron dos protocolos basados en el intercambio de calor entre un reservorio de agua y los acuarios:

- a. Temperaturas bajas. Para la simulación de temperaturas frías (desde 16 °C hasta 22 °C) se utilizaron bombas sumergibles que realizaron una recirculación del agua en los acuarios, pasando agua a través de una manguera acoplada a un serpentín de acero inoxidable por cada acuario (MJ-HB500W), que estuvo sumergido en un tanque de 40 L con agua a la temperatura deseada. La temperatura se regulo mediante un enfriador (Chiller, 6000 BTU, 230V) con una precisión de  $\pm 1$  °C (Figura 9A).
- b. Temperaturas altas. Para la simulación de temperaturas altas (desde 23 °C hasta 31 °C), se utilizaron termostatos (calentadores de agua) sumergidos en el tanque de 40 L, de esta forma, los serpentines de acero inoxidable intercambian calor con el agua, para mantener la temperatura deseada (Figura 9B).

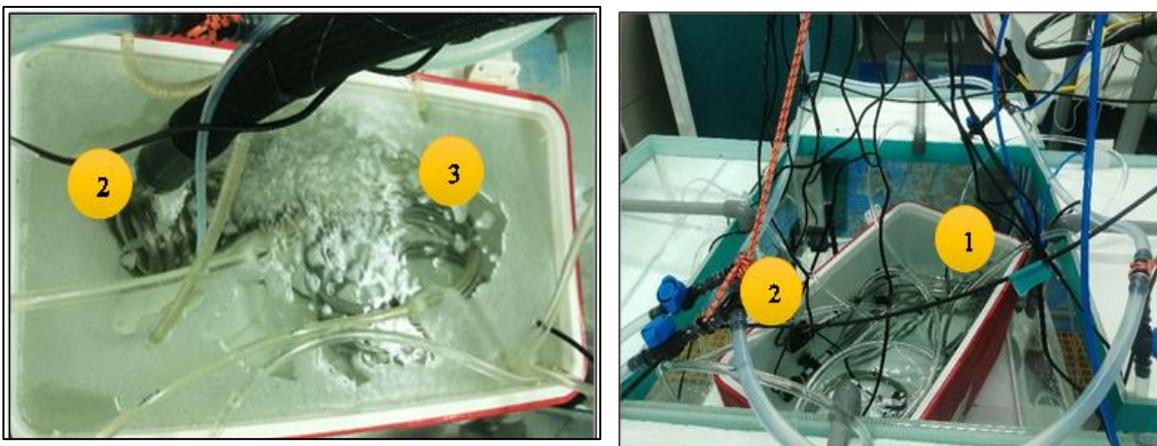


Figura 9. Sistema regulador de temperatura para los distintos experimentos. 1) Chiller, 2) serpentín de acero inoxidable y 3) intercambiadores de calor.

### 3.7. Temperatura letal media

Para este experimento se realizaron 3 tratamientos (Tabla 1), basados en la evaluación de diferentes grados de hipoxia (20 %, 5% y 2% de saturación de oxígeno) y el aumento gradual de temperatura (1 grado por día) a partir de 16 °C hasta tener la mortalidad al 100% de todos los acuarios, incluyendo el acuario control (> 95% O<sub>Dsat</sub>) o normoxia. La elección de los niveles de hipoxia se realizó a partir de lo observado en estudios anteriores en la especie:

- Tratamiento en normoxia. Este tratamiento (> 95% O<sub>Dsat</sub>) fue elegido para compararlo con lo estimado por Urban (1994) para la misma especie en sus experimentos de tolerancia térmica.
- Tratamiento de hipoxia moderada. El tratamiento de 20% O<sub>Dsat</sub>, considerado como hipoxia moderada, fue elegido para observar el comportamiento de la curva de sobrevivencia en un valor de oxígeno similar a los puntos críticos de oxígeno (c.a. 20% O<sub>Dsat</sub>) determinados por Aguirre-Velarde et al. (2016).
- Tratamiento de hipoxia severa con efectos evidentes. El tratamiento de 5% O<sub>Dsat</sub> fue elegido para observar el comportamiento de la curva de sobrevivencia en un nivel de oxígeno con efectos claros en la oxirregulación de la especie observados por Aguirre-Velarde et al. (2016).
- Tratamiento de hipoxia severa por debajo del límite de oxirregulación. El tratamiento a 2% O<sub>Dsat</sub> fue elegido para exponer a la concha de abanico a un nivel de oxígeno por debajo de 5% O<sub>Dsat</sub>, el cual es considerado por Aguirre-Velarde et al. (2016) como el límite de oxirregulación.

Se realizaron 3 repeticiones por cada tratamiento y el control. El conteo de conchas de abanico muertas se realizó cada 24 horas a las 8 am, hasta alcanzar al menos el 90% de mortalidad, registrando la altura valvar (mm) de cada ejemplar muerto; precisión de 0,1 mm con la ayuda de un calibrador o “Vernier” (Figura 10).

El criterio entre organismo muerto o vivo fue la siguiente: Un organismo muerto no presenta reacción de cerrado de valvas o contracción de tejidos después de presionar las valvas. Cuando la temperatura alcanzó los 27 °C se colocaron esponjas alrededor de las paredes de cada acuario, para que la temperatura pudiera alcanzarse y estuviera estable (Figura 11).

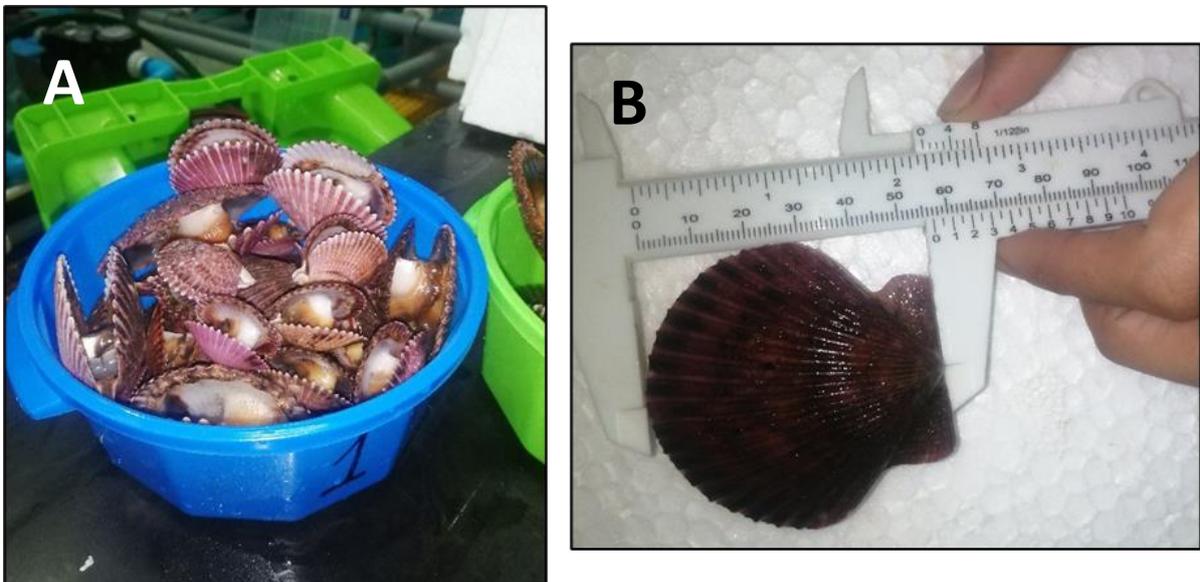


Figura 10. Conteo y medición de conchas de abanico muertas por cada experimento. A) conchas de abanico muertas durante el experimento y B) medición de la altura valvar de las conchas de abanico.

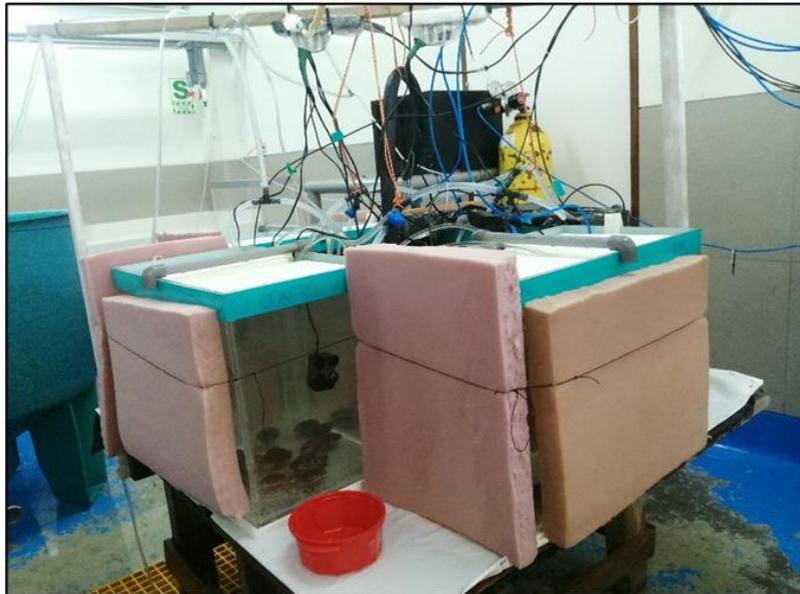


Figura 11. Montaje del experimento a temperatura gradual e hipoxia, cuando la temperatura estaba por encima de 27 °C.

### **3.8. Experimentos de estimación del tiempo letal medio**

Para estimar el tiempo letal medio (TL50) de las temperaturas simuladas para los ambientes de afloramiento (16 °C) y El Niño costero (25 °C) bajo hipoxia severa (2% DOsat), se utilizaron 6 réplicas por cada tratamiento (16 °C – 2% y 25°C – 2%) y dos réplicas para cada control (16 °C – > 95% y 25°C – > 95%). Se realizaron conteos y mediciones de muertos cada 12 horas, hasta alcanzar el 100% de mortalidad.

### **3.9. Análisis estadísticos**

#### **3.9.1. Cálculo de las curvas de supervivencia**

Para todos los tratamientos citados en la tabla 1, se registró el número de horas desde la exposición a las distintas condiciones, hasta conseguir > 90% de mortalidad. Estos datos sirvieron para la construcción de una curva de supervivencia por experimento, tomando en cuenta el total de organismos. Se estimó el 50% de mortalidad en cada

uno de los experimentos, utilizando modelos tipo "Kaplan-Meier" del paquete "survival", e intervalos de confianza a 95%, en el software R versión 4.1.2 (2021-11-01) -- "Bird Hippie".

### **3.9.2. Curvas de sobrevivencia por tallas**

Al igual que para el total de individuos, se obtuvieron curvas de sobrevivencia con modelos Kaplan-Meier para las conchas chicas (<35 mm) y grandes (>55 mm), obteniendo sus correspondientes TL50 y TeL50. Las curvas de sobrevivencia de las distintas tallas (chicas y grandes) fueron comparadas dentro de cada tratamiento, para saber si existieron diferencias significativas entre dichas curvas. Las pruebas estadísticas que se utilizaron para este tipo de comparaciones fueron las denominadas "Log rank test" (Kaplan, E. L., & Meier, 1958), a un nivel de significancia del 5%.

### **3.9.3. Curvas de control de variables fisicoquímicas**

Para la evaluación del control de las variables fisicoquímicas, se registró el número de horas desde el momento en que fue expuesto a estas estas variables (temperatura y saturación de oxígeno), para lograr un seguimiento durante el experimento y conocer los puntos donde se aumentó o disminuyó del valor óptimo:  $\pm 1$  °C para la temperatura y  $\pm 0.2\%$  para la saturación de oxígeno. Se crearon gráficos con los promedios de las repeticiones de cada tratamiento, se obtuvo el valor de la desviación estándar, el error estándar y los intervalos de confianza al 95%, utilizando la fórmula para bases de datos con menos de 30 registros, usando la distribución de t-Student (Skinner, K. R., Montgomery, D. C., & Runger, 2003).

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **4.1. Temperatura letal media en condiciones de normoxia**

#### **4.1.1. Curvas de sobrevivencia de organismos control**

La TeL50 para los organismos sometidos al incremento gradual de temperatura (16 – 31 °C) bajo condiciones de oxígeno normal o “normoxia” (> 95% O<sub>Dsat</sub>) fue de 30 °C, mientras que el 100% de la mortalidad se consiguió a una temperatura de 31 °C (Figura 12). Estos resultados coinciden con lo observado por Urban (1994), quién determinó la tolerancia de temperatura de 10 especies de importancia comercial de Chile y Perú frente a los efectos de El Niño, concluyendo que *Argopecten purpuratus* está adaptada a un amplio intervalo de temperaturas (8 – 36 °C), con gran resistencia a temperaturas altas, con LT50% a los 29 ± 3 °C. En este mismo sentido, se ha observado que los organismos marinos que viven en ambientes templados tienen amplios intervalos de tolerancia térmica, esto debido a estar adaptados a la variabilidad ambiental a lo largo del año (Sunday, 2010). En el caso de *A. purpuratus*, está adaptada a vivir en ambientes templados del Sistema de Afloramiento Costero del Perú, mientras que las poblaciones de Sechura viven en la zona de transición con los ambientes tropicales del Pacífico Americano (Wolff, 1987).

Aunque no fue un aspecto evaluado sistemáticamente, se pudo observar que en el tratamiento de normoxia se observaron desoves parciales en los organismos grandes, cuando las temperaturas se encontraban entre los 23 y 25 °C. A temperaturas altas (alrededor de 25 °C), por causa del Fenómeno de El Niño, en épocas pasadas (antes de la década de los 2010), las poblaciones naturales y cultivadas de *A. purpuratus* fueron afectadas positivamente, ya que gracias a ello hubo un incremento en la actividad reproductiva, aceleración de la maduración y acortamiento del periodo larval; mostrando un fuerte incremento de la producción de semillas en los años 1983 y 1998,

según el estudio realizado por Mendo (2003) y el reporte elaborado por (Mendo, J. & Quevedo, 2020). Considerando también que la temperatura del agua en las zonas de cultivo de esta especie rara vez alcanza 28 °C y que los eventos de mortalidad masiva en años recientes estuvieron relacionados con episodios de hipoxia (Cueto-Vega et al., 2021), este trabajo reafirma que la concha de abanico tiene una amplia tolerancia térmica y que la temperatura por sí sola, no es la responsable de las recientes mortalidades masivas en sus zonas de cultivo.

