

2025

# Informe final

## Proyecto FIPA 2023-20

Determinación de los factores causantes de los cambios estructurales de la población de anchoveta de la zona norte en el periodo reciente y sus implicancias

Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura  
Mayo 2025



Informe Final

Proyecto FIPA 2023-20

Determinación de los factores causantes de los cambios estructurales de la población de anchoveta de la zona norte en el periodo reciente y sus implicancias  
Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura/ Mayo 2025

Requirente

Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura

Directora Ejecutiva

*Daniela Bolbaran Pérez*

Ejecutor

Instituto de Fomento Pesquero, IFOP

Director Ejecutivo

*Gonzalo Pereira Puchy*

Jefe División Investigación Pesquera

*Carlos Montenegro Silva*

Jefe de Proyecto

*Carola Hernández Santoro*

Equipo de Trabajo

*Francisco Cerna Troncoso (IFOP)*

*Jessica Bonicelli Proaño (IFOP)*

*Naití Morales Serrano (IFOP)*

*Jorge Castillo Pizarro (IFOP)*

*Juan Carlos Saavedra Nievas (IFOP)*

*Erika López Soto (IFOP)*

*Guido Plaza Pastén (PUCV)*

*Fabián Tapia Jorquera (UDEC)*

*Claudeth Asencio (PUCV)*

*Osneider Palomino (PUCV)*



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
ÍNDICE DE ANEXOS.....	17
RESUMEN .....	18
1. ANTECEDENTES.....	24
2 OBJETIVOS.....	29
2.1 Objetivo general.....	29
2.2 Objetivos específicos .....	29
3 METODOLOGÍA .....	30
3.1 Objetivo específico 2.2.1 <i>Caracterizar los patrones de edad y crecimiento de juveniles y adultos de anchoveta de baja talla registrados en el período reciente, para clarificar sus impactos en los cambios que ha experimentado la especie.</i> .....	30
3.2 Objetivo específico 2.2.2. <i>Desarrollar y comprobar hipótesis respecto a los factores causantes de los cambios estructurales de la anchoveta, mediante análisis de series históricas oceanográficas, biológicas y pesqueras, juntamente con investigación y literatura asociada y discusiones de talleres de trabajo y comités.</i> .....	38
3.3 Objetivo específico 2.2.3. <i>Establecer recomendaciones para el manejo pesquero, bajo distintos escenarios basados en las hipótesis planteadas en el estudio.</i> .....	54
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	55
4.1 Objetivo específico 2.2.1 <i>Caracterizar los patrones de edad y crecimiento de juveniles y adultos de anchoveta de baja talla registrados en el período reciente, para clarificar sus impactos en los cambios que ha experimentado la especie.</i> .....	55
4.2 Objetivo específico 2.2.2. <i>Desarrollar y comprobar hipótesis respecto a los factores causantes de los cambios estructurales de la anchoveta, mediante análisis de series históricas oceanográficas, biológicas y pesqueras, juntamente con investigación y literatura asociada y discusiones de talleres de trabajo y comités.</i> .....	77



4.2.1	Caracterizaci3n del zooplancton .....	77
4.2.2	Caracterizaci3n ambiental del 3rea de estudio .....	92
4.2.3	Resultados de la b3squeda bibliogr3fica.....	146
4.3	Objetivo espec3fico 2.2.3. <i>Establecer recomendaciones para el manejo pesquero, bajo distintos escenarios basados en las hip3tesis planteadas en el estudio.</i> .....	167
5.	DISCUSI3N .....	180
6.	PLAN DE ACTIVIDADES.....	194
7.	REFERENCIAS BIBLIOGR3FICAS.....	195
ANEXOS	.....	213



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.	Fotografías bajo luz transmitida de otolito entero con aumento 100X. La foto (b) muestra el otolito pulido en posici3n sagital de un juvenil de anchoveta. El resto de las fotos (c-e) permiten visualizar de cerca con aumento 400X la zona del borde (c), la zona central del otolito (d) y la zona aborde del primordio (e) (Fuente: Cerna y Plaza 2016) .....	32
Figura 2.	Ilustraci3n de un proceso de lectura en un juvenil de anchoveta, utilizando la herramienta "Tag" del programa IMAGE-pro-plus. La flecha roja denota el radio m3ximo (RM). Fechas de Nacimiento (FN). ....	33
Figura 3.	Distribuci3n de estaciones de muestreo y 3rea de estudio de los cruceros realizados en la zona norte Chile .....	40
Figura 4.	Gr3ficos de interpolaci3n de la edad desde el modelo aditivo generalizado (GAM), que muestran el efecto parcial en l3nea solida del grosor de los incrementos diarios para cada combinaci3n de estaciones del a3o, donde la zona sombreada corresponde al intervalo al 95% de confianza. ....	57
Figura 5.	Gr3ficos de interpolaci3n de la edad desde el modelo aditivo generalizado (GAM) que muestran el efecto de las variables explicativas, estaciones del a3o (A) y cohortes (B) con respecto al GI. ....	58
Figura 6.	Gr3ficos del an3lisis de residuos del modelo con respecto a los valores predichos, Q-Q plot de la distribuci3n normal, histograma de los residuos, relaci3n entre devianza de los residuales-predictor lineal; y valores observados vs los ajustados. ....	61
Figura 7.	Gr3fico muestra los diferenciales de los interceptos respecto a la estimaci3n global de las variables explicativas cohorte y estaci3n. ....	63
Figura 8.	Gr3fico muestra los diferenciales de las pendientes respecto a la estimaci3n global de las variables explicativas cohorte y estaci3n. ....	64

Figura 9.	Longitud total media a la edad de 108 días estimadas a partir del modelo lineal generalizado para cada cohorte y estaciones. Las líneas verticales corresponden al intervalo al 95% de confianza.....	65
Figura 10.	Curvas medias de la relación edad-longitud total de anchoveta estimadas a partir del modelo Laird-Gompertz para cada una de las cohortes analizadas. ....	67
Figura 11.	Ilustración de los cambios en las tendencias centrales, magnitudes y rangos la tasa de crecimiento global de ejemplares pre-reclutas de anchoveta ( <i>Engraulis ringens</i> ), nacidos en las estaciones de invierno y primavera y verano-otoño, en el norte de Chile. ....	70
Figura 12.	Ilustración de los cambios en las tendencias centrales, magnitudes y rangos la tasa de crecimiento global de ejemplares reclutas de anchoveta ( <i>Engraulis ringens</i> ), nacidos en las estaciones de invierno y primavera y verano-otoño, en el norte de Chile. ....	70
Figura 13.	Ilustración de los cambios en las tendencias centrales, magnitudes y rangos la tasa de crecimiento global de ejemplares adultos de anchoveta ( <i>Engraulis ringens</i> ), nacidos en las estaciones de invierno y primavera y verano-otoño, en el norte de Chile. ....	71
Figura 14.	Gráficas de los efectos derivados de un modelo lineal general (GLM). Los paneles representan los residuos parciales de la TCG respecto a: (a) la longitud como variable predictora, (área gris= intervalo de confianza al 95%); (b) los tres estados ontogenéticos considerados y (c) los 13 años con disponibilidad de registro disponibles hasta la fecha. ....	73
Figura 15.	Gráficas de los efectos derivados de un Modelo Aditivo Generalizado (CAM). Los paneles representan los residuos parciales de la TCG respecto a: (a) la longitud como covariable predictora (b), los 13 años con disponibilidad de registro disponibles hasta la fecha (b) y los tres estados ontogenéticos considerados (c).....	76
Figura 16.	Serie de tiempo de la abundancia total de zooplancton promedio de otoño (A), primavera (B) y verano (C) y biovolumen total de zooplancton promedio de otoño	

(D), primavera (E) y verano (F). Las barras verticales representan el error estandar.

.....78

Figura 17. (A) Abundancia promedio de copépodos por estaci3n del a1o. Las barras verticales corresponden al error estandar utilizando los a1os de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triangulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (c3rculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de copépodos de oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de copépodos para oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error estandar calculado con todas las estaciones de cada a1o y estaci3n del a1o. Para el análisis de los paneles A, B y C se us3 el periodo 2014-2020.....79

Figura 18. (A) Abundancia promedio de eufaúsidos por estaci3n del a1o. Las barras verticales corresponden al error estandar utilizando los a1os de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triangulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (c3rculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de eufaúsidos de oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de eufaúsidos para oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error estandar calculado con todas las estaciones de cada a1o y estaci3n del a1o. Para el análisis de los paneles A, B y C se us3 el periodo 2014-2020.....81

Figura 19. (A) Abundancia promedio de quetognatos por estaci3n del a1o. Las barras verticales corresponden al error estandar utilizando los a1os de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triangulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (c3rculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de quetognatos de oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de quetognatos para oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error estandar

calculado con todas las estaciones de cada a1o y estaci3n del a1o. Para el an1lisis de los paneles A, B y C se us3 el periodo 2014-2020.....82

Figura 20. (A) Abundancia promedio de medusas por estaci3n del a1o. Las barras verticales corresponden al error est1ndar utilizando los a1os de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triangulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (c1rculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de medusas de oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de medusas para oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error est1ndar calculado con todas las estaciones de cada a1o y estaci3n del a1o. Para el an1lisis de los paneles A, B y C se us3 el periodo 2014-2020.....83

Figura 21. (A) Abundancia promedio de doliolidos por estaci3n del a1o. Las barras verticales corresponden al error est1ndar utilizando los a1os de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triangulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (c1rculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de doliolidos de oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de doliolidos para oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error est1ndar calculado con todas las estaciones de cada a1o y estaci3n del a1o. Para el an1lisis de los paneles A, B y C se us3 el periodo 2014-2020.....84

Figura 22. (A) Abundancia promedio de ctenoforos por estaci3n del a1o. Las barras verticales corresponden al error est1ndar utilizando los a1os de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triangulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (c1rculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de ctenoforos de oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de ctenoforos para oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error est1ndar calculado con todas

las estaciones de cada a1o y estaci3n del a1o. Para el an1lisis de los paneles A, B y C se us3 el periodo 2014-2020.....	85
Figura 23. Serie de tiempo de la pendiente de distribuci3n de tama1o de part1culas (A), la proporci3n de copépodos (B) y la proporci3n de gelatinosos carn1voros (C) para oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales corresponden al error es1andar calculado con todas las estaciones de cada a1o y estaci3n del a1o. ....	88
Figura 24. Pendiente de distribuci3n de tama1o de part1culas (A), proporci3n de copépodos (B) y proporci3n de gelatinosos carn1voros (C) promedio por estaci3n del a1o. Las barras verticales corresponden al error est1andar utilizando los a1os de la serie de tiempo 2014-2020. ....	89
Figura 25. Serie de tiempo del OD promedio de los primeros 20 m (A) y la profundidad del nivel superior de la ZMO (B) para oto1o (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales corresponden al error est1andar calculado con todas las estaciones oceanogr1ficas de cada a1o y estaci3n del a1o.....	90
Figura 26. OD promedio de los primeros 20 m (A) y profundidad del nivel superior de la ZMO (B) promedio por estaci3n del a1o. Las barras verticales corresponden al error est1andar utilizando los a1os de la serie de tiempo 2014-2020.....	91
Figura 27. Campos promedio de la velocidad del viento (izquierda) y del stress del viento (derecha) para el periodo 1980-2023 en la regi3n de inter3s. Las escalas de colores muestran el m3dulo de la velocidad (izquierda) y stress (derecha), y los vectores ilustran magnitud y direcci3n en cada caso. Datos de velocidad a 10 m sobre el nivel del mar obtenidos del rean1lisis ERA5 (doi:10.24381/cds.adbb2d47). ....	92
Figura 28. Climatolog1a del campo de viento sobre la regi3n de inter3s para el periodo 1980-2023. Datos corresponden a campos diarios de velocidad a 10 m sobre el nivel del mar (16:00 UTC) obtenidos del rean1lisis ERA5 (doi:10.24381/cds.adbb2d47).....	93

- Figura 29. Climatologí3 del campo de stress de viento sobre la regi3n de inter3s para el periodo 1980-2023. La escala de colores muestra la magnitud del stress de viento (Pa), y los vectores ilustran la magnitud y direcci3n. ....94
- Figura 30. Campo promedio para el periodo 1980-2023 del rotor de viento. La escala de colores muestra la magnitud y signo del rotor, y los vectores ilustran magnitud y direcci3n del stress de viento. Los tonos verdes (rotor negativo) indican áre3s con las condici3ns de generan el ascenso de agua, conocido como Bombeo de Ekman. Los polígono3 amarillo, rojo y celeste indican las tres áre3s para las que se obtuvo series de tiempo de Bombeo de Ekman. ....95
- Figura 31. Variaci3n latitudinal en la orientaci3n del eje dominante del stress del viento costero (izquierda) y del porcentaje de la variabilidad total explicada por el eje dominante (derecha). Los ángulo3 negativos (positivos) del panel de la izquierda indican qu el eje dominante apunta hacia el oeste (este) del norte geográfico. ....96
- Figura 32. Climatologí3 del stress de viento paralelo a la costa (izquierda) y del transporte de Ekman (derecha) en funci3n de la latitud. El tiempo se expresa como dí3 del ańo. Los tonos rojos (valores positivos) del panel izquierdo corresponden a viento favorable a surgencia costera. Los tonos azules (valores negativos) del panel derecho indican transporte de Ekman en direcci3n costa afuera (surgencia). ....97
- Figura 33. Serie temporal de transporte de Ekman (en  $S_v = 106 \text{ m}^3/\text{s}$ ) calculado para cada una de las 3 secciones de la costa previamente definidas como áre3s de inter3s. Las líne3s grises corresponden a valores diarios y las líne3s azules muestran las series suavizads usando una media móvil de 10 dí3s. Todos los valores se muestran con el signo opuesto al obtenido originalmente, por lo que valores positivos indican transporte de Ekman costa afuera (i.e. surgencia costera). ....98
- Figura 34. Resultado del análisis de wavelets aplicado a las series temporales de transporte de Ekman (líne3s azules en la figura anterior) para las tres zonas definidas: (a) Arica, (b) Iquique y (c) Antofagasta. Los tonos amarillos indican una mayor energí3 de las oscilaciones con periodos que se indican en el eje y. La líne3 negra punteada

indica el periodo anual. Las líneas blancas segmentadas delimitan el llamado “cono de influencia”; resultados que aparecen por debajo de esta línea no son confiables.

- .....99
- Figura 35. Comparación entre series mensuales de Transporte de Ekman (en  $S_v = 106 \text{ m}^3/\text{s}$ ) para las 3 secciones de la costa definidas anteriormente. Las líneas azul, roja y naranja sobre el eje superior marcan los periodos para los que se calculó el bombeo acumulado (er figura siguiente). Todos los valores se muestran con el signo opuesto al obtenido originalmente, i.e. valores positivos indican surgencia costera. ....100
- Figura 36. Comparación entre áreas (paneles) y entre periodos (colores) de la trayectoria del Transporte de Ekman acumulado a contar del 1 de septiembre para cada año en el registro analizado. Las líneas corresponden a la mediana de la distribución de valores para ada día, y las bandas de colores muestran los percentiles 10 y 90 alrededor de cada mediana. Las zonas de color naranja indican un traslape entre las bandas amarilla y roja. Las zonas de color verde indican un traslape entre las bandas amarilla y azul. ....100
- Figura 37. Series temporales de Bombeo de Ekman (en  $S_v = 106 \text{ m}^3/\text{s}$ ) calculadas para cada una de las 3 áreas que se muestran en la Figura 28. Las líneas grises corresponden a valores diarios calculados para cada área. Las líneas azules muestran las series suavizadas usando una media móvil de 10 días. Valores positivos indican transporte hacia la superficie, i.e. Bombeo de Ekman. ....101
- Figura 38. Resultado del análisis de wavelets aplicado a las series temporales de bombeo de Ekman (líneas azules en la figura anterior) para las tres zonas definidas: (a) Arica, (b) Iquique y (c) Antofagasta. Los tonos amarillos indican una mayor energía de las oscilaciones con periodos que se indican en el eje y. La línea negra punteada indica el periodo anual. Las líneas blancas segmentadas delimitan el llamado “cono de influencia”; resultados que aparecen por debajo de esta línea no son confiables. ....102
- Figura 39. Comparación entre las series mensuales de Bombeo de Ekman (en  $S_v = 106 \text{ m}^3/\text{s}$ ) para las 3 áreas de interés. Las líneas azul, roja y naranja sobre el eje superior



	marcan los periodos para los que se calculó el bombeo acumulado (ver figura siguiente).....	103
Figura 40.	Comparación entre áreas (paneles) y entre periodos (colores) de la trayectoria del Bombeo de Ekman acumulado a contar del 1 de septiembre para cada año en el registro analizado. Las líneas corresponden a la mediana de la distribución de valores para cada día, y las bandas de colores muestran los percentiles 10 y 90 alrededor de cada mediana. Las zonas de color naranja indican un traslape entre las bandas amarilla y roja. Las zonas de color verde indican un traslape entre las bandas amarilla y azul.....	103
Figura 41.	Patrón promedio de largo plazo (a), amplitud de la señal estacional (b), fracción de variabilidad no estacional (c) y tendencia interanual (d) en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el periodo 1980-2023 para la región de estudio. El análisis se basó en imágenes diarias AVHRR con 25 km de resolución espacial.....	104
Figura 42.	Variabilidad latitudinal e interanual de la intensidad del enfriamiento superficial en la región de interés. El índice de enfriamiento se calculó para cada temporada primavera-verano (septiembre a marzo) a partir de imágenes AVHRR diarias para el periodo 1981-2023. Los años en el eje x indican el año de inicio de cada temporada, i.e. los valores que se muestran para cada latitud sobre el año 2010 corresponden a promedios de los valores diarios calculados entre el 1 de septiembre de 2010 y el 31 de marzo de 2011. ....	105
Figura 43.	Variabilidad de corto periodo en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) cerca de la costa, ilustrada como anomalías de TSM que se calcularon para cada latitud como la diferencia entre la serie de tiempo original y una serie filtrada mediante una media móvil de 20 días. Colores más intensos indican una mayor amplitud de las oscilaciones de escala sinóptica en la TSM. Las series de tiempo utilizadas corresponden al pixel más costero de imágenes AVHRR con resolución diaria, disponibles para el periodo 1980-2023.....	106

- Figura 44. Serie mensual de la amplitud de la variabilidad sin3ptica en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) a lo largo de la regi3n de estudio (izquierda) y climatologí centrada en verano (derecha) de la variabilidad sin3ptica al norte de Mejillones (latitud indicada por la línea blanca punteada) para los dos periodos indicados por las líneas azul y naranja en el eje superior del panel izquierdo. Los sÍmbolos y barras de error representan la mediana y cuartiles 1 y 3 para cada mes. Los colores mÍs intensos en el panel de la izquierda indican una mayor amplitud de las oscilaciones de escala sin3ptica en la TSM durante cada mes, cuantificada como el RSM para de los valores diarios calculados para cada mes y latitud (figura anterior). Las series de tiempo utilizadas corresponden al pixel mÍs costero de imágenes AVHRR con resoluci3n diaria, disponibles para el periodo 1980-2023.....107
- Figura 45. Campo promedio de la clorofila-a superficial en la regi3n de estudio entre enero 2000 y diciembre 2023. Los contornos blancos y rojos muestran las áreas utilizadas para calcular los promedios espaciales de clorofila en cada compuesto mensual. El extremo oeste de estas áreas correspondió a una distancia de 20 millas náuticas de la línea de costa. El contorno gris oscuro mÍs cercano a la costa corresponde a la isóbata de 200 m. ....108
- Figura 46. Variabilidad temporal en los promedios espaciales de clorofila-a superficial para las 3 zonas de interés y para el promedio global. Las barras de colores en el panel superior indican los tres periodos identificados mediante la prueba no paramétrica de Pettitt (1979).....109
- Figura 47. Resultado del análisis de wavelets aplicado a las series mensuales de clorofila-a en las tres zonas de interés: (a) Arica, (b) Iquique y (c) Antofagasta. Los tonos amarillos indican una mayor energÍa de las oscilaciones con periodos que se indican en el eje y. La línea negra punteada indica el periodo anual. Las líneas blancas segmentadas **delimitan el llamado “cono de influencia”; resultados que aparecen por debajo de esta línea no son confiables.** .....110

Figura 48.	Comparaci3n de las climatologías de clorofila-a calculadas para los tres periodos identificados en las series de promedios mensuales mediante la prueba no paramétrica de Pettitt (1979). Los sÍmbolos y barras de error corresponden a la mediana y a los percentiles 25 y 75 para cada mes y periodo. Las climatologías estÁn centradas en verano (el aÍo comienza en julio y termina en junio). ....	111
Figura 49.	Series de tiempo del factor de condici3n, peso medio y longitud media de la anchoveta por zona. La lÍnea representa las tendencias de los datos (horizontal) y los puntos de ruptura (vertical) estimados por el mÉtodo BFAT para el periodo entre 1997-2022. ....	116
Figura 50.	Series de tiempo del factor de condici3n, peso medio y longitud media de la anchoveta por zona. La lÍnea representa las tendencias de los datos (horizontal) y los puntos de ruptura (vertical) estimados por el mÉtodo BFAT para el periodo entre 1997-2022. ....	117
Figura 51.	Estacionalidad del factor de condici3n, peso medio de hembras de anchoveta y de variables ambientales como clorofila y la temperatura por zona. ....	118
Figura 52.	Distribuci3n de datos faltantes por variable y cohorte. Valores al interior de las celdas indican el nÚmero de datos faltantes, celdas sin nÚmero indican completitud de datos y valores entre paréntesis debajo de cada cohorte indica el tamaÍo de muestra de anchovetas. ....	120
Figura 53.	GrÁficos residuales del modelo para la totalidad de las cohortes, QQ plot de normalidad, residuos versus el predictor lineal, histograma de los residuos y los valores predichos versus la respuesta. ....	124
Figura 54.	GrÁfico del efecto parcial sobre la longitud para los tÉrminos paramÉtricos cohorte (A) y estaci3n (B) y los tÉrminos suavizados transporte de Ekman (C) e Índice de oscilaci3n del sur (D). ....	125
Figura 55.	GrÁficos residuales del modelo para las cohortes desde 1981-1982. QQ plot de normalidad, residuos versus el predictor lineal, histograma de los residuos y los valores predichos versus la respuesta. ....	127

Figura 56.	Gráfico del efecto parcial sobre la longitud para los términos paramétricos cohorte (A) y estación (B) y los términos suavizados transporte de Ekman (C), oscilación de la TSM sinóptica (D), anomalías acumuladas de la TSM (E) e índice de enfriamiento (F) por periodo de vida y zona (F).	129
Figura 57.	Gráficos residuales del modelo para las cohortes desde 2001-2002. QQ plot de normalidad, residuos versus el predictor lineal, histograma de los residuos y los valores predichos versus la respuesta.	132
Figura 58.	Gráfico del efecto parcial sobre la longitud para los términos paramétricos cohorte (A) y estación (B) y los términos suavizados transporte de Ekman (C), oscilación de la TSM sinóptica (D), anomalías acumuladas de la TSM (E), índice de enfriamiento (F) y clorofila promedio por periodo de vida y zona (G).	134
Figura 59.	Gráficos residuales del modelo para las cohortes desde 2009-2010 al 2021-2022. QQ plot de normalidad, residuos versus el predictor lineal, histograma de los residuos y los valores predichos versus la respuesta.	138
Figura 60.	Gráfico del efecto parcial sobre la longitud para el término paramétrico cohorte (A) y los términos suavizados transporte de Ekman (B), oscilación de la TSM sinóptica (C), índice de enfriamiento (D), la proporción de copépodos (E) y la proporción de gelatinosos carnívoros por periodo de vida y zona (G).	139
Figura 61.	Estimación de los coeficientes de las variables explicativas, año, estación y zona para la Longitud total (cm).	143
Figura 62.	Estimación de los coeficientes de las variables explicativas, año, estación y zona para la condición corporal.	144
Figura 63.	Relación entre la clorofila y tendencia de la temperatura (Ten_TSM) para la variable respuesta longitud total a) y c) y condición corporal (K) b) y d).	145

---

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.	Resumen del número de pares de otolitos que se analizaron por cada cohorte anual. Se incluye la longitud y edad media, con su desviaci3n estándar y rango. ....	30
Tabla 2.	Variables obtenidas de los distintos proyectos desarrollados por IFOP en las respectivas estaciones del a3o y series disponibles. ....	40
Tabla 3.	Resumen de los indicadores del modelo aditivo generalizado (GAM) que relaciona el grosor de los incrementos diarios con la edad. El modelo también considera como variables explicativas la estaci3n del a3o y cohorte. E.E. corresponde al error estándar, t valor es el valor del estadístico de prueba t de Student y Pvalor es la probabilidad de que los coeficientes estimados sean iguales a cero. ....	56
Tabla 4.	Resumen de los resultados del modelo lineal generalizado (GLM) que relaciona la longitud total con la edad en días. El modelo también considera como variables explicativas la cohorte, la estaci3n del a3o y la zona. E.E. corresponde al error estándar, tvalor el valor del estadístico de prueba t de Student y Pvalor es la probabilidad de que los coeficientes estimados sean iguales a cero. ....	60
Tabla 5.	Resumen del análisis de varianza de los resultados del modelo lineal generalizado (GLM) que relaciona la longitud total con la edad en días. Gl corresponde a los grados de libertad y Pvalor es la probabilidad de que los coeficientes estimados sean iguales a cero. ....	61
Tabla 6.	Parámetros de crecimiento del modelo Laird-Gompertz que ajusta la relaci3n edad-talla de anchoveta por cohorte. Se muestra el valor de cada parámetro con su error estándar (EE), el nivel de significancia (Pvalor), el coeficiente de determinaci3n de cada ajuste (R2) y el número de pares de datos utilizados (n).....	66
Tabla 7.	Estadísticas generales de la tasa de crecimiento global, obtenidas mediante análisis micro-estructural de otolitos, de reclutas, pre-reclutas y adultos de anchoveta ( <i>Engraulis ringens</i> ) de forma combinada, en el norte de Chile. CV=coeficiente de variaci3n. Cohorte= A3o de nacimiento. ....	68

Tabla 8.	Resumen de las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk (a) y homocedasticidad de Levene (b) de la tasa de crecimiento global, para tres estados ontogénicos de ejemplares de anchoveta ( <i>Engraulis ringens</i> ), en el norte de Chile.....	72
Tabla 9.	Resumen de los coeficientes estimados y sus niveles de variaci3n de un Modelo Lineal General aditivo, ajustado a la TCG, con la longitud de los ejemplares de anchoveta usada como covariable y la cohorte de nacimiento y estado ontogénico usados como efectos fijos. EE: 1 error estándar; NG: C3digos de significancia (0 '***' 0,00; 1 '***' 0,01; *' 0,05 '.' 0,1). AIC: -1179 .....	74
Tabla 10.	Resumen de los coeficientes estimados y sus niveles de variaci3n de un Modelo Aditivo Generalizado (GAM), ajustado a la TCG, con la longitud de los ejemplares de anchoveta usada como covariable y la cohorte de nacimiento y estado ontogénico usados como efectos fijos. EE: 1 error estándar; NG: C3digos de <b>significancia</b> (0 '***' 0,00; 1 '***' 0,01; *' 0,05 '.' 0,1). AIC: -2071.24.....	75
Tabla 11.	Resultados del análisis de PERMANOVA univariado, utilizando como índice de similitud la distancia euclidiana entre tratamientos (otoño, primavera y verano), con el fin de probar si existen diferencias significativas de los 5 indicadores entre estaciones del año. ....	91
Tabla 12.	Puntos de ruptura estimados por el método BFAT para el periodo entre 1997-2022 para las series biol3gicas y ambientales (temperatura y clorofila) .....	115
Tabla 13.	Definici3n de las covariables asociadas al alimento utilizadas en el modelado de la longitud; el c3digo indica la nomenclatura usada en el modelo.....	119
Tabla 14.	Definici3n de las covariables asociadas al ambiente utilizadas en el modelado de la longitud, el c3digo indica la nomenclatura usada en el modelo.....	119
Tabla 15.	Índice de concurvidad de pares para las variables suavizadas transporte y bombeo de Ekman y los índices de oscilaci3n del sur y de movimiento de los vientos del oeste en el hemisferio sur. Variables en negrita indican que fueron seleccionadas para el modelo.....	122

Tabla 16.	Resumen del ajuste para la totalidad de las cohortes. Pruebas de significancia estadística (A), coeficientes estimados de los términos paramétricos (B) y niveles y porcentajes de explicaci3n total y de cada termino (C). ....	123
Tabla 17.	Índice de concurvidad de pares para las variables suavizadas transporte de Ekman, índices de oscilaci3n del sur e índices basados en la temperatura superficial del mar. Variables en negrita indican que fueron seleccionadas para el modelo. ....	126
Tabla 18.	Resumen del ajuste para las cohortes desde 1981-1982. Pruebas de significancia estadística (A), coeficientes estimados de los términos paramétricos (B) y niveles y porcentajes de explicaci3n total y de cada termino (C). ....	126
Tabla 19.	Índice de concurvidad de pares para las variables suavizadas transporte de Ekman, índices basados en la temperatura y en la clorofila superficial del mar. Variables en negrita indican que fueron seleccionadas para el modelo. ....	130
Tabla 20.	Tabla de análisis de devianza de los efectos no lineales para el modelo que considera las cohortes desde 2001-2002 al 2022-2023. ....	131
Tabla 21.	Resumen del ajuste para las cohortes desde 2001-2002. Pruebas de significancia estadística (A), coeficientes estimados de los términos paramétricos (B) y niveles y porcentajes de explicaci3n total y de cada termino (C). ....	131
Tabla 22.	Índice de concurvidad de pares para las variables suavizadas transporte de Ekman, índices basados en la temperatura y clorofila superficial del mar y en la composici3n del zooplancton. Variables en negrita indican que fueron seleccionadas para el modelo. ....	135
Tabla 23.	Tabla de análisis de devianza de los efectos no lineales para el modelo que considera las cohortes desde 2009-2010 al 2021-2022. ....	136
Tabla 24.	Resumen del ajuste para las cohortes desde 2009-2010 al 2021-2022. Pruebas de significancia estadística (A), coeficientes estimados de los términos paramétricos (B) y niveles y porcentajes de explicaci3n total y de cada termino (C). ....	137
Tabla 25.	Resultados del modelo aditivo generalizado (GAM) entre la longitud y el ambiente. ...	141



Tabla 26.	Resultados del modelo aditivo generalizado (GAM) entre la condici3n corporal y el ambiente.....	142
Tabla 27.	Lista de variables que afectan las tasas de crecimiento de grupo de los Clupeidos. ..	147
Tabla 28.	Variables que afectan la talla corporal del grupo de los Clupeidos .....	163
Tabla 29.	Lista de asistencia al taller de expertos.....	167
Tabla 30.	Programa del taller de expertos. ....	170
Tabla 31.	Matriz de conocimiento y recomendaciones de manejo basada en revisi3n bibliogr3fica y los resultados del presente estudio. ....	177
Tabla 32.	Matriz de conocimiento y recomendaciones de manejo basada en revisi3n bibliogr3fica y los resultados del presente estudio. ....	178
Tabla 33.	Matriz de conocimiento y recomendaciones de manejo basada en revisi3n bibliogr3fica y los resultados del presente estudio. ....	179

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Acta de la primera reuni3n con el presidente del FIPA.
Anexo 2.	Personal participante del equipo de trabajo por actividad.
Anexo 3.	Presentaciones realizadas en el taller de expertos.
Anexo 4.	Taller de difusi3n de resultados proyecto FIPA 2023-20.

---

## RESUMEN EJECUTIVO

---

El presente estudio reporta los resultados parciales de las tasas de crecimiento y su relación con la disminución de la longitud de anchoveta en la zona norte de Chile (límite norte y los 24° 00'S) correspondiente al área de estudio y entre los años 1973 y 2022, reportando desde años con altas biomásas asociado a la década de los noventa a la actualidad cuando las biomásas son las menores de la serie. Además, se entrega una caracterización ambiental, oceanográfica y del zooplancton del área de estudio a escala espacial e interanual.

El estudio encuentra, en relación con el crecimiento de anchoveta de la zona norte de Chile, una tendencia a la baja independiente del estado ontogenético (pre-recluta, recluta y adultos), destacando para los adultos un menor crecimiento los últimos años. Se destacan cambios temporales importantes en las tasas de crecimiento y longitud media de los peces con respecto a la edad, al menos en los primeros 150 días (5 meses) de vida. El análisis cronológico de los grosores de los incrementos diarios en otolitos, como proxy de la tasa de crecimiento, modelado a través de un modelo aditivo generalizado (GAM), detectó diferencias significativas en el grosor medio entre cohortes, con una tendencia decreciente en el tiempo, lo que sugiere una disminución de la tasa de crecimiento después del año 2009. En este mismo sentido la longitud media del pez con respecto a la edad observada al momento de la captura modelada con un GLM, mostró diferencias significativas entre las cohortes, con coeficientes que van disminuyendo en forma consistente desde la primera cohorte analizada (1972-1973) hasta la más reciente (2022-2023). Las longitudes medias estimadas a partir del modelo muestran una disminución interanual en dos periodos. El primer periodo de caída de la longitud media se registró entre 1972-1973 a 2001-2002, donde la longitud media disminuyó en 2,6 cm, en tanto que, en el segundo periodo, desde el 2009-2010 a 2022-2023, la longitud disminuyó en 2,9 cm. Este hallazgo es coherente con la disminución en la tasa de crecimiento de anchoveta que registró a través del modelo de crecimiento Laird-Gompertz, como también el resultado de la tasa de crecimiento absoluta para cada cohorte, la que ha disminuido significativamente en el tiempo. Las tasas medias de crecimiento global, calculadas como la relación entre la longitud y la edad de captura, también mostraron una tendencia decreciente en las últimas dos décadas, representando una disminución del

30% en los últimos años, siguiendo un mismo patrón, independientemente de la etapa ontogenética (es decir, pre-reclutas, reclutas y adultos) y la cohorte bi-estacional de nacimiento (es decir, invierno-primavera vs verano-otoño).

La caracterización ambiental del área de estudio mostró, períodos con claras diferencias en el forzamiento atmosférico, tanto en términos del estrés de viento paralelo a la costa que genera transporte de Ekman y consecuentemente la surgencia costera, como en términos del rotor de viento y el bombeo de Ekman generado por este sobre una banda costera de 25-50 km de ancho. A mediados de la década de los noventa hubo un incremento abrupto en la magnitud de ambos procesos de afloramiento, el cual se mantuvo hasta la segunda década del siglo XXI, con una caída mucho más gradual y niveles actuales que son comparables o levemente superiores a los observados a inicios de la década de los ochenta. De los índices de enfriamiento costero calculados a partir de anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) latitud-específicas y de las fluctuaciones a escala sinóptica de la TSM del área de estudio, se observó una clara intensificación en el enfriamiento costero a partir de 2006-2007, sugiriendo una intensificación del proceso de surgencia costera a partir de ese período y que difiere del patrón interanual en intensidad de la surgencia que se podría esperar a partir del análisis de viento.

En relación a la oferta alimenticia, los resultados muestran cambios interanuales y estacionales en la abundancia y estructura comunitaria del zooplancton en la región norte de Chile. Se detectaron decaimientos de la abundancia total y de copépodos, y aumentos importantes de gelatinosos, que podrían estar asociados con un forzamiento ambiental. Se destacó una disminución en la abundancia de los copépodos en otoño a partir del 2016 y entre 2014 y 2016 en verano. Esto podría tener drásticas consecuencias en la comunidad del zooplancton y con ello, en las poblaciones de peces pelágicos, como la anchoveta, que se alimenta principalmente de este grupo. Además, se destaca, el aumento progresivo de los gelatinosos a partir del 2014 que coincide con el inicio del período cálido. Cabe destacar la variabilidad estacional que se observó en la comunidad del zooplancton entre estaciones del año para el período 2014-2020, esta variabilidad en la comunidad del zooplancton fue explicada principalmente por los copépodos, el cual presentó sus mayores abundancias en primavera.

Para poner a prueba las hipótesis planteadas en el presente estudio, se adoptó como estrategia el modelado de cuatro periodos de cohortes y la incorporación de las variables predictoras según su completitud y significancia en el ajuste. Los periodos de análisis comenzaron con el total de cohortes para los índices de transporte y bombeo de Ekman, oscilación del sur y vientos. Posteriormente, se incluyeron los índices asociados a la temperatura superficial para las cohortes desde el 1981-1982, los índices de clorofila superficial para las cohortes desde el 2001-2002 y finalmente los índices asociados a la composición del zooplancton a partir de la cohorte 2009-2010 hasta la del 2021-2022. En este sentido, se debe destacar que las tendencias a la baja en el crecimiento de la anchoveta en la zona norte fueron modeladas con GAM utilizando un índice estandarizado de crecimiento siendo explicado principalmente por la edad, cohorte, estación y por el transporte de Ekman e indicadores de temperatura, explicando entre un 90 y 91% de la variabilidad total.

Como corolario, los resultados del presente estudio, a través de diferentes índices de crecimiento estandarizados, demostraron que el crecimiento somático de la anchoveta en los últimos 4 años correspondió a los registros más bajos de la serie interanual analizada, sugiriendo que esta especie se encuentra actualmente en una condición somática crítica, lo que requeriría la aplicación de urgentes medidas de manejo y evaluación para contribuir a su sostenibilidad en el corto y mediano plazo.

---

## EXECUTIVE SUMMARY

---

This study reports partial results of growth rates and their relationship with the decrease in anchovy body length in northern Chile (18- 24° 00'S) corresponding to the study area and between the years 1973 and 2022, reporting from years with high biomasses associated with the 1990s to the present when biomasses are the lowest in the series. In addition, an environmental, oceanographic and zooplankton characterization of the study area was provided at spatial and interannual scales.

The study found a downward trend in growth of anchovy in northern Chile, independent of the ontogenetic state (pre-recruit, recruit and adults), with lower growth in adults in recent years. Significant temporal changes in growth rates and mean length-at-age were estimated, at least during the first 150 days (5 months) of life. The chronological analysis of the thicknesses of daily increments in otoliths, as a proxy for growth rate, modeled through a generalized additive model (GAM), detected significant differences in mean daily increment width between cohorts, with a decreasing trend over time, suggesting a decrease in growth rate after 2009. In this same sense, the length-at-age at the time of capture, modeled with a GLM, showed significant differences between the cohorts, with coefficients that decreased consistently from the first cohort analyzed (1972-1973) to the most recent years (2022-2023). The average lengths predicted from the model showed an interannual decrease in two periods. In the first period, from 1972-1973 to 2001-2002, the average length decreased by 2.6 cm, while in the second period, from 2009-2010 to 2022-2023, the length decreased by 2.9 cm. This finding was consistent with the decrease in the anchovy growth rate recorded through the Laird-Gompertz growth model, as well as the result of the absolute growth rate for each cohort, which has decreased significantly over time. The mean global growth rates, calculated as ratio between the length and age at capture, also showed a decreasing trend in the last two decades, representing a 30% decrease in the last years, following a same pattern, irrespective of the ontogenetic stage (i.e., pre-recruits, recruits and adults) and the bi-seasonal cohort of birth (i.e., winter-spring vs summer-autumn).

The environmental characterization of the study area showed periods with clear differences in climatic drivers, both in terms of the wind stress parallel to the coast that generates Ekman transport and consequently coastal upwelling, and in terms of the wind rotor and the Ekman pumping generated by

it over a coastal band 25-50 km wide. In the mid-nineties there was an abrupt increase in the magnitude of both upwelling processes, which continued until the second decade of the 21st century, with a much more gradual fall and current levels that are comparable or slightly higher than those observed in the early eighties. From the coastal cooling indices calculated from latitude-specific sea surface temperature (SST) anomalies and synoptic-scale SST fluctuations in the study area, a clear intensification in coastal cooling was observed from 2006-2007 onwards, suggesting an intensification of the coastal upwelling process from that period onwards and which differs from the interannual pattern in upwelling intensity that could be expected from the wind analysis.

Regarding food supply, the results showed interannual and seasonal changes in the abundance and community structure of zooplankton in northern Chile. Declines in total abundance and copepod abundance were detected, and significant increases in gelatinous species, which could be associated with environmental forcing. A decrease in copepod abundance was observed in autumn starting in 2016 and between 2014 and 2016 in summer. This could have drastic consequences on the zooplankton community and, therefore, on populations of pelagic fish, such as anchovy, which feeds mainly on this group. In addition, a progressive increase in gelatinous species from 2014 onwards, which matched with the beginning of the warm period, was noted. Furthermore, seasonal variability was observed in the zooplankton community between seasons of the year for the period 2014-2020. Such a variability in the zooplankton community was mainly explained by copepods, which presented their highest abundances in spring.

To test the hypotheses raised in the present study, a four-period cohort modelling strategy was adopted, incorporating predictor variables according to their completeness and significance in the fit. The analysis periods began with the total cohorts for the Ekman transport and pumping indices, the Southern Oscillation and winds. Subsequently, the indices associated with surface temperature were included for the cohorts from 1981-1982, the surface chlorophyll indices for the cohorts from 2001-2002 and finally the indices associated with zooplankton composition from the 2009-2010 cohort to the 2021-2022 cohort. In this sense, it is worth highlighting that the downward trends in anchovy growth in the northern zone were modelled with GAM using a standardized growth index, mainly explained by

age, cohort, season and by Ekman transport and temperature indicators, explaining between 90 and 91% of the total variability.

As corollary, the results of the present study, through different standardized growth indices, demonstrated that somatic growth of anchovy in the last 4 years corresponded to the lowest records of the interannual series analyzed, suggesting this species is at current in a critical somatic condition, which would require the application of urgent management and evaluation measures to contribute to its sustainability in the short and medium term.



## 1. ANTECEDENTES

---

La anchoveta (*Engraulis ringens*) es una especie pelágico-costera que se distribuye desde el norte de Perú (4°30'S) hasta el sur de Chile (42°30'S), considerada una especie de gran importancia ecológica y económica en el sistema de la corriente de Humboldt. La importancia ecológica se basa en el rol fundamental de esta especie en el traspaso de energía entre los diferentes eslabones de la cadena trófica (Espinoza y Bertrand, 2008). Por su parte, la importancia económica radica en que sustenta la actividad pesquera en la zona norte de Chile (Böhm *et al.*, 2021) y lo largo de toda su distribución.

Las capturas de la zona norte muestran una tendencia fluctuante asociada principalmente con la disponibilidad del recurso, la variabilidad en las condiciones ambientales (ej. El Niño-Oscilación del Sur; ENSO), y el desplazamiento de la anchoveta entre el sur del Perú y norte de Chile, y viceversa.

Durante los últimos años la información pesquera ha mostrado una reducción de la talla media, asociada con una reducción de ejemplares de mayor tamaño y un aumento de los individuos bajo los 11,5 cm de longitud total (LT) (Hernández-Santoro *et al.*, 2019b). Adicionalmente, se ha observado una reducción en la talla media de madurez (L50%) de 11,5 cm a 10,0 cm LT (Hernández *et al.*, 2023). Los antecedentes indican que el potencial reproductivo estaría sostenido mayormente por anchoveta de menores longitudes con edades que no sobrepasan el año (Hernández *et al.*, 2023; Hernández-Santoro *et al.*, 2019b; Cerna y Plaza, 2016). Reducciones similares de tamaño se han registrado en otras especies de clupéidos, provocando cambios en la estructura poblacional (Brosset *et al.*, 2016, 2015; Van Beveren *et al.*, 2014a). Estos cambios en la estructura demográfica podrían estar relacionados con una reducción en el crecimiento somático en alguna fase ontogenética de la anchoveta, asociado con diferencias espacio-temporales en las condiciones ambientales (Garcés *et al.*, 2019; Hernández *et al.*, 2020; Michaud *et al.*, 2010). Por ejemplo (Cerna y Plaza, 2016), describen un crecimiento somático acelerado durante el primer año de vida, lo que desencadenaría un rápido reclutamiento a la pesca durante todo el año. Estos hallazgos fueron confirmados a través de la validación en la periodicidad de los micro- incrementos en peces juveniles nacidos en cautiverio y en peces adultos capturados vivos y marcados en cautiverio, estableciendo la periodicidad diaria (Plaza

y Cerna, 2015). Paralelamente, Böhm *et al.*, (2021), plantea dudas razonables con respecto al crecimiento de adultos debido a que no fue posible datar a nivel diario una fracción importante de otolitos más hialinizados, dada la gran inestabilidad en el patrón de depósito de los micro- incrementos. Lo anterior podría ser indicativo de una reducción sustantiva del crecimiento en esta especie en la zona de estudio, desencadenando una disminución de las tallas y pesos medios de este recurso. Adicionalmente, existe concordancia en que las tasas de crecimiento de cada cohorte están principalmente influenciadas por la variabilidad ambiental estacional de los controladores ambientales del crecimiento como la temperatura y disponibilidad de alimento (Allan *et al.*, 2022; Avaria-Llautureo *et al.*, 2021; Basilone *et al.*, 2017; Bacha y Amara, 2012; Cubillos *et al.*, 2001). La combinación de factores físicos y físico-químicos a que están asociados los cambios en temperatura y disponibilidad de alimento en el océano costero afectarían tanto la advección/retención de huevos y larvas sobre la plataforma continental (intensificación de la surgencia costera), como los niveles de stress fisiológico debido al calentamiento y desoxigenación del océano, que limitarían el crecimiento. Estudios publicados en la última década muestran un cambio a escala interanual en el patrón espacio-temporal de la surgencia y productividad en la costa de Chile (Schneider *et al.*, 2017, Weidberg *et al.*, 2020).