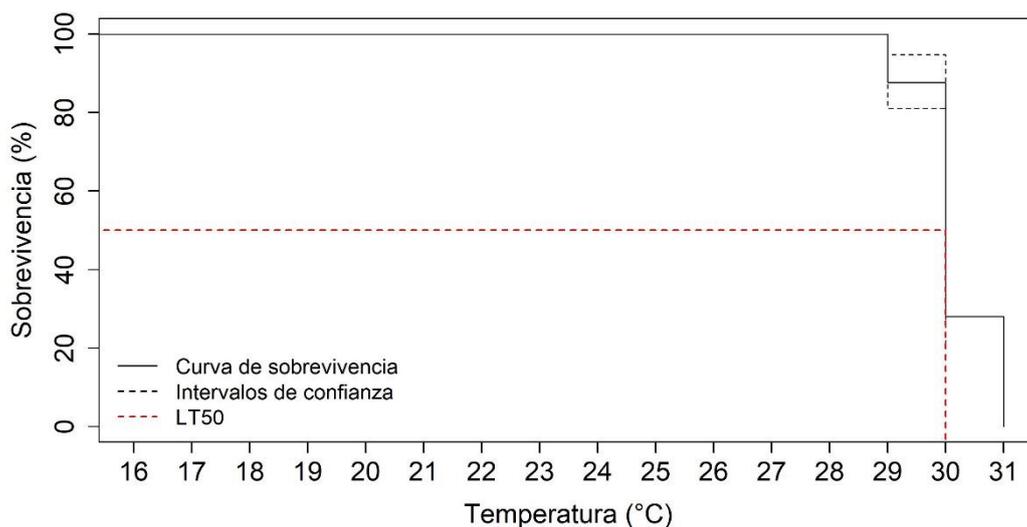


Figura 12. Curva de sobrevivencia de *Argopecten purpuratus* para el experimento de temperatura letal media bajo condiciones normales de oxígeno (>95 ODSat).

#### 4.1.2. Curvas de sobrevivencia de organismos control por talla

La TeL50 en las conchas de abanico chicas (< 35 mm) fue  $30.5 \pm 0.01$  °C y para las grandes (>50 mm) fue de 30 °C, con un IC del 95%, teniendo diferencias significativas pero marginales ( $X^2 = 4$ ,  $p = 0.05$ , g.l. = 1), siendo las chicas ligeramente más tolerantes que las grandes (Figura 13). Los organismos chicos tienen mayor posibilidad de obtener oxígeno del agua, gracias a su mayor relación superficie-volumen (Cueto-Vega et al., 2021), además que los organismos grandes tienen un

aumento de las tasas fisiológicas, por el incremento metabólico a causa del aumento de la temperatura (Dionicio & Flores, 2015). Sin embargo, para fines prácticos, estas diferencias marginales no serían relevantes para los productores acuícolas ante el manejo de eventos de incremento de temperatura del agua en sus cultivos.

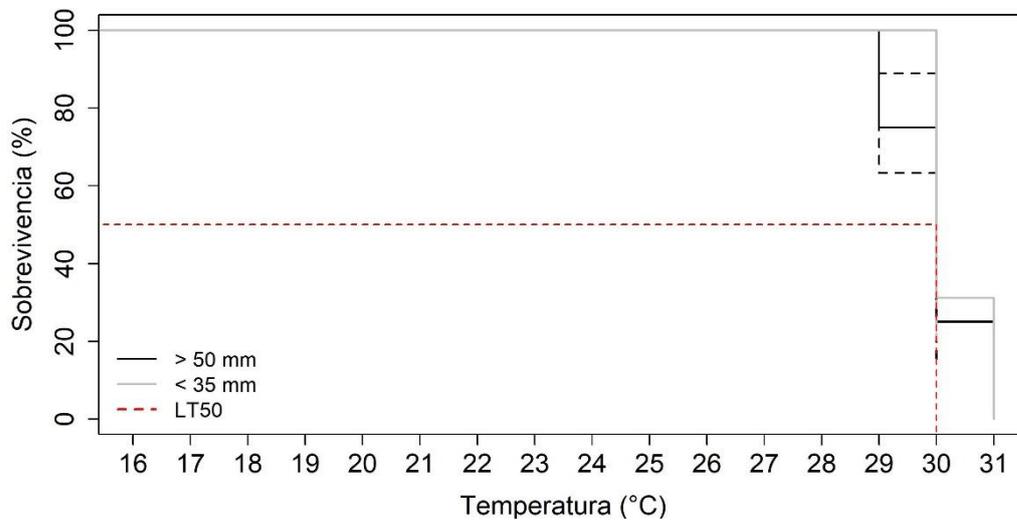


Figura 13. Curva de supervivencia de *Argopecten purpuratus* para el experimento de temperatura letal media bajo condiciones normales de oxígeno (>95 O<sub>Dsat</sub>), por tallas.

## 4.2. Temperatura letal media a 20 % de saturación de oxígeno

### 4.2.1. Control de variables fisicoquímicas.

Para el tratamiento de hipoxia moderada (20% O<sub>Dsat</sub>), las condiciones fisicoquímicas se mantuvieron de forma constante durante la experimentación, tanto la temperatura (16°C a 31°C, con incremento diario de 1 °C), como la saturación de oxígeno (20.23 ± 0.72 %) (Figuras 14A y 14B).

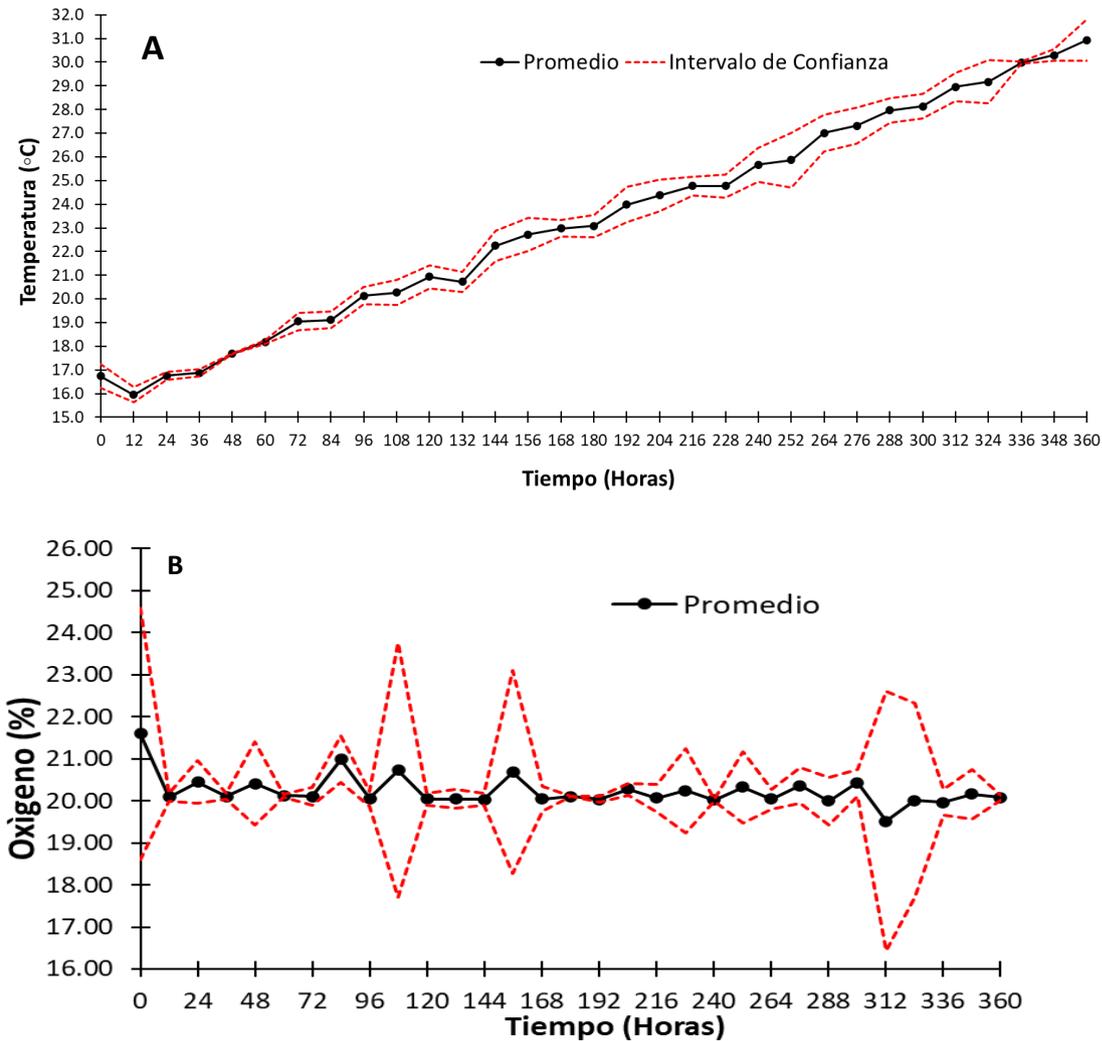


Figura 14. A) Curva de control de temperatura y B) saturación de oxígeno (%) en el experimento de temperatura letal media a 20% de saturación de oxígeno.

#### 4.2.2. Curva de sobrevivencia por talla para el tratamiento de 20% de saturación de oxígeno.

La  $TeL_{50\%}$  para las conchas de abanico del tratamiento a 20%  $OD_{sat}$  fue de 30 °C (IC del 95%). Este tratamiento terminó a los 31 °C, donde se obtuvo la mortalidad del 100% de las conchas (Figura 15). Respecto a estos resultados, Aguirre et al. 2016 observaron que la concha de abanico tiene una mayor tasa de respiración en condiciones cálidas (25 °C) en comparación con las normales (16 °C), pero con puntos

críticos de oxígeno (PcO<sub>2</sub>) similares a 16 °C (24.4 ± 1.9% O<sub>D</sub>sat) y 25 °C (21.4 ± 0.7% O<sub>D</sub>sat), manteniendo tasas respiratorias más o menos constantes hasta alrededor de 20% O<sub>D</sub>sat. Esta comparación de resultados permite confirmar que las conchas de abanico pueden tolerar temperaturas altas en combinación con hipoxia moderada (20% O<sub>D</sub>sat), al menos en condiciones de laboratorio.

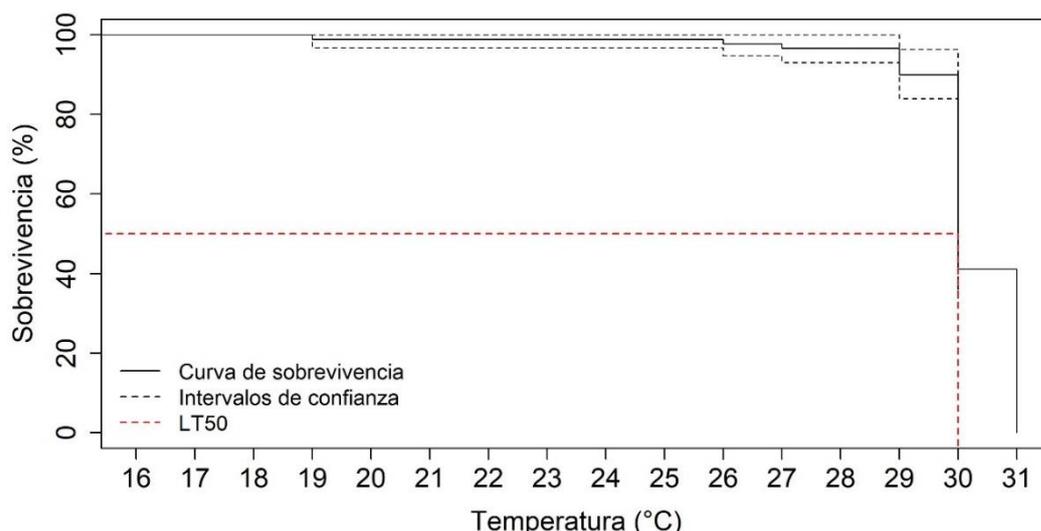


Figura 15. Curva de supervivencia de *Argopecten purpuratus* para el experimento de temperatura letal media a 20% de saturación de oxígeno.

#### 4.2.3. Curva de supervivencia de organismos para el tratamiento de 20% de saturación de oxígeno por tallas.

Las conchas de abanico de tallas pequeñas tuvieron una TeL50% de 31 °C y las de tallas grandes de 30 °C, con un IC del 95%, siendo los ejemplares más pequeños quienes tuvieron mejor resistencia a estas condiciones ( $X^2 = 9.9$ ,  $p = 0.002$ , g.l. = 1; Figura 16). Estos resultados concuerdan con lo observado en el experimento en condiciones de normoxia y con lo comentado acerca de la mayor resistencia de los organismos chicos, debido a la mayor relación superficie-volumen y su mayor capacidad de obtener el oxígeno disponible en el agua (Cueto-Vega et al., 2021).

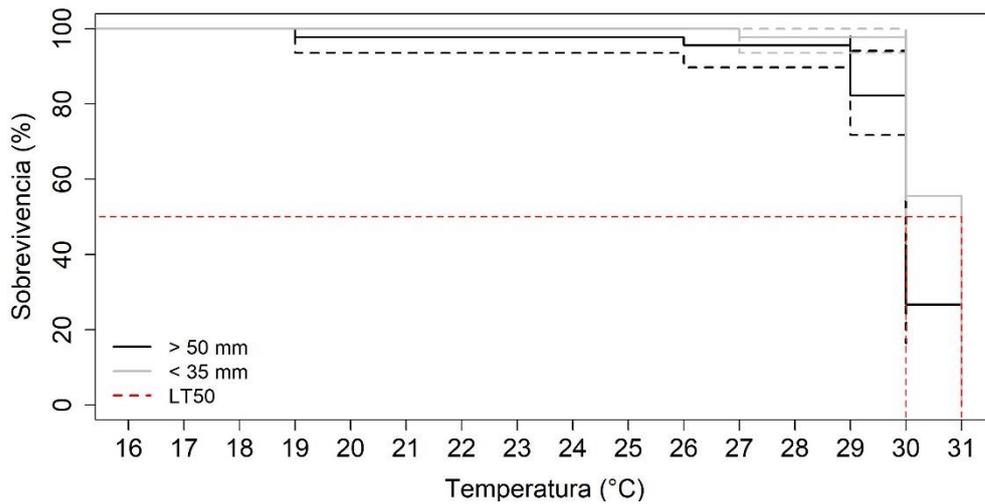
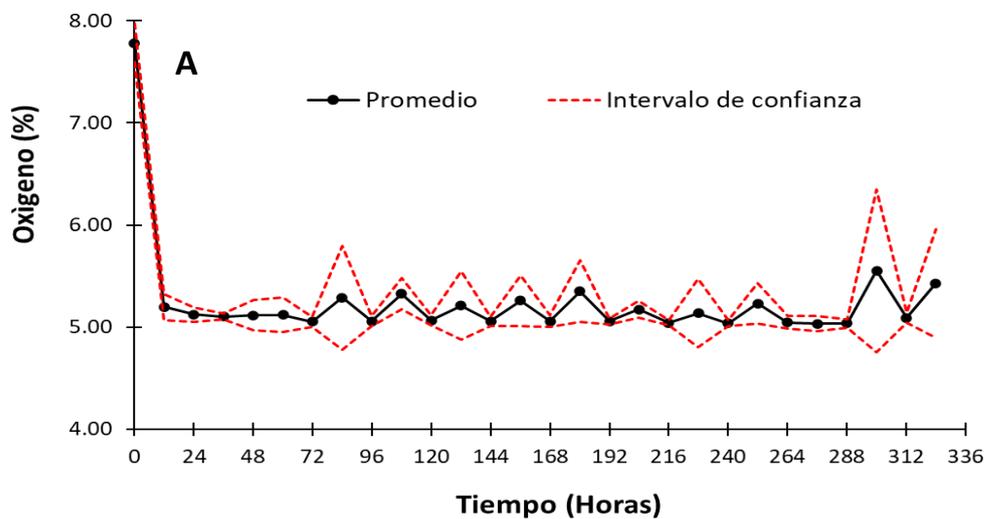


Figura 16. Curva de sobrevivencia de *Argopecten purpuratus* para el experimento de temperatura letal media a 20% de saturación de oxígeno, por tallas.

### 4.3. Temperatura letal media a 5% de saturación de oxígeno

#### 4.3.1. Control de variables fisicoquímicas.

Para el experimento al 5% O<sub>2</sub>sat (0.38 mg/l), las condiciones fisicoquímicas (temperatura y saturación de oxígeno) se mantuvieron constantes. La saturación de oxígeno se mantuvo con un promedio de  $5.25 \pm 0.17$  % (Figura 17A y 17B).



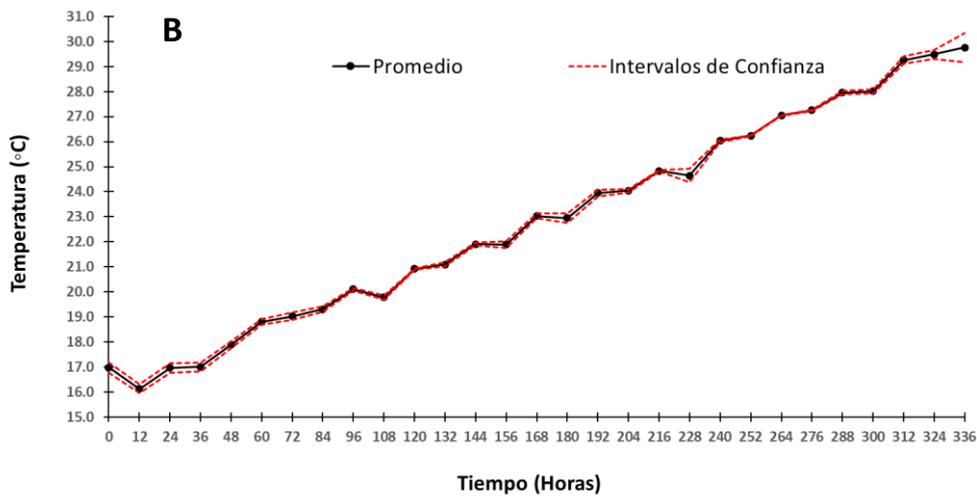


Figura 17. A) Curva de control de temperatura y B) saturación de oxígeno (%) en el experimento de temperatura letal media a 5% de saturación de oxígeno.

#### 4.3.2. Curva de sobrevivencia para el tratamiento de 5% de saturación de oxígeno.

En el tratamiento de aumento gradual de temperatura e hipoxia al 5% O<sub>Dsat</sub>, la TeL50 fue de 29°C, mientras que el 100% de mortalidad se obtuvo en la temperatura de 30 °C (Figura 18). Al igual que el tratamiento de 20% O<sub>Dsat</sub>, el comportamiento de la curva de sobrevivencia fue similar a lo observado en el tratamiento en normoxia. Esta coincidencia en los resultados en los distintos tratamientos (>95%, 20% y 5 % O<sub>Dsat</sub>), indica que el oxígeno no es un factor limitante de las conchas de abanico expuestas a concentración por encima del 5% O<sub>Dsat</sub>. Estos resultados concuerdan con el estudio realizado por Aguirre-Velarde et al. (2016), donde evaluaron los efectos progresivos de la captación de oxígeno en juveniles de *A. purpuratus* expuestos a 5% O<sub>Dsat</sub> y dos temperaturas (16 °C y 25 °C); ellos observaron puntos críticos de oxígeno a 16 °C (24.4 ± 1.9% O<sub>Dsat</sub>) y 25 °C (21.4 ± 0.7% O<sub>Dsat</sub>) y un fuerte decrecimiento en la oxirregulación entre el punto crítico de oxígeno y el 5% O<sub>Dsat</sub>, el cual fue más

pronunciado a 25 °C. A partir de estas evidencias, se puede confirmar que esta especie tiene una alta capacidad de regulación frente a las condiciones de oxígeno limitadas, al menos hasta el límite de 5% O<sub>Dsat</sub>; sin embargo, esto no significa que la especie no tenga consecuencias negativas en cuanto a las funciones metabólicas, al estar expuestas a niveles de oxígeno por debajo de los puntos críticos encontrados por Aguirre-Velarde et al. 2016.

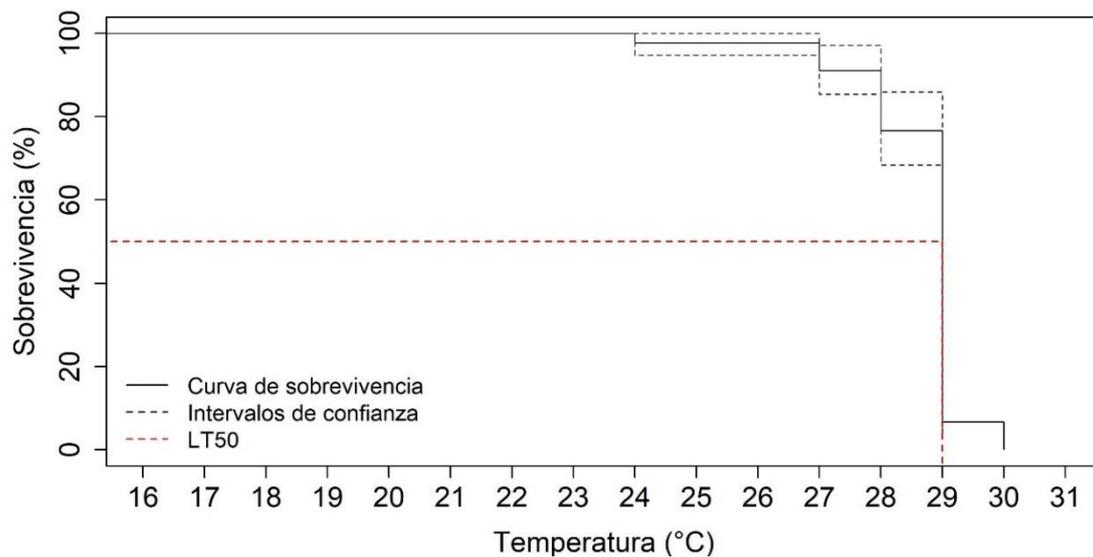


Figura 18. Curva de sobrevivencia de *Argopecten purpuratus* para el experimento de temperatura letal media a 5% de saturación de oxígeno.

#### 4.3.3. Curva de sobrevivencia por tallas para el tratamiento de 5% de saturación de oxígeno.

Para el caso de 5% O<sub>Dsat</sub>, la TeL50 de las conchas de abanico chicas fue de 29 °C y para las grandes de 28 °C, siendo las pequeñas quienes tuvieron una tolerancia mayor ( $X^2 = 17.6$ ,  $p < 0.001$ , g.l. = 1; Figura 19), lo cual es consistente con lo discutido anteriormente respecto a la mayor resistencia de las conchas chicas a la hipoxia.

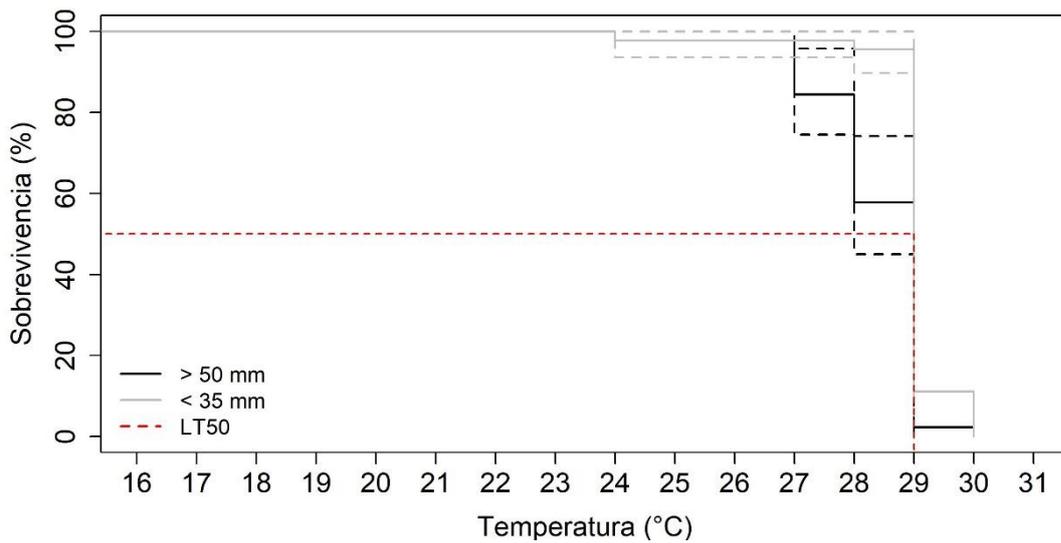
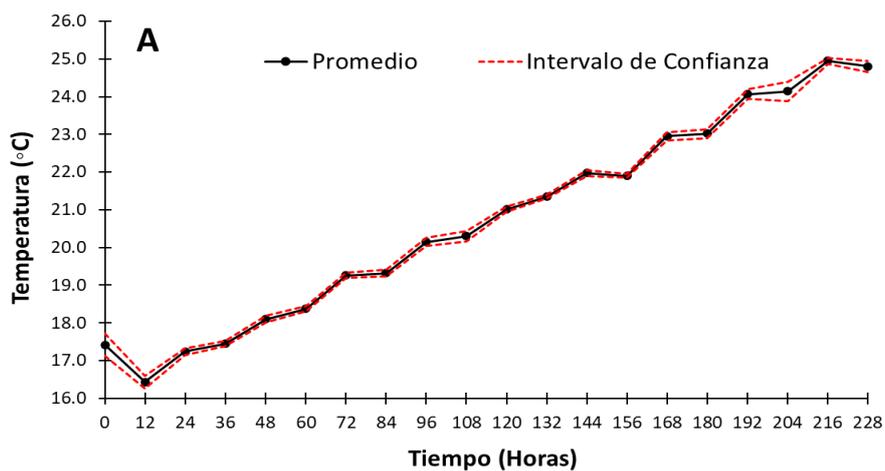


Figura 19. Curva de sobrevivencia de *Argopecten purpuratus* para el experimento de temperatura letal media a 5% de saturación de oxígeno, por tallas.

#### 4.4. Temperatura letal media a 2% de saturación de oxígeno

##### 4.4.1. Control de variables fisicoquímicas.

Para el experimento de temperatura letal media al 2% O<sub>2</sub>sat (0.15 mg/l), las condiciones fisicoquímicas se mantuvieron constantes, aunque la saturación de oxígeno a las 108 horas tuvo un aumento (3.5 %), lo cual se logró estabilizar, manteniéndose con un promedio de  $2.72 \pm 0.19$  % (Figura 20).



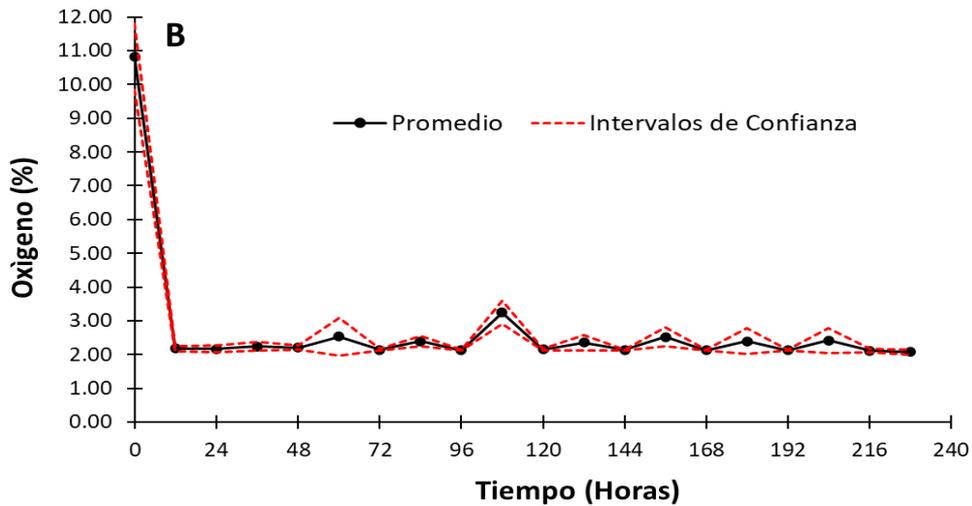


Figura 20. A) Curva de control de temperatura y B) saturación de oxígeno (%) en el experimento de temperatura letal media a 2% de saturación de oxígeno.

#### 4.4.2. Curva de sobrevivencia para el tratamiento de 2% de saturación de oxígeno.

Para el tratamiento a 2% O<sub>Dsat</sub>, la TeL<sub>50</sub> ocurrió a 23 °C, obteniendo el 100% de la mortalidad a una temperatura de 25 °C (Figura 21). Al comparar este resultado con lo observado en condiciones de normoxia, 20% O<sub>Dsat</sub> y 5%O<sub>Dsat</sub>, se puede observar que a 2% O<sub>Dsat</sub> hubo una reducción entre 4 y 5 °C en la tolerancia térmica de la concha de abanico. Como se mencionó anteriormente, Aguirre-Velarde et al. 2016 observó deficiencias en la oxirregulación de la concha de abanico expuesta a 5% O<sub>Dsat</sub> y 25 °C. Muchos bivalvos son capaces de activar vías bioquímicas anaeróbicas que les permiten tolerar y vivir por más tiempo frente a condiciones hipóxicas (Grieshaber, MK, Hardewig, I., Kreutzer, U., Portner, 1994). En este sentido, al estar expuesta a un valor extremo de oxígeno disuelto y una temperatura alta, la concha de abanico es posiblemente afectada en la producción de energía por las vías aeróbicas, y que a este nivel de oxígeno estén activados los mecanismos de metabolismo

anaeróbico, disminuyendo la capacidad de producción de energía y debilitando a los organismos, lo que explicaría las diferencias observadas entre la curva de sobrevivencia a 2% O<sub>Dsat</sub> y el resto de tratamientos (Aguirre-Velarde et al. 2019).