Al respecto, la zona norte de Chile es parte del sistema de corriente de Humboldt, el cual es influenciado por fluctuaciones de escala intra-estacional, asociadas con el fenómeno de surgencia costera; interanual, asociada con alternancia de eventos El Niño/La Niña; e inter-decadal asociado con el cambio de fase del índice de oscilación del Pacífico (Chávez *et al.*, 2003; Parada *et al.*, 2013). El Niño en esta zona se manifiesta con la presencia de ondas atrapadas a la costa y ondas de Rossby forzadas por vientos ecuatoriales, que modifican la profundidad de la termoclina o nutriclina, expandiendo o contrayendo el hábitat vertical de los recursos y modulando su distribución vertical (Ulloa *et al.*, 2001). La profundización de la termoclina conduce a surgencias de aguas pobres en nutrientes y mayor temperatura. Este cambio en la estructura física y química del agua genera cambios en la comunidad fitoplanctónica, desde una dominancia de diatomeas que sustentan zooplancton de mayor tamaño, como copépodos y eufáusidos (Alheit y Niquen, 2004; Falkowski y Oliver, 2007; Rykaczewski y Checkley, 2008) a fitoplancton dominado por dinoflagelados y zooplancton de menor

tama1o, con un dominio de organismos gelatinosos (Jacob *et al.*, 2018; Peterson, 1989; Walker y Peterson, 1991).

En este sentido, un menor crecimiento y su consecuente impacto en la talla media podr3a ser consecuencia de un cambio en la abundancia, composici3n y/o tama1o del zooplancton debido a una modificaci3n en estructura f3sica y qu3mica del agua (Boëns *et al.*, 2023; Boëns *et al.*, 2021; Becker *et al.*, 2020). La anchoveta presenta una gran plasticidad en su dieta y comportamiento alimentario, alimentándose de varios niveles tr3ficos (Espinoza y Bertrand, 2008). Por tener una dieta compuesta principalmente por euf3usidos y copépodos de gran tama1o (Espinoza *et al.*, 2009; Espinoza y Bertrand, 2014), la disponibilidad de estas presas afecta el estado de la poblaci3n. Por ejemplo, un aumento en la biomasa del macrozooplancton en el ecosistema de Humboldt durante los a1os ochenta facilit3 el repunte de la anchoveta por sobre la sardina espa1ola (Aronés *et al.*, 2019; Ay3n *et al.*, 2011; Canales *et al.*, 2016). Sin embargo, frente a escasez de sus presas preferidas, la anchoveta podr3a alimentarse de los organismos con mayor abundancia en el ambiente (Espinoza y Bertrand, 2008). En consecuencia, un cambio en la composici3n del zooplancton hacia el predominio de organismos gelatinosos o especies de menor tama1o, considerados menos nutritivos, con menor aporte energ3tico que presas m3s grandes (Ljungstr3m *et al.*, 2020), podr3a afectar la condici3n corporal y finalmente el crecimiento de la anchoveta. Adicionalmente, una disminuci3n en el tama1o del alimento origina cambios en los h3bitos de alimentaci3n desde morderor a filtrador (Queiros *et al.*, 2019; Thorall *et al.*, 2021). Seg3n Thorall *et al.* (2021), una alimentaci3n v3a filtraci3n es menos eficiente bio-energ3ticamente hablando ya que implica un mayor gasto con menor recompensa, influenciando as3 el almacenamiento de reservas de energ3a para la reproducci3n y aumentando la mortalidad de los reproductores.

El incremento de la temperatura aumenta el metabolismo con un efecto directo en el crecimiento de los individuos. Se considera que la temperatura tiene un efecto positivo durante la etapa larval y de juveniles, incrementando la sobrevivencia (Arellano-Valle *et al.*, 2017; Hare y Cowen, 1997; Ikpewe *et al.*, 2021; Shoji y Tanaka, 2006; Takasuka *et al.*, 2004). Estudios recientes destacan la importancia para el crecimiento de la temperatura por sobre la productividad, y sugieren una temperatura 3ptima de ~18°C (Cerna *et al.*, 2022; Hern3ndez *et al.*, 2020). Sin embargo, este efecto positivo se limita a un

rango de temperatura definido como “ventana 3ptima” (Bakun, 1996). Por el contrario, el aumento de la temperatura y el metabolismo podr3a tener un impacto negativo en el crecimiento de la fase adulta, asociado con la menor tolerancia t3rmica en esta fase (P3rtner y Peck, 2010), gatillando stress fisiol3gico y un incremento en la demanda de ox3geno. Cuando esta demanda no puede ser satisfecha (dado que la superficie de intercambio de gases aumenta directamente con la longitud del pez), los peces sacrifican el crecimiento para mantener sus funciones vitales (Amarasinghe y Pauly, 2021; Pauly, 2010; Pauly y Cheung, 2018a). Paralelamente, Ljungstr3m et al. (2020) predicen tallas 3ptimas m3s peque1as en aguas m3s c3lidas, debido a una mayor rapidez en la digesti3n, haciendo necesaria la captura de m3s presas y por consiguiente un mayor gasto energ3tico.

La mortalidad por pesca tambi3n puede desencadenar la reducci3n en la talla media. La mayor3a de las pesquer3as buscan individuos de tallas mayores, favoreciendo la permanencia y reproducci3n de individuos peque1os. Si las diferencias fenot3picas individuales en los rasgos de historia de vida bajo selecci3n son heredables, entonces la selecci3n inducida por la pesca podr3a conducir a cambios evolutivos hacia menores tama1os y/o edades de maduraci3n en las poblaciones explotadas (Heino y God3, 2002; Jennings et al., 1999). Adicionalmente, al reducir la densidad poblacional se aumenta la cantidad de recursos disponibles per c3pita y por consiguiente la competencia entre individuos disminuye. Estos cambios podr3an aumentar las tasas de crecimiento individual y conducir a una maduraci3n temprana, posiblemente con tama1os menores (Becker *et al.*, 2020; Dieckmann y Heino, 2007; Grift et al., 2003). Paralelamente, este tipo de selecci3n no natural reduce el n3mero de reproductores, con un posible efecto en la producci3n de reclutas.

La disminuci3n de la talla tiene un efecto negativo sobre el reclutamiento, ya que es precisamente el grupo de mayor tama1o el que realiza una mayor contribuci3n al reclutamiento (relaci3n hiperalom3trica), asociado a una mayor duraci3n del per3odo reproductivo e intensidad en relaci3n con el grupo m3s peque1o (Barneche *et al.*, 2018). La reducci3n del tama1o m3ximo en poblaciones con estrategia tipo r, de r3pido crecimiento y baja longevidad, como es el caso de la anchoveta, destinan m3s energ3a a la reproducci3n en condiciones ambientales desfavorables a favor del mantenimiento de la poblaci3n, impactando el tama1o y la supervivencia, principalmente de los individuos que maduran por primera vez (Van Beveren et al., 2014a).

La anchoveta es una especie de gran importancia económica y ecológica en el sistema de la corriente de Humboldt. El manejo del stock de anchoveta se basa en la información que recopila IFOP a través del programa de monitoreo semanal de la pesquería a lo largo de su distribución.

Durante los últimos años la información pesquera de la zona norte ha mostrado cambios en la composición de talla de las capturas con la desaparición de individuos de tallas sobre 15,5 cm LT y la alta presencia de individuos de tallas bajo 11,5 cm LT. Adicionalmente, se ha observado una disminución en la talla de madurez, la que actualmente está bajo los 10 cm LT. Estos cambios en la estructura demográfica serían determinantes en las variaciones de la estacionalidad de desove de la anchoveta, ya que los sucesos reproductivos de esta especie son tamaño dependiente (Claramunt et al., 2007), poniendo en riesgo la persistencia de la población y la sustentabilidad de la pesquería.

Entender las causas de los cambios de tallas observados durante los últimos años en la población de anchoveta del norte es indispensable para generar políticas públicas de manejo efectivo y oportuno. La investigación presentada en este informe busca profundizar el conocimiento sobre los cambios que han llevado a una disminución en tallas de la anchoveta del norte, y examinar posibles escenarios de cambio tanto en condiciones ambientales como en la disponibilidad y calidad del alimento, que permitan explicar este fenómeno.

## 2 OBJETIVOS

---

### 2.1 Objetivo general

Determinar los factores causantes de los cambios estructurales de la población de anchoveta de la zona norte de Chile, en el período reciente, y evaluar sus implicancias.

### 2.2 Objetivos específicos

- 2.2.1 Caracterizar los patrones de edad y crecimiento de juveniles y adultos de baja talla de anchoveta registrados en el período reciente, para clarificar sus impactos en los cambios que ha experimentado la especie.
- 2.2.2 Desarrollar y comprobar hipótesis respecto a los factores causantes de los cambios estructurales de la anchoveta, mediante el análisis y la comparación de series históricas oceanográficas, biológicas y pesqueras, juntamente con investigación y literatura asociada y discusiones de talleres de trabajo y comités.
- 2.2.3 Establecer recomendaciones para el manejo pesquero, bajo distintos escenarios basados en las hipótesis planteadas en el estudio.

### 3 METODOLOGÍA

3.1 Objetivo específico 2.2.1 *Caracterizar los patrones de edad y crecimiento de juveniles y adultos de anchoveta de baja talla registrados en el período reciente, para clarificar sus impactos en los cambios que ha experimentado la especie.*

3.1.1 Selección de otolitos para colección de referencia.

Los otolitos utilizados fueron recolectados de los muestreos de anchoveta realizados frente a la costa de Chile en la zona norte (18 a 24°S) a bordo del buque de investigación Abate Molina, durante los cruceros de hidroacústica realizados en diciembre de cada año y del muestreo de la captura comercial realizado por observadores científicos de IFOP. A cada ejemplar se le registró la longitud total con una precisión de 0,01mm, el peso total (g) y se removió el par de otolitos sagitales de cada pez, los cuales fueron limpiados, secados y almacenados para su posterior análisis. La muestra analizada correspondió a un total de 1860 pares de otolitos de anchoveta, correspondientes a 15 cohortes entre 1972-1973 y 2022-2023 (Tabla 1). El crecimiento de anchoveta fue analizado a nivel diario, lo cual permitió una resolución adecuada para detectar los posibles cambios interanuales en esta especie dado su patrón de crecimiento rápido.

Tabla 1. Resumen del número de pares de otolitos que se analizaron por cada cohorte anual. Se incluye la longitud y edad media, con su desviación estándar y rango.

Cohorte	Longitud total (cm)		Edad (días)		Número de muestra
	Media±d.e	Rango	Media±d.e	Rango	
1972-1973	10,6±0,8	9,0-12,0	94±17	64-126	44
1981-1982	10,7±1,0	8,5-12,0	95±17	62-134	56
1990-1991	13,0±0,4	12,5-13,5	165±9	145-182	41
1991-1992	11,2±0,8	9,5-13,0	144±21	87-191	104
1992-1993	10,2±1,7	8,0-13,0	121±28	84-201	78
2001-2002	10,3±1,1	8,0-12,0	133±17	109-159	31
2009-2010	10,3±1,2	7,5-13,0	115±28	54-190	372
2010-2011	8,3±2,4	5,5-11,5	93±15	71-118	15
2014-2015	11,0±1,4	8,0-12,5	140±38	71-352	191



2015-2016	5,6±3,2	2,5-14,0	67±58	71-352	109
2018-2019	10,0±2,1	7,0-14,0	238±40	25-247	30
2019-2020	6,1±2,0	3,5-12,0	75±33	45-183	234
2020-2021	8,3±2,4	4,0-13,5	115±35	49-195	307
2021-2022	7,7±2,8	3,0-13,0	102±37	41-215	143
2022-2023	6,9±2,3	3,5-12,0	101±36	38-158	105
Global	9,2±2,7	2,5-14,0	101±36	38-158	1860

### 3.1.2 Preparaci3n y an3lisis de la micro-estructura de otolitos

#### a) Preparaci3n de otolitos para an3lisis micro-estructural para anchoveta

Los otolitos sagitales de anchoveta recolectados fueron procesados siguiendo el m3todo SGEM descrito por Plaza *et al.* (2005). En este m3todo los otolitos son montados en peque1os bloques de resina ep3xica en portaobjetos. Para la correcta identificaci3n de los micro-incrementos, los otolitos embebidos en resina fueron pulidos utilizando lijas entre 800-2000 de tama1o de grano hasta lograr una resoluci3n adecuada del primordio. Este procedimiento ha sido adecuadamente desarrollado para la especie *E. ringens* en el proyecto FIPA 2009-16, donde se determin3 que un doble pulido sagital es el m3s adecuado para la identificaci3n de los micro-incrementos en juveniles bajo los 12 cm en esta especie (Figura 1).

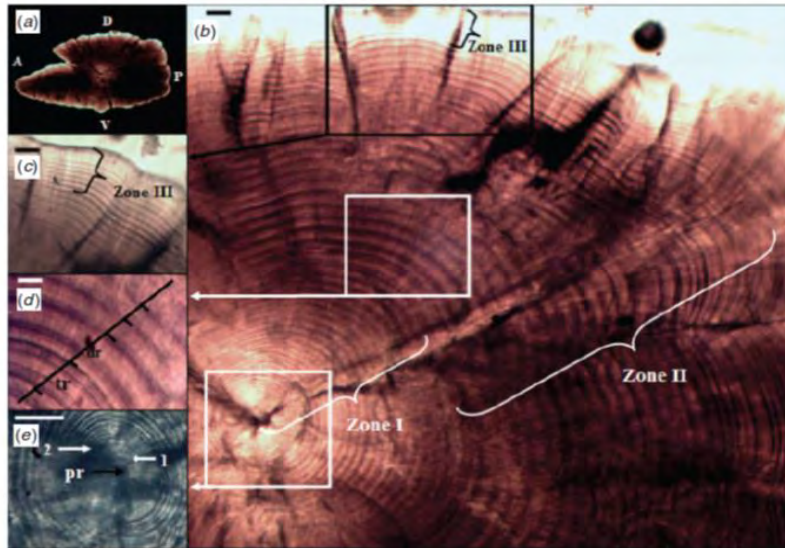


Figura 1. Fotografías bajo luz transmitida de otolito entero con aumento 100X. La foto (b) muestra el otolito pulido en posición sagital de un juvenil de anchoveta. El resto de las fotos (c-e) permiten visualizar de cerca con aumento 400X la zona del borde (c), la zona central del otolito (d) y la zona aborde del primordio (e) (Fuente: Cerna y Plaza 2016).

El radio máximo (RM), correspondiente a la distancia mayor entre el núcleo y el borde del otolito, fue medido desde el primordio hasta el borde del otolito en dirección caudal con el uso de microscopios con aumentos 400x y 1000x. La lectura y mediciones de los micro-incrementos fue realizada por un lector entrenado utilizando la herramienta “Caliper” del analizador de imágenes IMAGE-pro-plus (Figura 2).

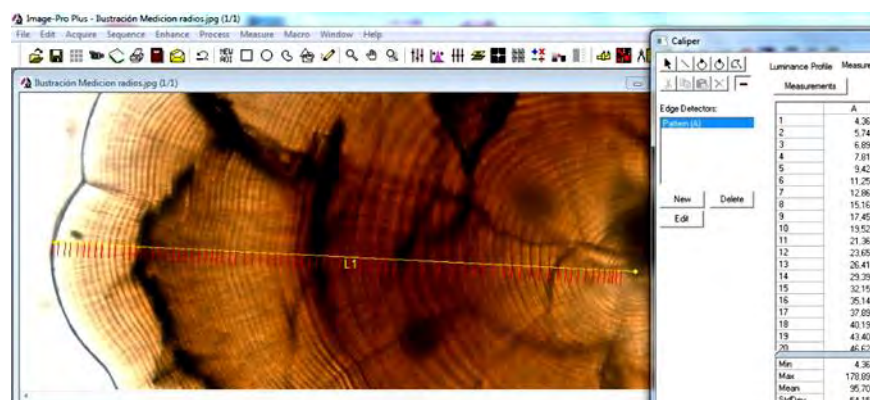


Figura 2. Ilustraci3n de un proceso de lectura en un juvenil de anchoveta, utilizando la herramienta "Tag" del programa IMAGE-pro-plus. La flecha roja denota el radio m1ximo (RM). Fechas de Nacimiento (FN).

Las fechas de nacimiento (FN) de los juveniles procesados en cada mes fueron estimadas restando el n1mero total de incrementos a la fecha de captura. Se construyeron distribuciones de frecuencias de las FN para los individuos colectados en cada mes de muestreo. El an1lisis de distribuci3n de frecuencia de las FN permiti3: a) determinar con exactitud la cohorte de nacimiento de los reclutas, y b) evaluar posibles variaciones inter-anales en el reclutamiento en funci3n de la fecha de nacimiento.

### 3.1.3 Estimaci3n del crecimiento

Para determinar el patr3n de crecimiento y estimar las posibles variaciones entre cohortes, se analizaron los perfiles de grosores de los incrementos diarios de cada cohorte y la relaci3n edad-talla a la fecha de captura, a trav3s de: a) un modelo lineal generalizado y b) estimaci3n de par1metros de crecimiento Laird-Gompertz en aquellas cohortes para las que se cont3 con una m1s amplia distribuci3n de datos.

### 3.1.3.1 Perfiles de grosor de los incrementos

La variaci3n en el grosor del incremento diario (GI) se analiz3 como un proxy de tasa de crecimiento diario en cada cohorte aplicando un modelo aditivo generalizado (GAM). Este modelo considera el GI como variable de respuesta, e incluy3 como covariables la edad en que el incremento fue formado, y la estaci3n del a3o (invierno-primavera, verano, o3o3o), con lo cual se obtuvo una relaci3n suavizada de GI para combinaci3n de estaciones. El modelo tambi3n incluy3 como variables predictivas: la cohorte y la estaci3n del a3o agrupada en invierno-primavera, verano-o3o3o. El modelo GAM se ajust3 **utilizando la biblioteca “mgcv” (Wood, 2006)** bajo el supuesto de errores normales de acuerdo con el siguiente modelo:

$$GI_{ijk} = \varphi = \beta_0 + s(edad_{ijk} * E_{ijk}) + E_{ijk} + Coh_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

donde  $\varphi$  representa la funci3n que permite vincular la media de GI y los predictores aditivos;  $\beta_0$  es el intercepto del modelo (la media global del GI);  $GI_{ijk}$  corresponde al grosor de cada microincremento del el i-3simo pez, en la j-3sima estaci3n del a3o ( $j=\{\text{invierno-primavera, verano, o3o3o}\}$ ); en la k-3sima cohorte ( $k=\{1972, 1981, 2009, 2014, 2019, 2020, 2021, 2022\}$ );  $edad_{ijk}$  es la edad en que ocurre el i-3simo incremento del pez, de la j-3sima estaci3n de nacimiento y la k-3sima cohorte.

### 3.1.3.2 Modelos edad-talla a la fecha de captura

#### a) An3lisis aplicando un modelo lineal generalizado (GLM)

Se analiz3 la variaci3n de la longitud del pez respecto a la edad en una fracci3n lineal de la distribuci3n de los datos, y con respecto a la cohorte de nacimiento, para las once cohortes en que se pudo aproximar un balance adecuado de los datos edad- talla para el rango de edades entre 50 y 150 d3as

de edad. Para este ajuste se aplic3 un modelo lineal generalizado, de acuerdo con la siguiente ecuaci3n general:

$$LT_{ijkl} = \beta_0 + \beta_1 (edad_{ijkl}) + \beta_j (edad_{ijkl} * Coh_j) + Coh_j + E_k + Z_l + \varepsilon_{ijkl}$$

donde  $LT_{ijkl}$  es la longitud total del pez  $i$  a una edad de la  $j$ -3sima cohorte de nacimiento para la estaci3n  $k$  en la zona  $l$ , la edad a cada longitud como covariable;  $Coh_j$  es la cohorte de nacimiento ( $j=\{1972-1973, 2022-2023\}$ ; once cohortes);  $E_k$  es la estaci3n de la cohorte de nacimiento ( $k=\{\text{invi3rno, primavera, verano y oto3o}\}$ );  $Z_l$  es la zona de procedencia ( $l=\{\text{Arica, Iquique y Antofagasta}\}$ );  $\beta_0$  es el **intercepto o media global**,  $\beta_1$  corresponde a la pendiente de la covariable. El modelo tambi3n incluye la interacci3n de la edad con la estaci3n y la zona, que no se presentan en la ecuaci3n para simplificar su expresi3n, aunque son evaluadas en el proceso de selecci3n de predictores.

A partir de un modelo simple, que solo modela la longitud media, se ensayaron distintas combinaciones de variables predictoras en un proceso que consiste en la incorporaci3n y sustracci3n de las variables y sus interacciones. Se utiliz3 la funci3n *step* del paquete estadístico *base* de R Project (R Core Team, 2024) para el modelo glm inicial, asumiendo una distribuci3n normal (Gaussian) para la respuesta con funci3n de enlace identidad. Adem3s, se utiliz3 la librería *ggeffects* para obtener los predictores de la variable de respuesta en funci3n de las variables explicativas (Lüdecke, 2018).

Para evaluar el supuesto de normalidad del modelo se aplic3 el test de uniformidad de Kolmog3rov-Smirnov, test de dispersi3n y test de outlier (Hartig, 2022).

## b) An3lisis modelo de crecimiento Laird-Gompertz

La relaci3n edad-talla observada para las cohortes 1991-1992, 1992-1993, 2001-2002, 2009-2010, 2014-2015, 2019-2020, 2020-2021, 2021-2022 y 2022-2023 fue estimada a trav3s del modelo de crecimiento de Laird-Gompertz de la forma:

$$L_t = L_{\infty} \exp[e^{(\alpha(X-X_0))}]$$

donde  $L_i$  es la longitud del individuo  $i$ ,  $L_{\infty}$  corresponde a la longitud asint3tica,  $\alpha$  es la tasa de crecimiento instant3nea,  $X_i$  es la edad del individuo  $i$  y  $X_0$  es la edad al punto de inflexi3n.

### 3.1.3.3 Tasas de crecimiento Global (FN)

Las tasas de crecimiento globales (TCG) fueron determinadas para cada pez como  $(LT - LTe)^{-1}$ ; donde EC correspondi3 a la edad en d3as observada a la fecha de captura. La variaci3n interanual en la TCG se abord3 utilizando un modelo lineal generalizado (GLM), donde la variable dependiente fue transformada con logaritmo natural, para cumplir con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. El modelo GLM tuvo la siguiente estructura:

$$Y_i = \alpha + \gamma + \delta + \beta LT + \gamma LT + e_i,$$

donde  $Y$  es la TCG,  $\alpha$  es el intercepto global,  $\gamma$  es el efecto del a3o,  $\delta$  es el efecto estacional, y  $\beta$  son los coeficientes estimados para  $LT$  que actúan como covariables num3ricas y  $e_i$  es el t3rmino de error. Alternativamente, tambi3n se utiliz3 un modelo aditivo generalizado (GAM), contenido en el paquete *mgcv* de R (Wood 2006), para la relaci3n de cada uno de los índices de forma con la longitud total del pez. Se utiliz3 un modelo con distribuci3 gaussiana o gamma y funci3n identidad, incluyendo el estado ontogen3tico y la cohorte de nacimiento como factores fijos. La estructura del modelo fue la siguiente:

$$TCG_{ij} = \varphi = \beta_0 + s(LT_{ij}) + Estado_{ontogen3tico_{ij}} + Cohorte_{ij}$$

donde  $\varphi$  representa la funci3n que permite enlazar la media y el modelo (funci3n de enlace); TCG correspondi3 a la tasa de crecimiento global;  $\beta_0$  es el intercepto del modelo;  $s$  es una funci3n suavizadora. Todos los ajustes de los modelos GLM y GAM fueron llevados a cabo en el paquete



estadístico R 4.0.0 (R core team 2020). Los GLM fueron ajustados usando familia “*Gausiana*” y funci3n de enlace “*identity*”.

3.2    Objetivo específico 2.2.2. *Desarrollar y comprobar hipótesis respecto a los factores causantes de los cambios estructurales de la anchoveta, mediante análisis de series históricas oceanográficas, biológicas y pesqueras, juntamente con investigación y literatura asociada y discusiones de talleres de trabajo y comités.*

Una de las hipótesis con mayor aceptación entre los investigadores dice relación con una reducción del crecimiento en alguna de las etapas de desarrollo ontogenético de la anchoveta debida a cambios en el hábitat, como una reducción en la abundancia y/o cambio en la composición (grupo dominante, tamaños) del alimento, o por un efecto negativo del aumento de la temperatura. Al respecto, en la zona norte se ha reportado una tendencia positiva en la temperatura desde 2009 a 2017 (Hernández-Santoro *et al.*, 2019b), aumento que genera una mayor demanda respiratoria para mantener el metabolismo basal. Esta demanda por oxígeno en una costa fuertemente influenciada por la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) del Pacífico Suroriental impone restricciones a la longitud del pez, dado el cambio en la relación entre el volumen corporal y la superficie de intercambio gaseoso en las branquias a medida que aumenta la talla. Debido a esto, se ha propuesto que los peces sacrifican el crecimiento para mantener su metabolismo (Pauly y Cheung, 2018b, Pauly 2021). Por otro lado, el aumento de la temperatura tiene un efecto indirecto en la abundancia, tamaño y/o composición del alimento. En esta línea se plantearon las siguientes hipótesis:

- 1) La reducción de talla de anchoveta se produce por cambios en el hábitat (cantidad y calidad de la oferta de alimento) y/o por factores ambientales que afectan el metabolismo (temperatura y oxígeno).
- 2) El menor crecimiento en alguna de las etapas de desarrollo ontogenético provoca una disminución en la talla media de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en la zona norte de Chile.
- 3) La tasa de crecimiento de la anchoveta en la zona norte de Chile depende de los cambios en la abundancia, tamaño y composición de sus presas.
- 4) El aumento de la temperatura del mar provoca una disminución del crecimiento en alguna de las etapas de desarrollo ontogenético de la anchoveta en la zona norte de Chile.



En este sentido, se analizaron los cambios interanuales y estacionales (otoño, invierno y verano) en la composici3n y abundancia del zooplancton seg3n la disponibilidad de esta variable (Tabla 2). Adem3s, se entrega una caracterizaci3n interanual y espacial de la condici3n ambiental, considerando informaci3n satelital de temperatura superficial del mar entre 1981 y 2023, el viento entre 1980 y 2023 y clorofila a superficial entre 2000 y 2023.

### 3.2.1 Caracterizaci3n del zooplancton

#### a) Datos e informaci3n a utilizar

La informaci3n biol3gica e hidrogr3fica utilizada en este estudio proviene de los cruceros anuales de los proyectos **“Condiciones bio-oceanogr3ficas y evaluaci3n del stock desovante de anchoveta entre las regiones de Arica y Parinacota y Antofagasta” (MOBIO-MPH)**, **“Evaluaci3n hidroac3stica de jurel entre las Regiones de Arica y Parinacota – Valparaíso” (jurel norte)** y **“Evaluaci3n hidroac3stica del reclutamiento de anchoveta entre las Regiones de Arica y Parinacota-Antofagasta” (RECLAN)**. Los cruceros mencionados anteriormente tuvieron como 3rea de estudio la zona norte de Chile (Figura 3) y se desarrollaron anualmente en distintas estaciones del ańo. El jurel norte se llev3 a cabo en otońo entre el 2010 y 2020 y en la primavera entre el 2006 y 2009, el MOBIO-MPH entre finales del invierno e inicios de la primavera y el RECLAN norte en verano (Tabla 2).

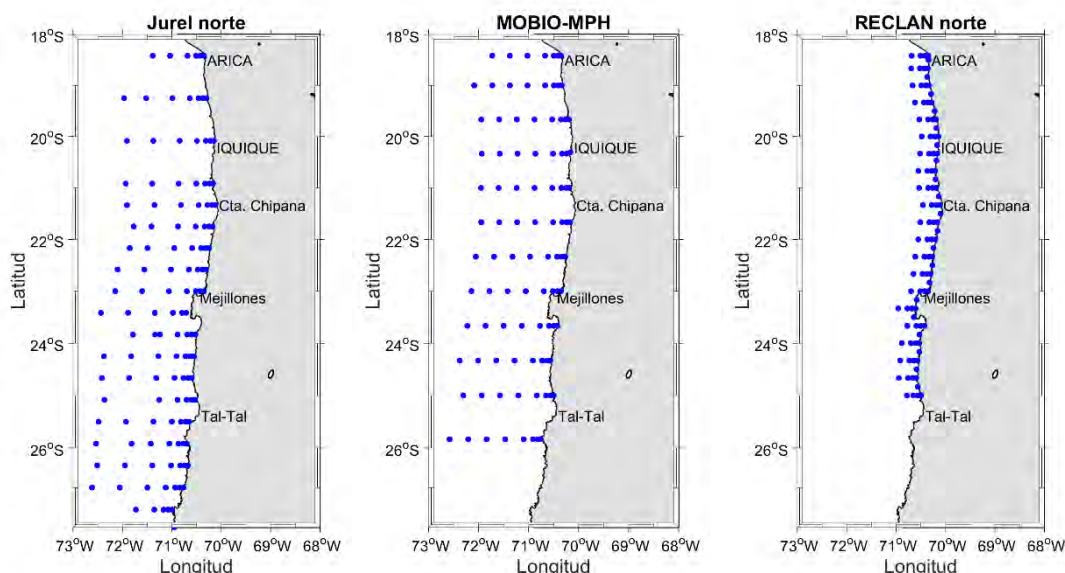


Figura 3. Distribuci3n de estaciones de muestreo y 1rea de estudio de los cruceros realizados en la zona norte Chile

Para las comparaciones interanuales y entre estaciones se utiliz3 informaci3n de abundancia ( $N^{\circ}\text{ind}/1.000\text{m}^3$ ) y biovolumen ( $\text{ml}/1.000\text{m}^3$ ) total de zooplancton y de 12 grupos taxon3micos (Copépodos, Eufáusidos, Larvas de Eufáusidos, Cladoceros, Medusas, Ctenóforos, Salpas, Doliolidos, Sifonóforos, Quetognatos y Apendicularias).

Tabla 2. Variables obtenidas de los distintos proyectos desarrollados por IFOP en las respectivas estaciones del a1o y series disponibles.

Variable	Proyecto	Periodo	Estaci3n del a1o
Abundancia y bio-volumen de zooplancton	Jurel norte	2006 - 2009	Primavera
	Jurel norte	2010 - 2020	Oto1o
	MOBIO-MPH	2014 - 2020	Invierno – primavera
	RECLAN norte	2010 - 2020	Verano
Pendiente de distribuci3n de tama1os	Jurel norte	2013 – 2020	Oto1o
	MOBIO-MPH	2014 - 2020	Invierno - primavera
	RECLAN norte	2010 - 2020	Verano
Oxígeno disuelto	Jurel norte	2012 – 2019	Oto1o
	MOBIO-MPH	2014 – 2020	Invierno - primavera
	RECLAN norte	2011 - 2020	Verano

#### b) Análisis de la informaci3n de zooplancton

Se determinaron los cambios estacionales e interanuales en la abundancia y biovolumen total de zooplancton, así como de los copépodos, eufáusidos, quetognatos, medusas, doliolidos, y ctenóforos. La abundancia de los 6 grupos taxonómicos se caracterizó incluyendo tendencias centrales como media y mediana, percentil de 75% y 25%. Además, se calculó el porcentaje de estaciones positivas para cada estaci3n del ańo.

Se analizaron los cambios en la estructura comunitaria de zooplancton entre estaciones del ańo a través de análisis multivariados. La abundancia de zooplancton se transformó con raíz cuadrada. Para probar la existencia de diferencias significativas en la composici3n y abundancia de los ensambles de zooplancton (e.i. índice de Bray Curtis) entre estaciones del ańo, se usó un análisis multivariado basado en permutaciones (PERMANOVA, Permutational Analysis of Variance) con 999 permutaciones (Anderson, 2017). Para dicho análisis se utilizó la informaci3n de abundancia de 12 grupos taxonómicos (Copópodos, Eufáusidos, Larvas de Eufáusidos, Cladoceros, Medusas, Ctenóforos, Salpas, Doliolidos, Sifonóforos, Quetognatos y Apendicularias) de los ańos 2014 – 2020, dado que los tres cruceros tienen informaci3n en dicho período. Así mismo, solo se utilizaron las estaciones ubicadas dentro de las 20 mn de distancia a la costa y entre los 18°S y 25°S de latitud, dado que los cruceros tienen distintas extensiones meridionales y zonales (Figura 3).

El análisis de porcentaje de similitud (SIMPER) fue usado para identificar los grupos taxonómicos (de total de 12) que representaron las mayores diferencias entre estaciones del ańo. También, se realizó un PERMANOVA univariado, utilizando como índice de similitud la distancia Euclidiana entre tratamientos, con el fin de probar si existen diferencias significativas en la abundancia entre estaciones del ańo. Esto último se realizó para los copépodos, ya que, en el resultado del SIMPER fueron los que más aportaron en la disimilitud entre tratamientos. Los análisis se realizaron mediante el software R.

### c) Indicadores de la abundancia y composición del zooplancton

Con la información de zooplancton se construyeron 3 indicadores: La proporción de copépodos, la proporción de gelatinosos carnívoros y la pendiente de distribución de tamaños. La proporción de copépodos se calculó mediante la división entre la abundancia de copépodos y la abundancia total. La proporción de gelatinosos se calculó mediante la suma de la abundancia de los ctenóforos, medusas y quetognatos dividida por la abundancia total. La pendiente se obtuvo de los datos históricos del IFOP. La pendiente de la distribución de tamaños se calcula a partir de la ecuación de regresión lineal entre los valores de densidad ( $N^{\circ}\text{ind}/1000\text{m}^3$ ) con transformación logarítmica ( $\log_2$ ) y la clase de tamaño. Este parámetro, como descriptor del tamaño individual en una comunidad ha sido ampliamente usado en ecología acuática (McClain, 2004) e ilustra el modo en que se distribuyen los recursos por tamaño corporal (White *et al.*, 2007). Los tres indicadores se calcularon para cada estación oceanográfica de manera independiente. Luego se calculó el promedio y el error estándar para cada año y estación del año (crucero).

Con la información de oxígeno disuelto (OD) se construyeron 2 indicadores: El OD promedio en los primeros 20 m de profundidad y el nivel superior de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO). Para el OD promedio en los primeros 20 m se promediaron los valores de OD de los primeros 20 m de cada perfil de CTD-OF. Para el caso del nivel superior de la ZMO se ubicó el valor más somero con una concentración de oxígeno menor o igual que 1 mL/L para cada perfil de CTD. Los dos indicadores se calcularon para cada estación oceanográfica de manera independiente. Luego se calculó el promedio y el error estándar para cada año y estación del año (crucero).

Se realizó un PERMANOVA univariado, utilizando como índice de similitud la distancia Euclidiana entre tratamientos, con el fin de probar si existen diferencias significativas de los 5 indicadores antes mencionados entre estaciones del año. Los análisis se realizaron mediante el software R.

### 3.2.2 Caracterizaci3n de la condici3n ambiental

Se analiz3 la variabilidad de las condiciones meteorol3gicas y oceanogr3ficas en la regi3n durante las 3ltimas d3cadas, con el fin de proporcionar el contexto necesario para abordar las hip3tesis que relacionan los cambios poblacionales de la anchoveta y el ambiente.

En primer lugar, se analiz3 la variabilidad temporal y espacial del viento, dado que cambios en su intensidad y estructura espacial podr3an modificar la intensidad y/o periodicidad de la surgencia costera en la regi3n, y con ello modificar el r3gimen ambiental tanto en t3rminos de temperatura del agua y ox3geno disuelto como en la disponibilidad y concentraciones relativas de nutrientes en aguas costeras. Junto con la relaci3n ampliamente aceptada entre la intensidad de la surgencia costera y la biomasa fitoplanct3nica, existe evidencia de que cambios interanuales en el afloramiento de agua por efecto del rotor de viento (i.e. tendencia del viento a rotar reflejada como cambios zonales en la direcci3n predominante) pueden afectar la estructura de tamaños del fitoplancton y zooplancton, favoreciendo con ello un cambio en las especies dominantes de peces pel3gicos pequeños (Rykaczewski y Checkley, 2008).

El an3lisis de patrones de enfriamiento/calentamiento del oc3ano costero y su conexi3n con eventuales cambios en la intensidad y/o periodicidad de la surgencia costera se abord3 utilizando informaci3n sobre el viento y la temperatura superficial del mar (TSM) en la regi3n de estudio, derivada de datos de rean3lisis ERA5 para el viento a 10 m sobre el nivel del mar (doi:10.24381/cds.adbb2d47) y de datos satelitales AVHRR disponibles para el per3odo 1980-2023 y distribuidos por [NOAA](https://noaa.gov). Posteriormente, para tener un indicador de la respuesta biol3gica a la din3mica oceanogr3fica y ambiental, adem3s de un proxy de las condiciones de alimentaci3n para la anchoveta, se analiz3 una serie temporal de im3genes satelitales de clorofila-a generada por Copernicus a partir de datos de m3ltiples sensores satelitales de color del oc3ano (SeaWiFS, MERIS, MODIS Aqua, VIIRS, OLCI). Estos datos, disponibles en la plataforma Copernicus CDS (DOI: 10.24381/cds.f85b319d), tienen una resoluci3n espacial y temporal de 4 km y 1 d3a, respectivamente. Los datos utilizados en nuestro

análisis cubrieron el período 2000-2023 y fueron convertidos a compuestos mensuales para mejorar la cobertura espacial, reduciendo las brechas de información en imágenes diarias debido a la presencia de nubes.

#### a) Análisis de información de viento

Se descargaron campos diarios de viento a 10 m sobre el nivel del mar desde el reanálisis ERA5, para la región comprendida entre las latitudes 18-28°S y longitudes 80-69.5°W y para el período entre el 1 de enero de 1980 y el 31 de diciembre de 2023. El producto ERA5 utilizado tiene una resolución espacial de 25 km y resolución temporal horaria. Como nuestro análisis se enfocó en la variabilidad de períodos mayores que 1 día (sinóptica, estacional, inter-anual), se utilizó solo un campo de viento por día, correspondiente a las 16:00 UTC (12:00 en Chile, UTC-4). Este procedimiento rindió un arreglo de datos tridimensional con 41 latitudes, 43 longitudes y 16071 días.

A partir de los campos de viento diarios se calculó un promedio de largo plazo para la velocidad y dirección del viento en la región, y una climatología, con las condiciones promedio para cada mes del año. Posteriormente, se calculó el stress del viento a partir de los campos de velocidad usando el método de Large y Pond (1981), utilizando 10 m como altura de referencia y una densidad del aire constante de 1,22 kg/m<sup>3</sup>. Los campos de stress de viento así obtenido se utilizaron para: (1) generar un campo promedio de largo plazo para la región, (2) calcular una climatología, con campos de stress promedio para mes del año, (3) calcular el rotor de viento para cada día, y (4) extraer series de tiempo de stress de viento en la línea de costa para cada latitud en la región de estudio (41 series de tiempo en total).

El rotor de viento  $C(t)$  se calculó para cada campo diario de stress del viento como la diferencia entre el gradiente zonal en el stress meridional ( $dt_y/dx$ ) y el gradiente meridional en el stress zonal ( $dt_x/dy$ ). Valores negativos de rotor indican la tendencia del viento a rotar en sentido horario, lo que en el hemisferio sur genera flujos verticales positivos (i.e. hacia la superficie), fenómeno conocido como Bombeo de Ekman. Un rotor de viento positivo genera flujos verticales en la dirección opuesta. Para

cada d3a en el per3odo analizado, se calcul3 el campo de velocidades verticales ( $w_{xy}$ ) a partir del rotor de viento siguiendo el m3todo indicado por Rykaczewski y Checkley (2008):

$$w_{xy} = \frac{\nabla \times \tau}{\rho_w f_y}$$

Donde  $\nabla \times \tau$  es el rotor de viento en el nodo xy de la grilla,  $\rho_w$  es la densidad del agua (considerada constante e igual a 1024 kg/m<sup>3</sup>) y  $f_y$  es el valor del par3metro de Coriolis en la latitud y.

Los campos de velocidad vertical as3 obtenidos se utilizaron para calcular el flujo vertical neto por Bombeo de Ekman en 3 3reas costeras definidas entre las latitudes 18,35-19,5°S (Arica), 19,5-21,5°S (Iquique), y 21,5-24°S (Antofagasta). Esto permiti3 obtener 3 series de tiempo diarias de Bombeo de Ekman a lo largo de la regi3n de estudio para evaluar cambios interanuales y diferencias entre regiones.

Como un primer paso en la caracterizaci3n de la variabilidad temporal del Bombeo de Ekman, se aplic3 un an3lisis de wavelets a las 3 series de tiempo para identificar la eventual presencia de periodos de variabilidad dominantes, y su persistencia o intermitencia a lo largo de los 40 a3os analizados. Posteriormente, a partir de las series de tiempo de resoluci3n diaria se calcularon series de promedios mensuales, las que fueron sometidas a una prueba no param3trica de Pettitt (1979) para detectar puntos en la serie donde el nivel medio cambia abrupta y significativamente.

Para evaluar m3s claramente los cambios interanuales, se calcul3 el Bombeo de Ekman acumulado a partir del 1 de septiembre de cada a3o y hasta el 31 de agosto del a3o siguiente, repitiendo este c3lculo a lo largo de toda la serie de tiempo. Posteriormente, estas trayectorias se agruparon entre a3os, seg3n los periodos definidos como de inter3s a partir del an3lisis de Pettitt arriba mencionado. Las trayectorias en bombeo de Ekman para estos tres periodos se compararon tanto en t3rminos del

valor mediano para cada d3a, como en cuanto al traslape o no de una banda alrededor de la mediana, definida por los percentiles 10 y 90 de la distribuci3n obtenida para cada d3a.

En paralelo a los c3lculos aplicados a cada campo de stress del viento, para cada latitud se extrajeron series de tiempo diarias de las componentes zonal y meridional del stress de viento en la costa. Estas series de tiempo se utilizaron para determinar la orientaci3n del eje dominante del viento en cada punto (direcci3n del primer vector propio de la matriz de covarianza entre las velocidades zonal y meridional) y la fracci3n de la variabilidad total en el stress del viento correspondiente al eje dominante (raz3n entre el primer valor propio y la traza de la matriz de covarianza). Una vez determinada la direcci3n del eje dominante en cada punto de la costa, se realiz3 una rotaci3n de los vectores de viento para obtener la componente paralela a la costa del stress del viento en cada latitud, y con ello calcular el Transporte de Ekman (T) como:

$$T = \frac{\tau_y}{\rho_w f}$$

Donde  $\tau_y$  es la componente paralela a la costa del stress del viento,  $\rho_w$  es la densidad del agua (considerada constante e igual a 1024 kg/m<sup>3</sup>) y  $f$  es el valor del par3metro de Coriolis en la latitud correspondiente. Inicialmente, a partir de las series diarias de transporte de Ekman se calcul3 una climatolog3a para cada latitud, as3 como valores integrados a lo largo de la costa para tres zonas definidas entre las latitudes 18,35-19,5°S (Arica), 19,5-21,5°S (Iquique), y 21,5-24°S (Antofagasta). Esto permiti3 obtener 3 series de tiempo diarias de Transporte de Ekman a lo largo de la regi3n de estudio para evaluar cambios interanuales y diferencias espaciales.