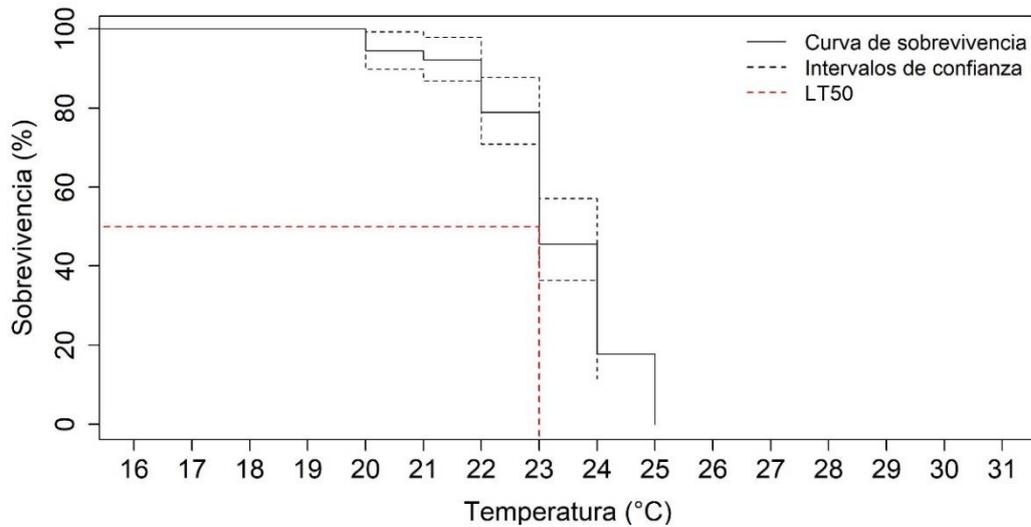


Figura 21. Curva de sobrevivencia de *Argopecten purpuratus* para el experimento de temperatura letal media a 2% de saturación de oxígeno.

#### 4.4.3. Curva de sobrevivencia por tallas para el tratamiento de 2% de saturación de oxígeno.

Los tamaños evaluados tuvieron similitudes en la TeL50, ya que las chicas y grandes no tuvieron diferencias significativas en sus curvas de sobrevivencia (TeL50 = 23 °C), pudiendo suponer que, a estas condiciones, la especie es afectada sin importar el tamaño ( $X^2 = 0.3$ ,  $p = 0.6$ , g.l. = 1); (Figura 22).

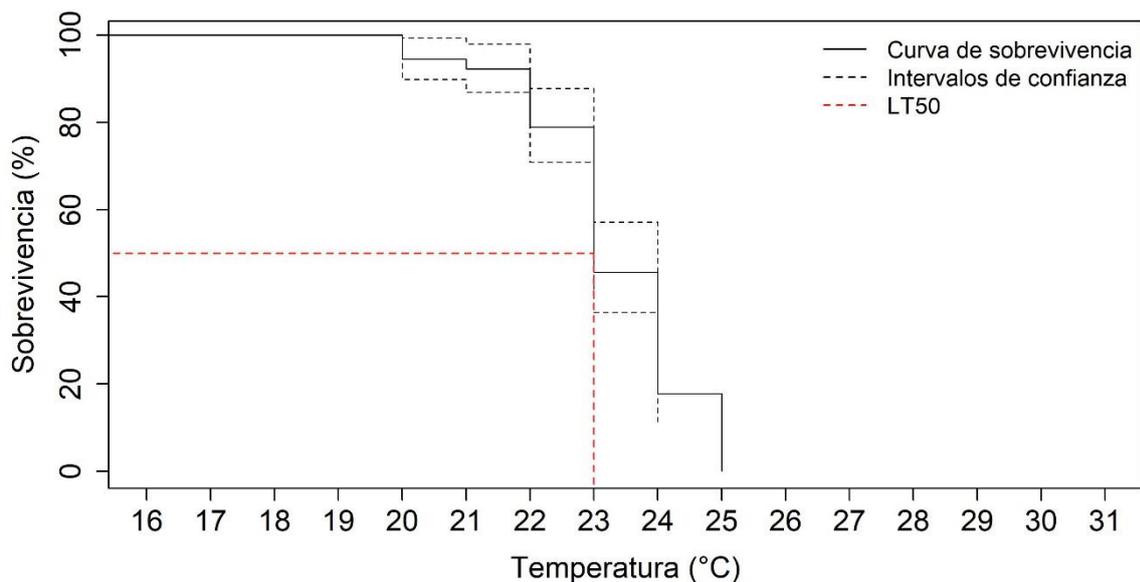


Figura 22. Curva de sobrevivencia de *Argopecten purpuratus* para el experimento de temperatura letal media a 2% de saturación de oxígeno, por tallas.

#### 4.4.4. Implicaciones de la teoría de la tolerancia térmica en la resistencia de la concha de abanico a la combinación hipoxia-temperatura.

De acuerdo con la teoría de la limitación de la tolerancia térmica por la deficiencia de oxígeno (H. Pörtner, 2010), a menor disponibilidad de oxígeno, la ventana (tolerancia) térmica de las especies se verá reducida, activando mecanismos fisiológicos y metabólicos, como estrategias de tolerancia pasiva al estrés térmico (Brokordt, K., Pérez, H., Herrera, C., & Gallardo, 2015). De acuerdo con esta teoría, se esperaba que en los experimentos de estimación de la temperatura letal se observara claramente una disminución significativa en la LTe50, conforme se aumentara el nivel de hipoxia. Sin embargo, la LTe50 promedio fue similar entre los tratamientos de normoxia (30 °C), 20% DO<sub>sat</sub> (30 °C) y 5% OD<sub>sat</sub> (29 °C), y fue hasta 2% OD<sub>sat</sub> que se pudo observar una diferencia clara en la sobrevivencia de los individuos.

En resumen, la concha de abanico no se comportó totalmente como se esperaba, es decir, la tolerancia térmica se mantuvo constante hasta niveles muy bajos de oxígeno. En este sentido, Sunday et al. (2010) relacionaron la tolerancia térmica en organismos ectotermos, como la concha de abanico, con su distribución latitudinal. Estos autores encontraron que, en los organismos marinos, a mayor latitud, mayor es su tolerancia térmica, esto debido a que las especies han evolucionado en ambientes cambiantes y, por lo tanto, cuentan con mecanismos fisiológicos y metabólicos para hacer frente a amplios intervalos de temperaturas. Respecto a la concha de abanico es una especie adaptada a un ambiente templado, como es el Sistema de Afloramiento Costero del Perú, y capaz de vivir en una zona de transición ambiental con ambientes tropicales, como es Sechura (Aguirre-Velarde et al., 2016b; Aguirre-Velarde, Pecquerie, Jean, Thouzeau, Flye-Sainte-Marie, et al., 2019; Cueto-Vega et al., 2021; Mendo, J. & Quevedo, 2020; Wolff, 1987). Es una especie capaz de vivir en un amplio intervalo de temperaturas (Urban, 1994), es un buen oxirregulador y vive en niveles muy bajos de oxígeno disuelto (Aguirre-Velarde et al., 2016b, 2017; Aguirre-Velarde, Pecquerie, Jean, Thouzeau, & Flye-Sainte-Marie, 2019; Cueto-Vega et al., 2021). Esta combinación de adaptaciones puede ser la razón que hasta 5% O<sub>2</sub>sat, la concha de abanico fuera capaz de sobrevivir a temperaturas altas, lo que podría aportar nuevas consideraciones a la teoría de tolerancia térmica propuesta por Portner (2010), respecto a especies adaptadas a ambientes naturalmente cambiantes, como las especies de ambientes templados.

#### **4.5. Tiempo letal medio en simulaciones del afloramiento costero e hipoxia severa**

##### **4.5.1. Control de variables fisicoquímicas**

Para este experimento se fijó el oxígeno a 2% O<sub>Dsat</sub> (0.15 mg/l) y a una temperatura de 16 °C. La condición de los organismos se estimó en un IC= 9.41 g/cm (Anexo 2). Las condiciones fisicoquímicas fueron controladas, logrando mantener una temperatura promedio de  $16.23 \pm 0.15$  °C y una saturación de oxígeno de  $2.61 \pm 0.26$  % O<sub>Dsat</sub>, como se muestra en la Figura 23.

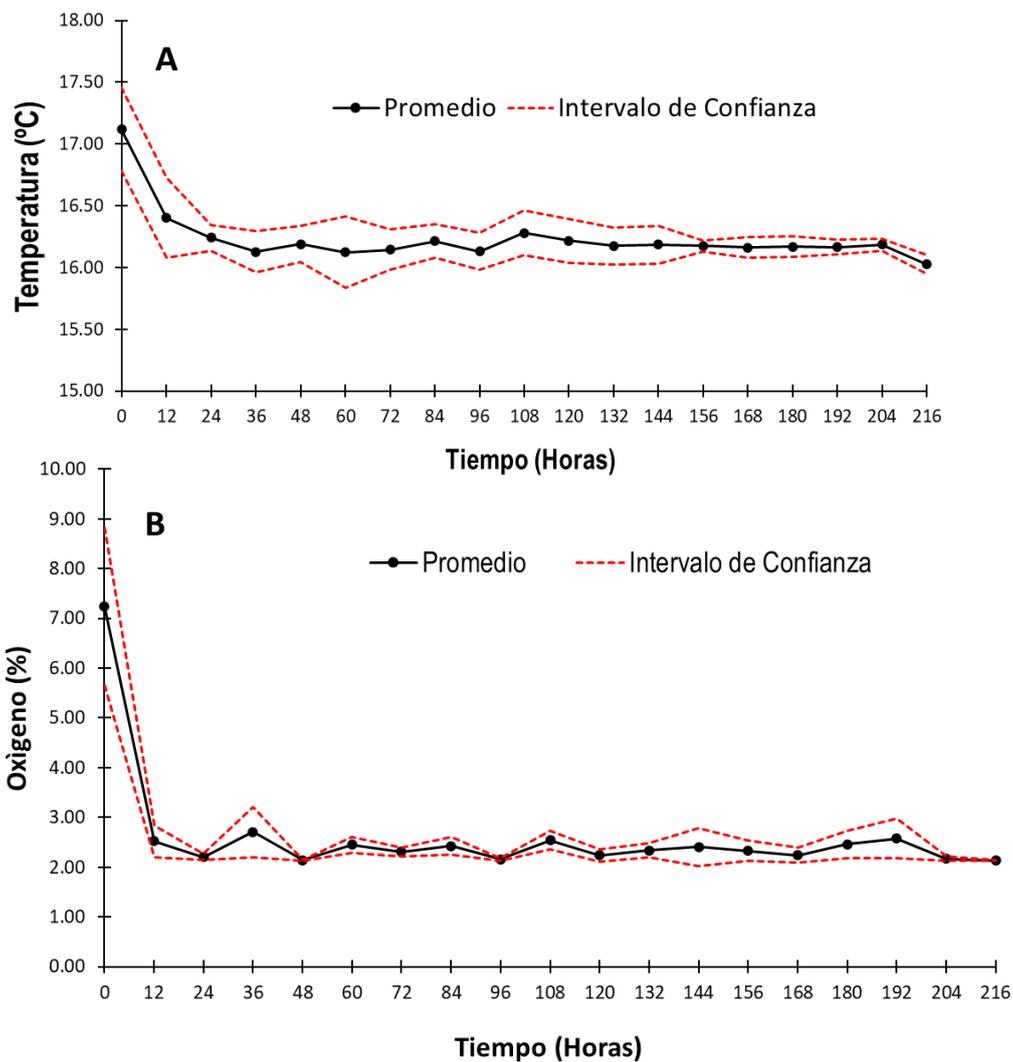


Figura 23. A) Curva de control de temperatura y B) saturación de oxígeno (%) en el experimento de tiempo letal medio para la interacción afloramiento costero-hipoxia severa.

#### **4.5.2. Curva de sobrevivencia para la interacción afloramiento costero-hipoxia severa**

Durante el experimento de TL50 a 2% O<sub>2</sub>sat y 16 °C, el TL50 se consiguió a las 120 horas de exposición (5 días), consiguiendo la mortalidad del 100% a las 240 horas (10 días), en este sentido, se puede asumir que la especie tiene buena tolerancia a la hipoxia severa, como se observa en la Figura 24. El Sistema de Afloramiento Costero del Perú se caracteriza por aportar agua fría, cargada de nutrientes, pero baja en oxígeno a los ecosistemas costeros peruanos (Gutiérrez, Bertrand, Wosnitza-mendo, Dewitte, Purca, Peña, Chaigneau, Graco, et al., 2011). Esta dinámica ambiental es la que predomina en la Bahía de Paracas, uno de los sitios de mayor cultivo de concha de abanico, en la cual se han reportado mortalidades masivas de esta especie (Aguirre-Velarde, Pecquerie, Jean, Thouzeau, & Flye-Sainte-Marie, 2019; Cueto-Vega et al., 2021), los cuales son intensificados por la eutrofización de la bahía, la presencia de compuestos de sulfuro, conocidos como “aguas blancas”, florecimientos algales nocivos (Cuellar-Martinez, T., Huanca Ochoa, A., Sánchez, S., Aguirre Velarde, A., Correa, D., Egoavil Gallardo, K. A., Luján Monja, H. F., Ipanaqué Zapata, J. M., Colas, F., Tam, J., & Gutiérrez, 2021) y la estratificación de la bahía, adjuntando las aguas frías y vientos; donde ya se han reportado eventos que produjeron altas mortalidades (Aguirre-Velarde et al., 2016b; Cueto-Vega et al., 2021), siendo este un problema en el manejo del cultivo de la concha de abanico. Aguirre et al. (2016) afirmó que a condiciones normales de temperatura (16 °C) en el cultivo de las conchas de abanico, las tasas de consumo de oxígeno son menores ( $0.12 \pm 0.007$  mgO<sub>2</sub> Ind<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>). Estos resultados son debido a que la concha de abanico es una especie de bivalvo que puede regular su frecuencia respiratoria similar y eficientemente a esta temperatura

templada. Sin embargo, estar expuesto a hipoxia severa podría tener las mayores consecuencias negativas en su metabolismo y desencadenar su muerte.