Al igual que lo indicado anteriormente para el bombeo de Ekman, se aplic3 un an3lisis de wavelets a las 3 series de tiempo para identificar la eventual presencia de periodos de variabilidad dominantes, y su persistencia o intermitencia a lo largo de los 40 a3os analizados. Posteriormente, se calcularon series de promedios mensuales y se aplic3 una prueba no param3trica de Pettitt (1979) para detectar puntos en la serie donde el nivel medio cambia abrupta y significativamente.



#### b) Análisis de la Temperatura Superficial del Mar (TSM)

Las imágenes AVHRR diarias descargadas para la región entre las latitudes 18-28°S y longitudes 80-69°W, y para el período entre septiembre de 1981 y mayo de 2023, tienen una resolución espacial de 25 km. De esta forma, el arreglo de datos de TSM analizado consta de 41 latitudes, 45 longitudes y 15214 días.

En primer lugar, se calculó el promedio de largo plazo para la TSM en toda la región de estudio. Posteriormente, se aplicó un análisis armónico a las series de tiempo diarias obtenidas desde cada uno de los  $41 \times 45 = 1845$  píxeles en la región con datos, con el objetivo de ajustar la señal armónica anual en cada caso, evaluar la amplitud de la señal anual y calcular la fracción de variabilidad total explicada por fluctuaciones no estacionales de TSM. De la diferencia entre las series de TSM originales y las series armónicas ajustadas, se obtuvieron series temporales de anomalías de TSM. Se aplicó un análisis de tendencia lineal a cada serie de anomalías de TSM, para evaluar el signo, la magnitud y la significancia estadística de las tendencias en TSM a lo largo de la región.

Para caracterizar el patrón latitudinal y evaluar fluctuaciones interanuales en el enfriamiento del océano costero, considerado un indicador de la surgencia costera. Se definió una franja costera cuyo límite costa afuera correspondió – en cada latitud – a la posición más oriental de la isóbata de 5000 m (dada la presencia de la fosa de Atacama, hay isóbatas de 5000 m en ambos flancos de la fosa). Para cada día en el registro, se calculó un vector de anomalías de TSM a lo largo de cada transecto costa-océano como la diferencia entre las TSM en el transecto y el valor de TSM en el extremo oceánico de éste. Para un océano en reposo, cuya temperatura superficial resulta principalmente del flujo de calor por radiación solar, la TSM debiese variar en latitud y con las estaciones del año, pero no a lo largo de un transecto costa-océano. Desviaciones de este patrón, con valores de TSM más bajos hacia la línea de costa, indican el ascenso de agua fría desde subsuperficie, o el ingreso de agua fría por descarga de ríos o escorrentía en meses de invierno-primavera. Como en la región de interés no hay ríos con una descarga importante, el enfriamiento de la costa relativo al extremo oceánico de cada transecto se considera un indicador de ascenso de agua por surgencia.

A partir de las anomalías de TSM calculadas siguiendo el procedimiento recién descrito, se defini3 la magnitud del enfriamiento costero (en  $^{\circ}\text{C km}$ ) como la integral de las anomalías de TSM a lo largo del transecto costa-océano para cada latitud y día en la base de datos. Como la distancia entre la línea de costa y la isóbata 5.000 varía en latitud (i.e. no todos los transectos tienen el mismo número de píxeles), se defini3 la intensidad del enfriamiento costero (en  $^{\circ}\text{C}$ ) como la magnitud dividida por el largo del transecto en cada latitud.

Finalmente, para evaluar posibles cambios en la variabilidad de escala sin3ptica en la TSM, se extrajo una serie de tiempo diaria para el píxel más cercano a la línea de costa en cada latitud a lo largo de la regi3n de estudio. A cada serie de tiempo se le aplic3 un filtro pasa-baja consistente en una media móvil de 20 días, que posteriormente se sustrajo de la serie.

#### c) Análisis de la Clorofila-a superficial (Chla)

Se descargaron imágenes satelitales de clorofila-a generada por Copernicus a partir de datos de múltiples sensores satelitales de color del océano (SeaWiFS, MERIS, MODIS Aqua, VIIRS, OLCI). Estos datos tienen una resoluci3n espacial y temporal de 4 km y 1 día, respectivamente. Las imágenes descargadas cubren el rango latitudinal de 18-28 $^{\circ}\text{S}$  y longitudes de 76-69 $^{\circ}\text{W}$ , para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2000 y 31 de diciembre de 2023. De esta forma, se obtuvo un arreglo de datos tridimensional con 240 latitudes, 168 longitudes y 8763 días.

Dadas las brechas de informaci3n frecuentemente encontradas en las imágenes diarias, debido a la presencia de nubes, y dado el énfasis de nuestro análisis en variaciones de escala estacional e interanual en las concentraciones de clorofila-a superficial, se gener3 una serie de 288 compuestos mensuales (24 años) a partir de las imágenes diarias descargadas originalmente.

La costa a lo largo de la regi3n de estudio se dividi3 en 3 secciones: 18,35-19,5 $^{\circ}\text{S}$  (Arica), 19,5-21,5 $^{\circ}\text{S}$  (Iquique), y 21,5-24 $^{\circ}\text{S}$  (Antofagasta), fijando como límite oeste una distancia de 20 millas

náuticas de la costa. Para cada una de estas áreas se calculó el promedio espacial de la clorofila-a en cada mes del registro disponible. Las 3 series de tiempo resultantes fueron comparadas entre sí, inicialmente en forma gráfica, y posteriormente aplicando la prueba no paramétrica de Pettitt (1979) que permite detectar cambios significativos en el nivel medio de una serie de tiempo

### 3.2.3 Caracterización de la condición biológica de la anchoveta

#### a) Indicadores biológicos de anchoveta

Se analizaron los datos biológicos de anchoveta provenientes de muestreos realizados en la zona norte de Chile, entre las zonas Arica y Antofagasta, en el marco del seguimiento de las pesquerías pelágicas que lleva a cabo el Instituto de Fomento Pesquero. Se identificó el sexo, se registró el peso ( $\pm 0,1$  g), la longitud ( $\pm 0,5$  cm) y se extirparon y pesaron sus ovarios ( $\pm 0,1$  g). Se calculó la longitud y peso medio y la condición corporal (Kn). Para el Kn se utilizó el índice de condición relativo (Le Cren, 1951). Este índice corresponde a la relación entre el peso medido de un individuo y su peso predicho a partir de la relación longitud-peso de todos los peces muestreados anualmente, siendo considerado uno de los mejores indicadores morfométricos de la condición de los peces en los ecosistemas marinos (ICES, 2016). **Una alta condición corporal del pez se deduce de  $Kn \geq 1$ , mientras que cuando  $Kn < 1$ , el organismo registra una baja condición de crecimiento somático en comparación con un individuo promedio con la misma longitud. El índice de condición de Le Cren fue calculado de la siguiente manera:**

$$Kn_i = W_{\text{observed}} / W_{O_i;s}$$

donde  $W_{O_i;s}$  es el peso corporal previsto de un individuo i, de una longitud dada  $L_i$ ; s obtenida de una curva longitud-peso.

#### b) Análisis de los indicadores biológicos y ambientales

Se analizó la estacionalidad de los indicadores biológicos de la anchoveta (peso, longitud y factor de condici3n) e indicadores ambientales (temperatura y clorofila) para las zonas de Arica, Iquique y Antofagasta. Todas las series de tiempo se descompusieron en tres componentes: Tendencia + Estacionalidad + Residuales. El componente estacional se utilizó para comparar la fenología entre las zonas, y la tendencia se utilizó para determinar puntos de quiebre a través de la funci3n BFAST en R; los residuales no se utilizaron en el análisis. Para descomponer el índice gonadosómico GI y Kn **se utilizó la funci3n “descomponer” (R Core Team, 2020) que corresponde a una descomposici3n estacional aditiva por promedios móviles (Kendall y Stuart, 1983).** Los datos faltantes de las series temporales fueron completados antes de realizar la descomposici3n con el paquete imputeTS (Moritz y Bartz-Beielstein, 2017) para completar la serie temporal aplicando el suavizador de Kalman.

#### 3.2.4 Modelamiento

Para probar las hipótesis propuestas en relaci3n a los efectos de las condiciones ambientales y los cambios en la abundancia y/o composici3n y tamaño del alimento en el crecimiento de la anchoveta y la longitud de ésta, se amplió el modelo desarrollado en el primer objetivo de este trabajo, que considera modelar la longitud media en funci3n de la edad en días, la cohorte y la estaci3n del año, incorporando predictores (variables explicativas) que permitan cuantificar el efecto del ambiente o la oferta alimentaria en el periodo y zona de estudio. Para esto se hizo uso de modelos aditivos generalizados (GAM, por su sigla en inglés), que son una generalizaci3n de los modelos lineales generalizados (Hastie y Tibshirani, 1990). Los GAM permiten modelar tanto relaciones lineales (efectos paramétricos) como no lineales (efectos no paramétricos) entre la variable respuesta y las variables explicativas, y son muy utilizados debido a su mayor flexibilidad para modelar este tipo de relaciones, dado que no imponen una ecuaci3n funcional de relaci3n no lineal, sino que utilizan funciones ajustadas localmente (suavizadores) que permiten recoger la relaci3n basada en los datos. Es decir, no existe una ecuaci3n (no lineal) que represente la relaci3n entre variables, sino que esa relaci3n se modela en funci3n del entorno de valores de la respuesta y su

predictor a trav3s de la utilizaci3n de funciones suaves y que son incorporados aditivamente en el modelo.

La variaci3n de la longitud del pez respecto a los diferentes predictores fue analizada, considerando un modelo base de predictores param3tricos, adicionando las covariables suavizadas del ambiente y alimento.

Para el modelo base, se utilizaron los resultados de la modelaci3n edad-talla descritas para el primer objetivo, esto es, un modelo que asume una distribuci3n normal de las longitudes con funci3n de enlace identidad y que como predictores param3tricos utiliza: la edad en d3as, la cohorte de nacimiento y la estaci3n del a3o, con una interacci3n de la edad con la cohorte. No fue considerada la interacci3n de la edad y la estaci3n del a3o, dado su bajo aporte a la reducci3n de la devianza (<0,5%) en post de utilizar un modelo inicial con mayor parsimonia. Se debe reiterar que s3lo se utiliz3 una fracci3n de los datos disponibles, considerando aquellas cohortes (once cohortes) y edades (entre 50 y 150 d3as) que permit3an aproximar un balance adecuado de los datos.

Para el ajuste se aplic3 un modelo aditivo generalizado (GAM), de acuerdo con la siguiente ecuaci3n general que se divide en un modelo base m3s los efectos no param3tricos:

$$\begin{aligned}
 LT_{ijk} &= EfP_{ijk} + \sum_{m=1}^p EfS_m + \varepsilon_{ijk} \\
 EfP_{ijk} &= \beta_0 + \beta_1 (edad_{ijk}) + \beta_j (edad_{ijk} * Coh_j) + Coh_j + E_k \\
 EfS_m &= S_m(V_m)
 \end{aligned}$$

donde  $LT_{ijkl}$  es la longitud total del pez  $i$  a una edad en la  $j$ -3sima cohorte de nacimiento para la  $k$ -3sima estaci3n en la  $l$ -3sima zona. El efecto param3trico ( $EfP_{ijkl}$ ; modelo base) est3 dado por la edad a cada longitud como covariable;  $Coh_j$  es la cohorte de nacimiento ( $j=\{1972-1973, \dots, 2022-2023\}$ ; once cohortes);  $E_k$  es la estaci3n de nacimiento de la cohorte ( $k=\{\text{invi3rno, primavera, verano y oto3o}\}$ );  $\beta_0$  es el intercepto o media global, y  $\beta_1$  corresponde a la pendiente de la covariable.

Los efectos no paramétricos están dados por la adición de las diferentes variables ambientales y de alimentación que son suavizadas por la función de regresión *spline* del tipo *thin plate* (Wood, 2003). Estas no son presentadas en la ecuación para simplificar su expresión, aunque fueron evaluadas en el proceso de selección de predictores.

Como se mencionó, el proceso de modelado considera la identificación del mejor conjunto de predictores que expliquen las variaciones en la longitud total. En este sentido, primero se evaluaron los términos suavizados que pudiesen aproximarse mediante alguna combinación de los demás predictores, por medio del índice de concurvidad (Ramsay et al., 2003; Wood, 2017), fijando como umbral el valor de 0,6. En segundo lugar, y una vez ajustado solo los predictores sin efecto de concurvidad, se realizó el análisis de significancia de los predictores. Por último, y una vez definido el conjunto de predictores finales, se procedió a evaluar la bondad de ajuste del modelo en términos de la importancia relativa de los predictores (Lai et al., 2024) y la verificación de los supuestos con el análisis residual (Wood, 2017).

Para el análisis de datos, ajuste de modelos y generación de gráficas se utilizó el software R versión 4.4.1 (R Core Team, 2024) y los paquetes *tidyverse* (Wickham et al., 2019), *nanian* (Tierney y Cook, 2023), *mgcv* (Wood, 2011), *gratia* (Simpson, 2024), *gam.hp* (Jiangshan et al., 2024) y *mgcViz* (Fasiolo et al., 2020).

Además, para determinar la relación entre la longitud de la anchoveta y el ambiente, se modeló con GAM incluyendo como covariables el año, zona, estación del año, la temperatura superficial del mar (SST), clorofila y sus tendencias, además, de la condición corporal y peso de la anchoveta y sus tendencias. También se modeló la condición corporal de la anchoveta y el ambiente, utilizando como covariables el año, zona, estación del año, la temperatura superficial del mar (SST), clorofila y sus tendencias. Antes de realizar los análisis, se utilizaron técnicas estándar para identificar posibles correlaciones y colinealidades entre las variables explicativas (Zuur et al., 2010). En particular, la correlación entre variables se verificó realizando una prueba de correlación de Pearson con el paquete *corrplot* (Wei y Simko, 2017). La colinealidad se probó calculando los factores de varianza-inflación

generalizados (GVIF), que son los valores de VIF corregidos por el número de grados de libertad de una variable predictiva (Fox y Weisberg, 2011). El GVIF se evaluó utilizando la función *corvif* en el software R. La selección de modelos se basó en el criterio de información de Akaike más bajo, corregido para muestras pequeñas (AICc). Los supuestos de homocedasticidad y normalidad se verificaron usando residuos, mientras que los supuestos de independencia (para garantizar que no hubiera autocorrelación) se verificaron mediante correlogramas.

### 3.2.5 Búsqueda bibliográfica

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica utilizando los dos principales canales de búsqueda para trabajos publicados tanto en español (SCOPUS), como en inglés (ISI Web of Science [WOS]) Para esto se llevaron a cabo dos búsquedas bibliográficas, la primera incluyó las palabras claves: **“Engraulis” AND “body size” AND “growth” AND “talla” AND “crecimiento”** en WOS y SCOPUS sin límite de fecha de publicación. La segunda búsqueda se realizó en WOS entre los años 2015 y 2024 **utilizando las palabras claves “Clupeiforme” OR “Clupeido” AND “body size” AND “growth”**. Adicionalmente se revisaron los Informes Técnicos de las sesiones del Comité Científico Técnico de Pesquerías de Pequeños Pelágicos (CCT PP) entre 2019-2022 y las discusiones y conclusiones de los 2 talleres de análisis de la anchoveta, principalmente de los realizados con los colegas del IMARPE y organizados por la Jefa del presente proyecto (Noviembre 2021).

### 3.3 Objetivo espec3fico 2.2.3. *Establecer recomendaciones para el manejo pesquero, bajo distintos escenarios basados en las hip3tesis planteadas en el estudio.*

La matriz de conocimiento para *Engraulis ringens* se construy3 a partir de la informaci3n bibliogr3fica recopilada mediante el uso de buscadores generales, plataformas de literatura cient3fica (Web of Science, Scopus, Google Scholar, entre otros). Una vez realizada la recopilaci3n, la literatura fue categorizada en dos tem3ticas globales: (1) biolog3a (edad, crecimiento, relaciones tr3ficas/ecol3gicas, distribuci3n, desove (3reas, huevos, larvas), reproducci3n/talla madurez, fecundidad, fecundidad, y (2) stock (unidades de stock, mortalidad natural, estructura tallas, unidades de stock, ambiente & oceanograf3a, ciclo migratorio y pesquer3a). Adicionalmente, los documentos fueron clasificados seg3n la escala espacial del estudio lo cual fue establecido en 3 niveles: escala local (norte Chile), escala nacional (dentro de Chile) y escala regional (Per3-Chile). Posteriormente, esta matriz fue complementada con la informaci3n generada durante el estudio.

Con la matriz de conocimiento se llev3 a cabo un taller de expertos, considerando el estado actual del recurso, se identificaron brechas del conocimiento y se determinaron l3neas de acci3n futuras. A partir de este diagn3stico integrado y del trabajo participativo con el grupo de expertos, y de acuerdo con criterios bio-pesqueros, socioecon3micos y de gobernanza, se propuso orientaciones y acciones para el desarrollo sustentable (estrategias de manejo) de la pesquer3a de este recurso. En este taller participaron investigadores nacionales con experiencia en la evaluaci3n de pel3gicos peque1os y ecolog3a reproductiva, y se elabor3 una lista de recomendaciones para futuros esfuerzos de medici3n y/o an3lisis que permitan seguir refinando el entendimiento de la din3mica de la pesquer3a de la anchoveta y su dependencia de cambios ambientales a escala local y regional. Adem3s, se incorporaron algunos escenarios basados en las hip3tesis planteadas, para identificar acciones directas e indirectas durante el desarrollo del taller de expertos. Es importante destacar que recientemente algunos estudios han evidenciado ca3da en las tallas medias en varias especies pel3gicos en otros ecosistemas, lo que podr3a estar asociado a tele conexiones m3s globales. Adem3s, se revisaron las actas del comit3 de manejo con 3nfasis en las propuestas de manejo expuestas en el mismo para analizar la viabilidad en base a los resultados obtenidos.



## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

En esta sección se reportan los resultados del análisis de tasas de crecimiento y su relación con la disminución de la longitud de anchoveta en la zona norte de Chile (norte de los 24°00'S) entre los años 1973 y 2023. Además, se entrega una caracterización ambiental, oceanográfica y del zooplankton del área de estudio a escala espacial e interanual, según lo comprometido en la propuesta técnica.

4.1      Objetivo específico 2.2.1 *Caracterizar los patrones de edad y crecimiento de juveniles y adultos de anchoveta de baja talla registrados en el período reciente, para clarificar sus impactos en los cambios que ha experimentado la especie.*

En el presente objetivo específico se reportan los principales resultados orientados a identificar los cambios en el crecimiento somático diario de la anchoveta sobre una base histórica, en base a diferentes aproximaciones.

### 4.1.2. Perfiles de grosor de los incrementos

El modelo aditivo generalizado muestra que existen diferencias significativas en el perfil de grosor de incrementos diarios (GI) entre estaciones del año. De la misma forma, se observaron diferencias significativas de cada una de las cohortes respecto de la cohorte de referencia (1972-1973). El modelo explicó el 40% de la devianza (Tabla 3). Los gráficos de interpolación respecto a la edad de GI muestran perfiles con muy baja variabilidad en los datos ajustados hasta aproximadamente los 130 días de vida. Estos perfiles por estación indican que en invierno, primavera y verano el grosor máximo se alcanza a los 50 días mientras que en otoño se logra entre los 60 y 70 días después de la eclosión. Otra característica observada es la aparente mayor pendiente de ascenso y descenso desde el pico máximo de GI que se observa en invierno y verano. A su vez el máximo parcial es mayor en verano que en el resto de las estaciones (Figura 4). Las diferencias entre estaciones y cohortes se muestran gráficamente en la Figura 5, donde se observa las diferencias significativas entre estaciones, siendo

relevante el mayor GI medio de verano respecto del resto de las estaciones, lo que sugiere que el mayor crecimiento ocurre en dicha estaci3n. A su vez, las diferencias entre cohortes muestran una caída del GI medio desde la cohorte de referencia (1972-1973) hasta el 2022-2023.

Tabla 3. Resumen de los indicadores del modelo aditivo generalizado (GAM) que relaciona el grosor de los incrementos diarios con la edad. El modelo tambi3n considera como variables explicativas la estaci3n del a3o y cohorte. E.E. corresponde al error est3ndar, t valor es el valor del estadístico de prueba t de Student y Pvalor es la probabilidad de que los coeficientes estimados sean iguales a cero.

Variable	Estimaci3n	E.E	t valor	Pvalor
Intercepto	8,751	0,05592	156,49	<2e-16
E_Primavera	-0,752	0,02711	-27,75	<2e-16
E_Verano	0,644	0,04065	15,85	<2e-16
E_Oto3o	-0,649	0,03826	-16,96	<2e-16
Cohorte 1981-1982	-0,674	0,06821	-9,88	<2e-16
Cohorte 2009-2010	0,562	0,05508	10,21	<2e-16
Cohorte 2014-2015	-3,112	0,06022	-51,67	<2e-16
Cohorte 2019-2020	-0,693	0,06393	-10,84	<2e-16
Cohorte 2020-2021	-1,182	0,06008	-19,68	<2e-16
Cohorte 2021-2022	-0,153	0,06190	-2,47	0,0133
Cohorte 2022-2023	-1,511	0,06380	-23,69	<2e-16

Significado aproximado de los t3rminos suavizados:

	egl	Ref. gl	F	Pvalor
S(edad):E_Invierno	8,68	8,96	2496,1	<2e-16
S(edad):E_Primavera	8,36	8,84	1378,9	<2e-16
S(edad):E_Verano	8,41	8,87	1134,9	<2e-16
S(edad):E_Oto3o	7,63	8,50	627,3	<2e-16

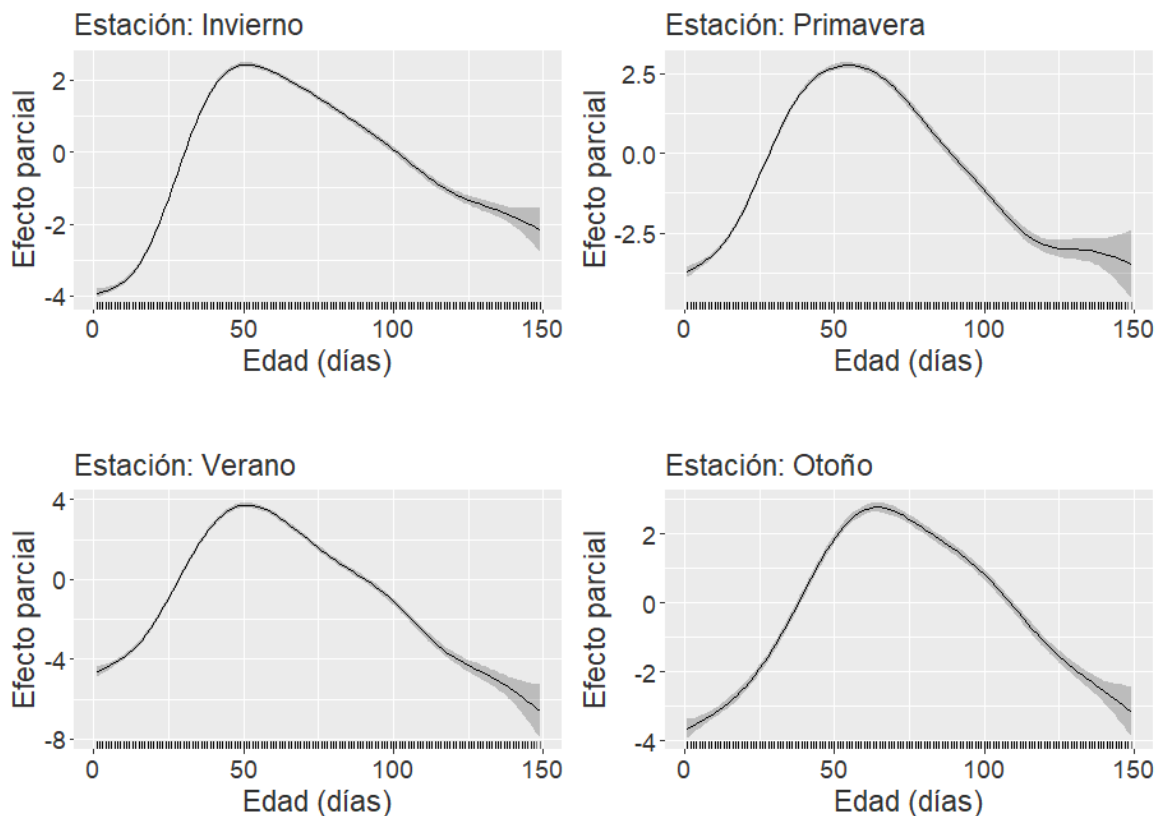


Figura 4. Gráficos de interpolación de la edad desde el modelo aditivo generalizado (GAM), que muestran el efecto parcial en línea sólida del grosor de los incrementos diarios para cada combinación de estaciones del año. La zona sombreada corresponde al intervalo al 95% de confianza.

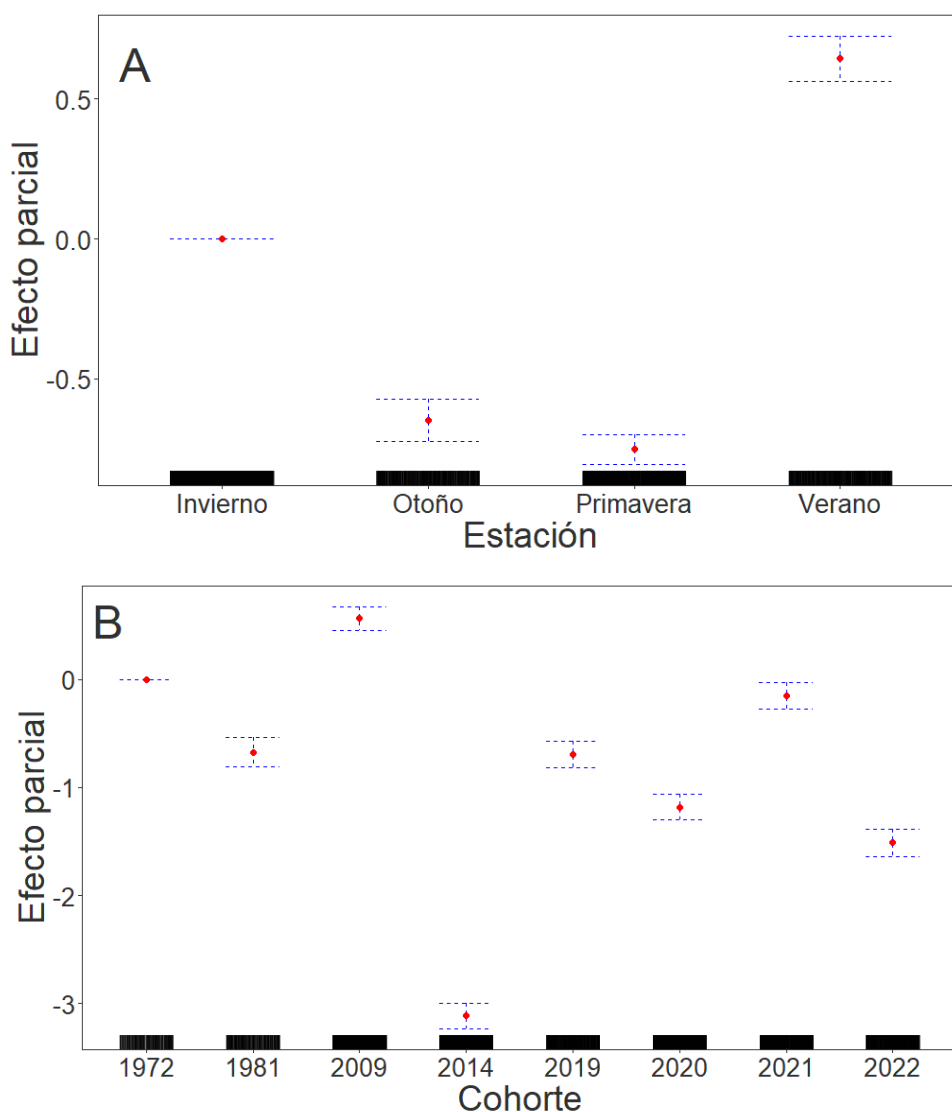


Figura 5. Gráficos de interpolación de la edad desde el modelo aditivo generalizado (GAM) que muestran el efecto de las variables explicativas estación del año (A) y cohorte (B) con respecto al GI.

#### 4.1.3. Modelos edad-talla a la fecha de captura

##### a) Análisis aplicando un modelo lineal generalizado (GLM)

La relación edad-talla modelada de forma lineal usando un GLM con la longitud como variable respuesta y la edad, cohorte, estación del año y zona como variables explicativas, más la interacción entre ellas, mostró que el mejor modelo fue aquel que incluía todas las variables

explicativas excepto la zona. El valor pseudo-R<sup>2</sup> que relaciona la devianza nula y la residual indica que el modelo tiene un alto poder explicativo equivalente al 89,4% de la devianza. El test de uniformidad Kolmogorov-Smirnov mostró que la distribución de los datos es normal ( $p=0,14$ ), el test de dispersión no muestra una sub o sobredispersión de los datos ( $p=0,52$ ) y el test de outliers mostró que solo 0,8% de los datos ( $n=10$ ) están en esta condición ( $p=0,75$ ), lo cual revela una proporción adecuada para ajustar el modelo lineal. El análisis de los residuales del modelo muestra gráficamente una distribución normal y homocedasticidad (Figura 6).

Este modelo reveló que desde la cohorte 1981-1982 a la 2022-2023 hubo diferencias significativas respecto de la cohorte de referencia (1972-1973). A su vez, los diferenciales de los interceptos de estas cohortes fueron menores y negativos respecto de la cohorte de referencia. La interacción entre la edad y la cohorte mostró diferencias significativas con respecto a la interacción edad-cohorte de referencia. A su vez la estación y su interacción con la edad también mostraron diferencias significativas respecto al invierno (Tabla 4). El test de Anova confirmó el efecto significativo de cada una de las variables explicativas, así como de sus interacciones. La edad y la cohorte son las variables que explicaron la mayor fracción de la devianza del modelo con un 95% (Tabla 5).

Tabla 4. Resumen de los resultados del modelo lineal generalizado (GLM) que relaciona la longitud total con la edad en d1as. El modelo tambi3n considera como variables explicativas la cohorte, la estaci3n del a1o y la zona. E.E. corresponde al error est1andar, tvalor el valor del estad1stico de prueba t de Student y Pvalor es la probabilidad de que los coeficientes estimados sean iguales a cero.

Termino	Estimaci3n	E.E.	tvalor	Pvalor
(Intercept)	9,51	0,744	12,8	3,19E-35
Edad	0,0087	0,00757	1,15	2,51e- 1
Cohorte 1981-1982	-3,21	0,962	-3,34	8,65e- 4
Cohorte 1991-1992	-4,71	1,11	-4,25	2,29e- 5
Cohorte 1992-1993	-9,86	0,94	-10,5	1,04E-24
Cohorte 2001-2002	-11,4	2,07	-5,51	4,27e- 8
Cohorte 2009-2010	-4,04	0,756	-5,35	1,04e- 7
Cohorte 2014-2015	-5,9	0,819	-7,2	1,04E-12
Cohorte 2019-2020	-6,64	0,744	-8,92	1,68E-18
Cohorte 2020-2021	-8,64	0,752	-11,5	4,20E-29
Cohorte 2021-2022	-10,1	0,767	-13,2	2,86E-37
Cohorte 2022-2023	-9,15	0,792	-11,5	2,29E-29
Estaci3n Primavera	-0,832	0,219	-3,8	1,54e- 4
Estaci3n Verano	1,94	0,534	3,63	2,92e- 4
Estaci3n Oto1o	1,96	0,629	3,12	1,84e- 3
Edad:Cohorte 1981-1982	0,0298	0,00988	3,02	2,60e- 3
Edad:Cohorte 1991-1992	0,0373	0,00972	3,84	1,30e- 4
Edad:Cohorte 1992-1993	0,0762	0,00907	8,4	1,18E-16
Edad:Cohorte 2001-2002	0,0811	0,0171	4,75	2,27e- 6
Edad:Cohorte 2009-2010	0,0355	0,00761	4,67	3,36e- 6
Edad:Cohorte 2014-2015	0,0498	0,0081	6,15	1,05e- 9
Edad:Cohorte 2019-2020	0,0363	0,00778	4,66	3,43e- 6
Edad:Cohorte 2020-2021	0,0574	0,00769	7,46	1,60E-13
Edad:Cohorte 2021-2022	0,0775	0,00786	9,87	3,60E-22
Edad:Cohorte 2022-2023	0,0562	0,00799	7,03	3,39E-12
Edad:Estaci3n Primavera	0,00569	0,00212	2,68	7,54e- 3
Edad:Estaci3n Verano	-0,012	0,0045	-2,66	7,82e- 3
Edad:Estaci3n Oto1o	-0,0176	0,00498	-3,53	4,23e- 4
Devianza nula: 7493      Devianza residual: 778      grados de libertad: 1256				

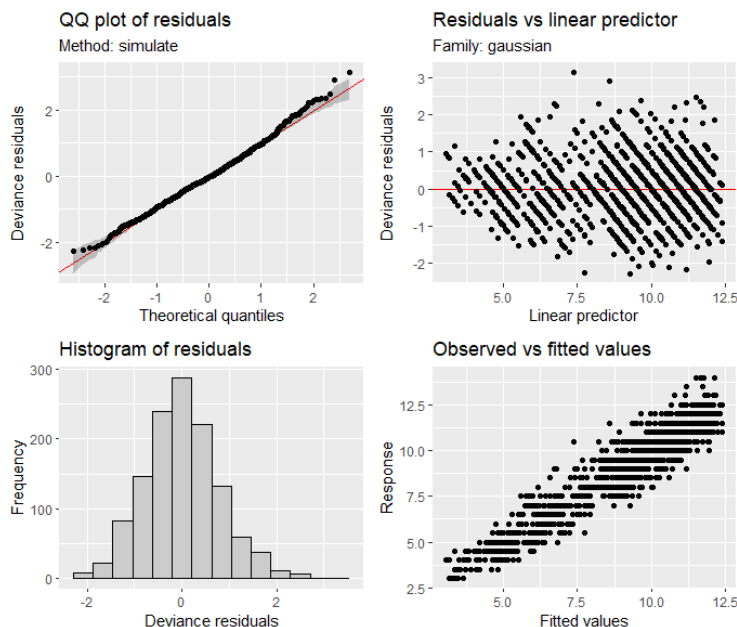


Figura 6. Gráficos del análisis de residuos del modelo con respecto a los valores predichos, Q-Q plot de la distribución normal, histograma de los residuos, relación entre devianza de los residuales-predictor lineal; y valores observados vs los ajustados.

Tabla 5. Resumen del análisis de varianza de los resultados del modelo lineal generalizado (GLM) que relaciona la longitud total con la edad en días. Gl corresponde a los grados de libertad y Pvalor es la probabilidad de que los coeficientes estimados sean iguales a cero.

Termino	gl	devianza	Porcentaje explicado	gl residual	Devianza residual	P <sub>valor</sub>
Edad	1	4489	66,8	1255	3004	<0,001
Cohorte	10	1918	28,6	1245	1086	<0,001
Estación	3	78,6	1,17	1242	1008	9,62E-27
Edad:Cohorte	10	207	3,08	1232	801	4,40E-64
Edad:Estación	3	23,1	0,344	1229	778	6,05e- 8

Los diferenciales de los interceptos de las cohortes son negativos respecto del global, lo que indica un decrecimiento progresivo desde la cohorte 1981-1982 hasta 2001-2002 respecto al intercepto de la cohorte de referencia (1972-1973). Esta situación cambia el 2009-2010, en que se observa un intercepto similar al registrado en 1990-1991, que luego comienza a descender hasta la cohorte 2022-2023. Esta última cohorte registra un valor levemente superior al 2021-2022, que sin embargo no tiene mayor efecto sobre la tendencia decreciente de este segundo periodo de la serie (Figura 7). Para las estaciones de verano y otoño se obtuvieron coeficientes más altos que para primavera (Figura 7). El mismo patrón se observó para la pendiente de cada cohorte, correspondiente a la interacción Edad:Cohorte, que aumenta respecto de la cohorte de referencia hasta el 2001-2002, disminuye el 2009-2010 y comienza aumentar con cierta variabilidad hasta el 2022-2023 (Figura 8).



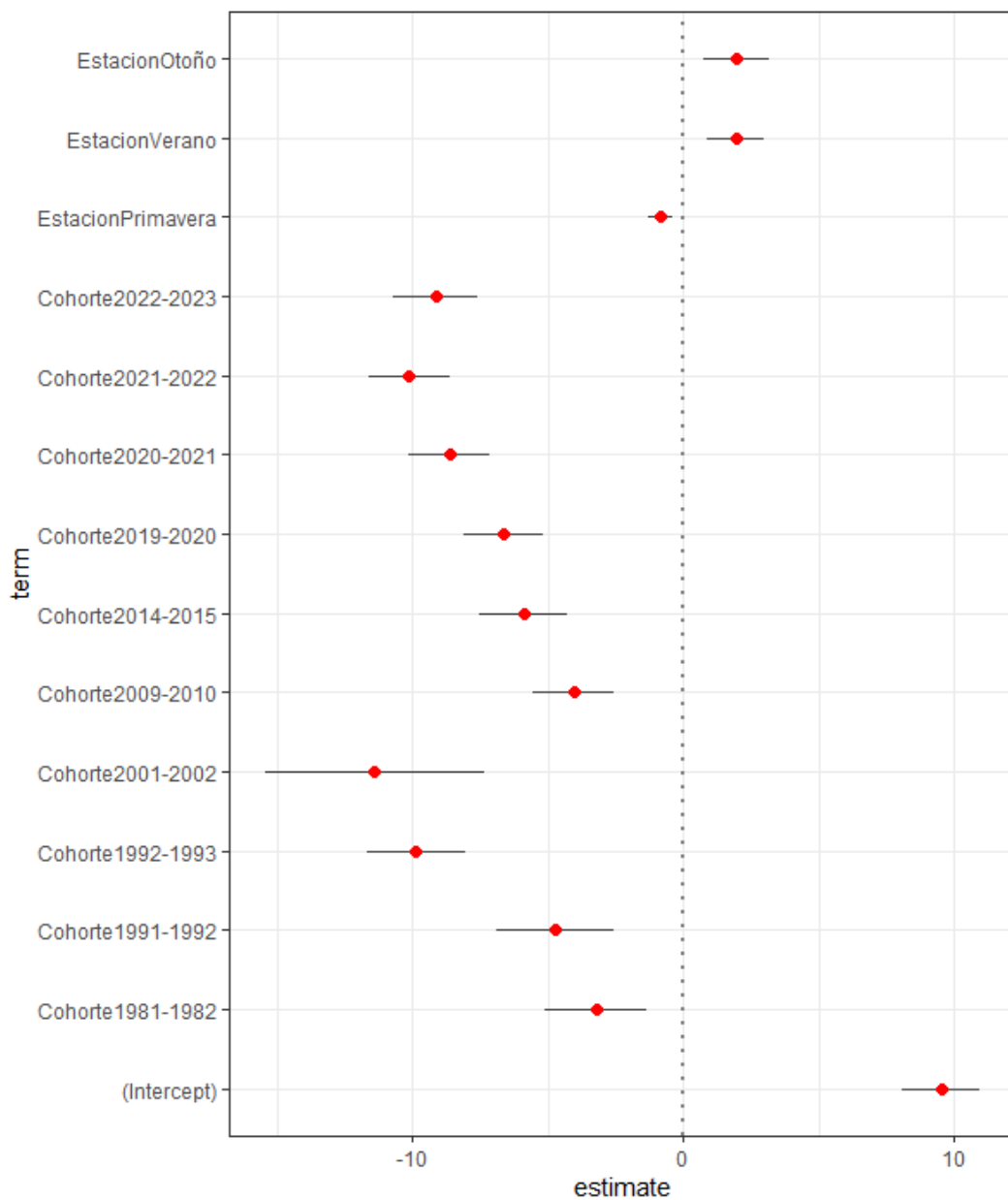


Figura 7. Diferenciales de los interceptos respecto a la estimación global de las variables explicativas cohorte y estación.

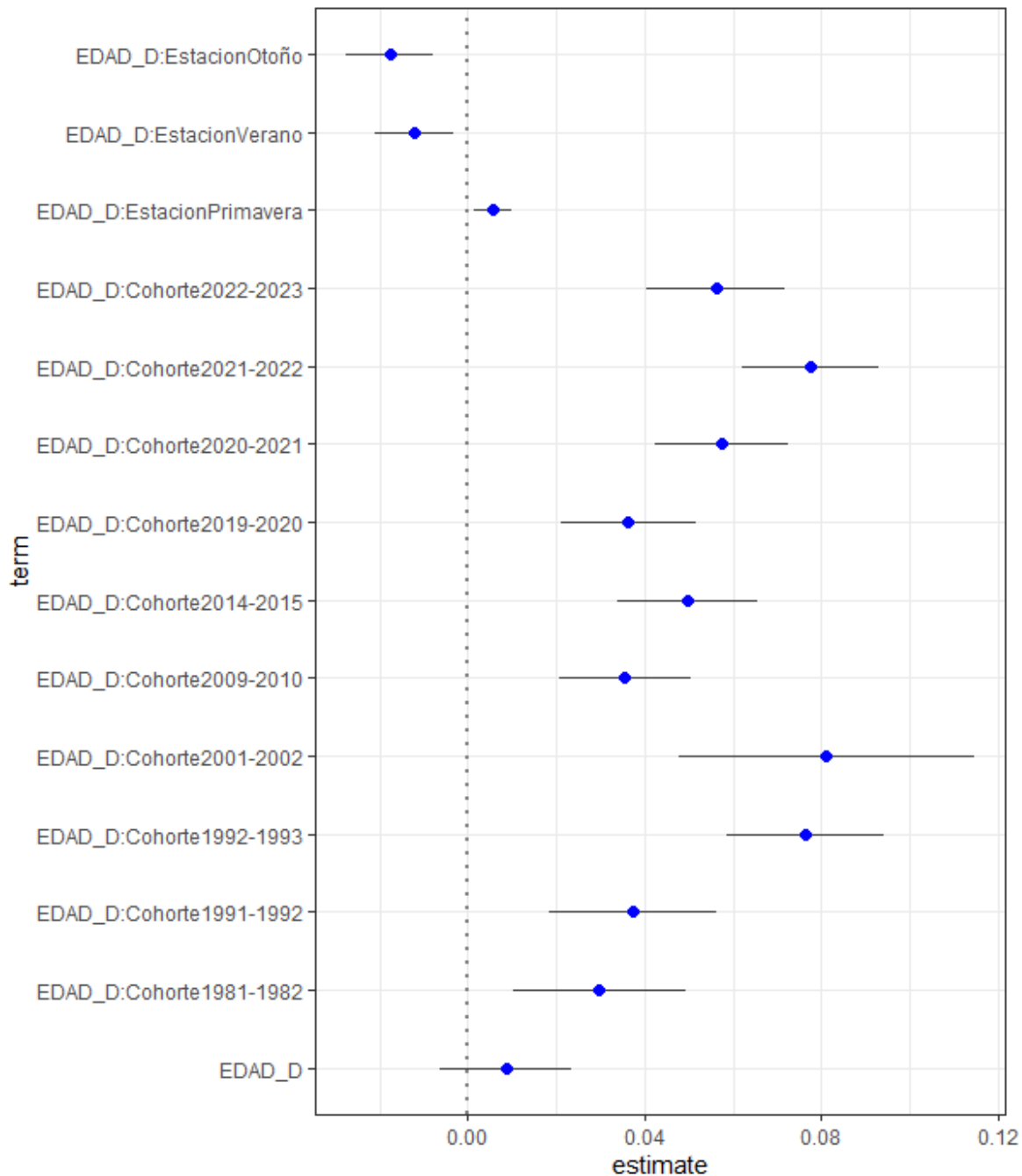


Figura 8. Diferenciales de las pendientes respecto a la estimación global de las variables explicativas cohorte y estación.

La estimación de la longitud total media predicha para una edad media de 108 días, a partir de los interceptos y pendientes del modelo GLM para cada cohorte, muestra una variación con la misma tendencia observada para los coeficientes del modelo: disminución desde 1972-1973 hasta 2001-2002, lo cual cambia el 2009-2010 en que se registra una talla media similar a las cohortes 1972-1973 y 1981-1982, para luego disminuir los siguientes años analizados hasta el 2022-2023. Aunque se registra un leve aumento en la cohorte 2021-2022, el 2022-2023 la talla vuelve a bajar a un valor inferior a este. Esta tendencia de cambio de la talla media a la edad ocurre para cada una de las estaciones, en que se debe destacar que en verano se registra una longitud media mayor que en el resto de las estaciones, siendo el valor más bajo el de primavera en cada cohorte (Figura 9).