Aguirre-Velarde (2019), en un estudio sobre las condiciones ambientales de la bahía de Paracas, observó que, durante el periodo de verano, los eventos hipóxicos/anóxicos y aguas blancas se relacionaron con una alta mortalidad y pérdida de peso somático de la concha de abanico, afectando la bioenergética, el crecimiento y reproducción de esta. Por su parte, Cueto-Vega et al. (2021) relacionaron los eventos de mortalidad masiva en Paracas durante 2013 y 2015, y encontraron una relación significativa entre valores por debajo de 20% O<sub>Dsat</sub> y las fechas en las que ocurrieron dichos eventos de mortalidad. Debido a esto, estos autores concluyeron que la hipoxia en combinación con otros factores estresantes, como la temperatura, podrían ser los causantes de las mortalidades de las conchas de abanico.

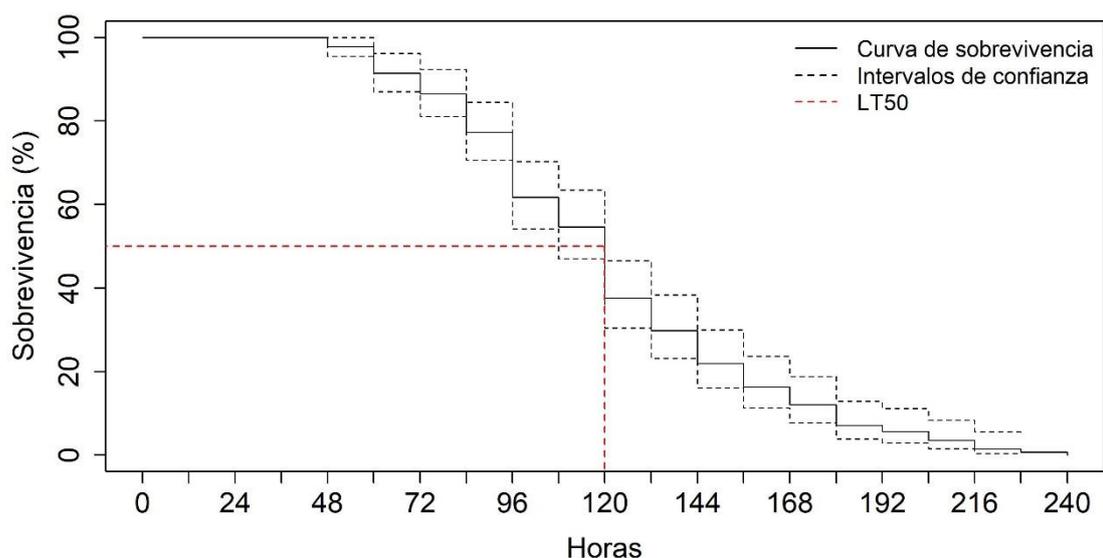


Figura 24. Curva de supervivencia de *Argopecten purpuratus* en el experimento de interacción afloramiento costero-hipoxia severa.

En la Figura 25, se muestra el TL50 de los ejemplares de conchas de abanico separados por tamaño, siendo las chicas (TL50 = 120 horas) más tolerantes a estas condiciones en comparación de las grandes (TL50 = 96 horas;  $X^2 = 6$ ,  $p = 0.01$ , g.l. = 1). Esto coincide con los resultados de Cueto-Vega et al. (2021), que expusieron a las conchas de abanico a la misma temperatura (16 °C), pero a un nivel de hipoxia menor (1% O<sub>Dsat</sub>). En dicho trabajo, los ejemplares pequeños fueron más resistentes que los grandes, debido a su mayor relación superficie-volumen, lo que les permite obtener de manera más eficiente el oxígeno del agua, lo que permite mantener su metabolismo basal por más tiempo. También, es posible que los organismos grandes necesiten una mayor cantidad de energía, para hacer frente a sus requerimientos reproductivos, como el desarrollo y mantenimiento de las gónadas, el desove y la recuperación post-desove. Asimismo, Ramajo (2019), mencionó que las especies que habitan en ambientes acuáticos influenciados por los afloramientos costeros, pueden soportar condiciones de aguas frías, ácidas e hipóxicas, como lo observado en los juveniles de *Argopecten purpuratus*, que aumentaron su rendimiento metabólico frente a la hipoxia para lograr mantener su crecimiento.

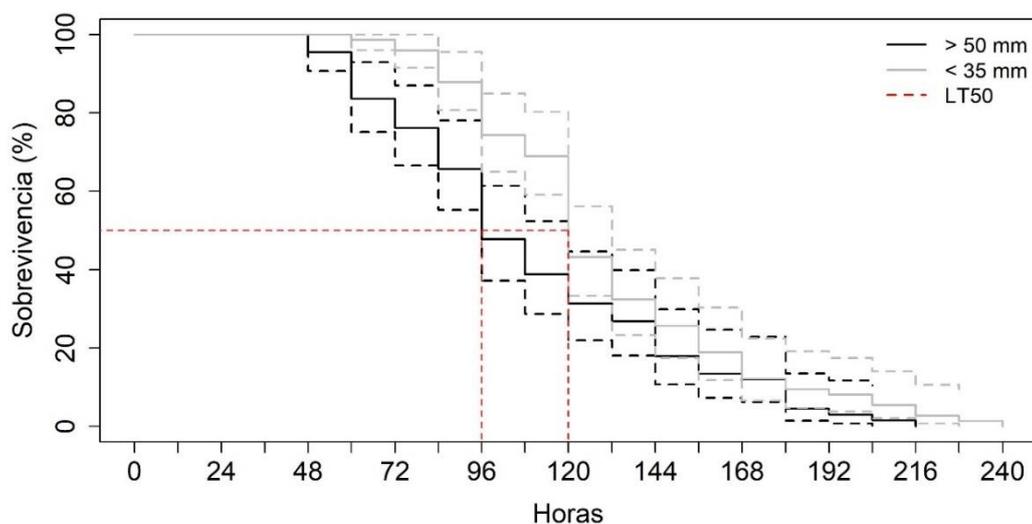


Figura 25. Curva de supervivencia de *Argopecten purpuratus* en el experimento de interacción afloramiento costero-hipoxia severa, por tallas.

#### 4.6. Tiempo letal medio en simulaciones de El Niño costero e hipoxia severa

##### 4.6.1. Control de condiciones fisicoquímicas

La estimación del IC para los organismos de este experimento fue de  $19.14 \text{ g/cm}^3$  (Anexo 3). Las condiciones fisicoquímicas tuvieron problemas de control, principalmente para estabilizar la temperatura durante las primeras 12 horas, pero luego se logró estabilizar teniendo un promedio de temperatura de  $24.79 \pm 0.13 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $2.11 \pm 0.01\%$  O<sub>2</sub>sat (Figura 26).

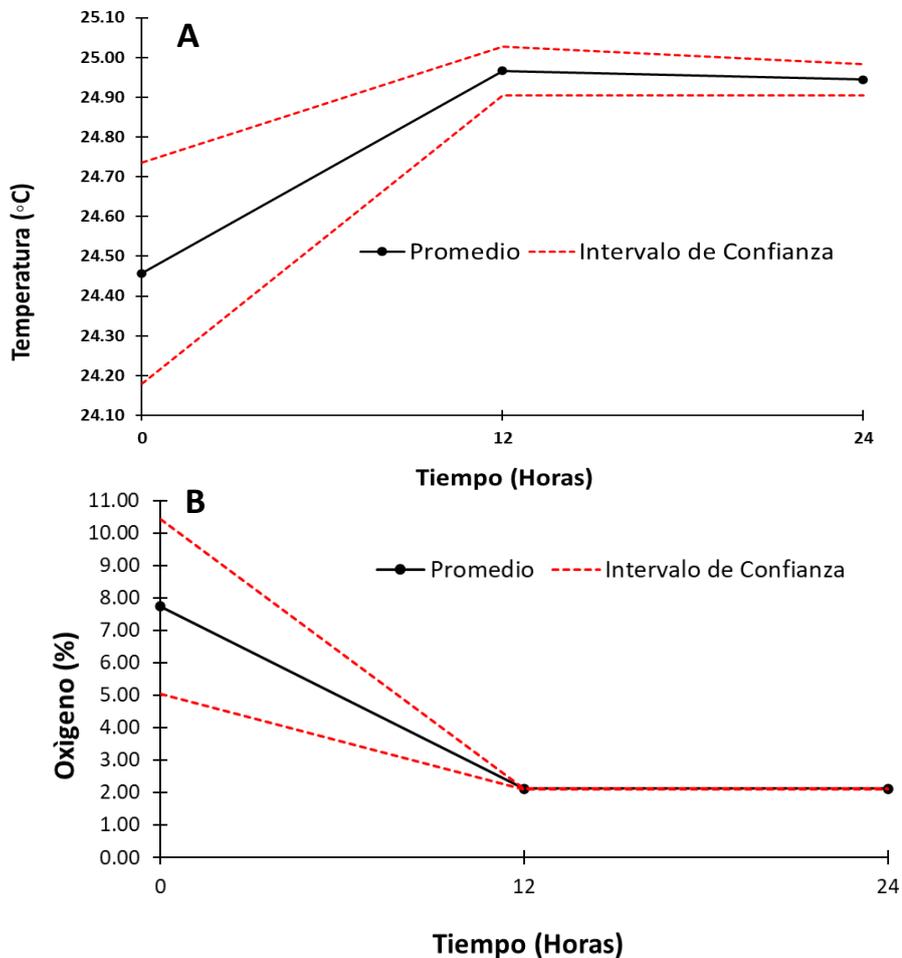


Figura 26. A) Curva de control de temperatura y B) saturación de oxígeno (%) en el experimento de tiempo letal medio para la interacción El Niño costero-hipoxia severa.

#### **4.6.2. Curva de sobrevivencia para la interacción El Niño costero -hipoxia severa**

En el experimento de 2% O<sub>2</sub>sat y 25 °C, el TL<sub>50</sub> de las conchas de abanico ocurrió a las 12 horas de exposición, presentando un notorio desprendimiento del manto y músculo, con el 100% de la mortalidad a las 24 horas, mostrando también el desprendimiento total del músculo y tejidos, acompañado de olores fuertes por la descomposición de los organismos (Figura 27). Sin duda, la exposición a estas condiciones significó un impacto drástico en la sobrevivencia de los organismos, esto tiene que ver con que, a temperaturas altas, las especies requieren de un mayor consumo de oxígeno, acelerando su metabolismo fisiológico, disminuyendo su capacidad de sobrevivir (Aguirre-Velarde et al., 2016b; Cueto-Vega et al., 2021; H. Pörtner, 2010).

Tanto en los acuarios de tratamiento, como los de control, se observaron desoves parciales, aunque las gónadas femeninas de los organismos bajo hipoxia, eran expulsadas en forma de masas compactas que quedaban sobre el fondo del acuario, mientras que de los organismos control, se pudieron observar células fecundadas viables, lo que concuerda con la explicación planteada respecto al incremento de la producción de la concha de abanico en las décadas de 1980 y 1990, asociadas con el Fenómeno de El Niño (Mendo, J. & Wolff, 2003; Tarazona et al., 2007).

La Bahía de Sechura es el sitio de mayor producción de concha de abanico en el Perú, con hasta el 80% de la producción (Mendo, J. & Quevedo, 2020). Esta bahía es considerada propensa a los cambios ambientales, influenciada por dos corrientes; la corriente de Humboldt (transporta aguas frías del sur) y la región ecuatorial (transporta aguas cálidas por el norte) (Vivar, 2016). Los eventos de mortalidad en épocas

recientes son evidencias de un cambio importante en las condiciones de la bahía, posiblemente relacionados con eutrofización y estar muy cerca al límite de capacidad de carga de esta bahía (Cueto-Vega et al., 2021), lo cual es necesario evaluar a la brevedad posible.

Respecto a otras especies, Artigaud et al. (2014), evaluaron las respuestas respiratorias de *Pecten maximus* y *Mytilus spp* a 25 °C e hipoxia (10% saturación de oxígeno), mostrando un decrecimiento de sus capacidades de oxirregulación y una reducción del rendimiento aeróbico, concluyendo que las especies de submareales son más vulnerables a estas condiciones. Por otro lado, Salgado (2020), al exponer a *Nodipecten subnososus* frente a hipoxia (40% ODsat y 30 °C), concluyó que esta especie tiene una capacidad metabólica para tolerar estos cambios, sin embargo, su respuesta depende a la edad y tamaño, debido a la demanda energética. Al estar expuesta a una temperatura crítica, esta especie tiene pérdida de homeostasis energética en juveniles, comprobando que, ante eventos de hipoxia, disminuye el tiempo de sobrevivencia en temperatura severas.

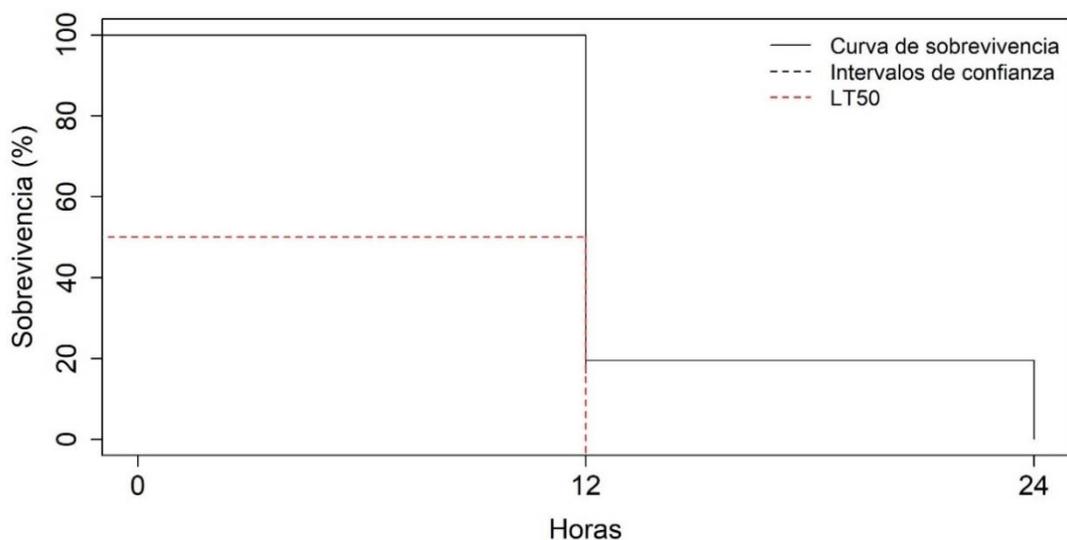


Figura 27. Curva de sobrevivencia de *Argopecten purpuratus* en el experimento de interacción El Niño costero-hipoxia severa.