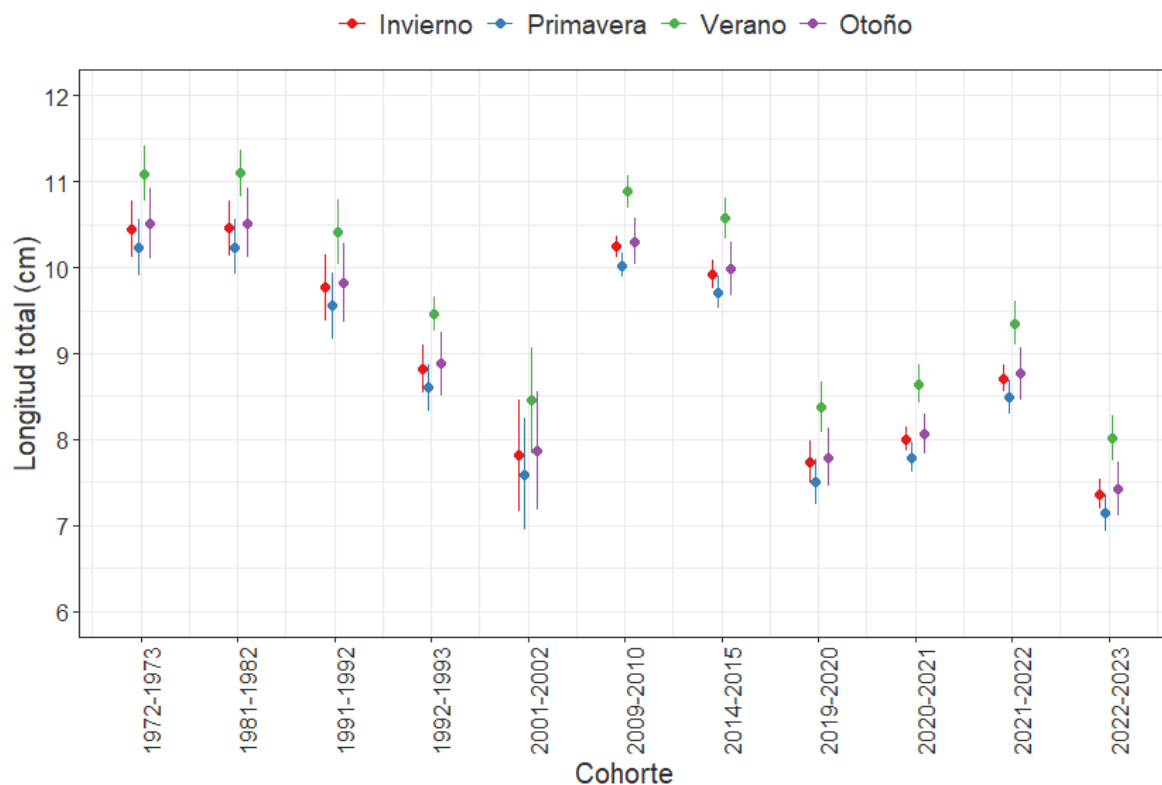


Figura 9. Longitud total media a la edad de 108 días estimada a partir del modelo lineal generalizado para cada cohorte y estación. Las líneas verticales corresponden al intervalo de 95% de confianza.

## b) Análisis modelo de crecimiento Laird-Gompertz

Los ajustes de crecimiento para las nueve cohortes entre 1991-1992 y 2022-2023 fueron adecuados, con coeficientes de determinaci3n sobre el 60%, excepto la cohorte 2001-2002 cuyo ajuste present3 un  $R^2$  de 0,47. Para la mayoría de las cohortes los parámetros estimados presentaron una alta significancia ( $P < 0,001$ ) y bajo error estándar, aunque para las cohortes 1991-1992 y 2001-2002 la edad al punto de inflexi3n ( $X_0$ ) y la tasa instantánea de crecimiento ( $\alpha$ ), respectivamente, no fueron significativas (Tabla 6). Los resultados muestran cambios importantes en el parámetro alfa, que corresponde a la tasa instantánea de crecimiento, entre las cohortes, registrando las cohortes 1991-1992, 2009-2010, 2014-2015 un valor más alto respecto de aquellas más recientes (Tabla 6). Las diferencias en los parámetros de crecimiento entre cohortes se evidencian más claramente al observar las curvas de crecimiento derivadas del modelo, donde se aprecian dos grupos que presentan relaciones edad-talla más próximas entre sí: uno que refleja un alto crecimiento correspondiente a las cohortes 1991-1992, 2009-2010 y 2014-2015 y el segundo, que refleja una menor tasa de crecimiento, conformado por las cohortes 2001-2002, 2019-2020, 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023. Entre estos dos grupos aparece la cohorte 1992-1993 en una posici3n intermedia, como una cohorte que estuviera en una etapa de transici3n. Estas diferencias son más evidentes entre la fracci3n de la curva que representa el rango de edad de 50 a 150 días después de la eclosi3n (Figura 10).

Tabla 6. Parámetros de crecimiento del modelo Laird-Gompertz que ajusta la relaci3n edad-talla de anchoveta por cohorte. Se muestra el valor de cada parámetro con su error estándar (EE), el nivel de significancia (Pvalor), el coeficiente de determinaci3n de cada ajuste ( $R^2$ ) y el número de pares de datos utilizados (n).

Cohorte	parámetro	Valor	EE	Pvalor	Cohorte	parámetro	Valor	EE	Pvalor
1991-1992	$L_\infty$	12,420	0,477	< 2e-16	1992-1993	$L_\infty$	14,455	0,7243	<2e-16
	$\alpha$	0,022	0,007	0.00291		$\alpha$	0,019	0,0033	1,58e-07
	$X_0$	33,880	1,726	0.05243		$X_0$	61,740	2,6989	<2e-16
	$R^2$	0,47				$R^2$	0,88		
	n	143				n	78		
2001-2002	$L_\infty$	14,647	2,994	5,5e-10	2009-2010	$L_\infty$	11,70	0,21	< 2e-16
	$\alpha$	0,018	0,011	0,00194		$\alpha$	0,028	0,00	8.86e-12
	$X_0$	75,129	4,254	< 2e-16		$X_0$	31,47	4,40	8.43e-12

2014-2015	R <sup>2</sup>	0,78				R <sup>2</sup>	0,67		
	n	85				n	264		
	L <sub>∞</sub>	12,46	0,20	< 2e-16		L <sub>∞</sub>	13,65	0,76	< 2e-16
	α	0,028	0,00	6.75e-13		α	0,016	0,00	6.33e-12
	X <sub>0</sub>	49,72	4,24	< 2e-16		X <sub>0</sub>	59,12	3,37	< 2e-16
	R <sup>2</sup>	0,73				R <sup>2</sup>	0,86		
	n	190				n	143		
2020-2021	L <sub>∞</sub>	14,83	0,853	<2e-16		L <sub>∞</sub>	13,43	0,502	<2e-16
	α	0,014	0,001	<2e-16		α	0,022	0,002	<2e-16
	X <sub>0</sub>	73,94	4,035	<2e-16		X <sub>0</sub>	67,44	1,985	<2e-16
	R <sup>2</sup>	0,99				R <sup>2</sup>	0,92		
	n	263				n	143		
2022-2023	L <sub>∞</sub>	12,361	1,757	5,5e-10					
	α	0,019	0,006	0,00194					
	X <sub>0</sub>	73,546	6,085	< 2e-16					
	R <sup>2</sup>	0,78							
	n	85							

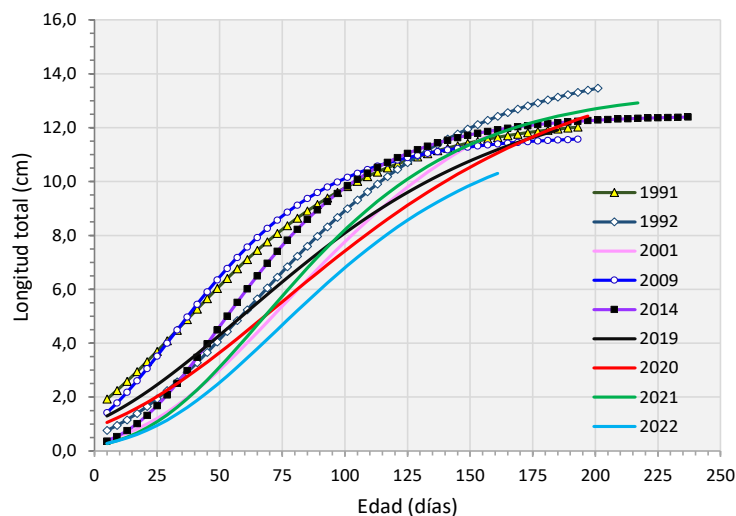


Figura 10. Curvas medias de la relaci3n edad-longitud total de anchoveta estimadas a partir del modelo Laird-Gompertz para cada una de las cohortes analizadas.

#### 4.1.4 Tasa de Crecimiento Global (TCG)

Las fluctuaciones interanuales en las TCG se analizaron desde una matriz de 1744 registros, distribuidos en un total de 18 a1os de estudio. La Tabla 7 resume las estadísticas generales de la TCG de forma combinada para cada a1o, donde fue posible observar variabilidades generales entre 4 y 23% y rangos entre 0,3 y 1,8 mm/día. La caída en la TCG a través de los a1os analizados fue significativa ( $TCG=0,0072 \cdot \text{A1o} + 15,297$ ;  $P<0,001$ ), con una caída más conspicua a partir del 2009, particularmente cuando se excluyó la cohorte 2018 ( $TCG= -0,0199 \cdot \text{a1o} + 40,942$ ;  $R^2 = 0,8$ ;  $P<0,001$ ), representando una disminuci3n del 30%. A continuaci3n, se presentan los principales resultados de las variaciones de la TCG, en base a los registros disponibles.

Tabla 7. Estadísticas generales de la tasa de crecimiento global, obtenidas mediante análisis micro-estructural de otolitos, de reclutas, pre-reclutas y adultos de anchoveta (*Engraulis ringens*) de forma combinada, en el norte de Chile. CV=coeficiente de variaci3n. Cohorte= A1o de nacimiento.

Cohorte	Media $\pm$ DE	Rango	CV	N
1972	1.08 $\pm$ 0.21	0.73 - 1.53	19.26	23
1973	1.20 $\pm$ 0.24	0.92 - 1.63	20.01	21
1981	0.99 $\pm$ 0.10	0.90 - 1.15	9.77	5
1982	1.14 $\pm$ 0.20	0.78 - 1.82	17.88	51
1990	0.78 $\pm$ 0.04	0.70 - 0.88	5.07	29
1991	0.76 $\pm$ 0.08	0.57 - 0.97	9.94	113
1992	0.82 $\pm$ 0.10	0.61 - 1.06	12.17	29
1993	0.85 $\pm$ 0.07	0.70 - 1.03	7.94	56
2001	0.75 $\pm$ 0.03	0.67 - 0.80	4.31	31
2009	0.95 $\pm$ 0.17	0.61 - 1.44	17.74	182
2010	0.84 $\pm$ 0.13	0.59 - 1.36	15.32	92
2014	0.81 $\pm$ 0.13	0.52 - 1.13	15.65	178
2015	0.90 $\pm$ 0.20	0.31 - 1.64	22.62	122
2018	0.40 $\pm$ 0.09	0.27 - 0.57	22.77	17
2019	0.73 $\pm$ 0.18	0.30 - 1.21	24.20	173
2020	0.65 $\pm$ 0.11	0.39 - 0.97	17.29	226
2021	0.71 $\pm$ 0.11	0.42 - 1.22	14.94	281
2022	0.66 $\pm$ 0.12	0.45 - 0.99	17.49	115
Total	0.788 $\pm$ 0.1905	0.2661 - 1.82	24.18	1744

Para tener una mejor representaci3n de las fluctuaciones en las TCG, se realiz3 una segregaci3n por tres estados ontogénicos (pre-reclutas, reclutas y adultos) siguiendo los procedimientos

descritos por Plaza et al. (2018). Los pre-reclutas fueron identificados como aquellos ejemplares con longitud total  $LT \leq 6$  cm, que en los cruceros de reclutamiento de este recurso aparecen claramente segregados en la distribuci3n de frecuencia de talla de las capturas. Por su parte, los reclutas y adultos fueron identificados como ejemplares con  $LT > 6$  y  $< 12$  cm, y con  $LT \geq 12$  cm, respectivamente. La matriz de datos tambi3n permiti3 efectuar una separaci3n por dos cohortes de nacimiento bi-estacionales, las cohortes invierno-primavera y verano-oto3o, que agrup3 a todos los ejemplares nacidos en esa combinaci3n de estaciones. La segregaci3n por cohorte estacional no se realiz3 para evitar perder potencia estadística y desbalancear en demasía el análisis cuantitativo.

Las tendencias centrales de las TCG evidenciaron un patr3n decreciente, independiente de la cohorte de nacimiento (invierno-primavera:  $0,80 \pm 0,17$  mm/día; rango: 0,26-1,64; CV=22%; verano-oto3o:  $0,77 \pm 0,23$  mm/día; rango: 0,30-1,82; CV=30%) y los estados ontogenéticos Pre-reclutas:  $0,77 \pm 0,18$  mm/día; rango: 0,48-1,64; CV= 22%; Reclutas:  $0,81 \pm 0,19$ ; rango: 0,31-1,82 CV=24%; y Adultos:  $0,69 \pm 0,18$ ; CV=25%. Esta tendencia se evidenci3 en los ejemplares analizados, a pesar de que los registros no estuvieron completamente balanceados dentro de cada a3o (Figura 11; Figura 12 y Figura 13).

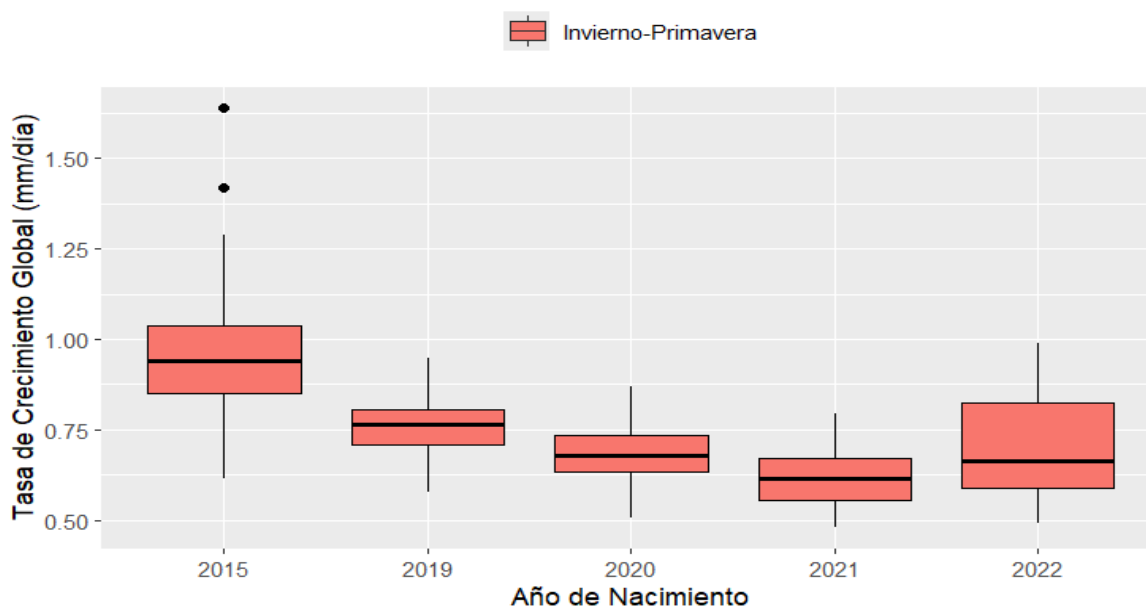


Figura 11. Ilustración de los cambios en las tendencias centrales, magnitudes y rangos la tasa de crecimiento global de ejemplares pre-reclutas de anchoveta (*Engraulis ringens*), nacidos en las estaciones de invierno y primavera y verano-otoño, en el norte de Chile.

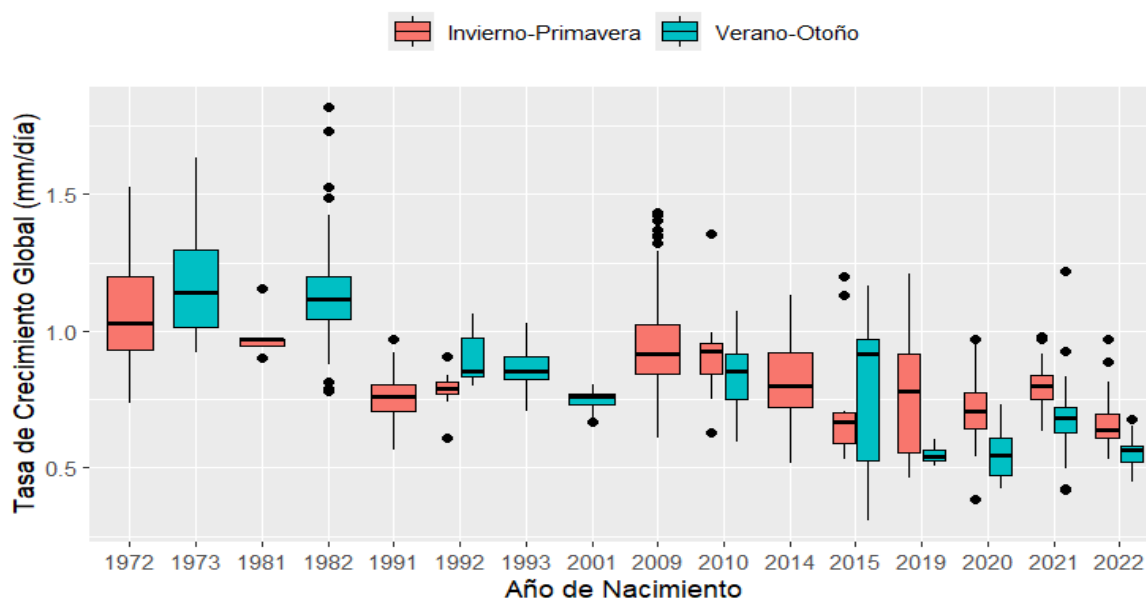


Figura 12. Ilustración de los cambios en las tendencias centrales, magnitudes y rangos de la tasa de crecimiento global de ejemplares reclutas de anchoveta (*Engraulis ringens*), nacidos en las estaciones de invierno y primavera y verano-otoño, en el norte de Chile.



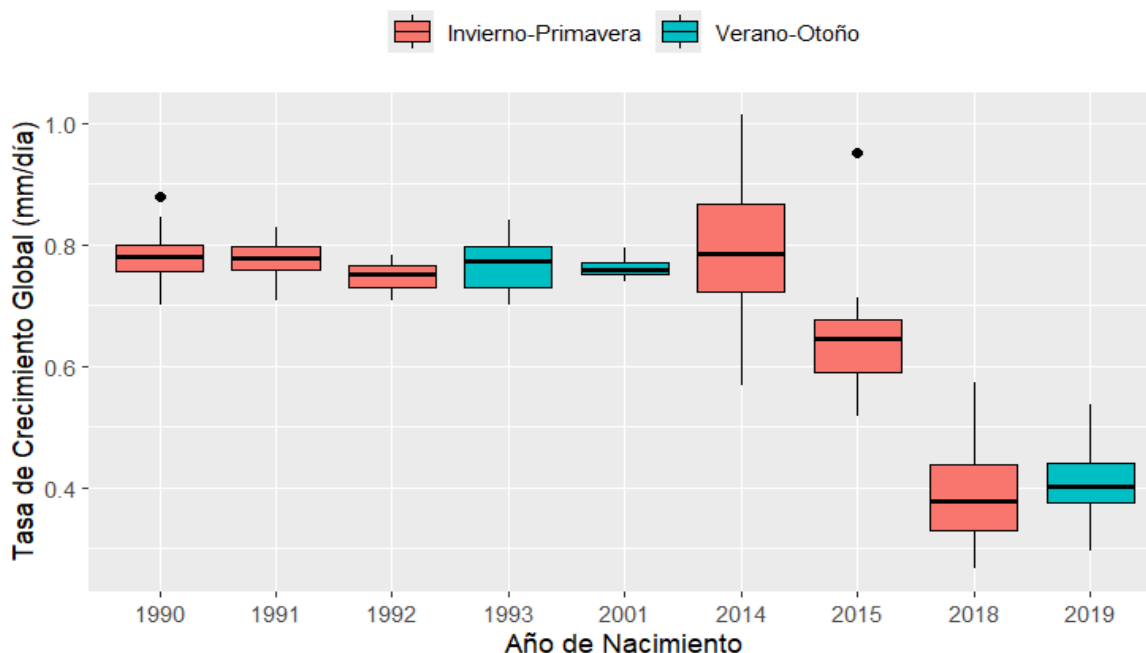


Figura 13. Ilustraci3n de los cambios en las tendencias centrales, magnitudes y rangos la tasa de crecimiento global de ejemplares adultos de anchoveta (*Engraulis ringens*), nacidos en las estaciones de invierno y primavera y verano-otoño, en el norte de Chile.

A pesar de que el diseño no fue completamente balanceado, se cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza para la mayoría de los años y estados ontogenéticos disponibles, cuando la informaci3n fue combinada por cohorte de nacimiento (Tabla 8). Esta condici3n permitiría ajustar ANOVAs por separado en aquellos años en que se cumplieron los supuestos para evaluar la significancia interanual de las TCG promedios. Sin embargo, se opt3 por ajustar un modelo lineal generalizado, combinado la informaci3n por cohorte bi-estacional, para soslayar en parte la presencia de un diseño no balanceado, incorporando tambi3n la longitud de los ejemplares como una covariable. El GLM explic3 un 51% de la desviación, demostrando que las TCG variaron significativamente, tanto cuando los estados ontogenéticos como los años fueron comparados con el patr3n de referencia (Tabla 9). El GLM tambi3n evidenci3 un efecto inverso entre la longitud del pez y la TCG (Figura 14a) y que los adultos tuvieron TCG significativamente m3s bajas (Figura 14b). El modelo tambi3n evidenci3 una caída sostenida y gradual de la TCG, a medida que trascurrieron los años, exceptuando el año 2018 (Figura 14c).

Tabla 8. Resumen de las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk (a) y homocedasticidad de Levene (b) de la tasa de crecimiento global, para tres estados ontogénicos de ejemplares de anchoveta (*Engraulis ringens*), en el norte de Chile.

Cohorte	Test de Normalidad (a)			Test de Homocedasticidad (b)		
	Pre-reclutas	Reclutas	Adultos	Pre-reclutas	Reclutas	Adultos
1972		0.338			0.118	
1973		0.013			0.132	
1981		0.101			0.023	
1982		<0.001			<0.001	
1990			0.77			0.78
1991		0.806	0.831		0.738	0.83
1992		0.013	0.859		<0.001	
1993		0.428	0.94		0.124	
2001		0.072	0.738			
2009		<0.001			<0.001	0.74
2010					0.083	
2014		0.132	0.76		0.047	0.76
2015	0.002	0.289	0.06	0.204	0.268	0.13
2018			0.09			0.09
2019	0.298	0.075	0.21	0.324	0.111	0.21
2020	0.797	<0.001		0.787	<0.001	
2021	0.300	0.728		0.496	0.681	
2022	0.035	0.017		0.032	0.044	

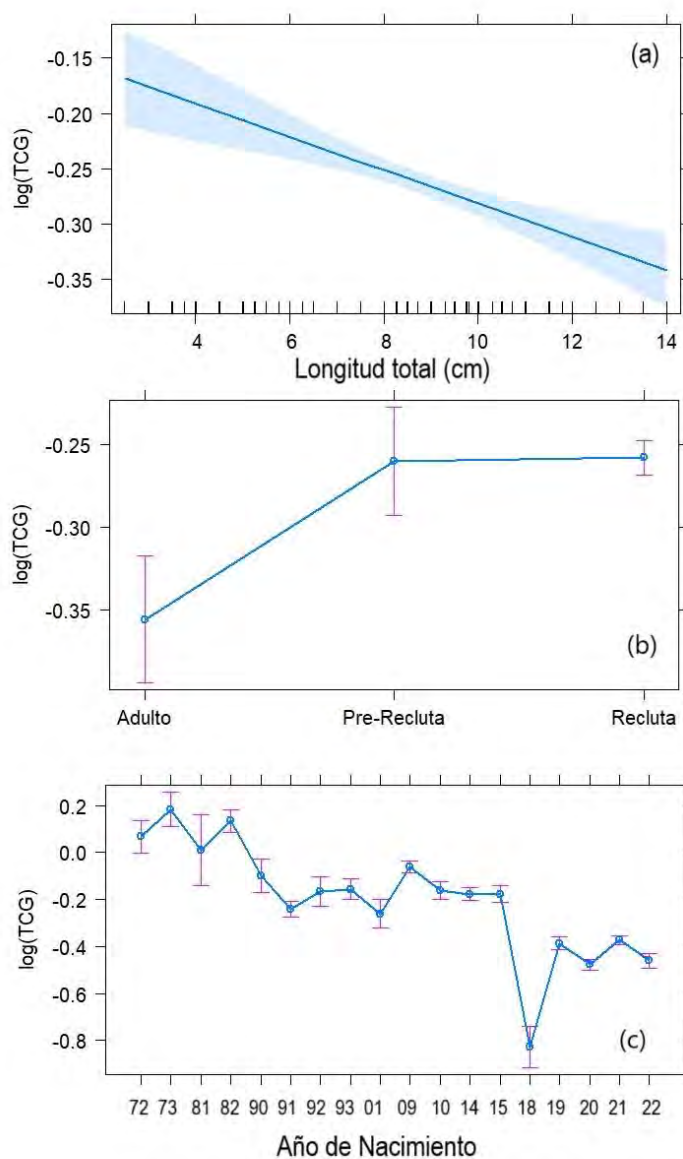


Figura 14. Gráficas de los efectos derivados de un modelo lineal generalizado (GLM). Los paneles representan los residuos parciales de la TCG respecto a: (a) la longitud como variable predictora, (área celeste = intervalo de confianza al 95%); (b) los tres estados ontogenéticos considerados y (c) los 13 años con registros disponibles hasta la fecha.

Tabla 9. Resumen de los coeficientes estimados y sus niveles de variaci3n de un Modelo Lineal General aditivo, ajustado a la TCG, con la longitud de los ejemplares de anchoveta usada como covariable y la cohorte de nacimiento y estado ontogendrco usados como efectos fijos. EE: 1 error estandar; NG: C3digos de significancia (0 '\*\*\*' 0,00; 1 '\*\*\*' 0,01; \* 0,05 ' ' 0,1). AIC: -1179

Coeficientes	Estimado	EE	Valor-t	Pr(> t )	NG
Interceptto	0.114	0.057	2.005	0.0452	*
LT	-0.015	0.003	-4.617	0.0000	***
Pre-reclutas	0.096	0.030	3.16	0.0016	**
Reclutas	0.098	0.020	4.906	0.0000	***
1973	0.116	0.052	2.246	0.0248	*
1981	-0.055	0.085	-0.653	0.5136	
1982	0.068	0.043	1.585	0.1131	
1990	-0.165	0.051	-3.207	0.0014	**
1991	-0.306	0.040	-7.747	0.0000	***
1992	-0.234	0.048	-4.873	0.0000	***
1993	-0.223	0.043	-5.24	<0.001	***
2001	-0.328	0.047	-6.948	0.0000	***
2009	-0.128	0.038	-3.37	0.000769	***
2010	-0.229	0.040	-5.715	1.29E-08	***
2014	-0.245	0.038	-6.39	2.13E-10	***
2015	-0.243	0.040	-6.033	1.97E-09	***
2018	-0.894	0.058	-15.373	< 2e-16	***
2019	-0.454	0.039	-11.648	< 2e-16	***
2020	-0.543	0.038	-14.347	< 2e-16	***
2021	-0.440	0.037	-11.769	< 2e-16	***
2022	-0.527	0.040	-13.278	< 2e-16	***

El modelo GAM, ajustado a la TCG incorporando la longitud del pez modelada por una funci3n suavizadora y los estados ontogendrco y cohorte de nacimiento como efectos fijos, alcanz3 una devianza explicada de 52,4%. El GAM evidenci3 que la mayor3a de los coeficientes fueron significativos cuando se compararon con el **valor de referencia "1972" y "adultos", respectivamente** (Tabla 10). De forma similar al GLM, el modelo GAM evidenci3 una ca3da gradual de la TCG hacia los a3os recientes (Figura 15b), con los adultos mostrando los menores registros (Figura 15c), aunque el efecto de la longitud apareci3 marcadamente no lineal (Figura 15a).

Tabla 10. Resumen de los coeficientes estimados y sus niveles de variación de un Modelo Aditivo Generalizado (GAM), ajustado a la TCG, con la longitud de los ejemplares de anchoveta usada como covariable y la cohorte de nacimiento y estado ontogenético usados como efectos fijos. EE: 1 error estándar; NG: Códigos de significancia (0 '\*\*\*' 0,00; 1 '\*\*\*' 0,01; \* 0,05 ' ' 0,1). AIC: -2071.24.

Coeficientes	Estimado	EE	Valor-t	Pr(> t )	NG
Interceptto	0.9612	0.03628	26.491	< 2e-16	***
Pre-reclutas	0.1885	0.04655	4.05	5.36E-05	***
Reclutas	0.1268	0.02364	5.362	9.32E-08	***
1973	0.1402	0.04054	3.457	0.000559	***
1981	-0.0682	0.0658	-1.036	0.300345	
1982	0.0743	0.03347	2.22	0.026531	*
1990	-0.2162	0.04221	-5.123	3.35E-07	***
1991	-0.2970	0.03102	-9.574	< 2e-16	***
1992	-0.2405	0.03748	-6.418	1.78E-10	***
1993	-0.2312	0.03339	-6.924	6.20E-12	***
2001	-0.3056	0.03668	-8.331	< 2e-16	***
2009	-0.1330	0.02956	-4.499	7.29E-06	***
2010	-0.2160	0.03143	-6.874	8.72E-12	***
2014	-0.2431	0.03012	-8.07	1.31E-15	***
2015	-0.20607	0.03156	-6.53	8.65E-11	***
2018	-0.5731	0.04643	-12.344	< 2e-16	***
2019	-0.40233	0.03047	-13.203	< 2e-16	***
2020	-0.4668	0.02965	-15.741	< 2e-16	***
2021	-0.39394	0.02911	-13.533	< 2e-16	***
2022	-0.45592	0.03096	-14.727	< 2e-16	***

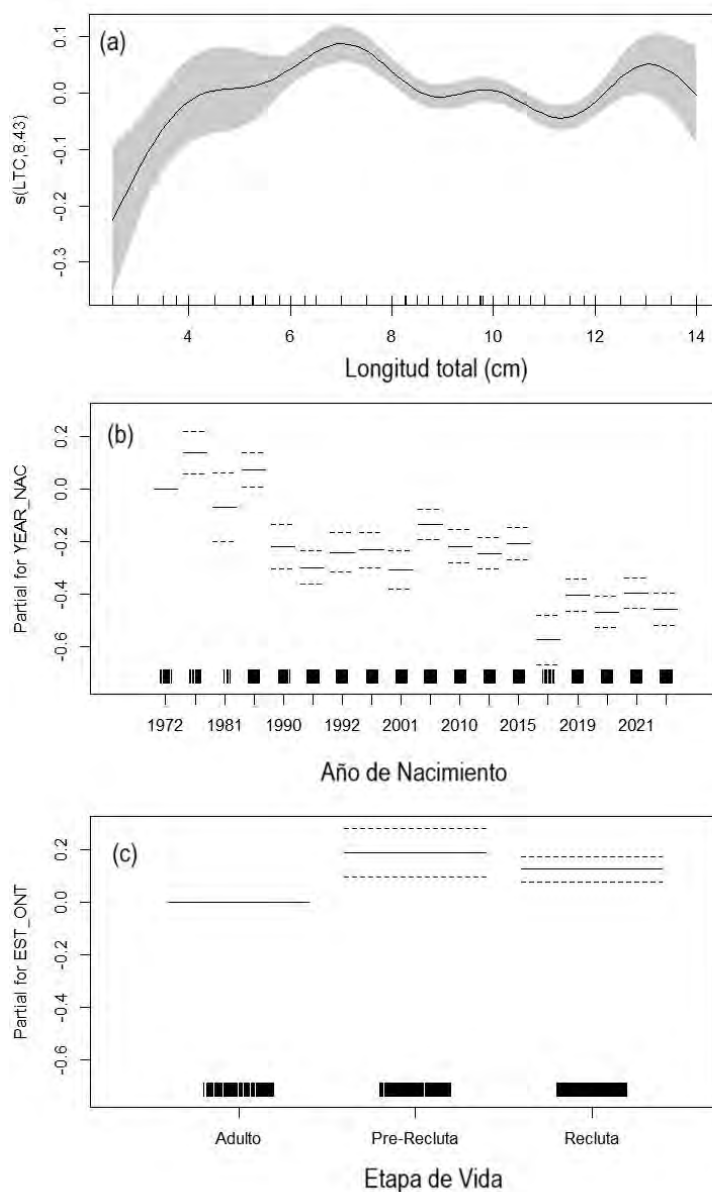


Figura 15. Gráficas de los efectos derivados de un Modelo Aditivo Generalizado (GAM). Los paneles representan los residuos parciales de la TCG respecto a: (a) la longitud como covariable predictora (b), los 13 años con disponibilidad de registro disponibles hasta la fecha (b) y los tres estados ontogenéticos considerados (c).

4.2 Objetivo espec3fico 2.2.2. *Desarrollar y comprobar hip3tesis respecto a los factores causantes de los cambios estructurales de la anchoveta, mediante an3lisis de series hist3ricas oceanogr3ficas, biol3gicas y pesqueras, juntamente con investigaci3n y literatura asociada y discusiones de talleres de trabajo y comit3s.*

#### 4.2.1 Caracterizaci3n del zooplancton

##### a) Variabilidad temporal del biovolumen y abundancia del zooplancton

La abundancia de zooplancton total promedio mostr3 cambios interanuales en la variabilidad estacional (Figura 16A). La abundancia de verano fue significativamente superior a la de otoño entre el 2011 y 2013 y en los tres años siguientes disminuy3 considerablemente, con promedios inferiores a los de otoño en el 2014 y 2015. A partir del 2016 la abundancia de otoño fue relativamente baja, en comparaci3n con el resto de la serie, y los aumentos m3s importantes se observaron principalmente en primavera (2017, 2018 y 2020) y verano (2017). Cabe destacar el año 2019, en el cual se observaron abundancias similares entre estaciones del año e inferiores a 330.000 ind/1000m<sup>3</sup> (Figura 16A).

El biovolumen total de zooplancton tambi3n tuvo cambios interanuales en la variabilidad estacional y, al igual que la abundancia, en general, present3 los promedios m3s bajos en el otoño (Figura 16B). El biovolumen de verano tuvo 3 periodos diferentes: un aumento en 2010-2012, otro entre 2014-2017 y finalmente entre el 2018-2020. En cambio, en primavera el biovolumen mostr3 una disminuci3n entre 2015 y 2019, y en el 2020 aument3 considerablemente (Figura 16B).

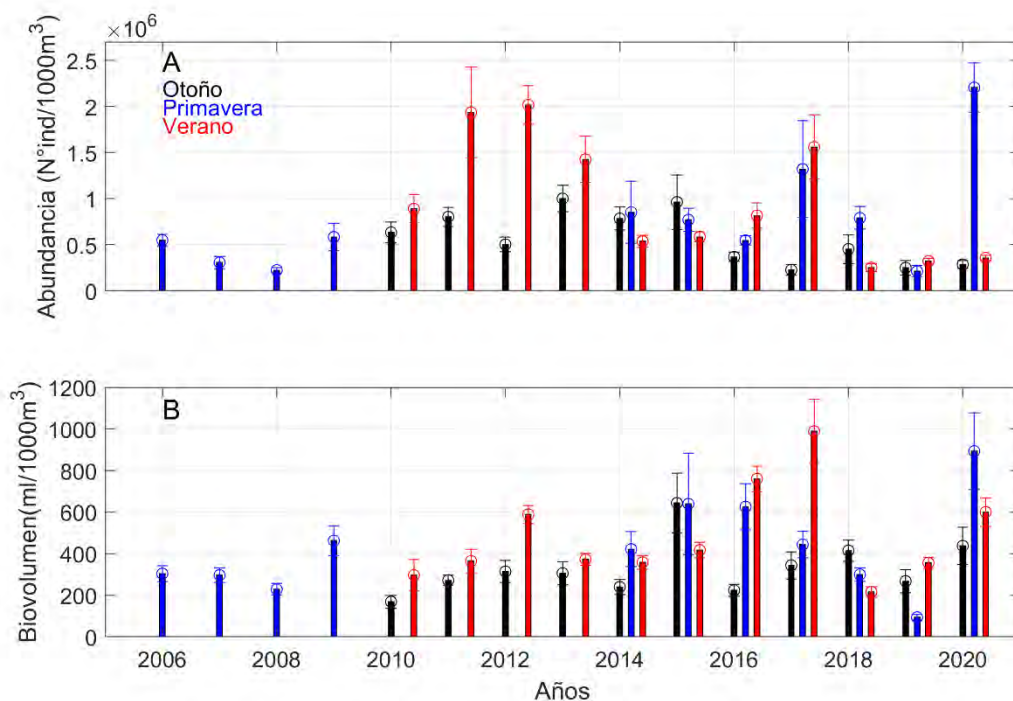


Figura 16. Serie de tiempo de la abundancia total de zooplancton promedio de otoño (A), primavera (B) y verano (C) y biovolumen total de zooplancton promedio de otoño (D), primavera (E) y verano (F). Las barras verticales representan el error estándar.

Para los copépodos, el promedio fue más bajo en el otoño que las demás estaciones del año, aunque las barras no se traslaparon solo entre primavera y otoño, lo que indica que hubo una diferencia significativa entre dichas estaciones (Figura 17A). Así mismo, el percentil de 75%, la mediana y el percentil de 25% mostraron los valores más altos durante primavera (Figura 17B). Por otro lado, el 100% de las estaciones de muestreo tuvo presencia de copépodos en las tres estaciones del año (Figura 17C). Al analizar la variabilidad interanual de la abundancia promedio de copépodos en otoño, primavera y verano (Figura 17D), se observaron fluctuaciones altamente similares a las de la abundancia total, dado que este grupo es el más representativo dentro de la comunidad zooplanctónica. Al igual que la abundancia total se destacó el decaimiento de copépodos en otoño a partir del 2016 y un decaimiento en verano entre 2014-2016 y otro entre 2018-2020. Así mismo, se observó un cambio en la señal estacional de la abundancia de copépodos. En el 2014 y 2015 la



abundancia fue similar entre las estaciones del año, aunque ligeramente inferior en verano. En el 2016 la abundancia de verano superó la de las otras estaciones, en 2017 la abundancia de primavera y verano superó la de otoño. Finalmente, en el 2018 y 2020 la abundancia de primavera fue significativamente más alta que las otras estaciones del año (Figura 17D).

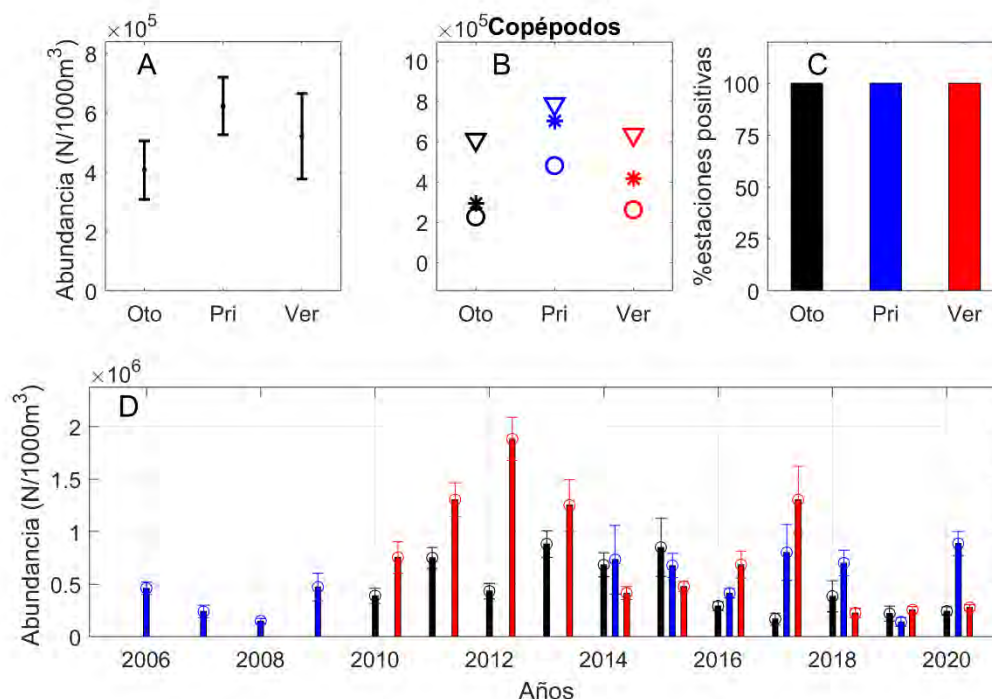


Figura 17. (A) Abundancia promedio de copépodos por estación del año. Las barras verticales corresponden al error estándar utilizando los años de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triángulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (círculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de copépodos de otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de copépodos para otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error estándar calculado con todas las estaciones de cada año y estación del año. Para el análisis de los paneles A, B y C se usó el periodo 2014-2020.

Los eufáusidos, a diferencia de los copépodos, mostraron la abundancia promedio más alta en el verano, al igual que el percentil de 75%, la mediana y el percentil de 25% (Figura 18A, B). Sin embargo, el porcentaje de estaciones positivas fue altamente similar entre otoño (76,8%) y verano (77,2%) (Figura 18C). La serie de tiempo de abundancia promedio mostró los mayores valores en

verano, salvo algunas excepciones. Por un lado, en el 2018, fue mayor en el otoño, y en el 2016 fue similar entre las estaciones (Figura 18D).

Los quetognatos mostraron la mayor abundancia promedio en primavera, aunque con una alta variaci3n entre los años (Figura 19A), debido principalmente al aumento significativo que hubo en primavera 2020 (Figura 19D). El percentil de 75% en primavera y otoño fue superior al de verano, sin embargo, las medianas y los percentiles de 25% fueron muy similares entre estaciones, indicando la baja variabilidad estacional de este grupo (Figura 19B). Por otro lado, mostr3 una alta frecuencia de ocurrencia, con un porcentaje de estaciones positivas superior a 80% en las tres estaciones del año (Figura 19C).

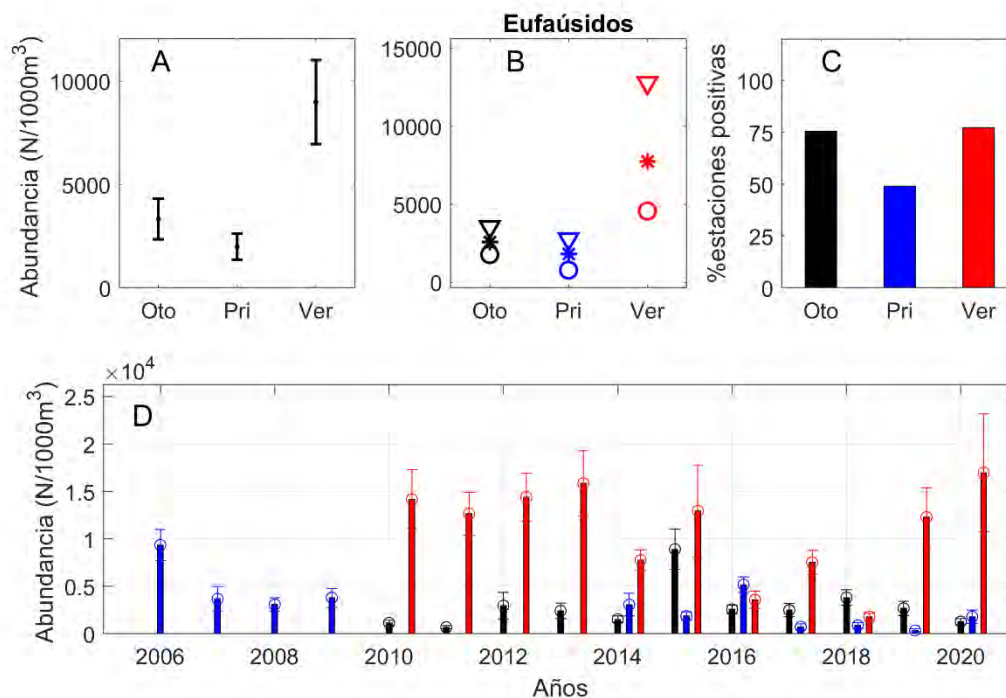


Figura 18. (A) Abundancia promedio de eufáusidos por estación del año. Las barras verticales corresponden al error estándar utilizando los años de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triángulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (círculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de eufáusidos de otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de eufáusidos para otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error estándar calculado con todas las estaciones de cada año y estación del año. Para el análisis de los paneles A, B y C se usó el periodo 2014-2020.

La serie de tiempo de abundancia promedio mostró valores similares entre estaciones del año a lo largo del tiempo, así como, un decaimiento en otoño y primavera entre el 2015-2019. En el último año la abundancia de primavera aumentó considerablemente, alcanzado el valor más alto de la serie (Figura 19D).

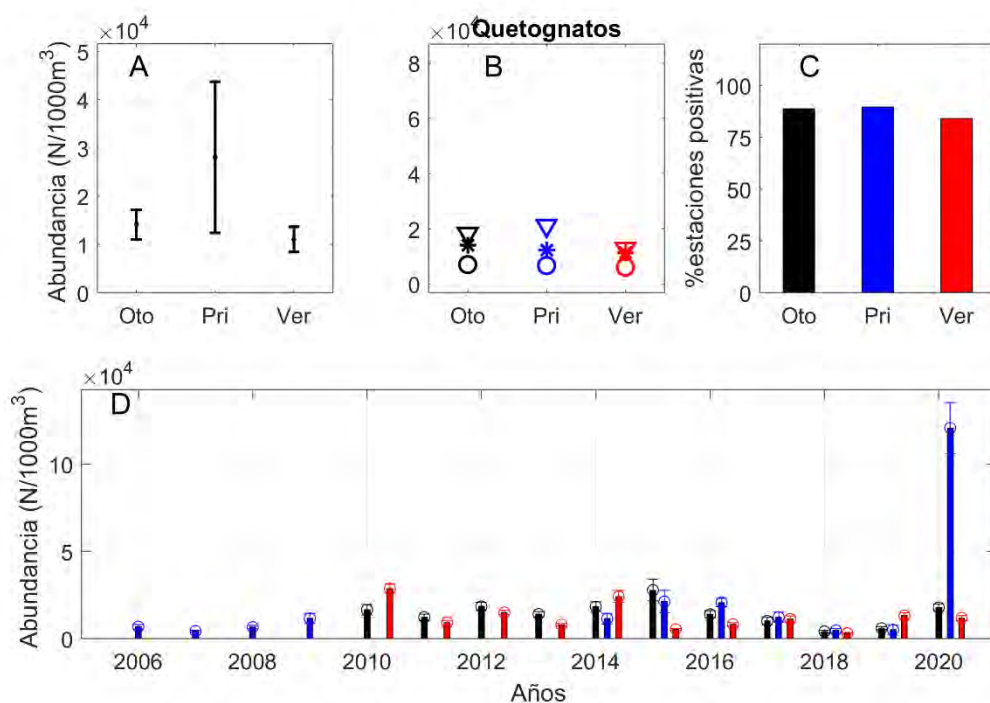


Figura 19. (A) Abundancia promedio de quetognatos por estación del año. Las barras verticales corresponden al error estándar utilizando los años de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triángulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (círculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de quetognatos de otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de quetognatos para otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error estándar calculado con todas las estaciones de cada año y estación del año. Para el análisis de los paneles A, B y C se usó el periodo 2014-2020.

Las medusas (Figura 20), los doliolidos (Figura 21) y ctenóforos (Figura 22) presentaron su mayor abundancia promedio y percentil de 75% en primavera, aunque con una alta variabilidad entre los años. Para las medusas (Figura 20) y doliolidos (Figura 21) tanto el percentil de 25% como la mediana fueron más altos en primavera. Por otro lado, las series de tiempo de abundancia promedio de los tres grupos mostraron los aumentos más importantes en primavera. Las medusas aumentaron su abundancia progresivamente a partir del 2016, alcanzando su máxima abundancia en la primavera de 2020 (Figura 20D). Los doliolidos presentaron aumentos importantes en el 2014, 2017, 2019 y 2020 (Figura 21D) y los ctenóforos en el 2017 y 2020 (Figura 22D).

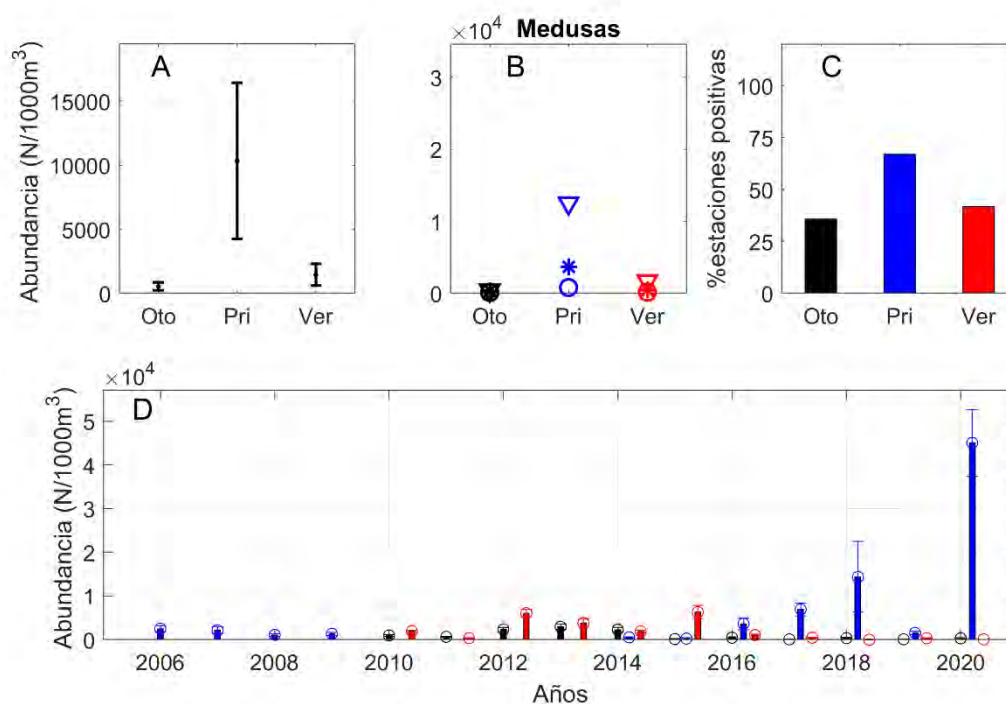


Figura 20. (A) Abundancia promedio de medusas por estación del año. Las barras verticales corresponden al error estándar utilizando los años de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triángulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (círculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de medusas de otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de medusas para otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error estándar calculado con todas las estaciones de cada año y estación del año. Para el análisis de los paneles A, B y C se usó el periodo 2014-2020.

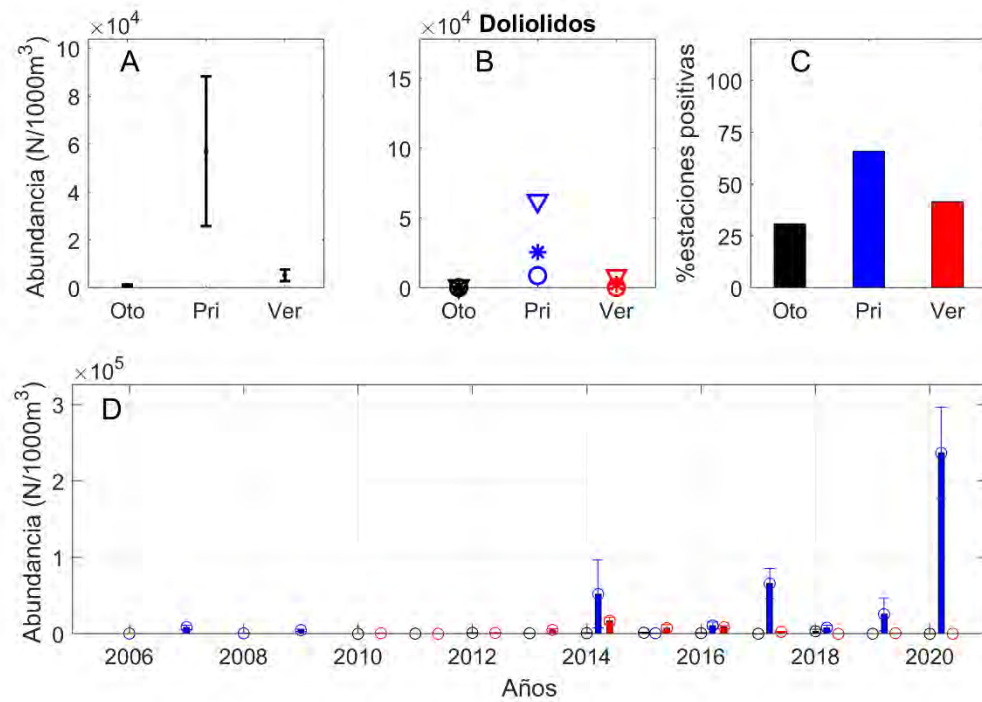


Figura 21. (A) Abundancia promedio de doliolidos por estación del año. Las barras verticales corresponden al error estándar utilizando los años de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triángulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (círculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de doliolidos de otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de doliolidos para otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error estándar calculado con todas las estaciones de cada año y estación del año. Para el análisis de los paneles A, B y C se usó el periodo 2014-2020.

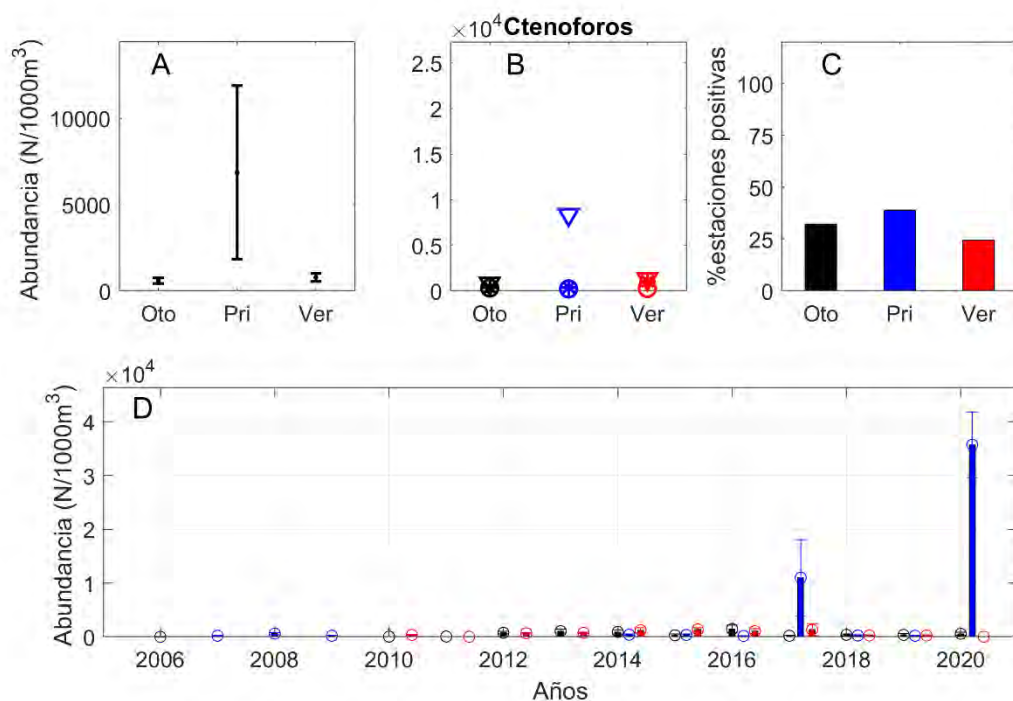


Figura 22. (A) Abundancia promedio de ctenóforos por estación del año. Las barras verticales corresponden al error estándar utilizando los años de la serie de tiempo 2014-2020. (B) Percentil de 75% (triángulo), mediana (asterisco) y percentil de 25% (círculo) y (C) porcentaje de estaciones positivas promedio de la abundancia de ctenóforos de otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). (D) Serie de tiempo de abundancia promedio de ctenóforos para otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales de los paneles corresponden al error estándar calculado con todas las estaciones de cada año y estación del año. Para el análisis de los paneles A, B y C se usó el periodo 2014-2020.

#### b) Variabilidad temporal de la estructura comunitaria de zooplancton

El análisis multivariado basado en permutaciones mostró diferencias significativas en los ensambles de zooplancton entre estaciones del año (PERMANOVA, pseudo  $F = 22,1$ ;  $p = 0,001$ ). Cinco grupos taxonómicos explicaron el 90,6% de la disimilitud entre la primavera y el verano: Copépodos (72,3%), Doliolidos (6,6%), Apendicularias (4,3%), Quetognatos (4,3%), y larvas de Eufáusidos (3,1%). Al comparar la primavera del otoño, cinco grupos fueron los que explicaron el 91,8%: Copépodos (72,8%), Doliolidos (6,3%), Quetognatos (4,8%), Apendicularias (4,3%) y larvas de Eufáusidos (3,6%).



Finalmente, al comparar el verano del otoño fueron cuatro grupos los que explicaron el 91,4% de la disimilitud: Copépodos (80,8%), Quetognatos (4,7%), Eufáusidos (3,1%) y Sifonóforos (2,8%).

Se comparó la abundancia de copépodos, dado que fue el grupo que explicó más del 70% de la disimilitud entre tratamientos. Se usó un PERMANOVA dado que no se cumplió el supuesto de normalidad para ninguno de los tratamientos. El resultado del PERMANOVA mostró diferencias significativas entre el otoño y la primavera ( $p = 0,01$ ).

#### c) Variabilidad temporal de indicadores

La serie de tiempo de la pendiente de distribución de tamaños mostró una tendencia positiva. Los valores de la pendiente en general se fueron volviendo menos negativos con el tiempo. Esta tendencia hacia valores menos negativos fue más evidente en la primavera. En verano y otoño la tendencia positiva se observó con más claridad hasta el año 2017. Se destacó la primavera del año 2018 con el valor más negativo y el otoño del 2017 con el valor menos negativo de toda la serie de tiempo (Figura 23A). Para el caso de la proporción de copépodos, en general se observó un decaimiento, pero con un desfase entre estaciones del año. En el verano, la proporción de copépodos mostró una disminución entre el 2011 y el 2014, mientras que en el otoño el decaimiento ocurrió después, entre el 2013 y 2017. En primavera se observaron dos ciclos, entre el 2015 y 2017 la proporción decayó, luego aumentó en el 2018 y posteriormente volvió a decaer hasta el 2020, año que alcanzó el valor más bajo de la serie de tiempo (Figura 23B) y que coincidió con el segundo valor menos negativo de la pendiente (Figura 23A). Finalmente, la proporción de los gelatinosos no mostró una tendencia clara, aunque fue posible observar un aumento progresivo de la proporción después del 2018 en primavera y otoño (Figura 23C).

Los resultados del PERMANOVA mostraron que no hubo diferencias significativas entre estaciones del año en la proporción de copépodos, ni en la proporción de gelatinosos, ni en la pendiente de distribución de tamaños del zooplancton (Tabla 11). Para la pendiente en primavera hubo mayor variabilidad entre los años, debido principalmente al valor más negativo de la serie de tiempo que se



obtuvo en el año 2020 (Figura 24A). La proporción de copépodos también presentó la mayor variabilidad en primavera (Figura 24B). La proporción de gelatinosos presentó una variabilidad similar entre las estaciones del año (Figura 24C), y aunque los resultados de PERMANOVA indicaron que no hubo diferencias significativas entre estaciones (Tabla 11), las barras de error estándar no se solaparon entre otoño y verano, lo cual podría indicar un grado de diferencia entre ambas estaciones con una mayor proporción de gelatinosos durante el otoño.

En los años 2015 y 2016 el OD promedio de los primeros 20 m de profundidad presentó un aumento (Figura 25A) y se observó un aumento en la profundidad del nivel superior de la ZMO (Figura 25B). Los resultados del PERMANOVA mostraron que no hubo diferencias significativas ni para la profundidad del nivel superior de la mínima de oxígeno, ni para el OD promedio de los primeros 20 m entre estaciones del año (Tabla 11, Figura 26).

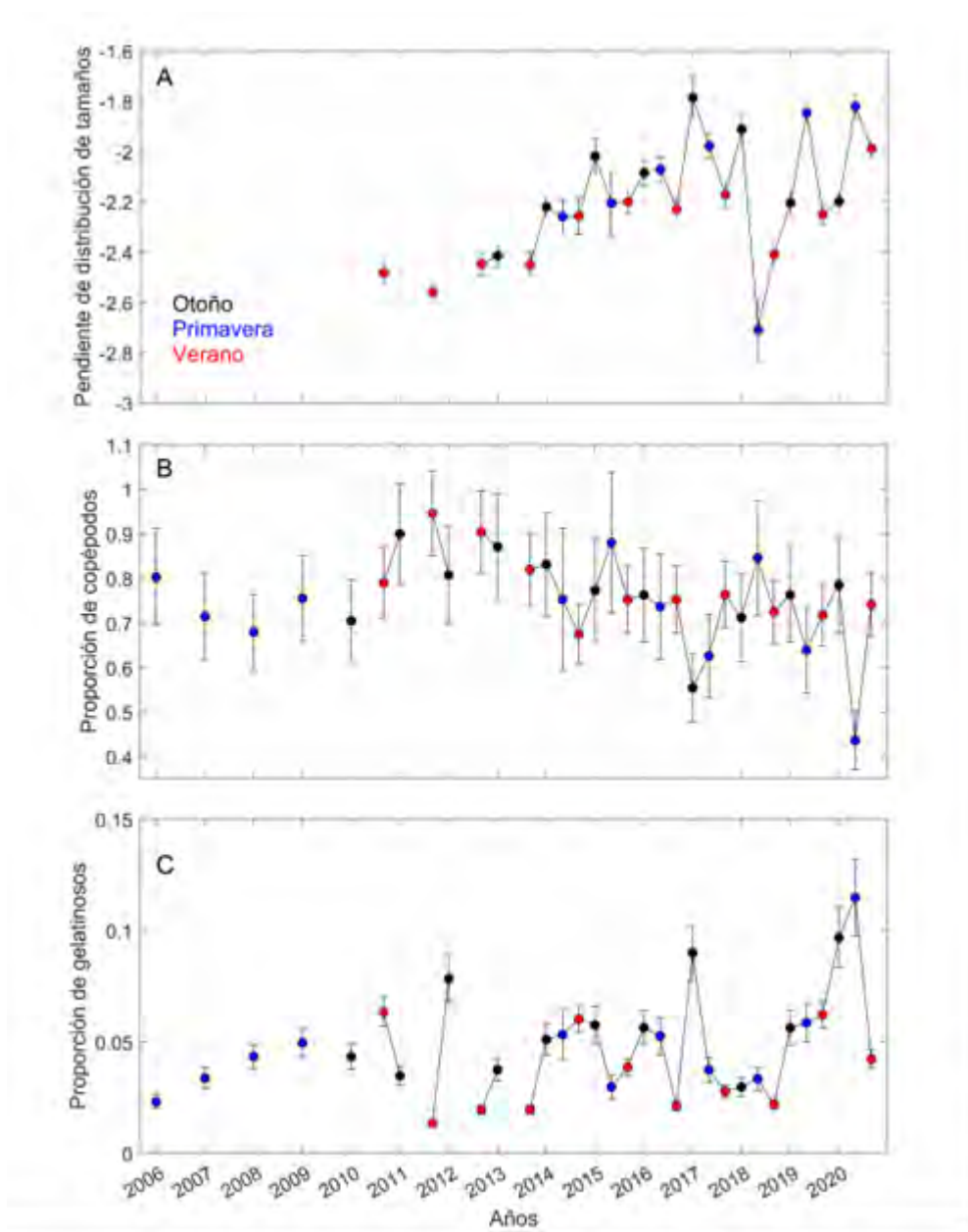


Figura 23. Serie de tiempo de la pendiente de distribución de tamaño de partículas (A), la proporción de copépodos (B) y la proporción de gelatinosos carnívoros (C) para otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales corresponden al error estándar calculado con todas las estaciones de cada año y estación del año.

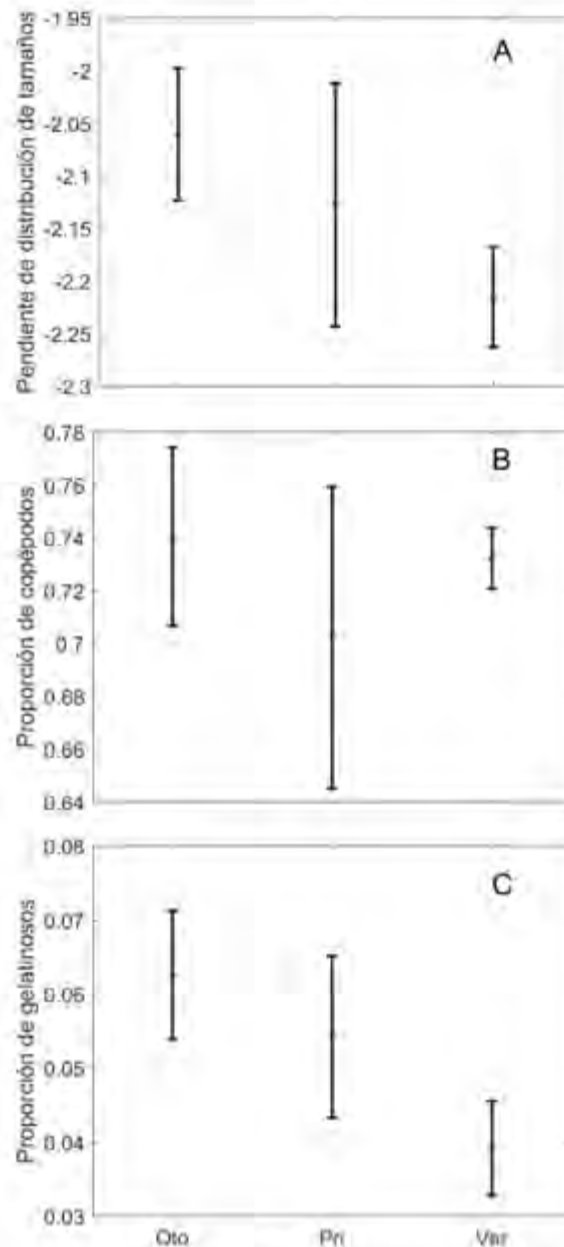


Figura 24. Pendiente de distribución de tamaño de partículas (A), proporción de copépodos (B) y proporción de gelatinosos carnívoros (C) promedio por estación del año. Las barras verticales corresponden al error estándar utilizando los años de la serie de tiempo 2014-2020.

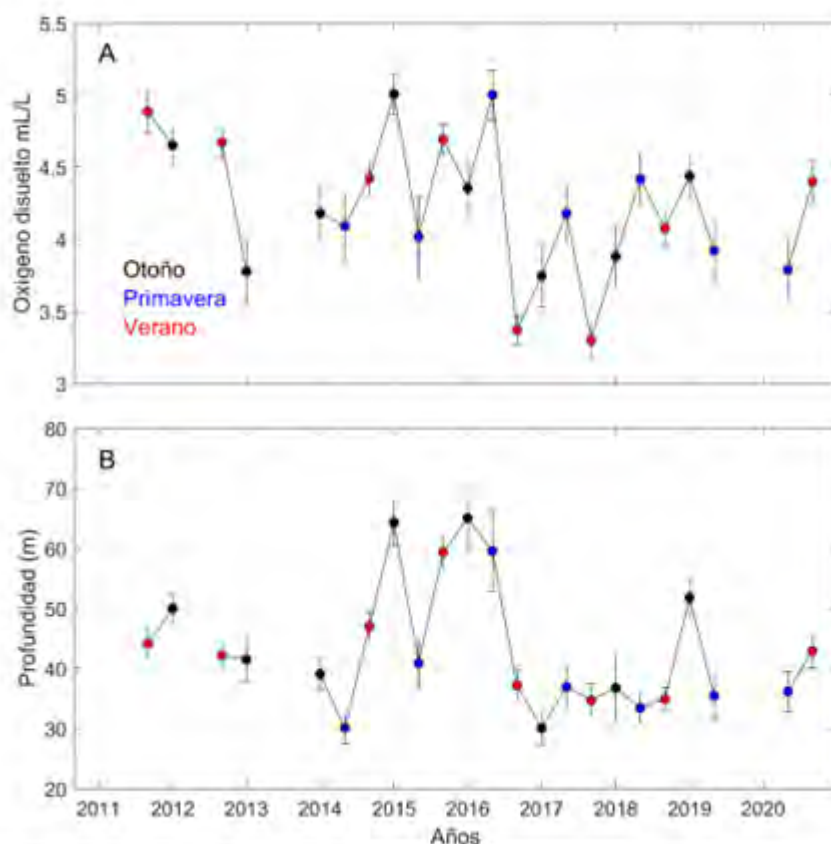


Figura 25. Serie de tiempo del OD promedio de los primeros 20 m (A) y la profundidad del nivel superior de la ZMO (B) para otoño (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales corresponden al error estándar calculado con todas las estaciones oceanográficas de cada año y estación del año.

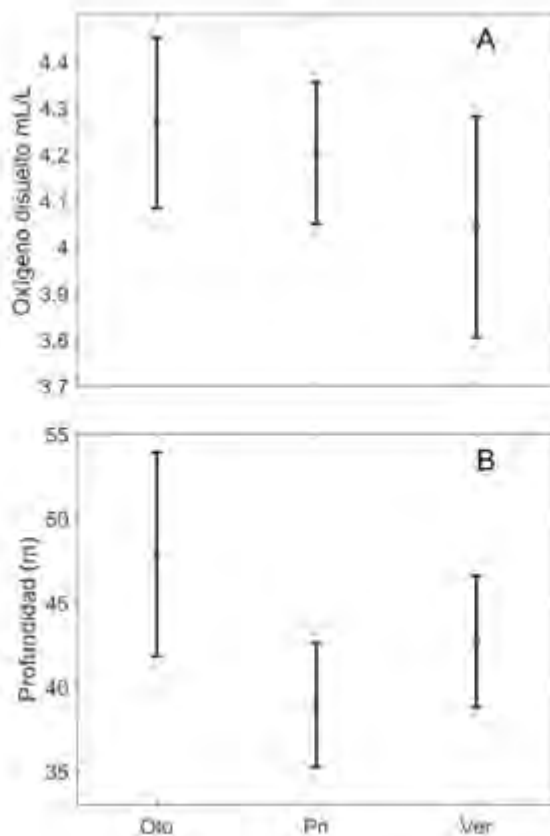


Figura 26. OD promedio de los primeros 20 m (A) y profundidad del nivel superior de la ZMO (B) promedio por estaci3n del a1o. Las barras verticales corresponden al error est1ndar utilizando los a1os de la serie de tiempo 2014-2020.

Tabla 11. Resultados del an1lisis de PERMANOVA univariado, utilizando como 1ndice de similitud la distancia euclidiana entre tratamientos (oto1o, primavera y verano), con el fin de probar si existen diferencias significativas de los 5 indicadores entre estaciones del a1o.

Variable	pseudo F	p
Pendientes de distribuci3n de tama1o de part1culas	0,92	0,4
Proporci3n de copépodos	0,27	0,8
Proporci3n de gelatinosos	1,78	0,2
Profundidad del l1mite superior de ZMO	0,97	0,4
OD promedio en los primeros 20 m	0,35	0,7

## 4.2.2 Caracterizaci3n ambiental del 1rea de estudio

### a) Variabilidad en el viento

Los campos promedio de velocidad y stress del viento (Figura 27) mostraron patrones espaciales similares, con mayores magnitudes hacia el SW de la regi3n de estudio y en general menores intensidades en la costa, con la excepci3n de sectores al sur de Antofagasta y al norte de Mejillones. Las diferencias espaciales se observaron m1s claramente en el m3dulo del stress del viento Figura 27, derecha), sobre todo el debilitamiento del esfuerzo del viento en las costas de Caldera y Arica. En cuanto a la direcci3n promedio del viento en la regi3n, se observ3 una divergencia en los vectores de velocidad y de stress al norte de los 22°S, con los vectores costeros apuntando en direcci3n NE, y los vectores oce1nicos dirigidos hacia el NW (Figura 27).

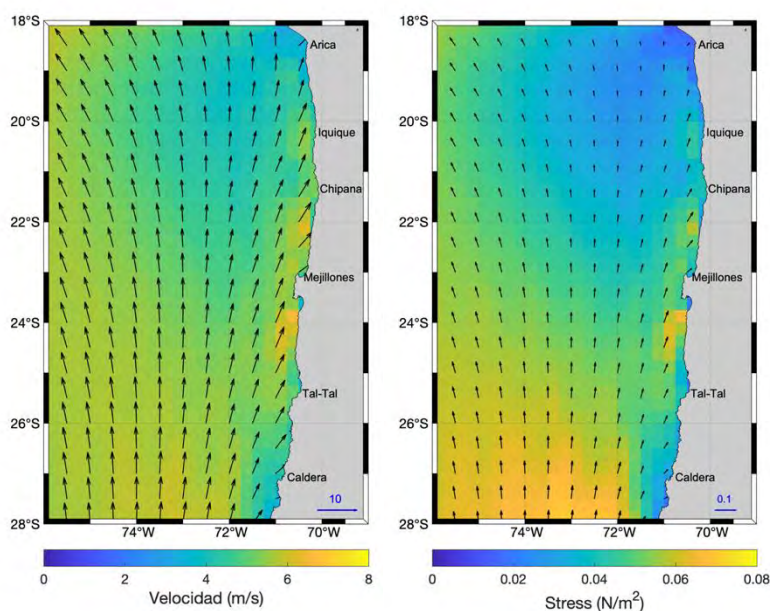


Figura 27. Campos promedio de la velocidad del viento (izquierda) y del stress del viento (derecha) para el periodo 1980-2023 en la regi3n de inter3s. Las escalas de colores muestran el m3dulo de la velocidad (izquierda) y stress (derecha), y los vectores ilustran magnitud y direcci3n en cada caso. Datos de velocidad a 10 m sobre el nivel del mar obtenidos del rean1lisis ERA5 (doi:10.24381/cds.adbb2d47).

En cuanto a la variabilidad estacional, las climatologías de la velocidad (Figura 28) y del stress del viento (Figura 29) revelaron una mayor intensidad del viento entre los meses de julio y noviembre, sobre todo al sur de los 26°S en la zona oceánica. Cerca de la costa, el sector con viento más intenso correspondió al sur de Antofagasta, particularmente entre septiembre y noviembre (Figura 29). La divergencia entre vectores de viento, detectada al norte de los 22°S en los promedios de largo plazo, aparece mucho más marcada entre los meses de julio y noviembre (Figura 29).

La divergencia de los vectores de stress del viento, y la mayor tendencia a rotar en sentido horario a lo largo de la franja costera, quedaron de manifiesto al calcular el rotor de viento e inspeccionar el campo promedio de largo plazo (Figura 30). En promedio, los valores más negativos de rotor de viento (i.e. mayor Bombeo de Ekman) se observaron dentro de una franja costera de 25-50 km entre Tal-Tal y Antofagasta, y entre Mejillones y Chipana (Figura 30).

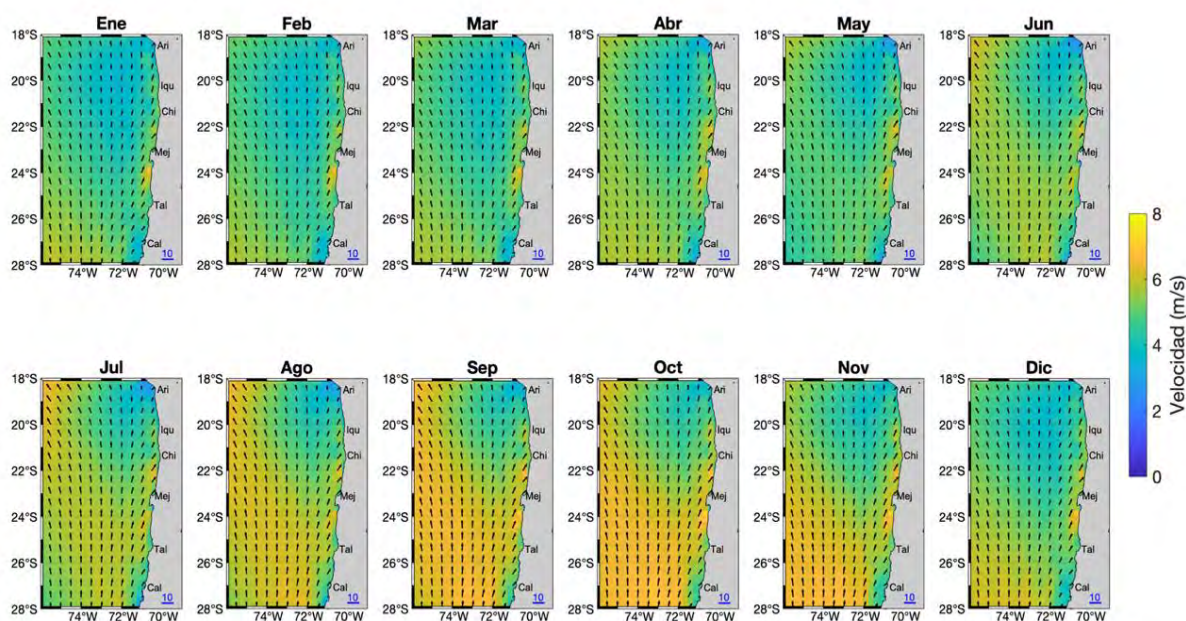


Figura 28. Climatología del campo de viento sobre la región de interés para el periodo 1980-2023. Datos corresponden a campos diarios de velocidad a 10 m sobre el nivel del mar (16:00 UTC) obtenidos del reanálisis ERA5 (doi:10.24381/cds.adbb2d47).



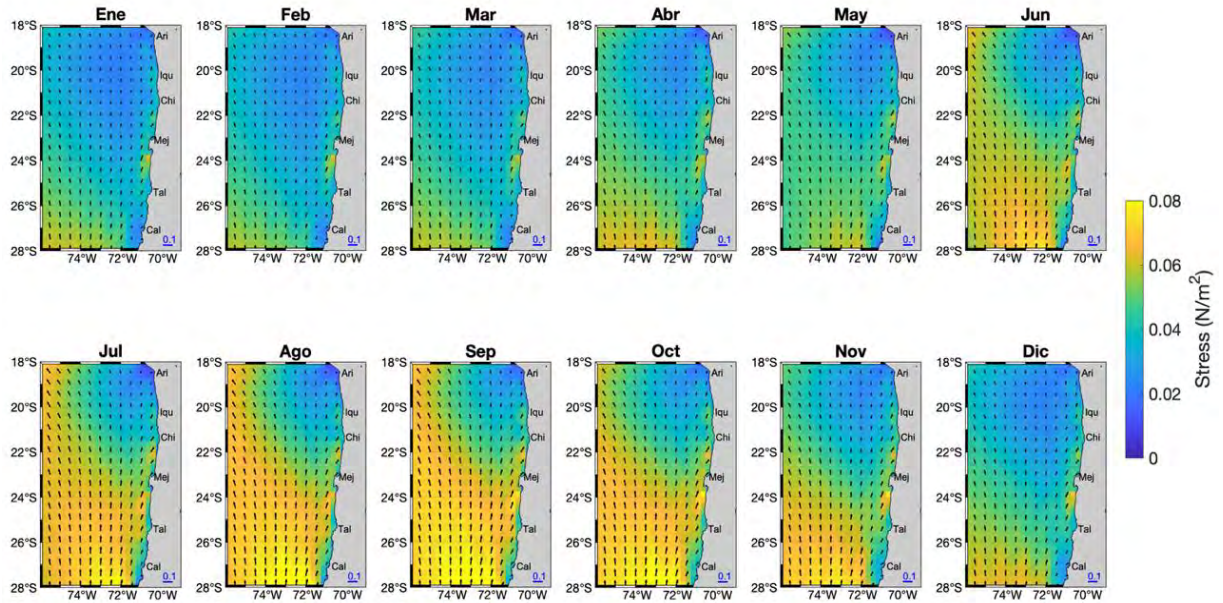


Figura 29. Climatología del campo de stress de viento sobre la región de interés para el periodo 1980-2023. La escala de colores muestra la magnitud del stress de viento (Pa), y los vectores ilustran la magnitud y dirección.



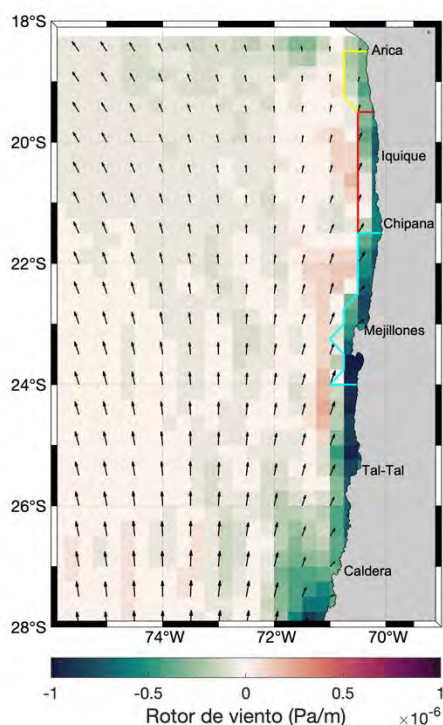


Figura 30. Campo promedio para el periodo 1980-2023 del rotor de viento. La escala de colores muestra la magnitud y signo del rotor, y los vectores ilustran magnitud y dirección del stress de viento. Los tonos verdes (rotor negativo) indican áreas con las condiciones de generar el ascenso de agua, conocido como Bombeo de Ekman. Los polígonos amarillo, rojo y celeste indican las tres áreas para las que se obtuvo series de tiempo de Bombeo de Ekman.

En cuanto al stress de viento costero, se observó una clara variación latitudinal en la orientación del eje dominante (Figura 31), que en general se mantuvo dentro de ca. 20° al oeste o al este del norte geográfico, salvo dos puntos ubicados frente a Arica y al sur de Antofagasta, en que el eje dominante se ubicó al este de los 50° con respecto al norte (Figura 31). En la mayoría de los casos, el eje dominante del viento concentró 80-90% de la variabilidad total, con valores menores en sectores específicos como frente a Arica, Bahía de Antofagasta y norte de Tal-Tal.

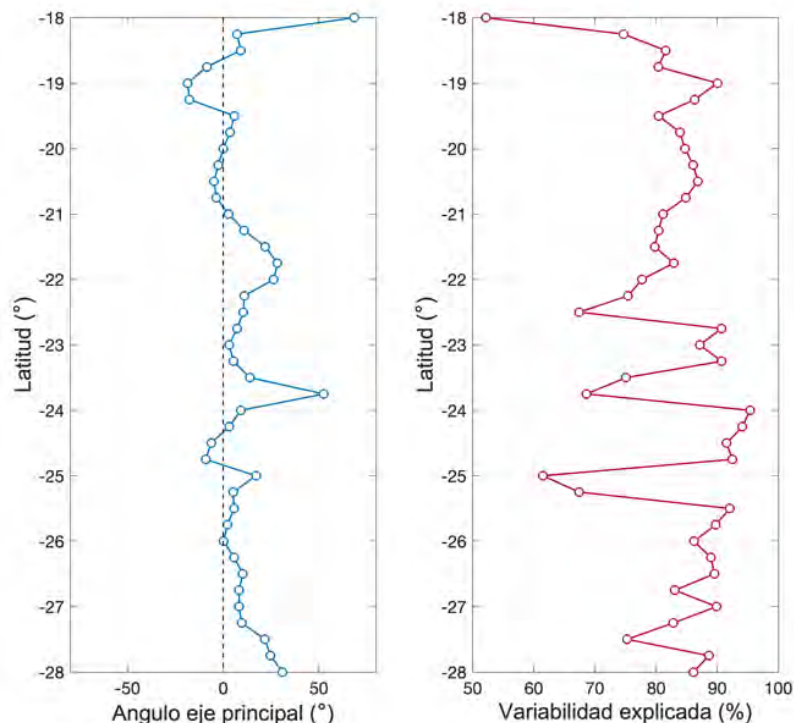


Figura 31. Variación latitudinal en la orientación del eje dominante del stress del viento costero (izquierda) y del porcentaje de la variabilidad total explicada por el eje dominante (derecha). Los ángulos negativos (positivos) del panel de la izquierda indican que el eje dominante apunta hacia el oeste (este) del norte geográfico.

Las climatologías en función de la latitud elaboradas para la componente paralela a la costa del stress del viento y para el transporte de Ekman (Figura 32) revelaron la ausencia de un patrón estacional claro. De la inspección de ambos gráficos destaca en primer lugar la heterogeneidad espacial en las magnitudes – no así en el signo – del stress costero y del transporte de Ekman resultante. Secundariamente, se observa un leve patrón estacional en el sector al sur de Antofagasta y frente a Mejillones, con mayores intensidades entre septiembre y noviembre (Figura 32, días 250-325).

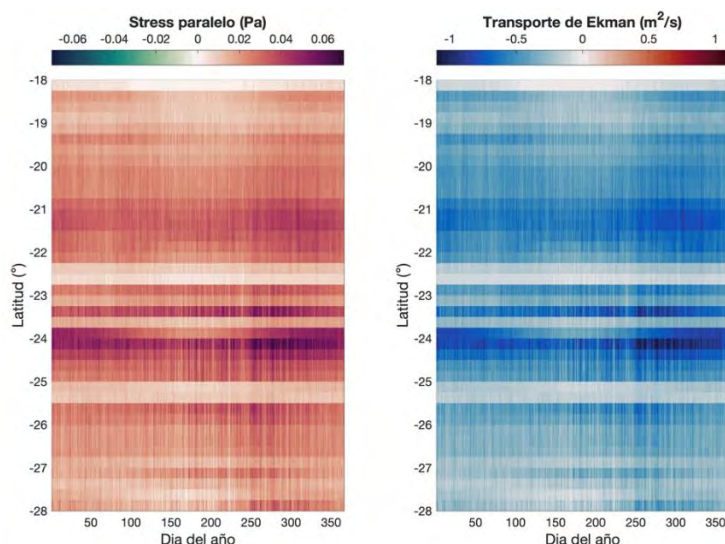


Figura 32. Climatología del stress de viento paralelo a la costa (izquierda) y del transporte de Ekman (derecha) en función de la latitud. El tiempo se expresa como día del año. Los tonos rojos (valores positivos) del panel izquierdo corresponden a viento favorable a surgencia costera. Los tonos azules (valores negativos) del panel derecho indican transporte de Ekman en dirección costa adentro (surgencia).

Las series de tiempo del Transporte de Ekman integrado a lo largo de las 3 secciones de la costa ya definidas mostraron niveles sustancialmente menores en la sección norte (Arica) en relación con las otras dos secciones (Iquique y Antofagasta, Figura 33). Al mismo tiempo, se observó un patrón de variabilidad estacional en las tres zonas, aunque fue más aparente hacia el extremo sur de la región de estudio (Figura 33).

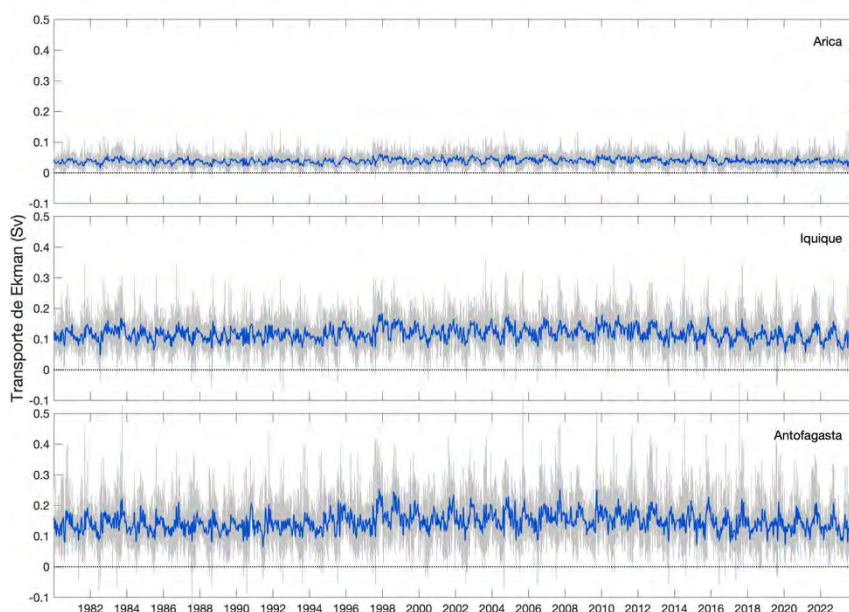


Figura 33. Serie temporal de transporte de Ekman (en  $Sv = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) calculado para cada una de las 3 secciones de la costa previamente definidas como áreas de interés. Las líneas grises corresponden a valores diarios y las líneas azules muestran las series suavizadas usando una media móvil de 10 días. Todos los valores se muestran con el signo opuesto al obtenido originalmente, por lo que valores positivos indican transporte de Ekman costa afuera (i.e. surgencia costera).