#### 4.6.3. Curva de sobrevivencia para la interacción El Niño costero-hipoxia severa

En la Figura 28 se muestra el TL50 de los dos tamaños evaluados para la concha de abanico, chicas y grandes. Los ejemplares chicos (12 °C) y grandes (12 °C) se comportaron de manera distinta ( $X^2 = 23.1$ ,  $p = 0.6$ ,  $g.l.= 1$ ; Figura 26), siendo las más grandes la que toleran mejor a estas condiciones, a diferencia de todos los experimentos anteriores. Esto, en términos de manejo de cultivos, no es muy relevante, ya que el TL50 y 100% de mortalidad ocurrieron en 12 y 24 horas, respectivamente. Estos tiempos son muy cortos para adoptar medidas de manejo de cultivo, por lo que ambas tallas de organismos corren el mismo riesgo de sufrir eventos de mortalidad masiva.

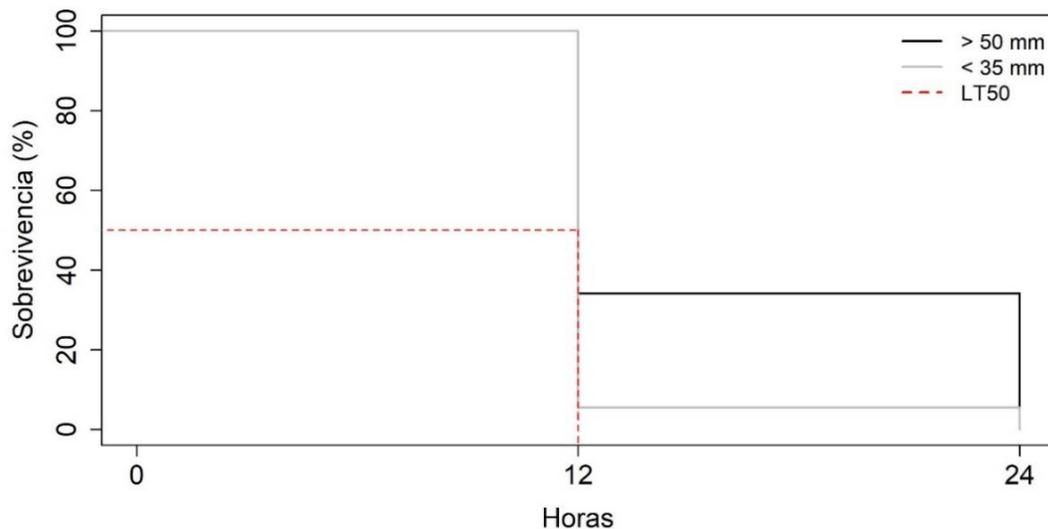


Figura 28. Curva de sobrevivencia de *Argopecten purpuratus* en el experimento de interacción El Niño-hipoxia severa, por tallas.

#### **4.6.4. Implicaciones de manejo en zonas de cultivo**

Los eventos de mortalidad de la concha de abanico en sus sitios de cultivo en las décadas de los 2000 y 2010, están relacionados con la intensificación de los eventos de hipoxia en las bahías y, en gran parte, por su interacción con el calentamiento del agua en las costas peruanas (Aguirre-Velarde et al. 2019; Cueto-Vega et al., 2021). Los resultados de este estudio concuerdan con dichas observaciones y denotan como temperaturas  $\geq 23$  °C pueden ser letales en condiciones de hipoxia severa ( $< 5\%$  O<sub>Dsat</sub>), incluso en eventos cortos (24 horas).

Si bien, la Bahía de Sechura es la de mayor volumen de desembarques en la costa peruana, ahí aun predominan los cultivos de fondo sobre los suspendidos (Mendo y Quevedo 2020), lo que significa una fuerte desventaja al enfrentarse a eventos de hipoxia-temperaturas altas. Los organismos que están en el fondo pueden estar expuestos a mayores niveles de hipoxia que, en cultivos suspendidos, debido al exceso de materia orgánica en el fondo y la ocurrencia de aguas blancas, por ejemplo (Aguirre-Velarde et al., 2016b; Aguirre-Velarde, Pecquerie, Jean, Thouzeau, Flye-Sainte-Marie, et al., 2019; Cueto-Vega et al., 2021)(Aguirre-Velarde et al., 2016b; Aguirre-Velarde, Pecquerie, Jean, Thouzeau, Flye-Sainte-Marie, et al., 2019). Además, es más fácil plantear y ejecutar medidas de emergencia en los cultivos suspendidos que en los de fondo (como cosecha adelantada, levantamiento de linternas, oxigenación mecánica del agua o el traslado de cultivos) (Cueto-Vega et al., 2021).

Respecto a Paracas, la situación actual es grave, debido a la desoxigenación de la bahía, la cual se intensifica en el verano e inicios del otoño, cuando la columna de agua se estratifica, las temperaturas del agua se elevan, ocurren eventos de aguas

blancas y se intensifican los florecimientos algales nocivos (Aguirre-Velarde, Pecquerie, Jean, Thouzeau, & Flye-Sainte-Marie, 2019). En esta bahía, las medidas de manejo deben incluir estrategias de restauración del ecosistema y así llevar de la mano la recuperación de la producción acuícola.

Respecto a las demás zonas de importancia acuícola para la concha de abanico a lo largo de la costa peruana (Departamento de Ica y Ancash, primordialmente; Mendo y Quevedo, 2020) es necesario evaluar su capacidad de carga y diseñar planes de manejo que prevean y busquen disminuir escenarios de hipoxia severa y calentamiento del agua, para evitar en la medida de lo posible eventos de mortalidad masiva. En general, se recomienda instalar protocolos de monitoreo y alerta temprana ante eventos de hipoxia-calentamiento del agua a lo largo de la costa peruana, lo que sería útil para el manejo de los sistemas de cultivo en dicho litoral (Cuellar-Martinez, T., Huanca Ochoa, A., Sánchez, S., Aguirre Velarde, A., Correa, D., Egoavil Gallardo, K. A., Luján Monja, H. F., Ipanaqué Zapata, J. M., Colas, F., Tam, J., & Gutiérrez, 2021).

Aunque nuestros resultados fueron comparables con Urban (1994), quien utilizó organismos de Bahía de Independencia, Ica, es posible que nuestros resultados de LTe50 y LT50 sean distintos a los que se puedan observar en individuos del extremo sur de Perú y el norte de Chile. Esto debido a que los organismos utilizados aquí provienen de la Bahía de Sechura, el límite norte de la especie, donde se pueden dar temperaturas altas (>20 °C) debido a la influencia de dos corrientes, la de Humboldt (transporta aguas frías del sur) y la Ecuatorial (transporta aguas cálidas por el norte) (Vivar, 2016), mientras que las poblaciones al extremo sur de su distribución están aclimatadas a temperaturas por debajo de los 20 °C (Aguirre-Velarde et al., 2016b;

Ramajo, L., Fernandez, C., Nuñez, Y., Caballero, P., Lardardies, M.A., Poupin, M.J., Birchenough, 2019; Thomas et al., 2019).

## V. CONCLUSIONES

- La concha de abanico tiene un intervalo de tolerancia térmica similar en condiciones de normoxia (> 95% O<sub>Dsat</sub>), hipoxia moderada (20% O<sub>Dsat</sub>) y el límite inferior de oxirregulación de la especie (5% O<sub>Dsat</sub>). Esto puede estar relacionado con que está adaptada a un intervalo amplio de temperaturas (8-36 °C) y niveles bajos de oxígeno en el ambiente marino.
- Su metabolismo sufre alteraciones al encontrarse a condiciones extremas de hipoxia severa (< 2% O<sub>Dsat</sub>), debido a la reducción de la capacidad de producción de energía y su limitación de la sobrevivencia.
- Las conchas de abanico pueden regular su frecuencia respiratoria frente al afloramientos costeros debido a las temperaturas templadas, pero también desencadenar la muerte de la especie y alterar su metabolismo a causa de la hipoxia severa, TL50% 240 horas (10 días).
- Las tallas chicas (< 35mm) tienen una mayor tolerancia a la hipoxia severa, al mantener su metabolismo basal por más tiempo, debido a su mayor relación superficie-volumen.
- La exposición a temperatura alta (25°C) e hipoxia, hacen que las conchas de abanico, sin importar su tamaño, corran riesgo en su capacidad de oxirregulación y la reducción aeróbica; causando la muerte en 24 horas (LT50% a 12h).
- La combinación de hipoxia severa y temperaturas altas podrían ser las causantes de las altas mortalidades de concha de abanico reportadas recientemente, afectando a la especie sin importar su tamaño.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda que se continúe evaluando la tolerancia térmica y su interacción con la hipoxia en organismos marinos del Sistema de Afloramiento Costero del Perú, con el fin de compararlos con lo planteado por la teoría de la limitación de la tolerancia térmica por la deficiencia de oxígeno, propuesta por Portner (2010).
- Crear estrategias que sirvan para restaurar el ecosistema acuático y las producciones acuícolas puedan lograr recuperarse, frente a las altas mortalidades que se han reportado años anteriores.
- Analizar los monitoreos y crear tablas que indiquen los periodos de alerta ante estos eventos y su intensidad con la que se presenten; pero también el rango de tiempo (duración de este fenómeno) para actuar frente a uno de estos.
- Establecer un plan de manejo para los cultivos de fondo y cultivo suspendido para actuar frente a la presencia de El Niño o Los afloramientos costeros y se logre recuperar la producción.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre-Velarde, A. y Flye-Sainte-Marie, J. (2019). *Ciclo de vida de la concha de abanico*.
- Aguirre-Velarde, A., Jean, F., Thouzeau, G., & Flye-Sainte-Marie, J. (2016a). *Effects of progressive hypoxia on oxygen uptake in juveniles of the Peruvian scallop, *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819)*.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.07.030i>
- Aguirre-Velarde, A., Jean, F., Thouzeau, G., & Flye-Sainte-Marie, J. (2016b). Effects of progressive hypoxia on oxygen uptake in juveniles of the Peruvian scallop, *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819). *Aquaculture*, 451, 385–389.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.07.030>
- Aguirre-Velarde, A., Jean, F., Thouzeau, G., & Flye-Sainte-Marie, J. (2017). Feeding behaviour and growth of the Peruvian scallop (*Argopecten purpuratus*) under daily cyclic hypoxia conditions. *Journal of Sea Research*, 131, 85–94.  
<https://doi.org/10.1016/j.seares.2017.11.001>
- Aguirre-Velarde, A., Pecquerie, L., Jean, F., Thouzeau, G., & Flye-Sainte-Marie, J. (2019). Predicting the energy budget of the scallop *Argopecten purpuratus* in an oxygen-limiting environment. *Journal of Sea Research*, 143, 254–261.  
<https://doi.org/10.1016/j.seares.2018.09.011>
- Aguirre-Velarde, A., Pecquerie, L., Jean, F., Thouzeau, G., Flye-Sainte-Marie, J., & Jean, F. (2019). Predicting the energy budget of the scallop *Argopecten purpuratus* in an oxygen-limiting environment. *Journal of Sea Research*, 143, 254–261. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2018.09.011i>
- Aguirre-Velarde, A., Thouzeau, G., Jean, F., Mendo, J., Cueto-Vega, R., Kawazo-

- Delgado, M., Vásquez-Spencer, J., Herrera-Sanchez, D., Vega-Espinoza, A., & Flye-Sainte-Marie, J. (2019). Chronic and severe hypoxic conditions in Paracas Bay, Pisco, Peru: Consequences on scallop growth, reproduction, and survival. *Aquaculture*, 512(October). <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734259>
- Anguilletta Jr, M J y Anguilletta, M. J. (2009). *Thermal adaptation: a theoretical and empirical synthesis*.
- Artigaud, S., Lacroix, C., Pichereau, V., & Flye-sainte-marie, J. (2014). *Bioquímica y fisiología comparadas , Parte A Respuesta respiratoria al calor e hipoxia combinados en el mar bivalvos Pecten maximus y Mytilus spp . 175, 135–140*.
- Bermudez Corcuera, P. I., & Aquino Bravo, H. (2004). Manual de cultivo suspendido de concha de abanico. *AECI/PADESPA - FONDEPES. Lima*.
- Bricelj, V. M., Shumway, S. (1991). Physiology: energy acquisition and utilization. *Scallops: biology. Ecology and Aquaculture*, 21.
- Brokordt, K., Pérez, H., Herrera, C., & Gallardo, A. (2015). Reproduction reduces HSP70 expression capacity in *Argopecten purpuratus* scallops subject to hypoxia and heat stress. *Aquatic Biology*, 23(3), 265–274. <https://doi.org/https://doi.org/10.3354/ab00626>
- Brokordt, k., Pérez, H. y Campos, F. (2013). Environmental hypoxia reduces the escape response capacity of juvenile and adult scallops *Argopecten purpuratus*. *J Shellfish Res*, 32, 369–376.
- Comexperú, P. (2022). *EXPORTACIONES ENERO-OCTUBRE DE. 2019–2021*.
- Cuellar-Martinez, T., Huanca Ochoa, A., Sánchez, S., Aguirre Velarde, A., Correa, D., Egoavil Gallardo, K. A., Luján Monja, H. F., Ipanaqué Zapata, J. M., Colas,

- F., Tam, J., & Gutiérrez, D. (2021). Paralytic shellfish toxins in Peruvian scallops associated with blooms of *Alexandrium ostenfeldii* (Paulsen) Balech & Tangen in Paracas Bay, Peru. *Marine Pollution Bulletin*, 173(Pt A), 112988.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112988>
- Cueto-Vega, R., Flye-Sainte-Marie, J., Aguirre-Velarde, A., Jean, F., Gil-Kodaka, P., & Thouzeau, G. (2021). Size-based survival of cultured *Argopecten purpuratus* (L, 1819) under severe hypoxia. *Journal of the World Aquaculture Society*, May.  
<https://doi.org/10.1111/jwas.12777>
- Dionicio, J. y, & Flores, J. (2015). Efecto de la temperatura en respuestas fisiológicas de la concha de abanico *Argopecten purpuratus*. *Revista Peruana de Biología*, 22(3), 329–334. <https://doi.org/10.15381/rpb.v22i3.11439>
- Emerson, C. W., Grant, J., Mallet, A., & Carver, C. (1994). Growth and survival of sea scallops *Placopecten magellanicus*: effects of culture depth. *Marine Ecology Progress Series*, 119–132.
- FONDEPES. (2016). *MANUAL DE CULTIVO SUSPENDIDO DE CONCHA DE ABANICO*. 57.
- García, A. (1989). «El boom» de la concha de abanico en la Reserva Nacional de Paracas: un caso para meditar. *Sollertia*, IV, 5, 14–15.
- Gewin, V. (2010). Dead in the water. *Nature* 466 (August), 812–814.
- González, R. (2010). Auge y crisis: la pesquería de la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en la región Pisco-Paracas, costa sur del Perú. *Espacio y Desarrollo*, 0(22), 25–51.
- Grieshaber, MK, Hardewig, I., Kreutzer, U., Portner, H. (1994). Fisiológica y

respuestas metabólicas a la hipoxia en invertebrados. *Rev. Fisiol. Bioquímica Farmacol*, 125, 43–147.