La caracterización de la variabilidad temporal del transporte de Ekman mediante análisis de wavelets mostró cambios interanuales en la intensidad de la señal estacional, con diferencias entre zonas en cuanto a los periodos en que la variabilidad estacional se volvió más importante (Figura 34). En la zona de Arica, el periodo con variabilidad estacional más intensa fue de 2002 a 2006, y secundariamente en 1995-1996 (Figura 34a). En la zona de Iquique, por otro lado, se observó una mayor persistencia de la señal estacional en el transporte de Ekman entre 1998 y 2022, aunque con una intensidad marcadamente mayor entre 2002-2007 y 2020-2022 (Figura 34b). Finalmente, en la zona de Antofagasta la señal estacional del transporte de Ekman cobró importancia en periodos más acostados alrededor de 1998, 2004-2006 y 2016-2018 (Figura 34c).

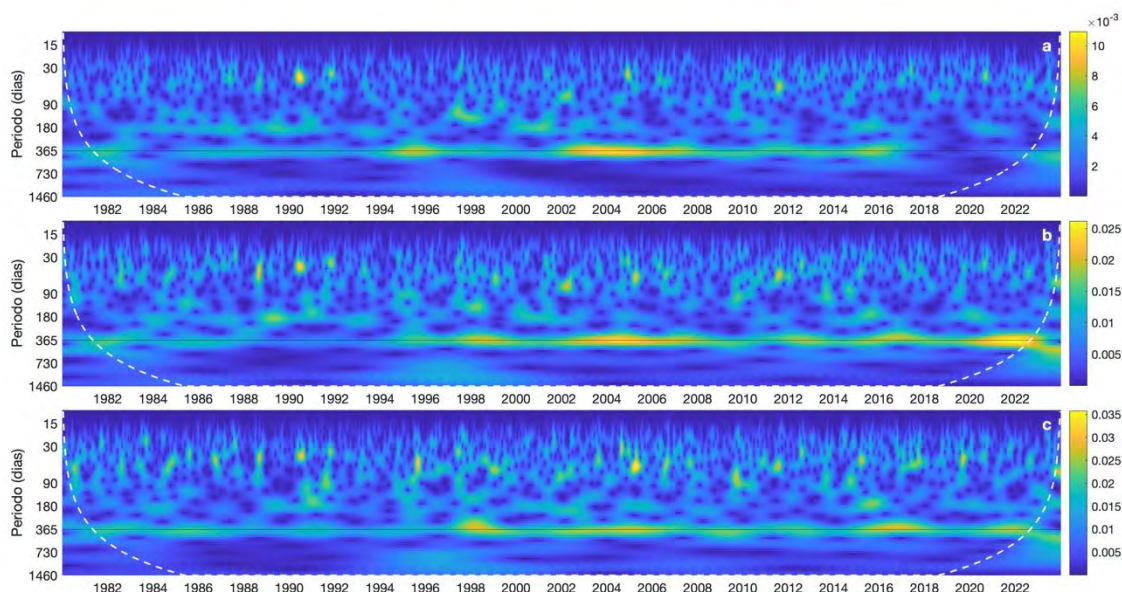


Figura 34. Resultado del análisis de wavelets aplicado a las series temporales de transporte de Ekman (líneas azules en la figura anterior) para las tres zonas definidas: (a) Arica, (b) Iquique y (c) Antofagasta. Los tonos amarillos indican una mayor energía de las oscilaciones con periodos que se indican en el eje y. La línea negra punteada indica el periodo anual. Las líneas blancas **segmentadas delimitan el llamado “cono de influencia”**; resultados que aparecen por debajo de esta línea no son confiables.

Las series de promedios mensuales del transporte de Ekman en las 3 regiones muestran más claramente los cambios interanuales en el nivel medio, el que de acuerdo con la prueba no paramétrica de Pettitt tuvo transiciones estadísticamente significativas en los años 1997 y 2013 (Figura 35). Las trayectorias de Transporte de Ekman acumulado para los tres periodos identificados (1980-1996, 1997-2012 y 2013-2022) mostraron un claro incremento en el segundo periodo, y un retorno a niveles originales (pre-1997) a contar del año 2013 (Figura 36).



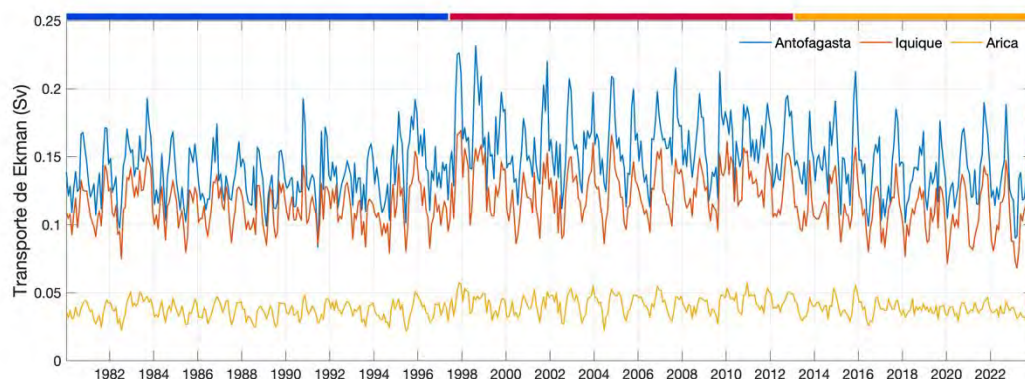


Figura 35. Comparación entre series mensuales de Transporte de Ekman (en  $\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) para las 3 secciones de la costa definidas anteriormente. Las líneas azul, roja y naranja sobre el eje superior marcan los periodos para los que se calculó el bombeo acumulado (ver figura siguiente). Todos los valores se muestran con el signo opuesto al obtenido originalmente, i.e. valores positivos indican surgencia costera.

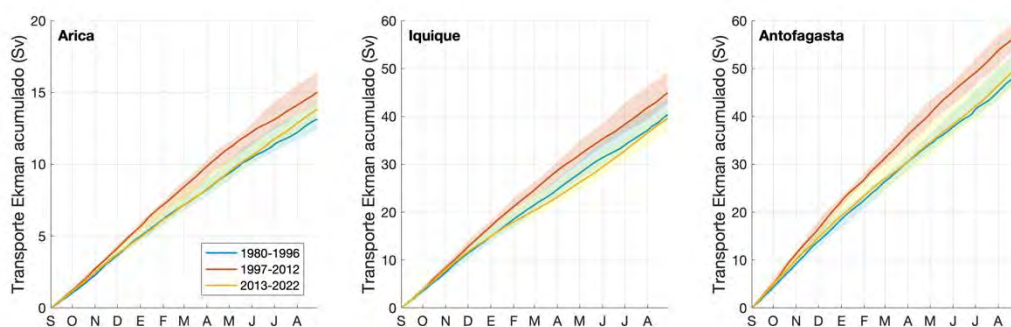


Figura 36. Comparación entre áreas (paneles) y entre periodos (colores) de la trayectoria del Transporte de Ekman acumulado a contar del 1 de septiembre para cada año en el registro analizado. Las líneas corresponden a la mediana de la distribución de valores para cada día, y las bandas de colores muestran los percentiles 10 y 90 alrededor de cada mediana. Las zonas de color naranja indican un traslape entre las bandas amarilla y roja. Las zonas de color verde indican un traslape entre las bandas amarilla y azul.

En cuanto al bombeo de Ekman, las series de tiempo calculadas para las 3 áreas que se indican en la figura 4 mostraron claras diferencias espaciales en la magnitud del transporte vertical generado por el rotor de viento, con valores sustancialmente menores en la zona norte (Arica, Figura 37a) y valores más altos en las costas de Iquique y Antofagasta (Figura 37b-c).

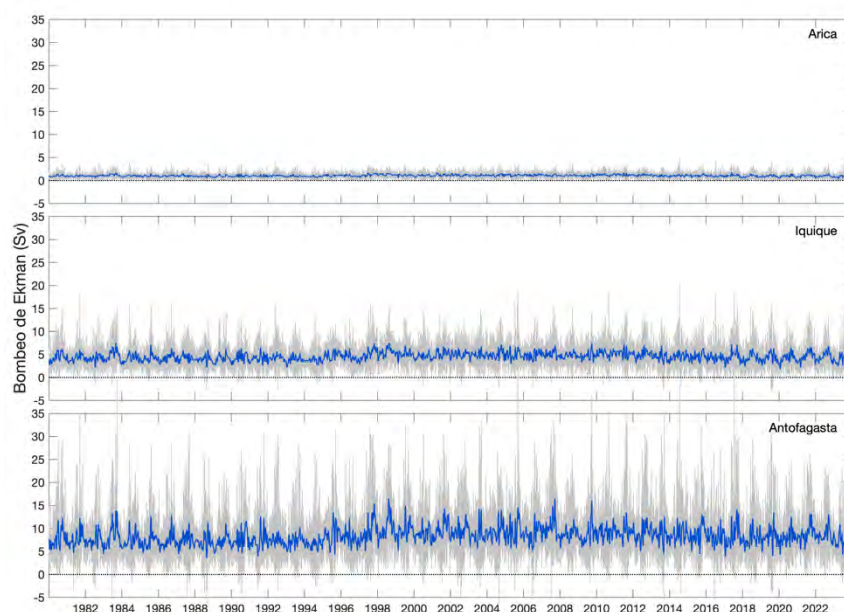


Figura 37. Series temporales de Bombeo de Ekman (en  $Sv = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) calculadas para cada una de las 3 áreas que se muestran en la Figura 28. Las líneas grises corresponden a valores diarios calculados para cada área. Las líneas azules muestran las series suavizadas usando una media móvil de 10 días. Valores positivos indican transporte hacia la superficie, i.e. Bombeo de Ekman.

La caracterización de la variabilidad temporal del bombeo de Ekman mediante análisis de wavelets reveló, en general, la ausencia de una señal estacional clara, salvo el periodo 2018-2022 en Arica e Iquique (Figura 38a-b) y el periodo 1998-1999 en Antofagasta (Figura 38c). A diferencia de lo observado en el caso del transporte de Ekman, se observó una mayor importancia de fluctuaciones de escala intra-estacional (30-90 días) durante periodos breves a lo largo de los 40 años analizados, sobre todo en la zona de Antofagasta (Figura 38c)

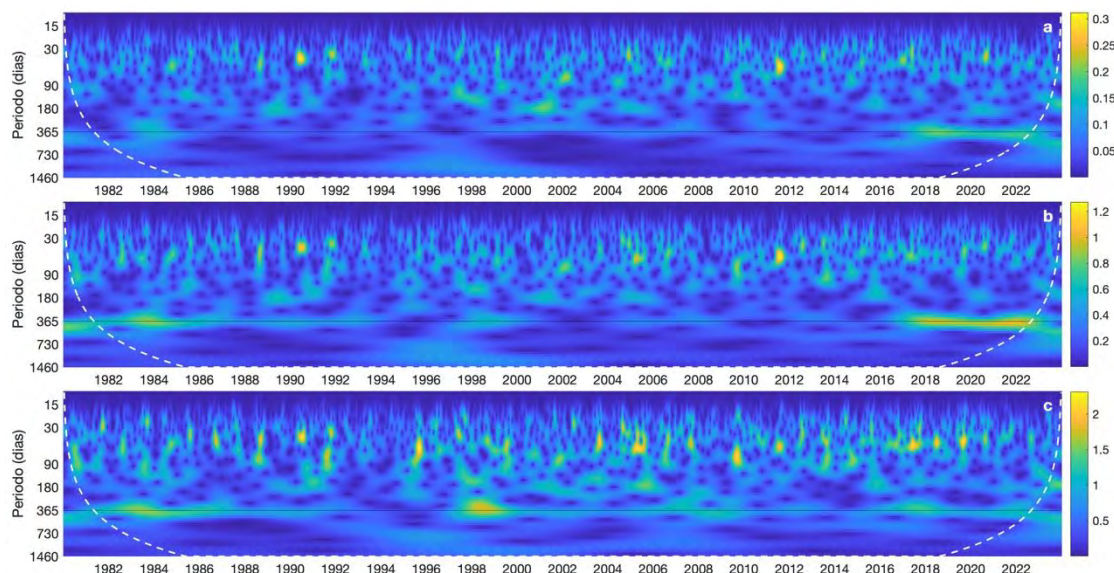


Figura 38. Resultado del análisis de wavelets aplicado a las series temporales de bombeo de Ekman (líneas azules en la figura anterior) para las tres zonas definidas: (a) Arica, (b) Iquique y (c) Antofagasta. Los tonos amarillos indican una mayor energía de las oscilaciones con periodos que se indican en el eje y. La línea negra punteada indica el periodo anual. Las líneas blancas segmentadas delimitan el llamado “cono de influencia”; resultados que aparecen por debajo de esta línea no son confiables.

Las series mensuales de bombeo de Ekman mostraron claramente un aumento en el nivel medio alrededor de 1997, y una transición a niveles similares a la condición pre-1997 entre 2013 y 2016 (Figura 39). Los cálculos de bombeo de Ekman acumulado para los tres periodos identificados revelaron una clara diferencia entre el periodo 1997-2012 y los otros dos segmentos de la serie de tiempo (Figura 40). En las tres zonas analizadas, el bombeo de Ekman acumulado fue claramente superior en 1997-2012. En Arica e Iquique las condiciones de bombeo de Ekman post-2012 volvieron a los niveles observados pre-1997 (ver traslape de bandas amarilla y azul en Figura 40a-b), mientras que en Antofagasta el bombeo de Ekman post-2012 se redujo a un nivel intermedio entre los otros dos periodos (Figura 40c).



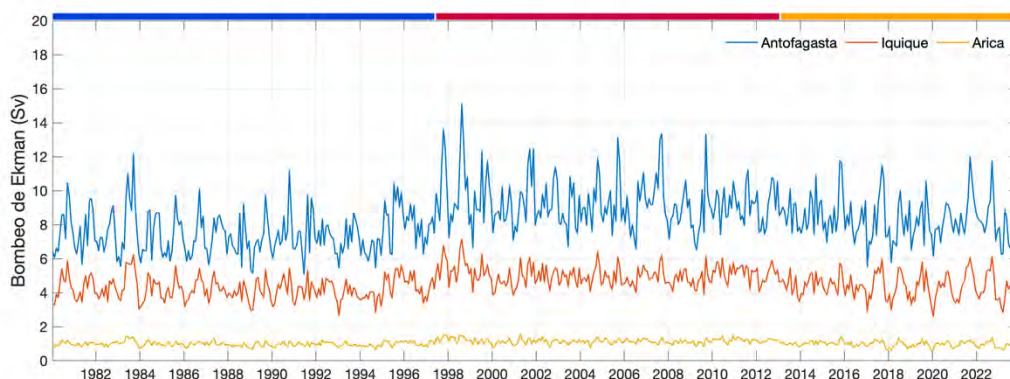


Figura 39. Comparación entre las series mensuales de Bombeo de Ekman (en  $Sv = 10^6 m^3/s$ ) para las 3 áreas de interés. Las líneas azul, roja y naranja sobre el eje superior marcan los periodos para los que se calculó el bombeo acumulado (ver figura siguiente).

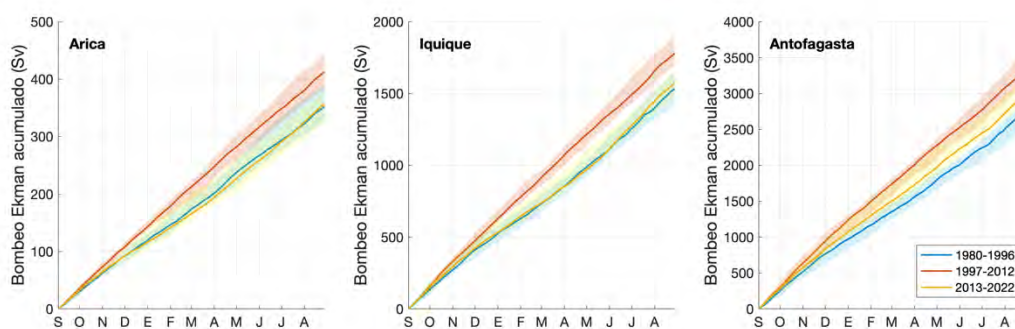


Figura 40. Comparación entre áreas (paneles) y entre periodos (colores) de la trayectoria del Bombeo de Ekman acumulado a contar del 1 de septiembre para cada año en el registro analizado. Las líneas corresponden a la mediana de la distribución de valores para cada día, y las bandas de colores muestran los percentiles 10 y 90 alrededor de cada mediana. Las zonas de color naranja indican un traslape entre las bandas amarilla y roja. Las zonas de color verde indican un traslape entre las bandas amarilla y azul.

## b) Variabilidad de la Temperatura Superficial del Mar (TSM)

El análisis del patrón espacial promedio y de la variabilidad de la TSM en el periodo 1981-2023 mostró una estructura clara tanto en la TSM media (Figura 41a) como en la amplitud del ciclo estacional (Figura 41b), la fracción de varianza no estacional en la TSM (Figura 41c) y la tendencia interanual al enfriamiento (Figura 41d). La estructura dominante fue un núcleo de agua en promedio más cálida (Figura 41a), con una variación de hasta  $8^{\circ}C$  entre invierno y verano (Figura 41b) y donde el ciclo

anual explica más del 90% de la variabilidad total en TSM (Figura 41c) en la zona oceánica centrada en los 19°S y 73°W (Figura 41a-c). Como se esperaba, la variabilidad no estacional en la TSM fue más importante en una estrecha franja costera a lo largo de toda la región, llegando hasta un 35% de la variabilidad total y mostrando valores más altos entre Mejillones e Iquique (Figura 41c). La tendencia interanual en las anomalías de TSM fue marcadamente mayor en la franja costera y principalmente entre Tal-Tal y Chipana, y frente a Iquique (Figura 41d), con tasas de enfriamiento de 0,2°C o más por década.

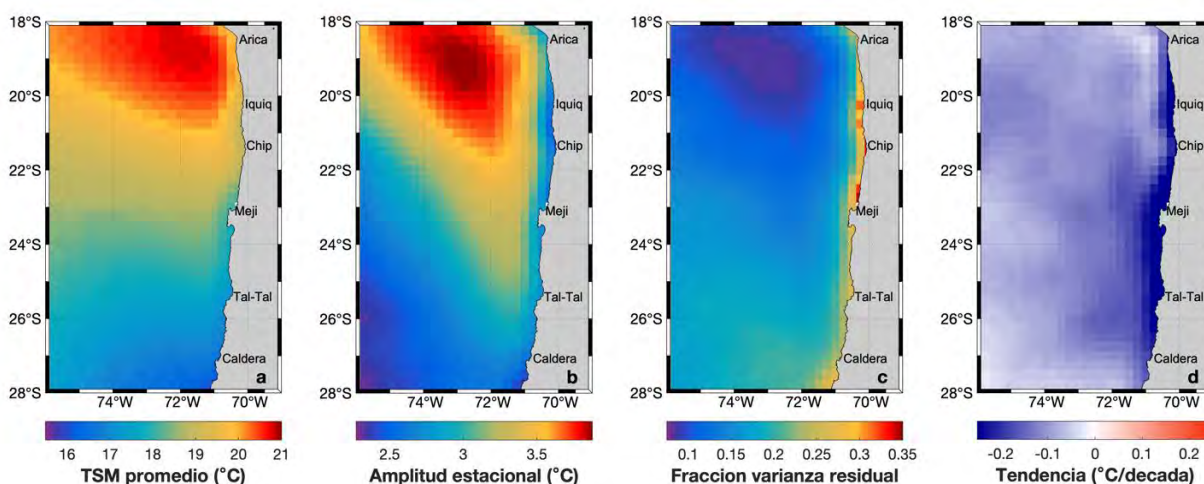


Figura 41. Patrón promedio de largo plazo (a), amplitud de la señal estacional (b), fracción de variabilidad no estacional (c) y tendencia interanual (d) en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el periodo 1980-2023 para la región de estudio. El análisis se basó en imágenes diarias AVHRR con 25 km de resolución espacial.

El índice de intensidad de enfriamiento/calentamiento superficial costero reveló un patrón latitudinal claro a lo largo de la región, con enfriamientos marcadamente más débiles, e incluso periodos de leve calentamiento, hacia el sur de 24°S (Figura 42). Hubo una clara intensificación del enfriamiento costero a partir de 2006-2007, principalmente entre 20-24°S hasta antes de 2020, y en toda la región a partir de 2021 (Figura 42). En los años más recientes, post-2020, el enfriamiento costero se ha intensificado a lo largo de toda la región (Figura 42). Por otro lado, los periodos de calentamiento costero en el extremo sur de la región (27-28°S) fueron más intensos en las temporadas 1982-1983 y

1997-1998, consistente con periodos de condición El Niño, y en que se observó un debilitamiento del patrón de enfriamiento a lo largo de toda la región (Figura 42). También hubo un debilitamiento en la temporada 2020-2021, que abarcó latitudes desde 21°S hacia el sur.

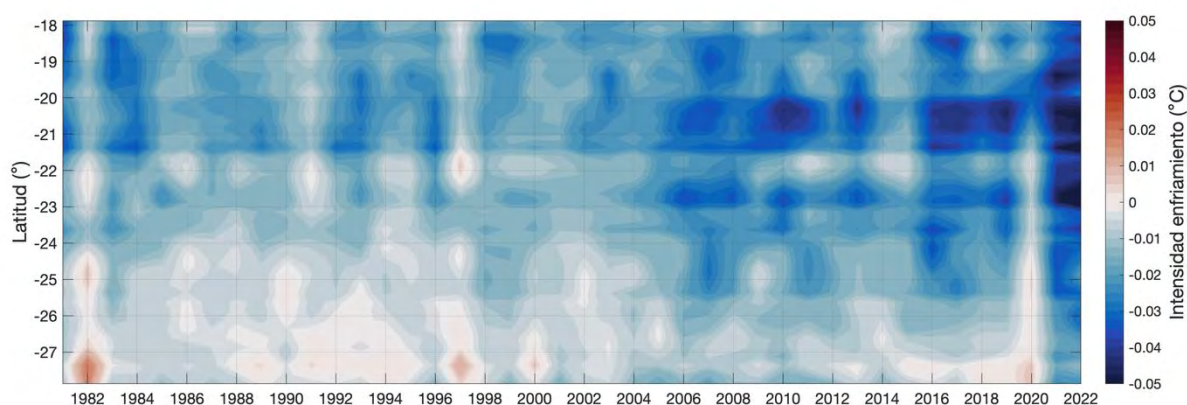


Figura 42. Variabilidad latitudinal e interanual de la intensidad del enfriamiento superficial en la región de interés. El índice de enfriamiento se calculó para cada temporada primavera-verano (septiembre a marzo) a partir de imágenes AVHRR diarias para el periodo 1981-2023. Los años en el eje x indican el año de inicio de cada temporada, i.e. los valores que se muestran para cada latitud sobre el año 2010 corresponden a promedios de los valores diarios calculados entre el 1 de septiembre de 2010 y el 31 de marzo de 2011.

La variabilidad de TSM con periodos < 20 días, considerada aquí como una medida de la variabilidad sinóptica asociada a la surgencia costera, mostró un patrón interanual consistente con lo observado para el índice de enfriamiento. La amplitud de las oscilaciones de escala sinóptica en la TSM aumentó claramente a partir de 2007 en toda la región de estudio (Figura 43), y entre 1995-1997 hubo una disminución marcada en la variabilidad sinóptica de la TSM en toda la región (banda vertical más clara en la Figura 43).

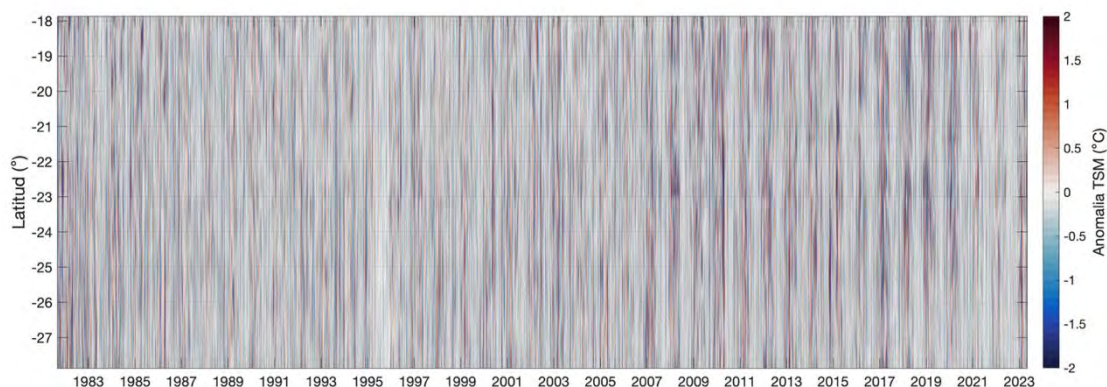


Figura 43. Variabilidad de corto periodo en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) cerca de la costa, ilustrada como anomalías de TSM que se calcularon para cada latitud como la diferencia entre la serie de tiempo original y una serie filtrada mediante una media móvil de 20 días. Colores más intensos indican una mayor amplitud de las oscilaciones de escala sinóptica en la TSM. Las series de tiempo utilizadas corresponden al pixel más costero de imágenes AVHRR con resolución diaria, disponibles para el periodo 1980-2023.

El análisis de la variabilidad sinóptica mensual, cuantificada para cada mes (y latitud) mediante el RMS de las oscilaciones diarias de la anomalía de TSM (Figura 43), mostró con mayor claridad el incremento en amplitud de la variabilidad sinóptica entre los años 2007 y 2020, en contraste con el periodo 1986-2006 en que las oscilaciones fueron sustancialmente menores (Figura 44, izquierda). Al comparar la climatología del RMS mensual para estos dos periodos en una latitud cercana a Mejillones ( $23^{\circ}7'S$ , **línea punteada en** Figura 44), quedó de manifiesto que el cambio registrado a partir de 2007 consistió principalmente en un aumento de las oscilaciones de escala sinóptica en verano-otoño (febrero-abril) y una disminución en invierno (agosto-septiembre, Figura 44). Finalmente, la transformación de oscilaciones diarias a una medida mensual de variabilidad hizo aún más clara la fuerte disminución en variabilidad sinóptica de la TSM registrada entre 1995 y 1996 para toda la región (banda vertical azul oscuro, Figura 44).

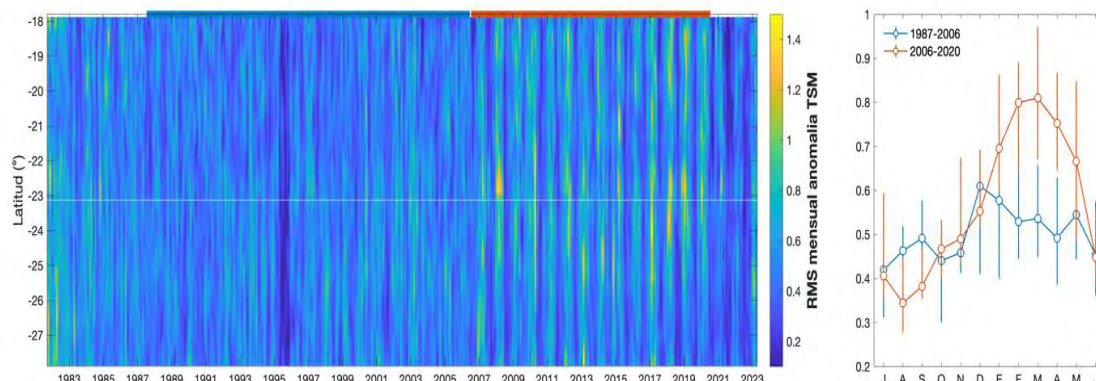


Figura 44. Serie mensual de la amplitud de la variabilidad sin3ptica en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) a lo largo de la regi3n de estudio (izquierda) y climatolog3a centrada en verano (derecha) de la variabilidad sin3ptica al norte de Mejillones (latitud indicada por la l3nea blanca punteada) para los dos periodos indicados por las l3neas azul y naranja en el eje superior del panel izquierdo. Los s3mbolos y barras de error representan la mediana y cuartiles 1 y 3 para cada mes. Los colores m3s intensos en el panel de la izquierda indican una mayor amplitud de las oscilaciones de escala sin3ptica en la TSM durante cada mes, cuantificada como el RSM para de los valores diarios calculados para cada mes y latitud (figura anterior). Las series de tiempo utilizadas corresponden al pixel m3s costero de im3genes AVHRR con resoluci3n diaria, disponibles para el periodo 1980-2023.



#### d) Variabilidad de la Clorofila-a superficial

El patrón espacial promedio de la clorofila-a superficial en la región de estudio mostró la tendencia habitual a tener mayores concentraciones de pigmentos fotosintéticos sobre la plataforma continental (Figura 45, contorno gris más cercano a la costa), y alrededor de puntas, al interior de bahías, o en zonas donde el ancho de la plataforma se incrementa abruptamente, como en la costa entre Chipana e Iquique (Figura 45).

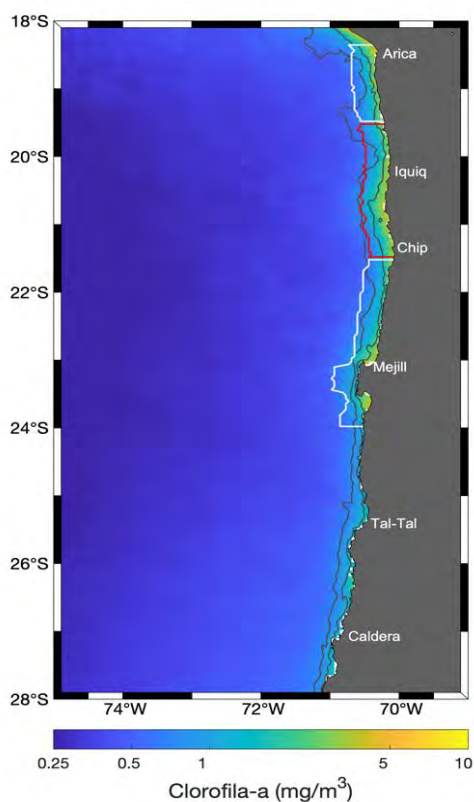


Figura 45. Campo promedio de la clorofila-a superficial en la región de estudio entre enero 2000 y diciembre 2023. Los contornos blancos y rojos muestran las áreas utilizadas para calcular los promedios espaciales de clorofila en cada compuesto mensual. El extremo oeste de estas áreas correspondió a una distancia de 20 millas náuticas de la línea de costa. El contorno gris oscuro más cercano a la costa corresponde a la isóbata de 200 m.

La variabilidad temporal de las concentraciones medias de clorofila-a reveló diferencias latitudinales en los niveles medios y un leve patrón estacional en 2 de las 3 zonas delimitadas a lo largo de la región (Figura 46). El análisis de wavelets aplicado a las series mensuales de clorofila-a en las tres zonas de interés confirmó la ausencia de una señal anual en la zona de Arica, y la presencia de una señal anual más clara en las otras dos zonas durante el periodo 2008-2012 (Figura 47). Se observó una periodicidad cercana a la anual en la zona de Antofagasta entre 2017 y 2020, y entre 2016 y 2018 en la zona de Iquique (Figura 47).

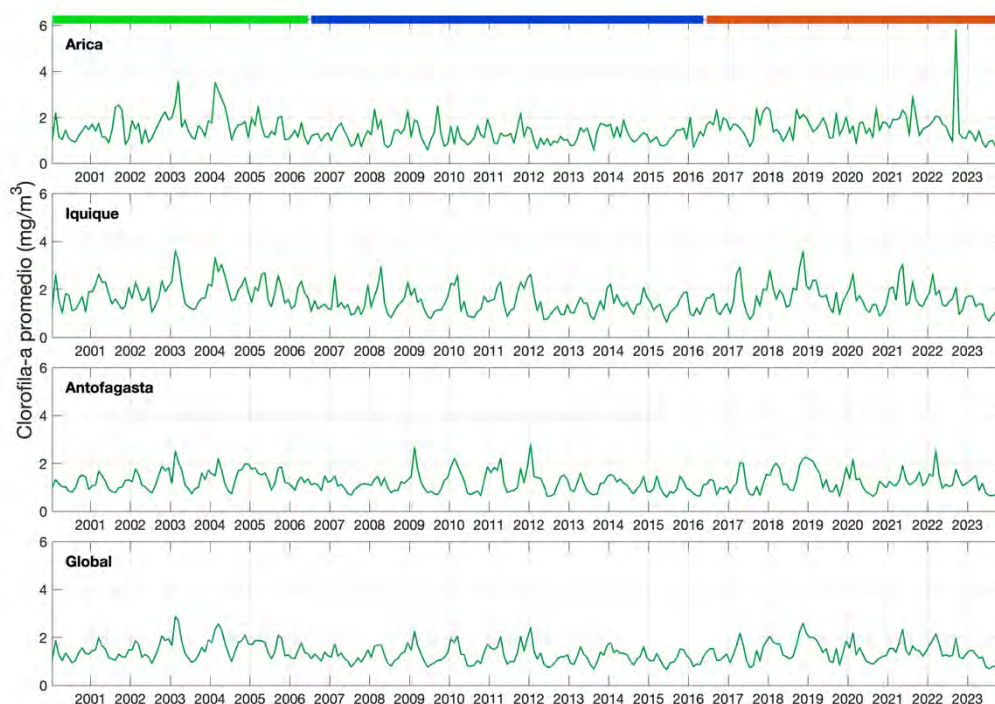


Figura 46. Variabilidad temporal en los promedios espaciales de clorofila-a superficial para las 3 zonas de interés y para el promedio global. Las barras de colores en el panel superior indican los tres periodos identificados mediante la prueba no paramétrica de Pettitt (1979).

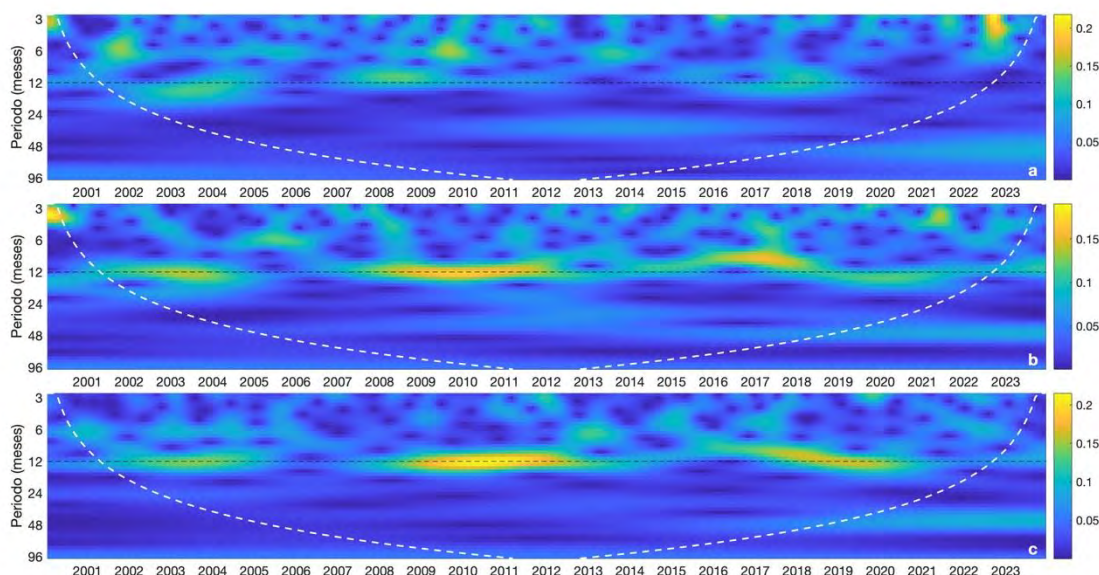


Figura 47. Resultado del análisis de wavelets aplicado a las series mensuales de clorofila-a en las tres zonas de interés: (a) Arica, (b) Iquique y (c) Antofagasta. Los tonos amarillos indican una mayor energía de las oscilaciones con periodos que se indican en el eje y. La línea negra punteada indica el **periodo anual**. **Las líneas blancas segmentadas delimitan el llamado “cono de influencia”;** resultados que aparecen por debajo de esta línea no son confiables.

En cuanto a la variabilidad interanual de la clorofila-a, en la zona de Arica se observó una disminución en el nivel medio de clorofila entre 2006 y 2017, mientras que en Iquique hubo una disminución más gradual entre 2005 y 2012 (Figura 46). El análisis de Pettitt aplicado a estas series mensuales permitió identificar dos transiciones estadísticamente significativas en el nivel medio de clorofila-a. Para las zonas de Iquique y Antofagasta, así como para el promedio global, se encontró una transición significativa entre junio 2006 y febrero 2017. Para Arica, por otro lado, el punto de cambio detectado correspondió a mayo de 2016. Esta división de las series de tiempo en tres periodos (indicados con barras de colores en la Figura 46) se utilizó para calcular y comparar climatologías de clorofila-a en las 3 zonas de interés, así como en la región completa (Figura 48).



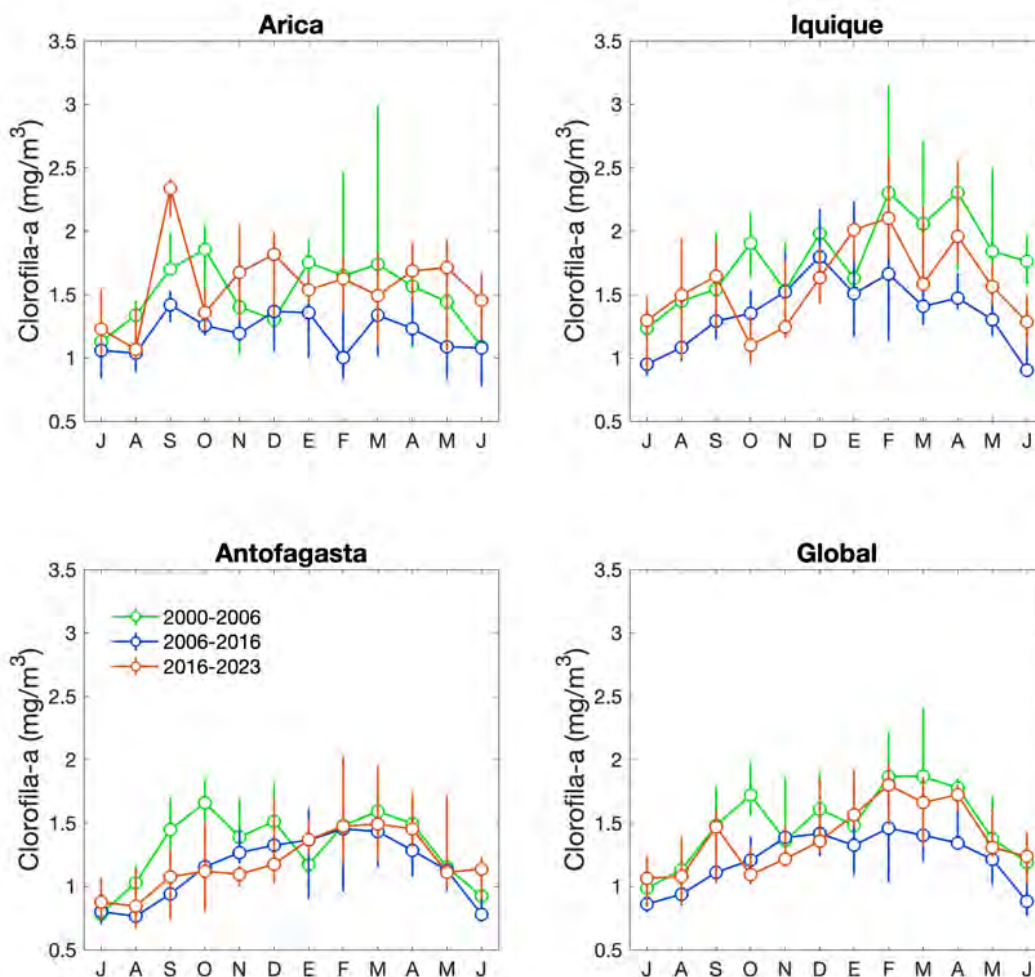


Figura 48. Comparación de las climatologías de clorofila-a calculadas para los tres periodos identificados en las series de promedios mensuales mediante la prueba no paramétrica de Pettitt (1979). Los símbolos y barras de error corresponden a la mediana y a los percentiles 25 y 75 para cada mes y periodo. Las climatologías están centradas en verano (el año comienza en julio y termina en junio).

Se observó una clara disminución en el nivel medio de clorofila-a superficial entre el periodo 2000-2006 y 2006-2016, tanto en la zona de Arica como en Iquique, además de la serie de promedios para toda la región (líneas verdes y azules en Figura 48). Esta disminución fue más pronunciada en meses

de invierno-primavera, y menos pronunciada entre fines de primavera y comienzos de verano (noviembre a enero, Figura 48). A partir de 2016 (líneas naranjas en Figura 48) los niveles medios de clorofila-a en Arica retornaron a niveles comparables o superiores a los registrados antes de 2006 (Figura 48). En Iquique, por otro lado, hubo un alza en los niveles medios de clorofila durante el invierno y verano-otoño, pero los valores medios disminuyeron aún más en primavera (octubre-diciembre), llegando a niveles por debajo de los registrados en el periodo 2006-2016. Para Antofagasta, por otro lado, no se observó un cambio marcado en los niveles medios de clorofila-a, salvo en los meses de invierno-primavera (agosto-diciembre), y principalmente entre septiembre y octubre (Figura 48). En síntesis, desde 2006 a la fecha las condiciones de clorofila-a durante invierno-primavera – época considerada clave para la vida temprana de la anchoveta – empeoraron marcadamente entre septiembre y octubre en Antofagasta, tuvieron una caída entre 2006-2016 y una clara recuperación en años recientes en Arica, y se han recuperado parcialmente en Iquique (en julio-septiembre), con una caída aún más pronunciada en los niveles medios de clorofila entre octubre y enero (Figura 48).

#### 4.2.3 Caracterización de la condición biológica de la anchoveta

##### a) Análisis de los indicadores biológicos y ambientales

Se analizó la tendencia y estacionalidad por zonas (Arica, Iquique y Antofagasta) de indicadores biológicos de anchoveta como el factor de condición, peso y longitud e indicadores ambientales como la clorofila y temperatura. El factor de condición (K) para las hembras de anchoveta mostró una tendencia decreciente en las zonas de Iquique y Antofagasta hasta 2022 con un punto de quiebre el 2011, marcado por una mayor pendiente principalmente en Antofagasta. Sin embargo, en Arica la tendencia negativa se mantuvo hasta 2018, mostrando posteriormente una tendencia levemente positiva (Figura 49 y Tabla 12 ). La estacionalidad del factor de condición mostró una baja durante el primer semestre, con los menores valores en Arica, y destacando Iquique con una mejor condición. El segundo semestre se registró un incremento en la condición de las hembras, con máximos en noviembre y una mejor condición en Arica (Figura 51).

El peso y la longitud de las hembras de anchoveta mostraron tendencias similares en las tres zonas, con valores crecientes hasta el año 2000, con pesos entre 10 y 38 g, y longitudes entre 10 y 18 cm. Posteriormente se observó una tendencia a la baja, con un intervalo entre 15 y 30 g en el peso y longitudes entre 13,5 y 16,5 cm hasta el 2013/2014, cuando vuelve a presentar una tendencia creciente, destacando pesos entre 10 y 25 g y longitudes entre 13,0 y 16,0 cm, con una mayor pendiente en Antofagasta (Figura 49 y Tabla 12). Para las tres zonas, la estacionalidad del peso mostró menores valores en septiembre y febrero, y máximos en mayo y entre noviembre y diciembre. (Figura 51).

La clorofila mostró tendencias similares en las tres zonas, con valores crecientes hasta el año 2003/2004 con valores entre 1 y 7 mg/m<sup>3</sup>. Posteriormente se registra una tendencia que se mantiene hasta 2022, con un quiebre en 2015/2016 marcado por un aumento en la pendiente y mayores valores en el último periodo, con niveles de clorofila entre 1,5 y 8 mg/m<sup>3</sup> (Figura 50 y Tabla 12 ). La clorofila mostró una clara estacionalidad, con mayores valores durante el verano, destacando la zona de

Iquique por sobre Arica y Antofagasta. Posteriormente se observó una baja, con los menores valores en los meses junio -julio, para luego incrementar hasta diciembre. El segundo semestre se observó mayores valores para la zona de Arica y Antofagasta (Figura 51).

La temperatura mostró una leve tendencia decreciente en las tres zonas hasta 2012/2013, posteriormente en Iquique y Antofagasta, mostró una tendencia positiva hasta el 2016, cuando mostró una leve tendencia a la baja. En tanto en Arica el 2013 mostró un aumento en la pendiente, manteniendo la tendencia decreciente (Figura 50 y Tabla 12 ). La temperatura presentó una estacionalidad similar a la clorofila, con mayores valores en verano principalmente en Arica y Antofagasta, y un posterior descenso con los menores valores entre julio y septiembre para las tres zonas (Figura 51).

Tabla 12. Puntos de ruptura estimados por el método BFAT para el periodo entre 1997-2022 para las series biológicas y ambientales (temperatura y clorofila)

Puntos quiebre/indicadores	1 <sup>er</sup>	2 <sup>do</sup>	3 <sup>er</sup>
<b>Arica</b>			
Factor de condición	2018 (8)		
Peso medio	2001 (1)	2013 (12)	2018 (8)
Longitud media	2001 (1)	2013 (12)	2018 (8)
Clorofila	2003 (6)	2015 (1)	
Temperatura (°C)	2013 (3)		
<b>Iquique</b>			
Factor de condición	2011 (7)	-	
Peso medio	2000 (12)	2014 (3)	2018 (1)
Longitud media	2000 (12)	2014 (1)	2018 (8)
Clorofila	2003 (9)	2016 (2)	
Temperatura (°C)	2012 (2)	2016 (2)	
<b>Antofagasta</b>			
Factor de condición	2011 (8)		
Peso medio	2000 (12)	2014 (6)	2018 (4)
Longitud media	2000 (12)	2013 (11)	2018 (6)
Clorofila	2004 (10)	2016 (3)	
Temperatura (°C)	2012 (1)	2016 (1)	

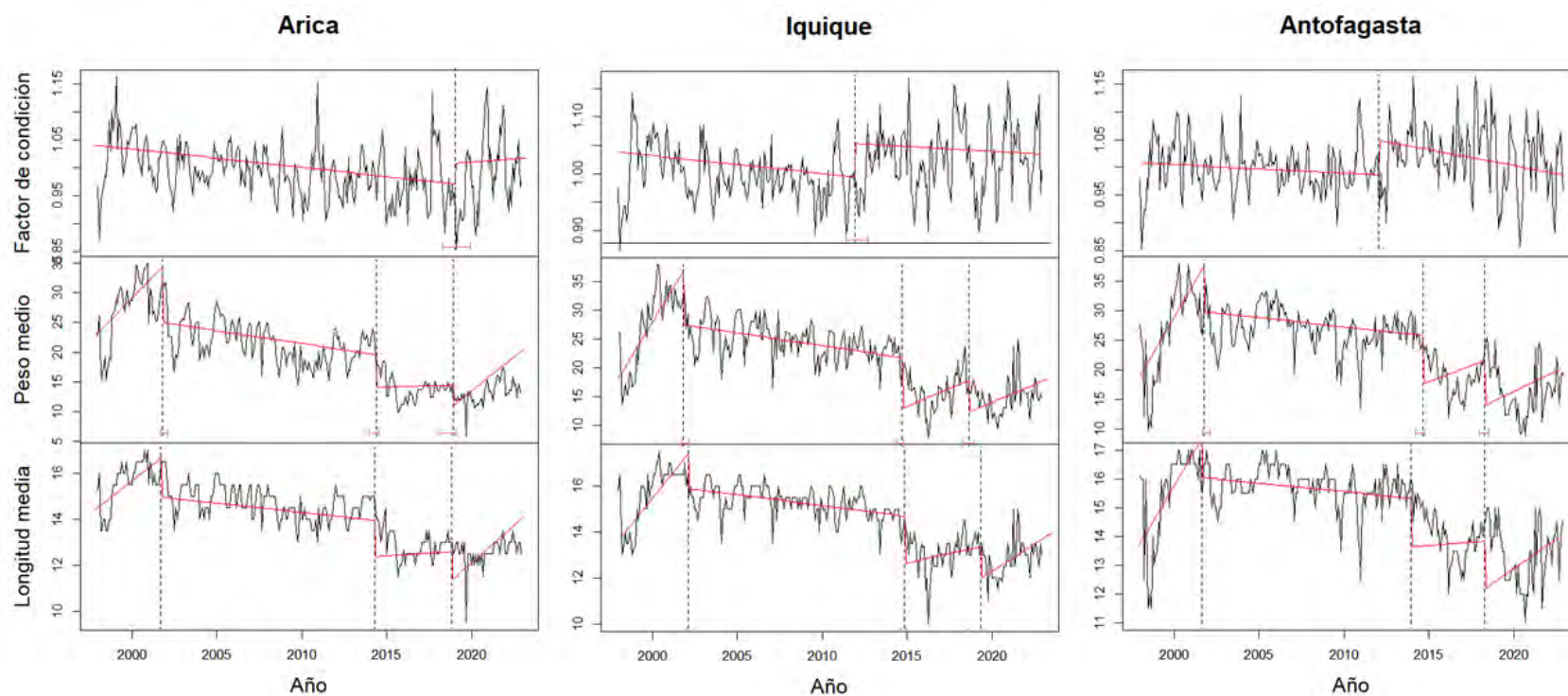


Figura 49. Series de tiempo del factor de condici3n, peso medio y longitud media de la anchoveta por zona. La lnea representa las tendencias de los datos (horizontal) y los puntos de ruptura (vertical) estimados por el m3todo BFAT para el periodo entre 1997-2022.

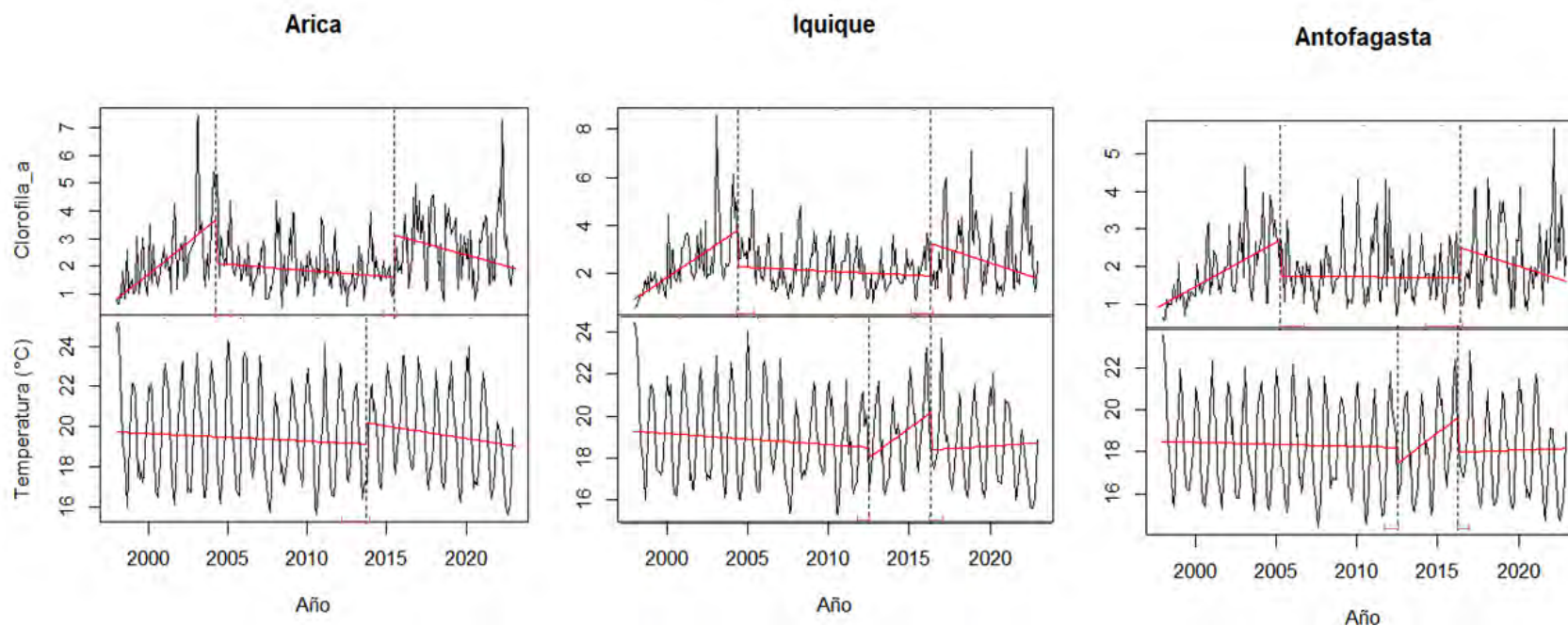


Figura 50. Series de tiempo del factor de condición, peso medio y longitud media de la anchoveta por zona. La línea representa las tendencias de los datos (horizontal) y los puntos de ruptura (vertical) estimados por el método BFAT para el periodo entre 1997-2022.



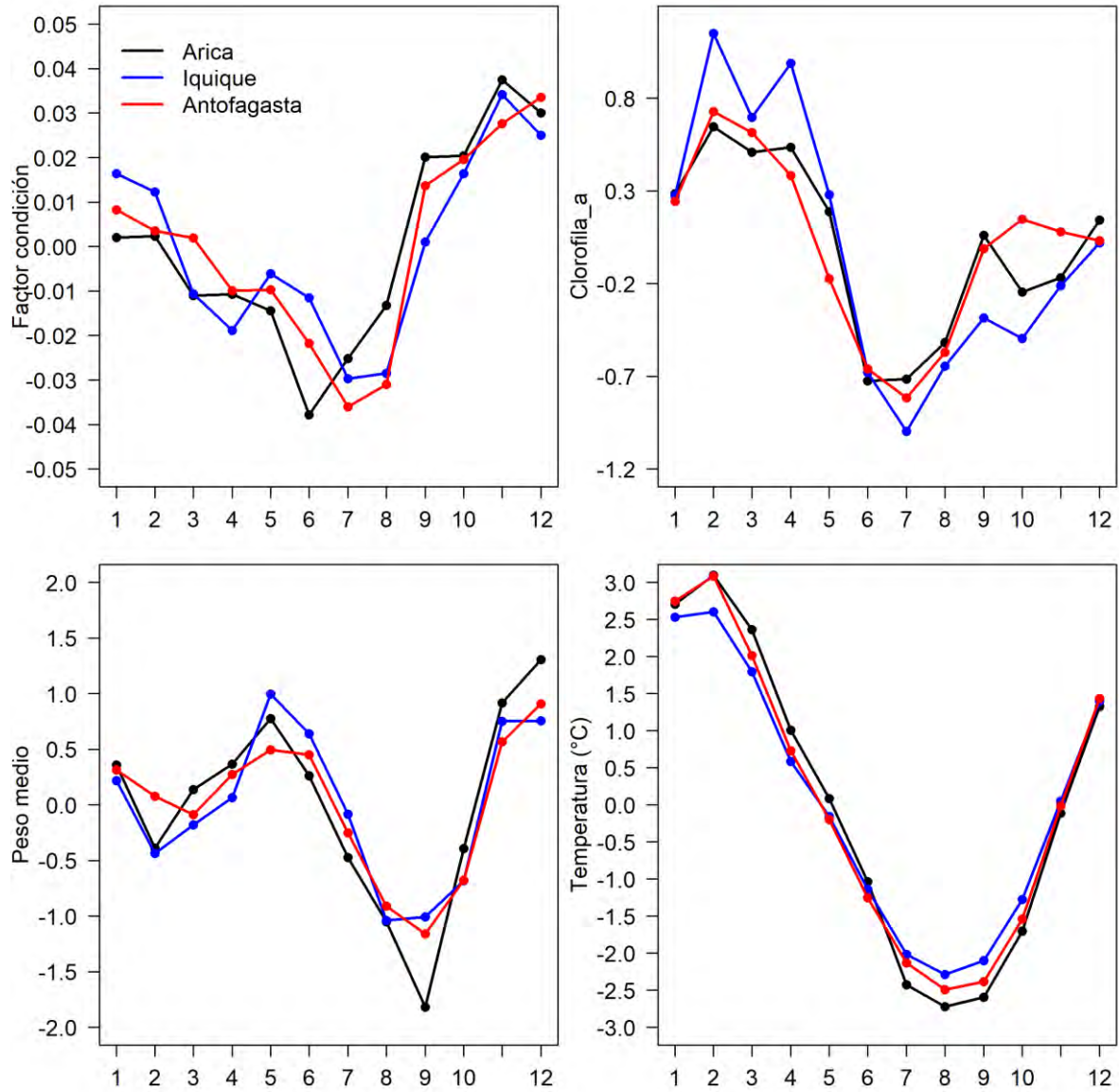


Figura 51. Estacionalidad del factor de condición, peso medio de hembras de anchoveta y de variables ambientales como clorofila y la temperatura por zona.



#### 4.2.4 Modelamiento

##### 4.2.4.1 Modelo GAM para crecimiento con el ambiente

Se probó un total de dieciocho covariables de las veinte disponibles, ocho relacionadas con la oferta alimentaria (Tabla 13) y doce asociadas a variables ambientales (Tabla 14).

Tabla 13. Definición de las covariables asociadas al alimento utilizadas en el modelado de la longitud; el código indica la nomenclatura usada en el modelo.

Fuente	Código	Definición
Cruceros	Z_PEND	Pendiente de distribución de tamaños del zooplancton durante el periodo de vida del pez y la zona respectiva.
	Z_A_PRM	Abundancia promedio de la abundancia total durante el periodo de vida y la zona respectiva.
	Z_PRP_COP	Proporción de copépodos durante el periodo de vida del pez y la zona respectiva.
	Z_PRP_GEL_C	Proporción de gelatinosos carnívoros (medusas, quetognatos y ctenóforos) durante el periodo de vida del pez y la zona respectiva.
Satelital	CHL_PR_Z	Clorofila promedio para cada periodo y zona respectiva.
	CHL_PR_T	Clorofila promedio para cada periodo y área total evaluada.
	CHL_AC_Z	Clorofila acumulada para cada periodo y zona respectiva.
	CHL_PR_T	Clorofila acumulada para cada periodo y área total evaluada.

Tabla 14. Definición de las covariables asociadas al ambiente utilizadas en el modelado de la longitud, el código indica la nomenclatura usada en el modelo.

Fuente	Código	Definición
Satelital	EK_PUM	Valor acumulado de bombeo de Ekman, para el periodo y zona respectiva. Valores positivos indican afloramiento de agua por bombeo de Ekman.
	EK_TRA	Suma de valores diarios para el transporte de Ekman (en Sverdrups) durante el periodo y la zona respectiva. Valores negativos indican surgencia.
	SOI_PRM	Promedio de valores mensuales del índice de oscilación del sur, para el periodo correspondiente. Valores negativos indican El Niño. En serie mensual se usa -7 como umbral (límite superior) para definir condición Niño.
	SAM_PRM	Promedios de valores mensuales del índice de movimiento de los vientos del oeste en el hemisferio sur para el periodo correspondiente. Valores positivos/negativos del SAM indican vientos zonales más débiles/fuertes en la franja de 40-65 grados S.
	TSM_SINOP_Z	Medida de la amplitud de las oscilaciones de escala sinóptica en la temperatura superficial del mar para el periodo y la zona respectiva. Mientras mayor el valor, mayores las oscilaciones.
	TSM_SINOP_T	Medida de la amplitud de las oscilaciones de escala sinóptica en la temperatura superficial del mar para el periodo y el área total evaluada. Mientras mayor el valor, mayores las oscilaciones.
	TSM_GR_DA_Z	Suma de las anomalías de la temperatura superficial del mar durante cada periodo y zona.

Cruceros	TSM_GR_DA_T	Suma de las anomalías de la temperatura superficial del mar durante cada periodo y área total evaluada.
	TSM_CO_INT_Z	Suma del índice de enfriamiento superficial para cada periodo y zona respectiva. Mientras menor será el valor, más intensa la surgencia en ese periodo y zona.
	TSM_CO_INT_T	Suma del índice de enfriamiento superficial para cada periodo y área total. Mientras menor será el valor, más intensa la surgencia en ese periodo y área total evaluada.
	Ox_Prm20m	Promedio del oxígeno disuelto en los primeros 20 m durante el periodo de vida del pez y zona.
	Ox_PrmCMOx	Promedio de la profundidad del límite superior de la capa de mínimo oxígeno durante el periodo de vida del pez y zona.

Para analizar el enfoque de modelación, se evaluó el número de observaciones faltantes y el balance de información en los datos ambientales y de alimento para el conjunto de cohortes analizadas. En cuanto a los datos faltantes, se observan distintos periodos de completitud para diferentes grupos de variables (Figura 52).

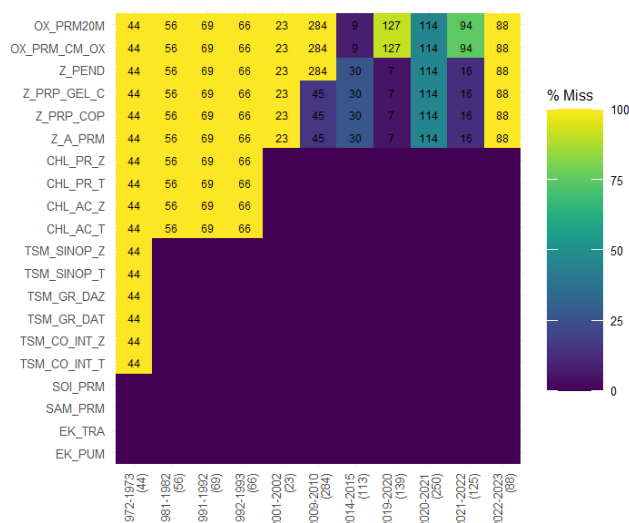


Figura 52. Distribución de datos faltantes por variable y cohorte. Valores al interior de las celdas indican el número de datos faltantes, celdas sin número indican completitud de datos y valores entre paréntesis debajo de cada cohorte indica el tamaño de muestra de anchovetas.

Con base en estos resultados, se adoptó como estrategia el modelado de cuatro periodos de cohortes y la incorporación de las variables predictoras según su completitud y significancia en el ajuste. A continuación, se detallan los periodos y covariables consideradas:

## 1) Modelo 1: Período entre 1973 y 2023

$$\text{Longitud (cm)} = \text{EDAD\_D:CH} + \text{EDAD} + \text{ESTACION} + s(\text{SOI\_PRM}) + s(\text{EK\_TRA}) + s(\text{EK\_PUM}) + s(\text{SAM\_PRM})$$

## 2) Modelo 2: Período entre 1981 y 2023

$$\text{Longitud (cm)} = \text{EDAD\_D:CH} + \text{EDAD} + \text{ESTACION} + s(\text{EK\_TRA}) + s(\text{SOI\_PRM}) + s(\text{TSM\_SINOP\_Z}) + s(\text{TSM\_SINOP\_T}) + s(\text{TSM\_GR\_DAZ}) + s(\text{TSM\_GR\_DAT}) + s(\text{TSM\_CO\_INT\_Z}) + s(\text{TSM\_CO\_INT\_T})$$

## 3) Modelo 3: Período entre 2001 y 2023

$$\text{Longitud (cm)} = \text{EDAD\_D:CH} + \text{EDAD} + \text{ESTACION} + s(\text{EK\_TRA}) + s(\text{TSM\_SINOP\_Z}) + s(\text{TSM\_GR\_DAZ}) + s(\text{TSM\_CO\_INT\_Z}) + s(\text{CHL\_PR\_Z}) + s(\text{CHL\_PR\_T}) + s(\text{CHL\_AC\_Z}) + s(\text{CHL\_AC\_T})$$

## 4) Modelo 4: Período entre 2009 y 2022

$$\text{Longitud (cm)} = \text{EDAD\_D:CH} + \text{EDAD} + \text{ESTACION} + s(\text{EK\_TRA}) + s(\text{TSM\_SINOP\_Z}) + s(\text{TSM\_GR\_DAZ}) + s(\text{TSM\_CO\_INT\_Z}) + s(\text{CHL\_PR\_Z}) + s(\text{Z\_PEND}) + s(\text{Z\_A\_PRM}) + s(\text{Z\_PRP\_COP}) + s(\text{Z\_PRP\_GEL\_C})$$

## 1) Modelo 1: Período entre 1973 y 2023

Los resultados del análisis de curvatura para las variables suavizadas del valor acumulado de bombeo de Ekman (EK\_PUM) y la suma diaria del transporte de Ekman (EK\_TRA), así como el índice de oscilación del sur (SOI\_PRM) y del índice de movimiento de los vientos del oeste en el hemisferio sur (SAM\_PRM) muestran un índice de concurvatura superior al umbral (0,6), lo que sugiere que uno de los términos suaves puede aproximarse mediante el otro. Por esta razón, solo se utilizaron en el modelo la suma diaria del transporte de Ekman y el promedio mensual del índice de oscilación del sur (SOI\_PRM) (Tabla 15).

Tabla 15. Índice de concurvidad de pares para las variables suavizadas transporte y bombeo de Ekman y los índices de oscilaci3n del sur y de movimiento de los vientos del oeste en el hemisferio sur. Variables en negrita indican que fueron seleccionadas para el modelo.

Concurvidad	1972-1973 a 2022-2023			
	s(EK_TRA)	s(EK_PUM)	s(SOI_PRM)	s(SAM_PRM)
s(EK_TRA)	-	<b>0,82</b>	0,12	0,18
s(EK_PUM)	<b>0,85</b>	-	0,19	0,12
s(SOI_PRM)	0,12	0,10	-	<b>0,43</b>
s(SAM_PRM)	0,06	0,07	<b>0,61</b>	-

Todos los predictores paramétricos y suavizados fueron significativos (Tabla 16A), indicando relaciones no lineales entre la longitud y los predictores suavizados (un GLE>1 indica una relaci3n no lineal), presentando un ajuste con un alto grado de explicaci3n, con una devianza explicada del 90%, destacando la edad y cohortes con un 72%, seguido por el índice de oscilaci3n del sur (SOI\_PRM) y el transporte de Ekman (EK\_TRA), con porcentajes de variabilidad total explicada en torno al 11%. La estaci3n del ańo, aunque presenta diferencias significativas entre longitudes, muestra el menor grado de explicaci3n (Tabla 16C). Por otra parte, los coeficientes paramétricos son en general consistentes con las tendencias estimadas obtenidas desde el modelo lineal generalizado presentado en el objetivo anterior, en el sentido de mostrar una disminuci3n en los coeficientes de las cohortes respecto a la de referencia 1972-1973 (Tabla 16B).

Tabla 16. Resumen del ajuste para la totalidad de las cohortes. Pruebas de significancia estadística (A), coeficientes estimados de los términos paramétricos (B) y niveles y porcentajes de explicación total y de cada termino (C).

(A) Prueba de significancia de términos				
Términos suavizados				
Término	GLE	GLR	Estadístico	Valor P
s(EK_TRA)	6,66	7,84	4,37	< 0,0001
s(SOI_PRM)	7,92	8,71	6,68	< 0,0001
Términos paramétricos				
Término	GL	Estadístico F		Valor p
EDAD_D	1	1,56		0,212
CH_	10	36,81		< 0,0001
ESTACION	3	11,13		< 0,0001
EDAD_D:CH_	10	26,17		< 0,0001
(C) Niveles y porcentajes de explicación				
Término	Pseudo-R2	% Explic.		
EDAD_D:CH_	0,282	31,4 %		
EDAD_D	0,188	20,9 %		
CH_	0,181	20,1 %		
s(SOI_PRM)	0,106	11,7 %		
s(EK_TRA)	0,095	10,6 %		
ESTACION	0,048	5,3 %		
Total	0,900	100,0 %		

(B) Coeficientes estimados términos paramétricos				
Término	Estimación	EE	Estadístico	Valor P
(Intercepto)	9,4859	0,7271	13,05	< 0,0001
EDAD_D	0,0094	0,0075	1,25	0,212
CH_1981-1982	-1,3877	0,9369	-1,48	0,139
CH_1991-1992	-4,6118	1,1860	-3,89	< 0,0001
CH_1992-1993	-7,8284	1,0047	-7,79	< 0,0001
CH_2001-2002	-10,4605	2,0509	-5,10	< 0,0001
CH_2009-2010	-4,2999	0,7869	-5,46	< 0,0001
CH_2014-2015	-5,2738	0,8598	-6,13	< 0,0001
CH_2019-2020	-6,2740	0,7636	-8,22	< 0,0001
CH_2020-2021	-8,2672	0,7773	-10,64	< 0,0001
CH_2021-2022	-10,3525	0,7785	-13,30	< 0,0001
CH_2022-2023	-8,9485	0,7951	-11,26	< 0,0001
ESTACION_Primavera	-0,3774	0,0784	-4,81	< 0,0001
ESTACION_Verano	-0,0335	0,1476	-0,23	0,821
ESTACION_Otoño	-0,4207	0,1725	-2,44	0,015
EDAD_D:CH_1981-1982	0,0121	0,0096	1,25	0,21
EDAD_D:CH_1991-1992	0,0401	0,0103	3,89	< 0,0001
EDAD_D:CH_1992-1993	0,0666	0,0093	7,15	< 0,0001
EDAD_D:CH_2001-2002	0,0722	0,0169	4,26	< 0,0001
EDAD_D:CH_2009-2010	0,0384	0,0080	4,78	< 0,0001
EDAD_D:CH_2014-2015	0,0456	0,0085	5,37	< 0,0001
EDAD_D:CH_2019-2020	0,0304	0,0080	3,79	< 0,0001
EDAD_D:CH_2020-2021	0,0538	0,0079	6,85	< 0,0001
EDAD_D:CH_2021-2022	0,0801	0,0079	10,15	< 0,0001
EDAD_D:CH_2022-2023	0,0554	0,0080	6,96	< 0,0001

El análisis residual no muestra desviaciones importantes de los supuestos del modelo, presentando residuos asintóticamente normales (qq-plot e histograma), indicando una adecuada elección de la función de enlace (predictor lineal vs la devianza residual) y manteniendo el efecto lineal en el modelo de los predictores paramétricos (Figura 53). El ajuste evidenció dos periodos de reducción de la longitud total, una primera caída gradual desde la cohorte inicial hasta el periodo 2001-2002 y una segunda disminución desde la cohorte del 2009-2010 a la última cohorte de análisis, con longitudes medias por sobre la media histórica para las cohortes 1972-1973 a 1991-1992 y 2009-2010 a 2014-2015 (Figura 54A). Respecto a la estación de nacimiento de la cohorte, las longitudes medias son mayores en las estaciones de invierno y verano en comparación a las de otoño y primavera (Figura 54B).

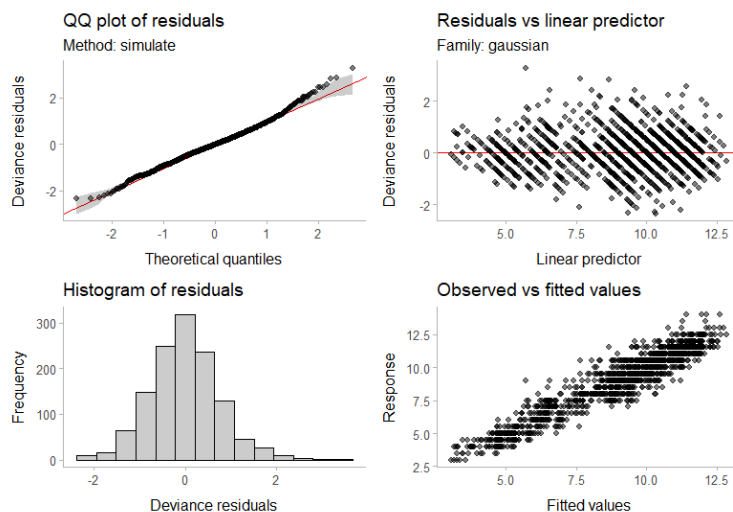


Figura 53. Gráficos residuales del modelo para la totalidad de las cohortes, QQ plot de normalidad, residuos versus el predictor lineal, histograma de los residuos y los valores predichos versus la respuesta.

En relación con los efectos en la longitud de las variables suavizadas, éstos mostraron una relación no lineal en ambas variables (Figura 54C y D). La suma de transportes de Ekman diarios durante el periodo de vida del individuo y la zona con valores mayores que -5 indican un efecto positivo en la longitud, sugiriendo que eventos de menor surgencia en la zona y periodo de vida, tienden a mostrar mejores condiciones para el crecimiento (Figura 54C). El promedio de variaciones mensuales del índice de oscilación del sur para la zona y periodo de vida del individuo presentan una ventana ambiental, favoreciendo el crecimiento en longitud en condiciones neutras, entre valores de -1 y 1, con un efecto negativo sobre las longitudes fuera de este intervalo (Figura 54D).

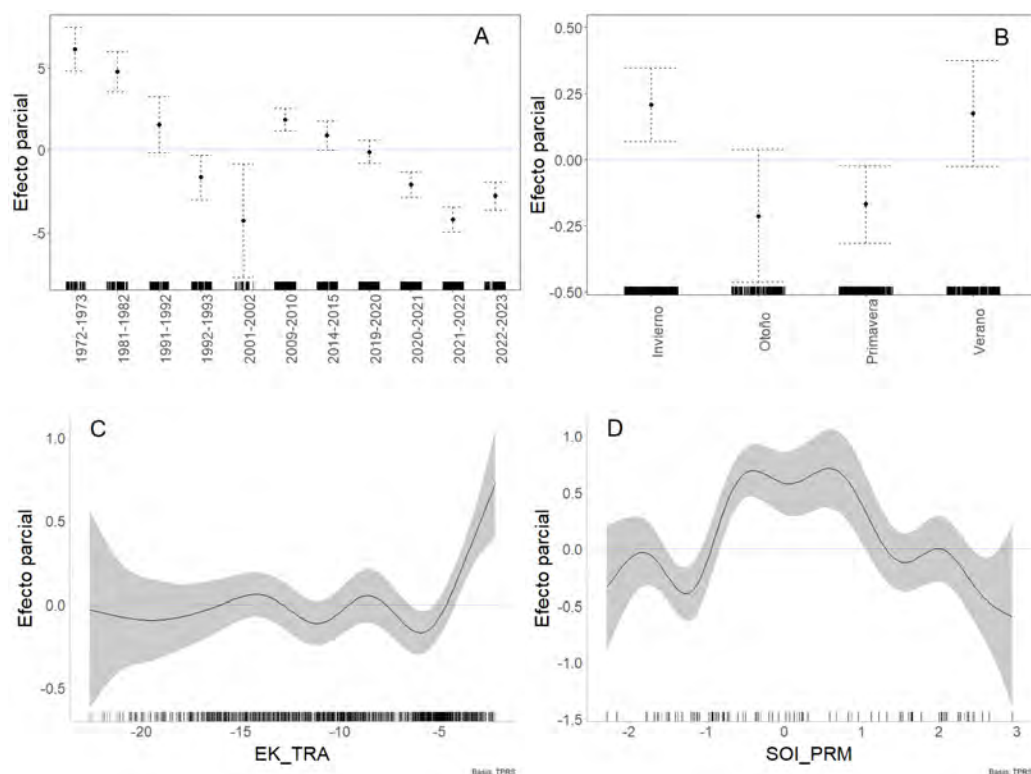


Figura 54. Gráfico del efecto parcial sobre la longitud para los términos paramétricos cohorte (A) y estación (B) y los términos suavizados transporte de Ekman (C) e índice de oscilación del sur (D).

## 2) Modelo 2: Periodo entre 1981 y 2023

Las covariables ambientales probadas en el modelo fueron EK\_TRA, TSM\_SINOP\_Z y TSM\_GR\_DAZ ambas para la zona y periodo de vida del individuo (Tabla 17) las que presentaron índice de concurridad menor al umbral de 0,6. Todos los predictores paramétricos y suavizados fueron significativos (Tabla 18A), indicando relaciones no lineales entre la longitud y los predictores suavizados. El ajuste tuvo un 91% de explicación de la devianza, con cerca del 30% de este porcentaje dado por los predictores no lineales. De igual forma a lo observado en el modelo con la totalidad de las cohortes, la estación del año, aunque significativa en el modelo, muestra el menor grado de explicación (Tabla 18C), mientras que los coeficientes paramétricos son en general consistentes con las tendencias estimadas, aunque en este ajuste no se considera la primera cohorte (Tabla 18B).

Tabla 17. Índice de concurvidad de pares para las variables suavizadas transporte de Ekman, índices de oscilaci3n del sur e índices basados en la temperatura superficial del mar. Variables en negrita indican que fueron seleccionadas para el modelo.

Concurvidad	1981-1982 al 2022-2023					
	s(EK_TRA)	s(SOI_PRM)	s(TSM_SINOP_Z)	s(TSM_SINOP_T)	s(TSM_GR_DAZ)	s(TSM_CO_INT_T)
s(EK_TRA)		0,13	0,15	0,13	0,11	0,08
s(SOI_PRM)	0,13		<b>0,66</b>	<b>0,63</b>	<b>0,67</b>	<b>0,67</b>
s(TSM_SINOP_Z)	0,27	<b>0,63</b>		<b>0,89</b>	0,43	0,46
s(TSM_SINOP_T)	0,13	0,34	<b>0,84</b>		0,27	0,30
s(TSM_GR_DAZ)	0,17	0,59	0,24	0,27		<b>0,95</b>
s(TSM_GR_DAT)	0,16	<b>0,71</b>	0,38	0,43	<b>0,95</b>	
s(TSM_CO_INT_Z)	0,11	0,20	0,29	0,33	0,22	0,24
s(TSM_CO_INT_T)	0,13	0,12	0,34	0,36	0,26	0,26

El análisis residual no muestra desviaciones importantes de los supuestos del modelo, presentando residuos asintóticamente normales (qq-plot e histograma), indicando una adecuada elecci3n de la funci3n de enlace (predictor lineal vs la devianza residual) y manteniendo el efecto lineal en el modelo de los predictores paramétricos (Figura 55).

Tabla 18. Resumen del ajuste para las cohortes desde 1981-1982. Pruebas de significancia estadística (A), coeficientes estimados de los términos paramétricos (B) y niveles y porcentajes de explicaci3n total y de cada término (C).

(A) Prueba de significancia de términos				
Térmicos suavizados				
Término	GLE	GLR	Estadístico	Valor P
s(EK_TRA)	6,12	7,33	6,88	< 0,0001
s(TSM_SINOP_Z)	4,92	6,05	3,90	< 0,0001
s(TSM_GR_DAZ)	7,19	8,19	8,17	< 0,0001
s(TSM_CO_INT_Z)	6,57	7,68	9,75	< 0,0001
Térmicos paramétricos				
Término	GL	Estadístico F		Valor p
EDAD_D	1	6,2		0,0127
CH_	9	26,9		< 0,0001
ESTACION	3	13,5		< 0,0001
EDAD_D:CH_	9	21,6		< 0,0001

(B) Coeficientes estimados térmicos paramétricos				
Término	Estimación	EE	Estadístico	Valor P
(Intercepto)	9,0233	0,7118	12,68	< 0,0001
EDAD_D	0,0171	0,0068	2,50	0,013
CH_1991-1992	-2,5469	1,5539	-1,64	0,101
CH_1992-1993	-7,4111	0,9997	-7,41	< 0,0001
CH_2001-2002	-10,3245	2,0045	-5,15	< 0,0001
CH_2009-2010	-3,1474	0,7874	-4,00	< 0,0001
CH_2014-2015	-4,3884	0,8392	-5,23	< 0,0001
CH_2019-2020	-6,6942	0,7343	-9,12	< 0,0001
CH_2020-2021	-6,5003	0,7532	-8,63	< 0,0001
CH_2021-2022	-10,1214	0,8004	-12,65	< 0,0001
CH_2022-2023	-8,3729	0,8605	-9,73	< 0,0001
ESTACION_Primavera	-0,5535	0,0941	-5,88	< 0,0001
ESTACION_Verano	-0,2382	0,1676	-1,42	0,156



(C) Niveles y porcentajes de explicaci3n			ESTACION_Otoño	-0,1659	0,2403	-0,69	0,49
Término	Pseudo-R2	% Explic.	EDAD_D:CH_1991-1992	0,0270	0,0124	2,19	0,029
EDAD_D:CH_	0,246	27,0 %	EDAD_D:CH_1992-1993	0,0594	0,0100	5,92	< 0,0001
EDAD_D	0,172	18,9 %	EDAD_D:CH_2001-2002	0,0703	0,0165	4,26	< 0,0001
CH_	0,153	16,8 %	EDAD_D:CH_2009-2010	0,0218	0,0075	2,91	0,004
s(EK_TRA)	0,100	11,0 %	EDAD_D:CH_2014-2015	0,0352	0,0079	4,46	< 0,0001
s(TSM_SINOP_Z)	0,066	7,3 %	EDAD_D:CH_2019-2020	0,0284	0,0074	3,85	< 0,0001
s(TSM_GR_DAZ)	0,065	7,2 %	EDAD_D:CH_2020-2021	0,0376	0,0073	5,17	< 0,0001
s(TSM_CO_INT_Z)	0,061	6,6 %	EDAD_D:CH_2021-2022	0,0750	0,0081	9,30	< 0,0001
ESTACION	0,048	5,3 %	EDAD_D:CH_2022-2023	0,0458	0,0088	5,20	< 0,0001
Total	0,911	100,0 %					

Para este periodo de análisis, se mantiene la identificaci3n de dos periodos de reducci3n y el mismo patr3n descrito para la totalidad de las cohortes (Figura 56A). Respecto a las estaciones de la cohorte de nacimiento, se observa que solo en la estaci3n de invierno presenta longitudes medias mayores en comparaci3n a las dem3s estaciones (Figura 56B).

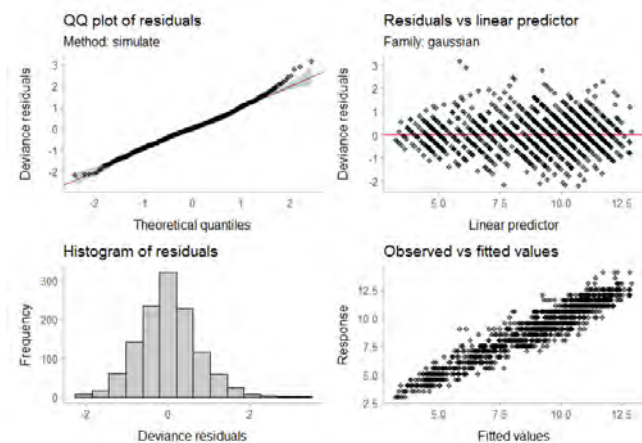


Figura 55. Gr3ficos residuales del modelo para las cohortes desde 1981-1982. QQ plot de normalidad, residuos versus el predictor lineal, histograma de los residuos y los valores predichos versus la respuesta.

En relaci3n con los efectos en la longitud de las variables suavizadas, se observ3 una relaci3n no lineal en las cuatro variables (Figura 56C a F). La suma de transportes de Ekman muestra un

comportamiento similar a lo descrito para la totalidad de las cohortes, con un efecto positivo en la longitud para valores superiores a  $-5$  (Figura 56C).

Para el promedio de las oscilaciones de escala sinóptica de la TSM, se observan fluctuaciones de efectos positivos y negativos sobre la longitud en el intervalo entre valores cercanos a 0,2 y 0,6, con un efecto positivo por sobre este límite, mostrando que amplitudes de las oscilaciones mayores al valor de 0,6 favorecerían el crecimiento (Figura 56D). Similar patrón muestra la suma de anomalías de la TSM para el periodo de vida del individuo y la zona, con efectos fluctuantes en el intervalo de los -200 a los 100 de anomalías acumuladas, con un efecto negativo a partir del límite superior y positivo a partir del límite inferior (Figura 56E). Por último, la suma del índice de enfriamiento superficial para cada periodo de vida del individuo y zona muestra un efecto positivo en la longitud para valores negativos y disminuyendo el efecto hacia valores positivos, lo que indicaría que condiciones de surgencia más intensas, favorecerían el crecimiento en longitud (Figura 56F).

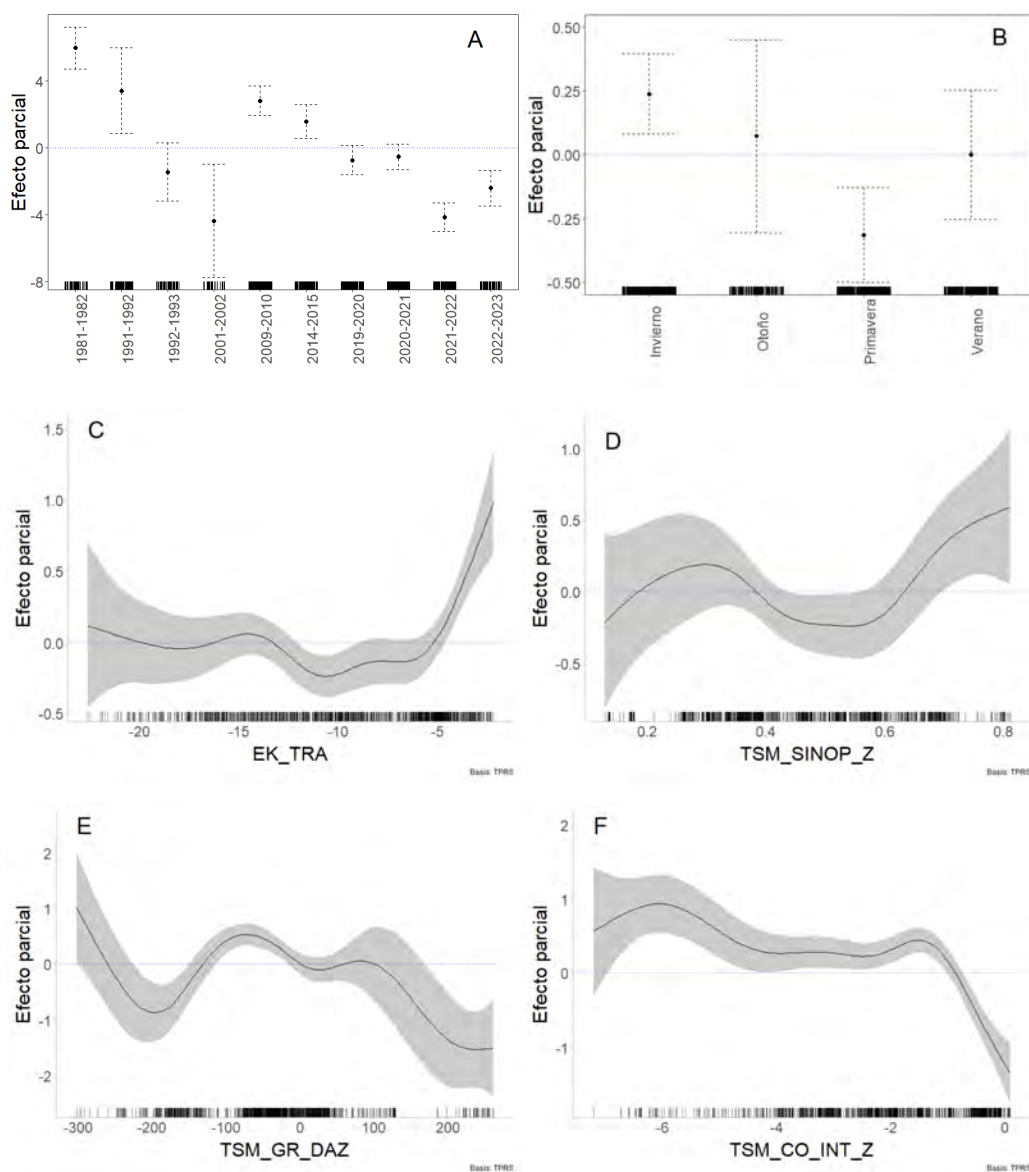


Figura 56. Gráfico del efecto parcial sobre la longitud para los términos paramétricos cohorte (A) y estación (B) y los términos suavizados transporte de Ekman (C), oscilación de la TSM sinóptica (D), anomalías acumuladas de la TSM (E) e índice de enfriamiento (F) por periodo de vida y zona (F).