Gutiérrez, D., Bertrand, A., Wosnitza-mendo, C., Dewitte, B., Purca, S., Peña, C., Chaigneau, A., Graco, M., Echevin, V., Grados, C., & Guevara-Carrasco, R. (2011). Sensibilidad del sistema de afloramiento costero del Perú al cambio climático e implicancias ecológicas Sensitivity of the Peruvian upwelling system to climate change and ecological implications. *Revista Peruana Geo Atmosférica*, 26(3), 1–24.

Gutiérrez, D., Bertrand, A., Wosnitza-mendo, C., Dewitte, B., Purca, S., Peña, C., Chaigneau, A., Tam, J., Graco, M., Grados, C., Fréon, P., & Guevara-carrasco, R. (2011). Sensibilidad del sistema de afloramiento costero del Perú al cambio climático e implicancias ecológicas. *Revista Peruana Geoatmosférica*, 26(3), 1–26.

Helly, J. J., & Levin, L. A. (2004). Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(9), 1159–1168. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.03.009>

ITP. (2021). potencial económico y comercial de la vieira peruana: concha de abanico. *Dirección de Investigación, Desarrollo, Innovación y Transferencia Tecnológica – DIDITT – ITP. Instituto Tecnológico de La Producción*. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2346689/Boletín Informativo OM001-2021.pdf.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2346689/Boletín%20Informativo%20OM001-2021.pdf.pdf).

Jiang, W., Li, J., Gao, Y., Mao, Y., Jiang, Z., Du, M., Zhang, Y., & Fang, J. (2016). Effects of temperature change on physiological and biochemical responses of Yesso scallop, *Patinopecten yessoensis*. *Aquaculture*, 451, 463–472.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.10.012>

Johnstone, J. (1912). Informe sobre las mediciones de la solla realizadas durante el año 1910. *Las Transacciones de La Liverpool Biologi Sociedad Cal*, 26, 85–102.

Kaplan, E. L., & Meier, P. (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association*, 53(282), 457–481.

Levin, I. (2003). Oxygen minimum zone benthos: Adaptation and community response to hypoxia. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 41, 1–5.

Lodeiros C., Maeda Martínez A., Freitas L., U. E., & M, L.-C. D. & S. (2001). Ecofisiología de Pectínidos Iberoamericanos. *Los Moluscos Pectínidos de Ibero América: Ciencia y Acuicultura.*, 4, 77–88.

Mendo, J., & Wolff, M. (2002). Pesquería y manejo de la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en la Bahía Independencia. *Lima: J. Mendo and M. Wolff (Eds.)*.

Mendo, J. & Jurado, E. (1993). Length-based growth parameter estimates of the Peruvian scallop (*Argopectenpurpuratus*). *Growth (Lakeland)*, 15, 357–367.

Mendo, J. & Quevedo, I. (2020). La cadena de valor de la concha de abanico. *Programa Nacional de Innovación En Pesca y Acuicultura.*, 1159–1168.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=34111584010%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.seares.2017.11.001%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.seares.2018.09.011%0Ahttps://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01542077>

Submitted on 19 Jun

2017%0AHAL%0Ahttps://www.pnipa.gob.pe/wp-co

- Mendo, J. & Wolff, M. (2003). El impacto de El Niño sobre la producción de concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en Bahía Independencia, Pisco, Perú. *Ecología Aplicada*, 2(1), 51–57.
- Mendo, J., & Quevedo, I. (2020). La cadena de valor de la concha de abanico. *Journal of Sea Research*, 7(January), 1159–1168.  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=34111584010%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.seares.2017.11.001%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.seares.2018.09.011%0Ahttps://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01542077> Submitted on 19 Jun 2017%0AHAL%0Ahttps://www.pnipa.gob.pe/wp-co
- Mendo, J., Wolff, M., Carbajal, W., Gonzáles, I., & Badjeck, M. (2008). Manejo y explotación de los principales bancos naturales de concha de abanico (*A. purpuratus*) en la costa Peruana. *Estado Actual Del Cultivo y Manejo de Moluscos Bivalvos y Su Proyección Futura: Factores Que Afectan Su Sustentabilidad En América Latina*, 101–114.
- Montecino, V., & Lange, C. B. (2009). The Humboldt Current System: Ecosystem components and processes, fisheries, and sediment studies. *Progress in Oceanography*, 83(1–4), 65–79. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.041>
- Mora Orozco, C. D. L., Flores López, H. E., Durán Chávez, Á., & Ruiz Corral, J. A. (2011). Cambio climático y el impacto en la concentración de oxígeno disuelto en el Lago de Chapala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(SPE2), 381–394.
- Navarro, J. M., Fernández-Reiriz, M. J., & Labarta, U. (2004). Short-term feeding response of the scallop *Argopecten purpuratus* exposed to two different diets. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 84(4), 775–

779. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0025315404009919h>

Navarro, J. (2002). Fisiología energética de pectínidos iberoamericanos. . *Los Moluscos Pectínidos de Iberoamérica: Ciencia y Acuicultura*, 2–4, 27–104.

NOAA. (2014). *El Niño/Oscilacion Sur (ENSO)*.

[https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/enso\\_disc\\_apr2014/ensodisc\\_Sp.html](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_disc_apr2014/ensodisc_Sp.html)

Ohde, T., Siegel, H., Reißmann, J., Gerth, M. (2007). Identification and investigation of sulphur plumes along the Namibian coast using the MERIS sensor. *Cont. Shelf Res*, 27(6), 744–756.

Paredes Guerrero, A. E. (2018). EFECTO DE LA DENSIDAD SOBRE EL CRECIMIENTO DE CONCHA DE ABANICO *Argopecten purpuratus*, (Lamarck, 1819) EN CULTIVO SUSPENDIDO DE CARTERAS EN LA CALETA DE COLAN 2018. *Universidad Nacional De Piura Facultad De Ingeniería Pesquera Escuela Profesional De Ingeniería Pesquera Tesis*, 1–64.

Pörtner, H. (2010). Oxygen- And capacity-limitation of thermal tolerance: A matrix for integrating climate-related stressor effects in marine ecosystems. *Journal of Experimental Biology*, 213(6), 881–893. <https://doi.org/10.1242/jeb.037523>

Pörtner, H. O., Bock, C., & Mark, F. C. (2017). Oxygen- & capacity-limited thermal tolerance: Bridging ecology & physiology. *Journal of Experimental Biology*, 220(15), 2685–2696. <https://doi.org/10.1242/jeb.134585>

Ramajo, L., Fernandez, C., Nuñez, Y., Caballero, P., Lardardies, M.A., Poupin, M.J., Birchenough, S. (2019). Physiological responses of juvenile Chilean scallops (*Argopecten purpuratus*) to isolated and combined environmental drivers of coastal upwelling. *ICES Journal of Marine Science*, 76(6), 1836–1849.

- Romero, V. & Orrego, A. (1986). Estudio preliminar microoceanográfico de la Bahía de Paracas – Invierno 1983. *Universidad Nacional Agraria La Molina. PADI.*, 26, 827–847.
- Skinner, K. R., Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). Process monitoring for multiple count data using generalized linear model-based control charts. *International Journal of Production Research*, 41(6), 1167–1180.
- Storey, JM y Storey, K. (2004). Oxygen limitation and metabolic rate depression. *In: Storey KB, Ed. Functional Metabolism: Regulation and Adaptation. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.*, 415–444.
- Sunday. (2010). Global analysis of thermal tolerance and latitude in ectotherms. *Proc. R. Soc. B 2011 278*, 1823–1830. <https://doi.org/doi:10.1098/rspb.2010.1295>
- Tarazona, J., Espinoza, R., Solís, M., & Arntz, W. (2007). Crecimiento y producción somática de la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en Bahía Independencia, Pisco (Perú) comparados entre eventos El Niño y La Niña. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 42(3), 275–285. <https://doi.org/10.4067/s0718-19572007000300008>
- Thomas, Y., Flye-Sainte-Marie, J., Chabot, D., Aguirre-Velarde, A., Marques, G. M., & Pecquerie, L. (2019). Effects of hypoxia on metabolic functions in marine organisms: Observed patterns and modelling assumptions within the context of Dynamic Energy Budget (DEB) theory. *Journal of Sea Research*, 143, 231–242. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2018.05.001>
- Urban, H. J. (1994). Upper temperature tolerance of 10 bivalve species off Peru and Chile related to El Niño. *Marine Ecology Progress Series*, 107(1–2), 139–146.

<https://doi.org/10.3354/meps107139>

Vivar, I. (2016). *CAMBIOS EN LA ESTRUCTURA COMUNITARIA DEL EPIBENTOS POR EFECTO DEL CULTIVO DE CONCHA DE ABANICO (Argopecten purpuratus) EN LA BAHÍA DE SECHURA–PIURA*. 511, 7995788.

Wolff, M. & Wolff, R. (1983). Observaciones sobre la utilización y el crecimiento del pectínido *Argopecten purpuratus*. *Boletín IMARPE*, 7(6), 197–235.

Wolff, M. (1985). Abundancia masiva y crecimiento de pre-adultos de la concha de abanico peruana (*Argopecten purpuratus*) en la zona de Pisco bajo condiciones de “El Niño” 1983. *En: Arntz, W., A. Landa y J. Tarazona (Eds.). “El Niño” y Su Impacto En La Fauna Marina. Bol. Inst. Mar Perú-Callao, extr*, 87–90.

Wolff, M. (1987). Population dynamics of the peruvian scallop *Argopecten purpuratus* during the El Niño phenomenon of 1983. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44, 164341691.

Wolff, M. (1988). Spawning and recruitment in the Peruvian scallop *Argopecten purpuratus*. *Marine Ecology Progress Series*, 42, 213–217.

<https://doi.org/10.3354/meps042213>

Zhang, W., Cao, Z. D., Peng, J. L., Chen, B. J., & Fu, S. J. (2010). The effects of dissolved oxygen level on the metabolic interaction between digestion and locomotion in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen). *Comparative Biochemistry and Physiology - A Molecular and Integrative Physiology*, 157(3), 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2010.06.184>

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### 1. MATERIALES

#### 1.1. Material biológico:

- Aproximado de 840 ejemplares (15 de tallas mayores 50mm y 15 de tallas menores 37mm por pecera) procedentes de la Bahía de Sechura – Piura.

#### 1.2. Materiales:

- 4 peceras acrílicas de 8mm (60 x 35 x 45)
- Jabas de 44 litros de capacidad
- Mangueras de poliuretano
- Cooler
- Esponjas
- Gel pack
- Papel aluminio
- Tecnopol
- Tubos PVC 4"
- Tubos PVC 1/2"
- Codos de 4"
- Tapas de PVC de 4"
- Cútter
- Tanques de 500 l
- Precintos (pequeños, medianos y grandes)
- Tanque de 500 l

#### 1.3. Equipos

- Sensor de oxígeno multi 3630 IDS
- Sensor de oxígeno WTW FDO\*925
- Controlador de temperatura Chiller, 6000 BTU, 230V, ½ HP, flujo min–máx 12/25.
- Lámpara Ultra Violeta marca Jecord, modelo STU–36W, 220V
- Filtro de cartucho de 10um, 5um y 1um
- Termostato 500W
- Bombas de agua (1000 y 1200 litros por hora)
- Controlador de nitrógeno

#### **1.4. Productos químicos:**

- Agua oxigenada
- Agua destilada
- Gas Nitrógeno

## ANEXO 2

**Cálculo del Índice de Condición de los ejemplares de *Argopecten purpuratus* para el tratamiento de temperatura gradual y saturación de oxígeno al 20%, 5% y 2%.**

CODIGO	altura valvar	P. TOTAL	ORG. + GONA	P. ORG.	P. GONADA	P. SECO ORG.	P. SECO GONADA	P. SECO ORG + P. SECO GONADA	% HUMEDAD	IC
Exp. PO1	30.4	3	1.5	1.5		0.1		0.1	46.67	3.29
Exp. PO2	32.25	3.8	1.8	1.8		0.2		0.2	42.11	6.20
Exp. PO3	31.55	5.6	1.8	1.8		0.2		0.2	28.57	6.34
Exp. PO4	27.45	3.5	1.6	1.6		0.1		0.1	42.86	3.64
Exp. PO5	29	4.8	1.5	1.5		0.1		0.1	29.17	3.45
Exp. PO6	62.5	48.9	14.6	13.8	0.8	2	0.07	2.07	25.62	33.12
Exp. PO7	62.05	48	14.5	13.7	0.8	1.9	0.11	2.01	26.02	32.39
Exp. PO8	60	40.1	11.1	10.6	0.5	1.5	0.04	1.54	23.84	25.67
Exp. PO9	57	31.8	8.8	8.5	0.3	1	0.01	1.01	24.50	17.72
Exp. PO10	56.3	36.2	9.5	9	0.5	1.2	0.02	1.22	22.87	21.67

### ANEXO 3

Cálculo del Índice de Condición de los ejemplares de *Argopecten purpuratus* para el experimento de interacción del afloramiento costero (16 °C) e hipoxia severa (2%).

CODIGO	ALTURA VALVAR	PESO TOTAL	PESO ORG.	PESO SECO	% HUMEDAD	IC
C1	36.15	20.35	4.09	0.39	18.2	10.79
C2	48.25	21.24	4.69	0.49	19.8	10.16
C3	49	25.53	5.42	0.41	19.6	8.37
C4	47	22.09	4.64	0.43	19.1	9.15
C5	35.95	16.54	4.31	0.37	23.8	10.29
C6	44	22.31	5.35	0.47	21.9	10.68
C7	30.5	12.92	2.43	0.24	17.0	7.87
C8	28.9	12.76	2.5	0.19	18.1	6.57
C9	50.45	23.84	6.28	0.54	24.1	10.70
C10	35.65	15.06	3.89	0.34	23.6	9.54

## ANEXO 4

**Cálculo del Índice de Condición de los ejemplares de *Argopecten purpuratus* para el experimento de interacción de El Niño costero (25 °C) e hipoxia severa (2%).**

CODIGO	Altura valvar	P. TOTAL	P. ORG. + GONADA	P. ORG.	P. GONADA	P. SECO ORG.	P. SECO GONADA	P. SECO ORG + P. SECO GONADA	% HUMEDAD	IC
PO1	50.25	37.4	10.4	10.0	0.4	1.7	0.03	1.73	23.18	34.43
PO2	62.35	45.2	11.6	11.2	0.4	2.1	0.04	2.14	20.93	34.32
PO3	72.15	58.0	16.5	15.8	0.7	2.8	0.05	2.85	23.53	39.50
PO4	51.5	38.4	13.2	12.6	0.6	1.8	0.06	1.86	29.53	36.12
PO5	45.25	29.3	8.6	8.3	0.3	1.3	0.02	1.32	24.85	29.17
PO6	63.45	45.7	12.2	11.6	0.6	2.0	0.04	2.04	22.23	32.15
PO7	52	38.9	10.9	10.6	0.3	1.7	0.03	1.73	23.57	33.27
PO8	52.5	38.5	10.4	9.9	0.5	1.7	0.03	1.73	22.52	32.95
PO9	48.5	35.0	10.5	10.0	0.5	1.7	0.02	1.72	25.09	35.46
PO10	51.2	38.9	10.6	10.2	0.4	1.7	0.04	1.74	22.78	33.98
PO11	27.25	2.9	1.0	1.0		0.1		0.10	31.03	3.67
PO12	30.55	3.7	1.0	1.0		0.1		0.10	24.32	3.27
PO13	27	2.9	1.0	1.0		0.1		0.10	31.03	3.70
PO14	35	4.6	0.8	0.8		0.2		0.20	13.04	5.71
PO15	33.95	4.2	1.8	1.8		0.2		0.20	38.10	5.89
PO16	27.5	2.7	0.9	0.9		0.1		0.10	29.63	3.64
PO17	23.75	2.3	1.1	1.1		0.1		0.10	43.48	4.21
PO18	29.85	3.4	1.0	1.0		0.1		0.10	26.47	3.35
PO19	26.9	2.9	1.2	1.2		0.1		0.10	37.93	3.72
PO20	23	2.2	0.9	0.9		0.1		0.10	36.36	4.35

## ANEXO 5

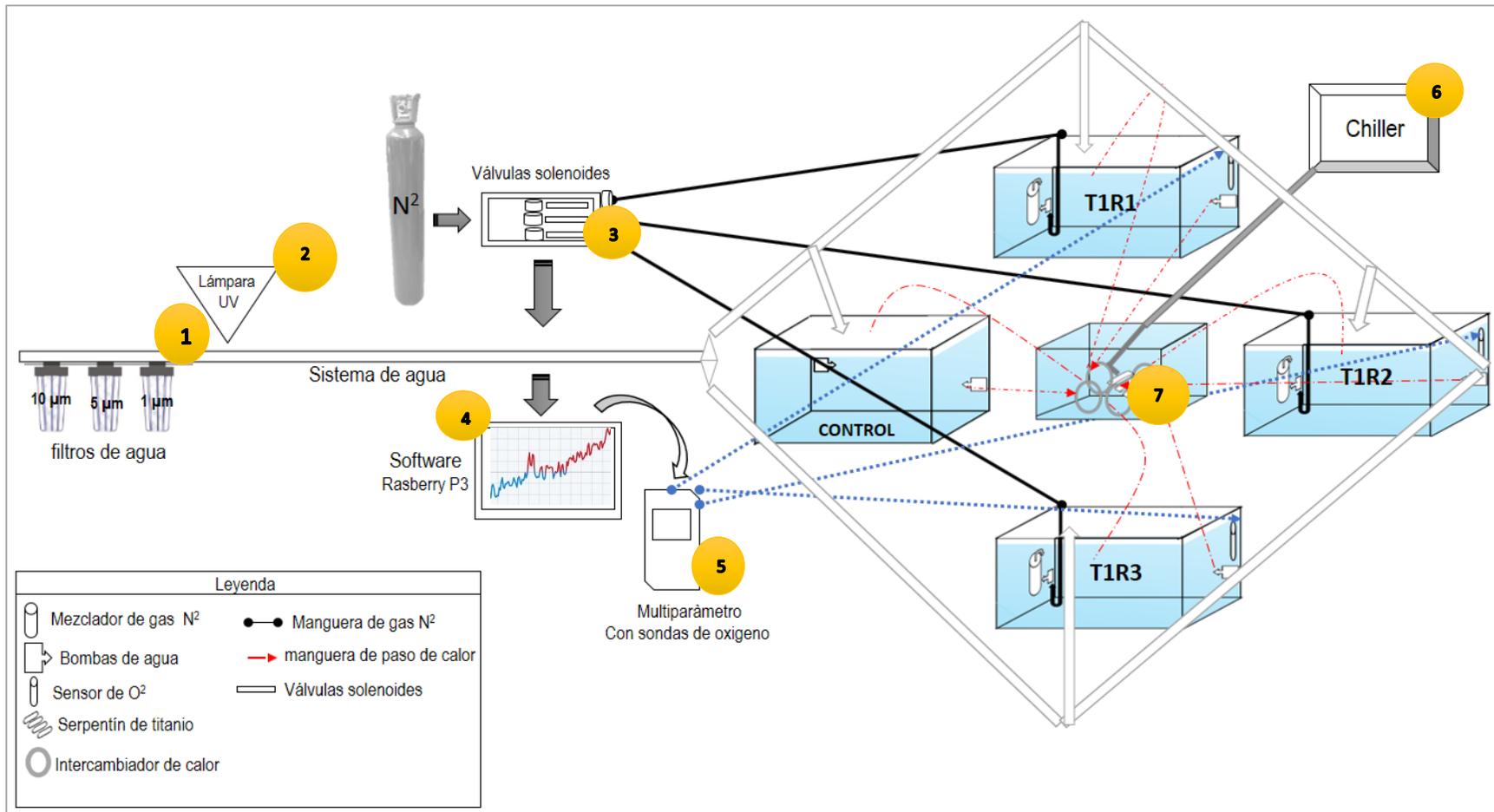


Figura 29. Esquema del experimento de temperatura e hipoxia (16 °C y 2%). (1) cartuchos de filtros de agua, (2) lámpara ultra violeta, (3) controlador de inyector de nitrógeno, (4) software de control de hipoxia instalado en una computadora Raspberry p3, (5) multiparámetro (6) enfriador de agua, (7) intercambiador de calor.

## ANEXO 6

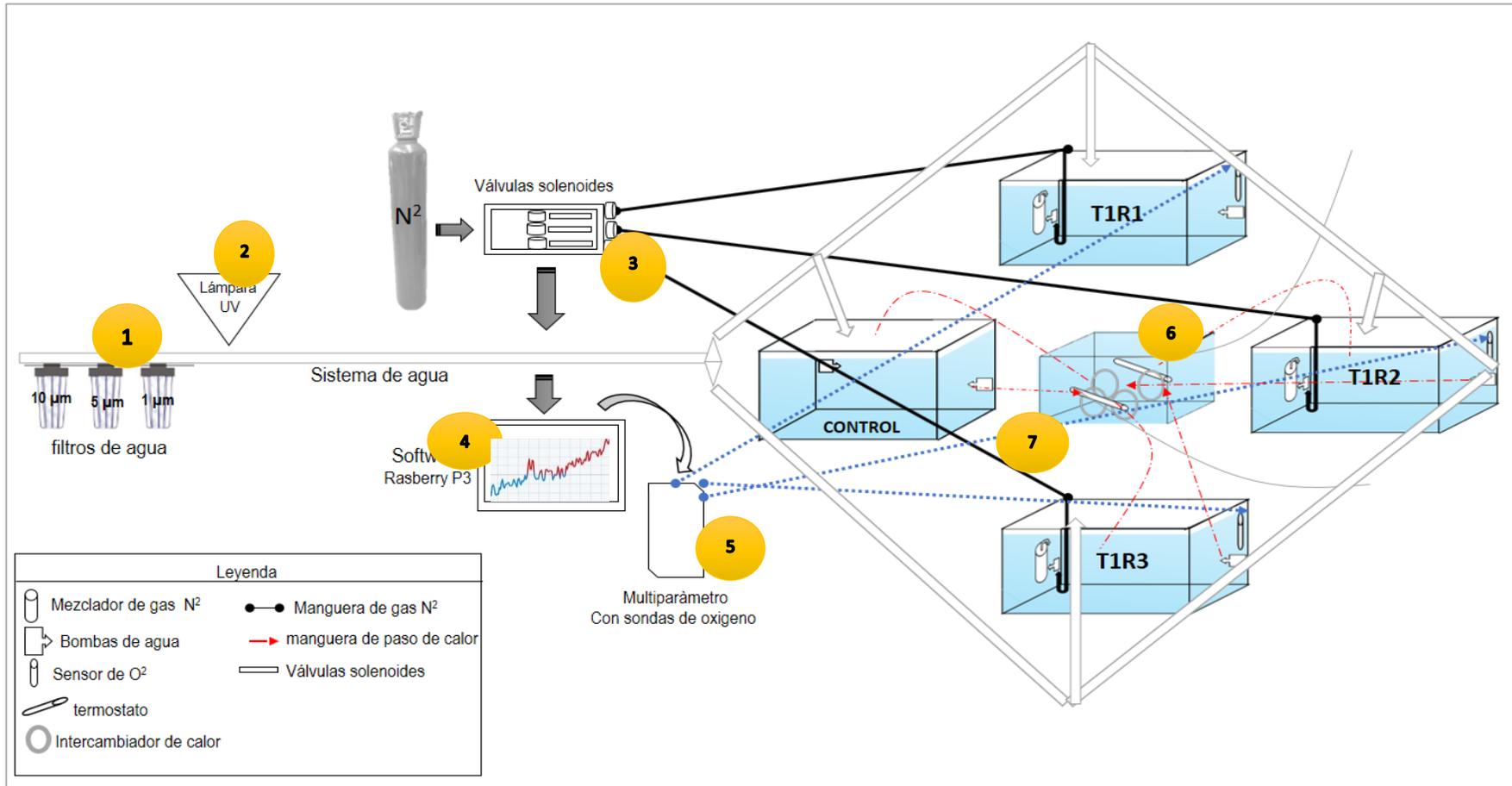


Figura 30. Esquema del experimento de temperatura e hipoxia (25 °C y 2%). (1) cartuchos de filtros de agua, (2) lámpara ultra violeta, (3) controlador de inyector de nitrógeno, (4) software de control de hipoxia instalado en una computadora Raspberry p3, (5) multiparámetro (6) enfriador de agua, (7) intercambiador de calor.

## ANEXO 7

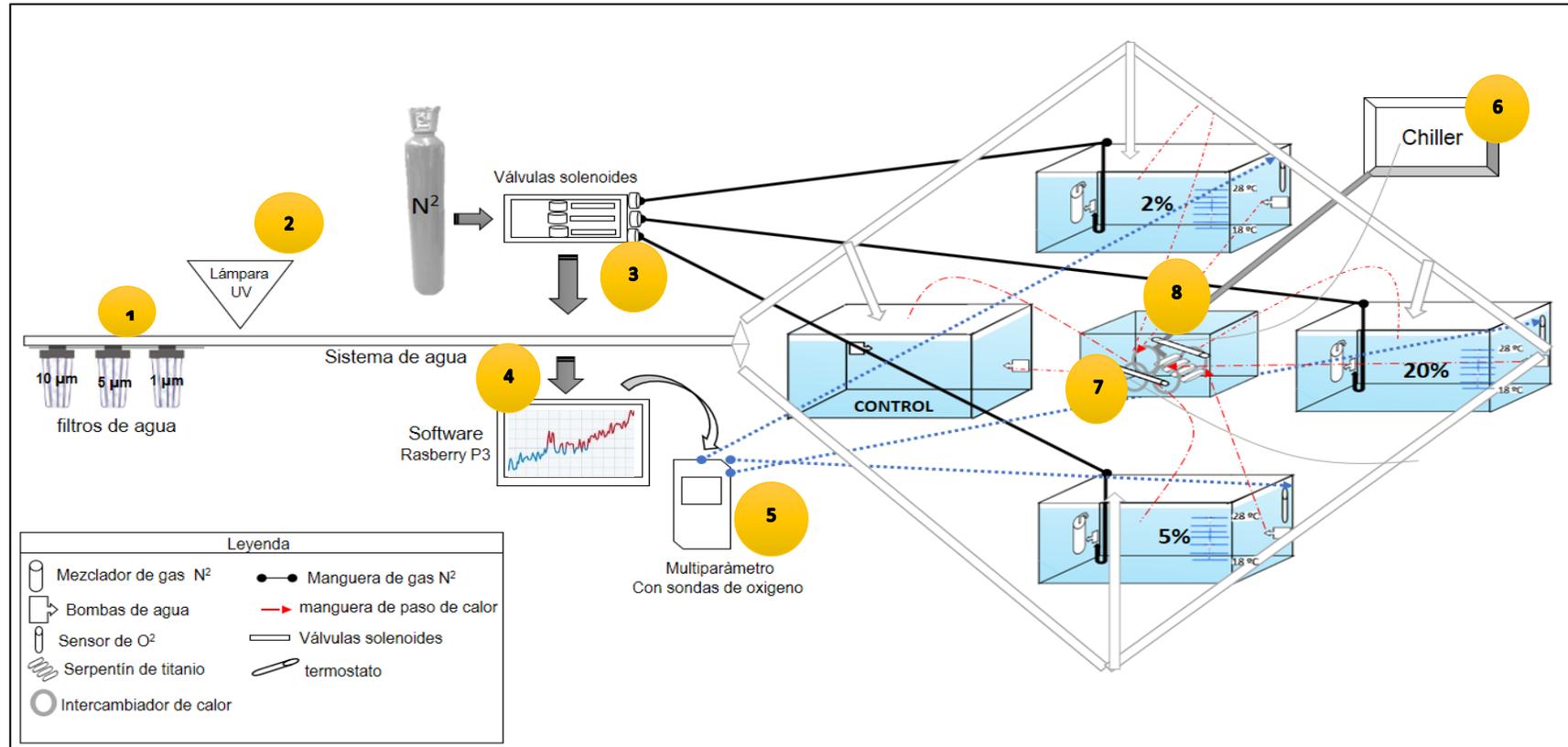


Figura 31. Esquema del experimento de hipoxia (20%, 5% y 2%) y temperatura gradual (18 °C hasta la muerte del acuario control). (1) cartuchos de filtros de agua, (2) lámpara ultra violeta, (3) controlador de inyector de nitrógeno, (4) software de control de hipoxia instalado en una computadora Raspberry p3, (5) multiparàmetro, (6) enfriador de agua, (7) intercambiador de calor, (8) calentadores de calor.