### 3) Modelo 3: Período entre 2001 y 2023

Al tercer modelo se incorporaron dos covariables que presentaron bajo indicador de concurvidad, que fueron CHL\_AC\_Z y CHL\_AC\_T (Tabla 19). Los resultados del análisis de devianza muestran que los predictores no lineales asociados a la clorofila  $s(\text{CHL\_PR\_T})$  y  $s(\text{CHL\_AC\_Z})$  no son significativos (valor  $p > 0,05$ ), por lo que fueron eliminados del modelo (Tabla 20). Todos los predictores paramétricos y suavizados fueron significativos (Tabla 18A), indicando relaciones no lineales entre la longitud y los predictores suavizados. El ajuste tuvo un 91% de explicación de la devianza, con cerca del 30% dado por los predictores no lineales. De igual forma a lo observado en el modelo con la totalidad de las cohortes, la estación del año, aunque significativa en el modelo, muestra el menor grado de explicación (Tabla 18C), mientras que los coeficientes paramétricos estimados son consistentes con los resultados obtenidos, aunque en este ajuste no está considerada la primera cohorte (Tabla 18B).

Tabla 19. Índice de concurvidad de pares para las variables suavizadas transporte de Ekman, índices basados en la temperatura y en la clorofila superficial del mar. Variables en negrita indican que fueron seleccionadas para el modelo.

	2001-2002 al 2022-2023							
	s(EK_TRA)	s(TSM_SINOP_Z)	s(TSM_GR_DAZ)	s(TSM_CO_INT_Z)	s(CHL_PR_Z)	s(CHL_PR_T)	s(CHL_AC_Z)	s(CHL_AC_T)
s(EK_TRA)		0,17	0,14	0,14	0,09	0,09	0,34	0,44
s(TSM_SINOP_Z)	0,30		0,52	0,22	0,14	0,23	0,22	0,28
s(TSM_GR_DAZ)	0,24	0,30		0,10	0,08	0,14	0,17	0,22
s(TSM_CO_INT_Z)	0,15	0,39	0,39		0,44	0,33	0,42	0,40
s(CHL_PR_Z)	0,18	0,15	0,13	0,37		0,37	0,45	0,25
s(CHL_PR_T)	0,10	0,31	0,13	0,39	0,36		0,37	0,50
s(CHL_AC_Z)	0,14	0,25	0,12	0,39	0,48	0,20		<b>0,78</b>
s(CHL_AC_T)	0,11	0,26	0,08	0,41	0,24	0,35	<b>0,75</b>	

Tabla 20. Tabla de análisis de devianza de los efectos no lineales para el modelo que considera las cohortes desde 2001-2002 al 2022-2023.

Término	GLE	GLR	Estadístico	Valor P
s(EK_TRA)	7,08	8,13	5,6	< 0,0001
s(TSM_SINOP_Z)	3,43	4,31	2,4	0,044
s(TSM_GR_DAZ)	6,81	7,89	7,0	< 0,0001
s(TSM_CO_INT_Z)	6,08	7,16	8,7	< 0,0001
s(CHL_PR_Z)	6,83	7,72	3,1	0,001
s(CHL_PR_T)	2,49	3,14	1,7	0,158
s(CHL_AC_Z)	2,08	2,64	2,1	0,115

Todos los predictores paramétricos y suavizados fueron significativos (Tabla 21A), indicando relaciones no lineales entre la longitud y los predictores suavizados. El ajuste tuvo un 92% de explicación de la devianza, con cerca del 40% de este porcentaje dado por los predictores no lineales.

Similar a lo observado para los modelos anteriores con diferentes periodos de cohorte, la estación del año muestra una de los menores grado de explicación (Tabla 21C), mientras que los coeficientes paramétricos son en general consistentes con las tendencias estimadas para los demás periodos de cohorte (Tabla 21B). El análisis residual no muestra desviaciones importantes de los supuestos del modelo, presentando residuos asintóticamente normales (qq-plot e histograma), indicando una adecuada elección de la función de enlace (predictor lineal vs la devianza residual) y manteniendo el efecto lineal en el modelo de los predictores paramétricos (Figura 57).

Tabla 21. Resumen del ajuste para las cohortes desde 2001-2002. Pruebas de significancia estadística (A), coeficientes estimados de los términos paramétricos (B) y niveles y porcentajes de explicación total y de cada termino (C).

(A) Prueba de significancia de términos					(B) Coeficientes estimados térmicos paramétricos				
Térmicos suavizados					Término	Estimación	EE	Estadístico	Valor P
Término	GLE	GLR	Estadístico	Valor P	(Intercepto)	-1,2926	2,0744	-0,62	0,533
s(EK_TRA)	7,25	8,27	5,47	< 0,0001	EDAD_D	0,0871	0,0159	5,49	< 0,0001
s(TSM_SINOP_Z)	3,71	4,66	2,29	0,047	CH_2009-2010	7,5497	2,0702	3,65	< 0,0001
s(TSM_GR_DAZ)	6,97	8,04	7,00	< 0,0001	CH_2014-2015	5,7877	2,0987	2,76	< 0,0001
s(TSM_CO_INT_Z)	5,94	7,07	8,55	< 0,0001	CH_2019-2020	3,7240	2,0774	1,79	0,073
s(CHL_PR_Z)	7,09	7,97	3,87	0,0001	CH_2020-2021	3,1066	2,0492	1,52	0,130
Térmicos paramétricos					CH_2021-2022	0,2538	2,0750	0,12	0,903
					131				

Término	GL	Estadístico F	Valor p
EDAD_D	1	6,2	0,0127
CH_	9	26,9	< 0,0001
ESTACION	3	13,5	< 0,0001
EDAD_D:CH_	9	21,6	< 0,0001

(C) Niveles y porcentajes de explicaci3n		
Término	Pseudo-R2	% Explic.
EDAD_D:CH_	0,216	23,6 %
EDAD_D	0,166	18,0 %
CH_	0,117	12,8 %
s(EK_TRA)	0,111	12,1 %
s(TSM_SINOP_Z)	0,076	8,2 %
s(TSM_GR_DAZ)	0,069	7,5 %
s(TSM_CO_INT_Z)	0,060	6,5 %
ESTACION	0,056	6,1 %
s(CHL_PR_Z)	0,047	5,1 %
Total	0,917	100,0 %

CH_2022-2023	1,4675	2,1077	0,70	0,486
ESTACION_Primavera	-0,5024	0,0989	-5,08	< 0,0001
ESTACION_Verano	-0,2597	0,2054	-1,26	0,206
ESTACION_Otoño	-0,2998	0,2741	-1,09	0,274
EDAD_D:CH_2009-2010	-0,0497	0,0158	-3,14	0,002
EDAD_D:CH_2014-2015	-0,0330	0,0161	-2,05	0,041
EDAD_D:CH_2019-2020	-0,0445	0,0161	-2,77	0,006
EDAD_D:CH_2020-2021	-0,0248	0,0159	-1,56	0,120
EDAD_D:CH_2021-2022	0,0031	0,0162	0,19	0,850
EDAD_D:CH_2022-2023	-0,0181	0,0169	-1,07	< 0,0001

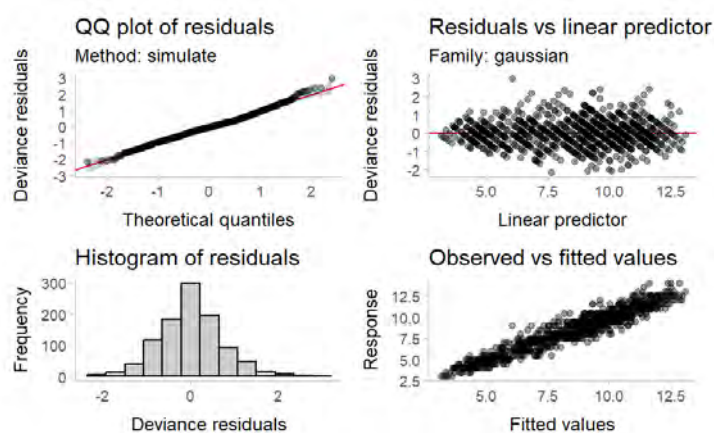


Figura 57. Gráficos residuales del modelo para las cohortes desde 2001-2002. QQ plot de normalidad, residuos versus el predictor lineal, histograma de los residuos y los valores predichos versus la respuesta.

Para este periodo de análisis se observa el patr3n de tendencia registrado para los demás periodos de cohortes (Figura 58A). Respecto a las estaciones de la cohorte de nacimiento, nuevamente se observan mayores longitudes medias en la estaci3n de invierno en comparaci3n a las demás estaciones (Figura 58B).

En relaci3n con los efectos en la longitud de las variables suavizadas, éstas mostraron una relaci3n no lineal en las cinco variables (Figura 58). Los predictores utilizados en los modelos para los

anteriores periodos de cohortes (EK\_TRA, TSM\_SINOP\_Z, TSM\_GR\_DAZ y TSM\_CO\_INT\_Z) muestra en general el mismo comportamiento descrito, con un efecto positivo en la longitud para valores superiores a  $-5$  del transporte de Ekman (Figura 58C), oscilaciones de escala sin3ptica de la TSM con fluctuaciones en el intervalo entre valores de 0,2 y 0,6 (Figura 58D), con efectos fluctuantes en la longitud para anomalías acumuladas de la TSM en el intervalo de los -200 a los 100 (Figura 58E) y un efecto positivo en la longitud de la acumulaci3n del índice de enfriamiento superficial hacia valores negativos (Figura 58F).

Por último, la clorofila promedio por periodo de vida del individuo y zona muestra un efecto de fluctuaciones de efectos positivos y negativos entre en intervalo de valores de 1,5 y 2,5, favoreciendo el crecimiento en longitud para valores inferiores y siendo desfavorable para valores superiores a estos límites (Figura 58G).

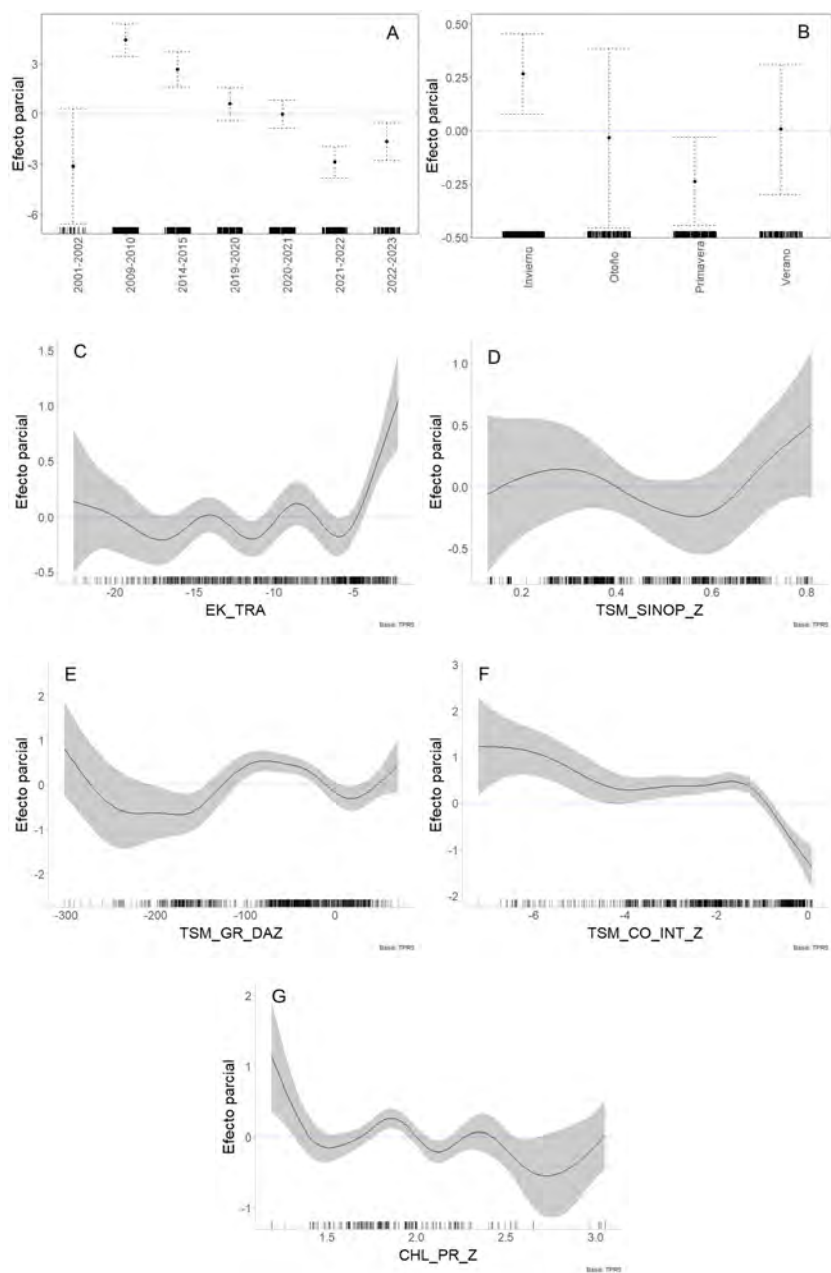


Figura 58. Gráfico del efecto parcial sobre la longitud para los términos paramétricos cohorte (A) y estación (B) y los términos suavizados transporte de Ekman (C), oscilación de la TSM sinóptica (D), anomalías acumuladas de la TSM (E), índice de enfriamiento (F) y clorofila promedio por periodo de vida y zona (G).



#### 4) Modelo 4: Período entre 2009 y 2022

Los resultados del análisis de curvatura muestran un índice de concurvidad superior al umbral en las variables suavizadas de acumulación de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM\_GR\_DAZ), pendiente (A\_PEND) y abundancia promedio (Z\_A\_PRM) del zooplancton para el período de vida del individuo por zona, separándolas del proceso de ajuste (Tabla 22).

Tabla 22. Índice de concurvidad de pares para las variables suavizadas transporte de Ekman, índices basados en la temperatura y clorofila superficial del mar y en la composición del zooplancton. Variables en negrita indican que fueron seleccionadas para el modelo.

	2009-2010 al 2021-2022								
	s(EK_TRA)	s(TSM_SINOP_Z)	s(TSM_GR_DAZ)	s(TSM_CO_INT_Z)	s(CHL_PR_Z)	s(Z_PEND)	s(Z_A_PRM)	s(Z_PRP_COP)	s(Z_PRP_GEL_C)
s(EK_TRA)		0,20	0,17	0,11	0,35	0,35	0,21	0,27	0,32
s(TSM_SINOP_Z)	0,28		<b>0,75</b>	0,50	0,36	0,45	<b>0,83</b>	0,32	0,31
s(TSM_GR_DAZ)	0,28	<b>0,64</b>		0,34	0,19	0,26	<b>0,74</b>	0,34	0,23
s(TSM_CO_INT_Z)	0,36	0,51	0,57		0,45	0,18	0,43	0,32	0,32
s(CHL_PR_Z)	0,25	0,37	0,42	0,29		0,34	0,45	0,33	0,32
s(Z_PEND)	0,33	<b>0,64</b>	0,54	0,28	0,34		0,52	0,57	0,29
s(Z_A_PRM)	0,33	<b>0,66</b>	0,54	0,24	0,37	0,46		0,33	0,35
s(Z_PRP_COP)	0,38	0,29	0,32	0,37	0,31	<b>0,64</b>	0,26		0,33
s(Z_PRP_GEL_C)	0,37	0,36	0,35	0,36	0,33	0,55	0,34	0,42	

Los resultados del análisis de devianza indican que los predictores asociados tanto a la clorofila promedio para el período de vida y la zona, como a la estación del año de nacimiento, no son significativos (valor  $p > 0,05$ ), por lo cual fueron excluidos del modelo (Tabla 23).

Por otra parte, todos los predictores paramétricos y suavizados fueron significativos (Tabla 24A), indicando relaciones no lineales entre la longitud y los predictores suavizados. El ajuste tuvo un 92% de explicación de la devianza, con cerca del 40% de este porcentaje dado por los predictores no lineales (Tabla 24C) y similar a lo observado para los modelos anteriores con diferentes períodos de cohorte, los coeficientes paramétricos, son en general consistentes con las tendencias estimadas en los demás períodos (Tabla 25B).

Tabla 23. Tabla de an3lisis de devianza de los efectos no lineales para el modelo que considera las cohortes desde 2009-2010 al 2021-2022.

T3rminos suavizados				
T3rmino	GLE	GLR	Estadístico	Valor P
s(EK_TRA)	6,71	7,82	3,4	0,001
s(TSM_SINOP_Z)	6,72	7,79	4,7	< 0,0001
s(TSM_CO_INT_Z)	5,55	6,64	3,7	< 0,0001
s(CHL_PR_Z)	5,27	6,36	1,8	0,07
s(Z_PRP_COP)	7,40	8,23	6,9	< 0,0001
s(Z_PRP_GEL_C)	6,24	7,23	7,2	< 0,0001
T3rminos param3tricos				
T3rmino	GL	Estadístico F	Valor p	
EDAD_D	1	107,5	< 0,0001	
CH_	4	20,3	< 0,0001	
ESTACION	3	2,2	0,092	
EDAD_D:CH_	4	12,9	< 0,0001	

El an3lisis residual no muestra desviaciones importantes de los supuestos del modelo, presentando residuos asint3ticamente normales (qq-plot e histograma), indicando una adecuada elecci3n de la funci3n de enlace (predictor lineal vs la devianza residual) y manteniendo el efecto lineal en el modelo de los predictores param3tricos (Figura 59).

Tabla 24. Resumen del ajuste para las cohortes desde 2009-2010 al 2021-2022. Pruebas de significancia estadística (A), coeficientes estimados de los términos paramétricos (B) y niveles y porcentajes de explicación total y de cada término (C).

(A) Prueba de significancia de términos					(B) Coeficientes estimados términos paramétricos				
Términos suavizados					Término	Estimación	EE	Estadístico	Valor P
Término	GLE	GLR	Estadístico	Valor P	(Intercept)	6,0781	0,4349	13,98	< 0,0001
s(EK_TRA)	7,35	8,34	4,59	< 0,0001	EDAD_D	0,0408	0,0038	10,75	< 0,0001
s(TSM_SINOP_Z)	6,03	7,17	3,83	< 0,0001	CH_2014-2015	-1,6889	0,6274	-2,69	< 0,0001
s(TSM_CO_INT_Z)	5,81	6,89	6,93	< 0,0001	CH_2019-2020	-3,5174	0,5806	-6,06	< 0,0001
s(Z_PRP_COP)	7,86	8,55	7,85	< 0,0001	CH_2020-2021	-4,7572	0,5412	-8,79	< 0,0001
s(Z_PRP_GEL_C)	5,89	6,87	7,08	< 0,0001	CH_2021-2022	-8,0053	0,7016	-11,41	< 0,0001
Términos paramétricos					EDAD_D:CH_2014-2015	0,0128	0,0052	2,47	0,014
Término	GL	Estadístico F		Valor p	EDAD_D:CH_2019-2020	0,0051	0,0061	0,84	0,40
EDAD_D	1	115,6		< 0,0001	EDAD_D:CH_2020-2021	0,0274	0,0043	6,30	< 0,0001
CH_	4	33,5		< 0,0001	EDAD_D:CH_2021-2022	0,0410	0,0052	7,88	< 0,0001
EDAD_D:CH_	4	19,4		< 0,0001					

(C) Niveles y porcentajes de explicación		
Término	Pseudo-R2	% Explic.
EDAD_D:CH_	0,213	22,7 %
EDAD_D	0,180	19,2 %
CH_	0,126	13,4 %
s(EK_TRA)	0,113	12,0 %
s(Z_PRP_GEL_C)	0,096	10,2 %
s(TSM_SINOP_Z)	0,079	8,4 %
s(Z_PRP_COP)	0,072	7,6 %
s(TSM_CO_INT_Z)	0,063	6,7 %
Total	0,941	100,0 %

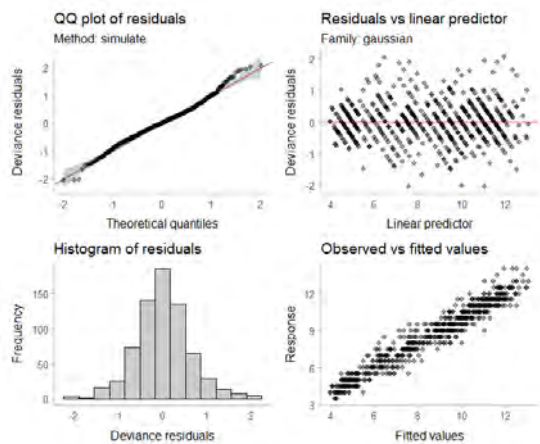


Figura 59. Gráficos residuales del modelo para las cohortes desde 2009-2010 al 2021-2022. QQ plot de normalidad, residuos versus el predictor lineal, histograma de los residuos y los valores predichos versus la respuesta.

Para este periodo de análisis se observa un patrón de tendencia entre cohortes similar al registrado para los demás periodos de estudio (Figura 60A). En relación con los efectos en la longitud de las variables suavizadas, éstos mostraron una relación no lineal en las cinco variables (Figura 60). Los predictores utilizados en los modelos para los anteriores periodos de cohortes (EK\_TRA, TSM\_SINOP\_Z y TSM\_CO\_INT\_Z) muestran en general el mismo comportamiento descrito, con un efecto positivo en la longitud para valores superiores a  $-5$  del transporte de Ekman (Figura 60B), oscilaciones de escala sinóptica de la TSM con fluctuaciones en el intervalo entre valores de 0,2 y 0,6 (Figura 60C) y un efecto positivo en la longitud de la acumulación del índice de enfriamiento superficial hacia valores negativos (Figura 60D).

Por último, la proporción de copépodos para el periodo de vida del individuo y zona muestra un efecto de fluctuaciones de efectos positivos y negativos en el intervalo del 40% al 80%, favoreciendo el crecimiento en longitud para valores superiores a este límite (Figura 60E), mientras que la proporción de gelatinosos carnívoros mayores al 2%, presentaría un efecto positivo en las longitudes totales (Figura 60F).

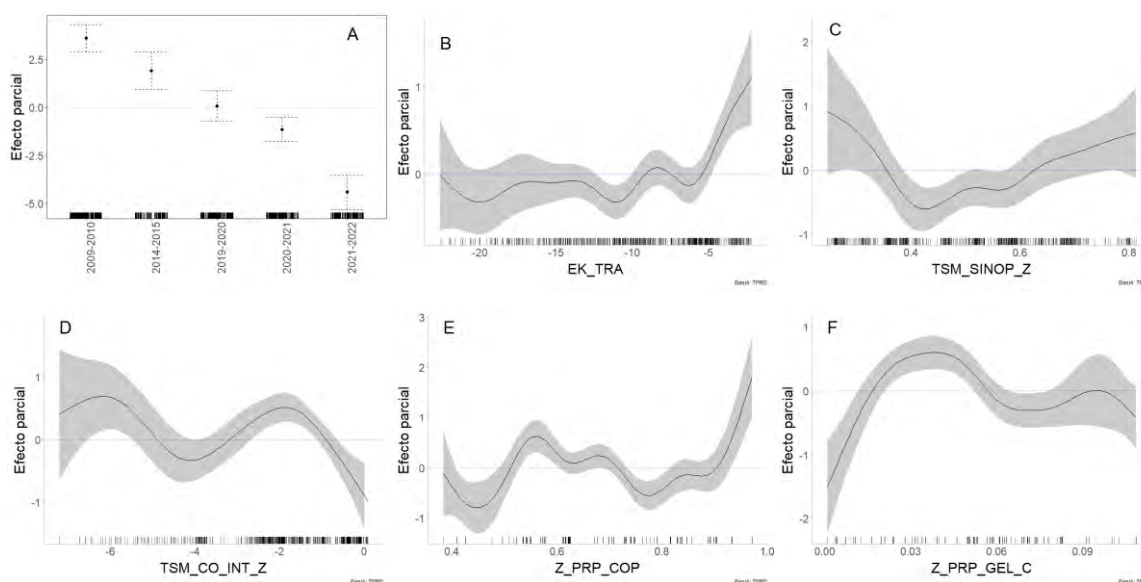


Figura 60. Gráfico del efecto parcial sobre la longitud para el término paramétrico cohorte (A) y los términos suavizados transporte de Ekman (B), oscilación de la TSM sinóptica (C), índice de enfriamiento (D), la proporción de copépodos (E) y la proporción de gelatinosos carnívoros por periodo de vida y zona (G).

#### 4.2.4.2 Modelo GAM para longitud y condición corporal de la anchoveta

Se modeló la longitud y el factor de condición para la anchoveta con un modelo GAM, incluyendo el efecto ambiental a través de la temperatura superficial del mar (TSM), clorofila y sus tendencias, con el fin de cuantificar el efecto entre la variabilidad en la longitud y el aumento de la temperatura a largo plazo. Además, se analizó el efecto de la condición corporal en la longitud, utilizando el factor de condición (K) y su tendencia. El modelo GAM para la longitud explicó el 79,3% de la variabilidad total en la longitud. Las covariables que aportaron significativamente al modelo fueron el año, la zona, la estación, la clorofila y la tendencia de la temperatura. La condición corporal y su tendencia no fueron significativas (Tabla 25 y Figura 61). Al respecto, los coeficientes decrecieron a partir del año 2015 en comparación con el año 1997 (referencia), mostrando una disminución en la variable respuesta. Para las zonas se observó una diferencia latitudinal con menores longitudes de norte a sur, es decir mayores en la zona de Antofagasta (Tabla 25 y Figura 61). La clorofila mostró una relación negativa

con la longitud, mientras que la tendencia de la temperatura mostró una relación levemente positiva (Figura 63b y d). Para el factor de condición (K), el modelo GAM explicó el 32,5% de la variabilidad total (Tabla 26 y Figura 62). Las covariables que aportaron significativamente al modelo fueron el año, la zona, la estación, la clorofila y la tendencia de la temperatura. El K mostró coeficientes negativos entre el año 2002 y 2012, indicando una disminución de la condición. Sin embargo, ésta se torna positiva desde 2013 a 2022 (Figura 62). La clorofila mostró una relación positiva con K, registrando mayores valores con clorofilas menores que  $2 \text{ mg/m}^3$  y la tendencia de la temperatura mostró una relación levemente positiva con K (Figura 63a y c).

Tabla 25. Resultados del modelo aditivo generalizado (GAM) entre la longitud y el ambiente.

Variables	Estimaci3nn	Error_Estandar	Valor_p
(Intercept)	13.3731	0.1304	0
as.factor(year)1999	1.5936	0.1543	1.16035E-23
as.factor(year)2000	2.6482	0.1587	2.17865E-54
as.factor(year)2001	2.4792	0.1605	9.5812E-48
as.factor(year)2002	1.3977	0.1623	3.37387E-17
as.factor(year)2003	2.0049	0.1642	9.75474E-32
as.factor(year)2004	1.2981	0.1657	1.36901E-14
as.factor(year)2005	2.0275	0.1622	4.42094E-33
as.factor(year)2006	1.8353	0.1579	4.05614E-29
as.factor(year)2007	1.3273	0.1553	5.7798E-17
as.factor(year)2008	1.3505	0.1583	6.29086E-17
as.factor(year)2009	1.0154	0.1574	1.84149E-10
as.factor(year)2010	0.8456	0.1582	1.15417E-07
as.factor(year)2011	0.9697	0.1597	1.87714E-09
as.factor(year)2012	1.2134	0.1548	1.34993E-14
as.factor(year)2013	1.0987	0.1567	4.80326E-12
as.factor(year)2014	0.7253	0.1593	6.02595E-06
as.factor(year)2015	-0.4505	0.1569	0.004189667
as.factor(year)2016	-1.2285	0.1601	4.48185E-14
as.factor(year)2017	-0.7385	0.1600	4.49346E-06
as.factor(year)2018	-0.2522	0.1627	0.121514427
as.factor(year)2019	-0.9733	0.1612	2.29575E-09
as.factor(year)2020	-1.6658	0.1573	1.01687E-24
as.factor(year)2021	-0.6881	0.1602	1.94503E-05
as.factor(year)2022	-0.5882	0.1654	0.000395522
as.factor(estacion)2	0.2904	0.0946	0.002215191
as.factor(estacion)3	0.0413	0.0817	0.613034093
as.factor(zona)2	0.4449	0.0535	3.6507E-16
as.factor(zona)3	0.7960	0.0538	2.60746E-44

	edf	Ref.df	F	p-value
s(ten_temp)	1.949	2.335	14.651	2.78E-07 ***
s(clo)	2.786	2.967	3.284	0.0231 *

R-sq.(adj) = 0.785    Deviance explained = 79.3%  
GCV = 0.43602    Scale est. = 0.41968    n = 900

Tabla 26. Resultados del modelo aditivo generalizado (GAM) entre la condici3n corporal y el ambiente.

Variables	Estimaci3nn	Error_Estandar	Valor_p
(Intercept)	0.9691	0.0088	0
as.factor(year)1999	0.0452	0.0105	2.04357E-05
as.factor(year)2000	0.0469	0.0108	1.64802E-05
as.factor(year)2001	0.0070	0.0109	0.521644153
as.factor(year)2002	-0.0095	0.0111	0.389421268
as.factor(year)2003	-0.0033	0.0112	0.767488958
as.factor(year)2004	-0.0060	0.0113	0.593714912
as.factor(year)2005	0.0087	0.0111	0.429269686
as.factor(year)2006	-0.0001	0.0108	0.993184024
as.factor(year)2007	0.0062	0.0106	0.560484191
as.factor(year)2008	-0.0170	0.0108	0.114971257
as.factor(year)2009	-0.0175	0.0107	0.102828656
as.factor(year)2010	-0.0020	0.0108	0.85413591
as.factor(year)2011	-0.0085	0.0109	0.437337812
as.factor(year)2012	-0.0096	0.0106	0.365392501
as.factor(year)2013	0.0288	0.0107	0.007171551
as.factor(year)2014	0.0302	0.0109	0.005489582
as.factor(year)2015	-0.0090	0.0107	0.403001069
as.factor(year)2016	0.0101	0.0109	0.355207426
as.factor(year)2017	0.0295	0.0109	0.007070322
as.factor(year)2018	0.0304	0.0111	0.006408933
as.factor(year)2019	-0.0276	0.0110	0.012365484
as.factor(year)2020	0.0102	0.0107	0.343611036
as.factor(year)2021	0.0358	0.0109	0.001104573
as.factor(year)2022	-0.0063	0.0113	0.575271023
as.factor(estacion)2	0.0037	0.0062	0.55134761
as.factor(estacion)3	0.0430	0.0053	2.5733E-15
as.factor(zona)2	0.0183	0.0036	5.75922E-07
as.factor(zona)3	0.0188	0.0037	4.05319E-07

	edf	Ref.df	F	p-value
s(ten_temp)	1.278	1.497	4.23	0.028711 *
s(clo)	2.541	2.858	6.607	0.000501 ***

R-sq.(adj) = 0.3 Deviance explained = 32.5%  
GCV = 0.002039 Scale est. = 0.0019647 n = 900



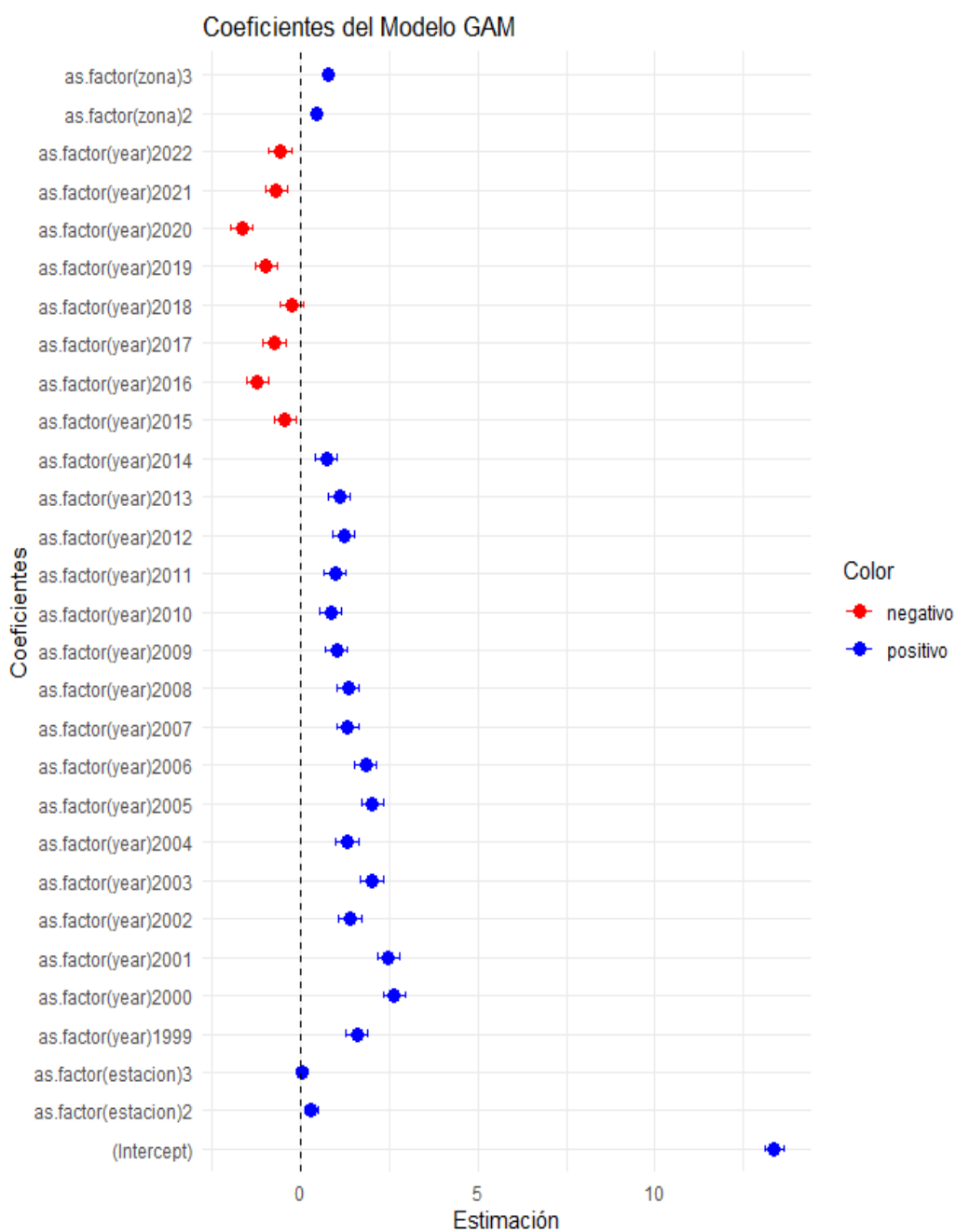


Figura 61. Estimaci3n de los coeficientes de las variables explicativas, a3o, estaci3n y zona para la Longitud total (cm).

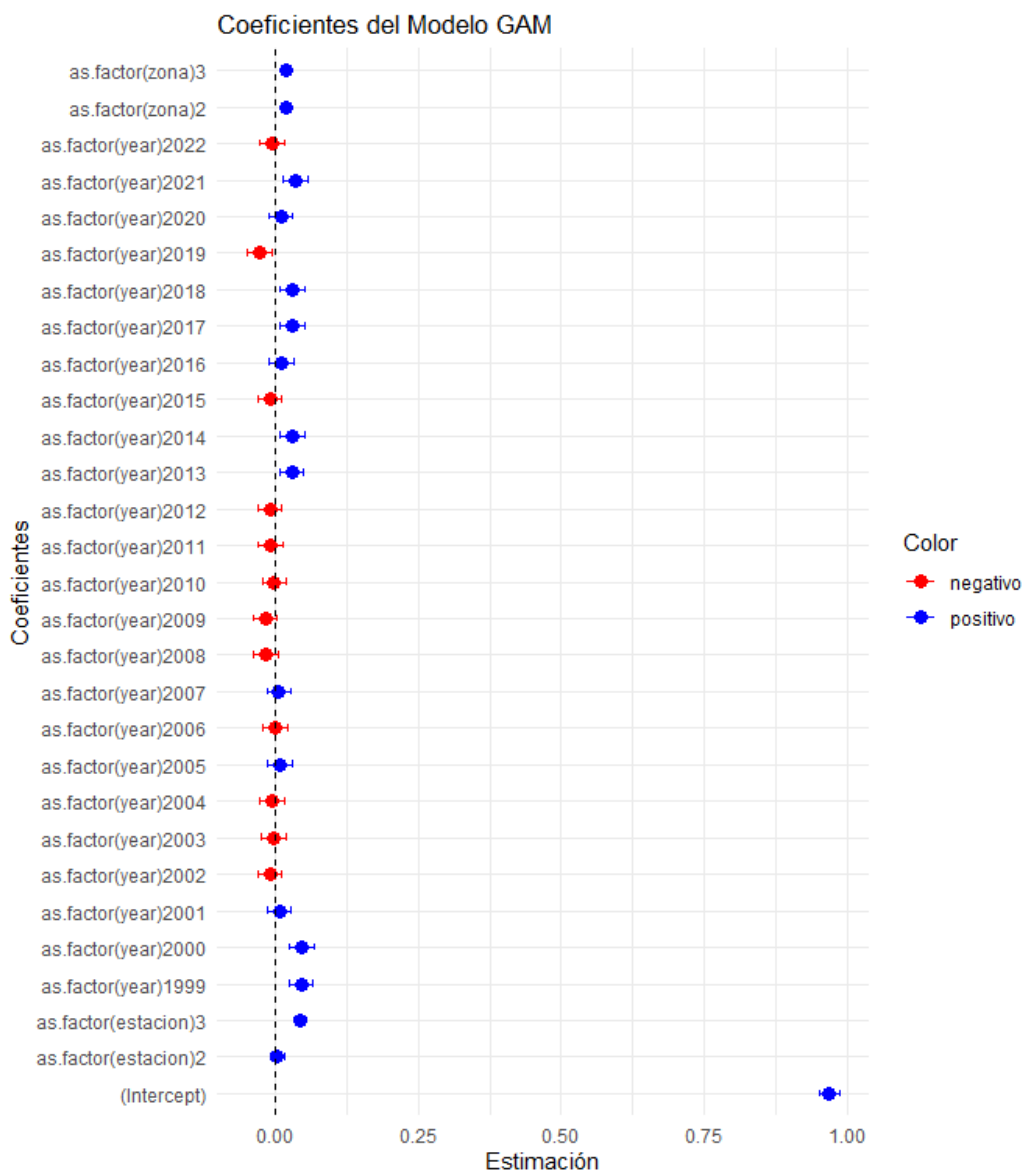


Figura 62. Estimaci3n de los coeficientes de las variables explicativas, a3o, estaci3n y zona para la condici3n corporal.

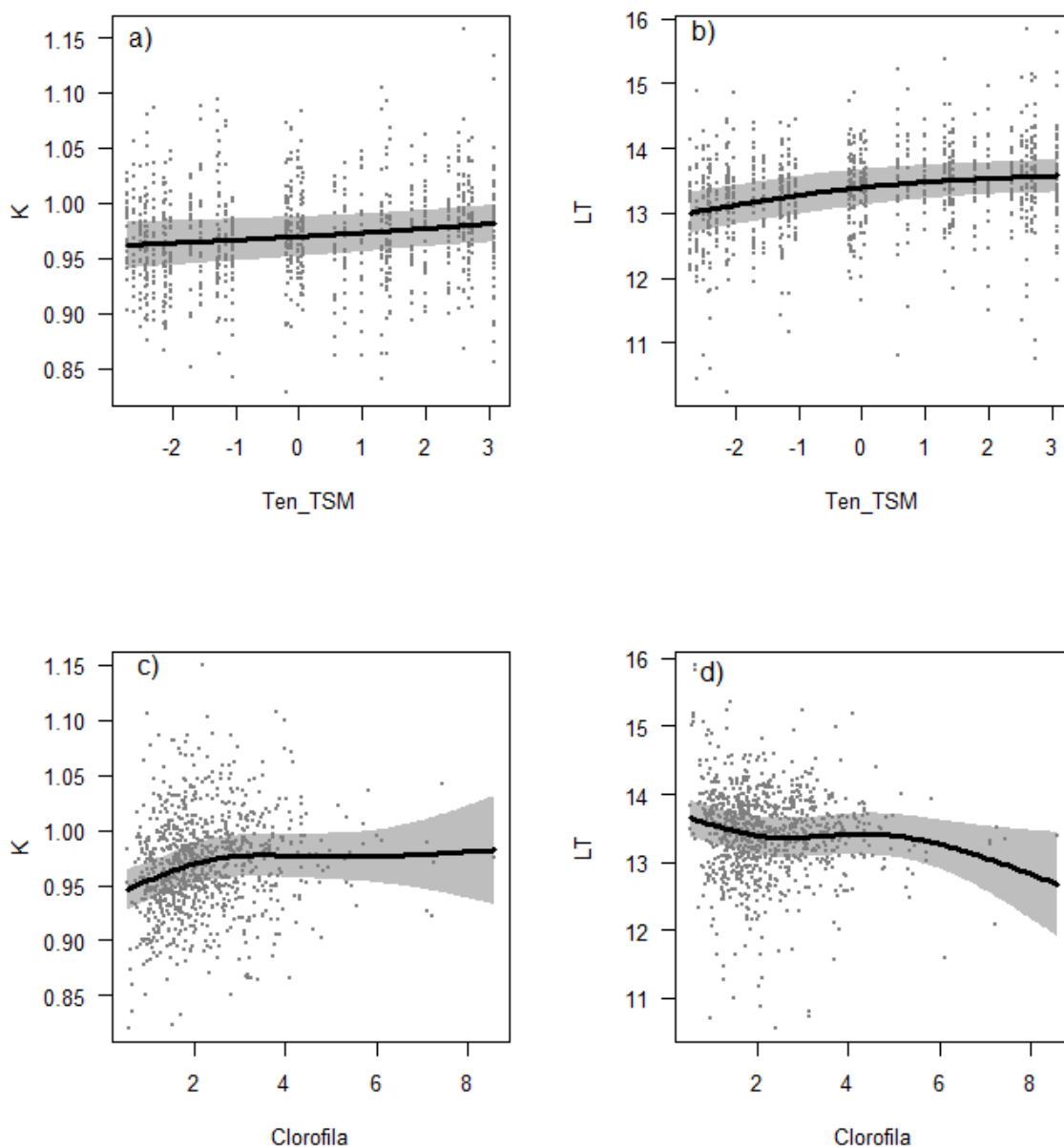


Figura 63. Relaci3n entre la clorofila y tendencia de la temperatura (Ten\_TSM) para la variable respuesta longitud total a) y c) y condici3n corporal (K) b) y d).

#### 4.2.3 Resultados de la búsqueda bibliográfica

Las cadenas de búsqueda dieron como resultado 632 y 908 estudios, respectivamente. Aquellos estudios fuera del alcance de esta revisión fueron excluidos después de leer el título, el resumen y/o trabajo completo de ser necesario. Las razones de exclusión fueron: i) exploraron otros temas fuera del alcance de esta revisión; ii) el estudio se enfocaba en otras especies, no clupeidos; o iii) informaron los temas de búsqueda solo de manera auxiliar. La mayoría de los estudios excluidos estaban dentro de las primeras dos categorías. Posteriormente, se procedió a incorporar artículos no reconocidos por nuestra cadena de búsqueda y que, según nuestro conocimiento y experiencia, eran pertinentes al tema. Adicionalmente, se incluyeron trabajos citados por los estudios previamente analizados. Sin considerar los trabajos excluidos, la lista final fue de 109 estudios.

Al separar los resultados por tema de búsqueda (factores que influyen sobre el crecimiento vs. los que influyen sobre la talla corporal) se tuvo como resultado un total 88 y 21 estudios, respectivamente. Cabe señalar que, para ambas búsquedas, la mayoría de los estudios se centraron en los estados tempranos de desarrollo (ej. larva o juvenil), con solo unos pocos enfocados en adultos.

De acuerdo con los resultados expuestos en la Tabla 27, la revisión encontró 13 factores que podrían producir un truncamiento del crecimiento, en donde la temperatura parece ser el más importante, seguido por la disponibilidad de alimento (cantidad y calidad de presa) y los factores denso-dependientes.

Al realizar un desglose de las especies de estudio, se identificó un total de 19 especies, en donde destaca *Engraulis encrasicolus*, seguida por *Clupea harengus*, *Engraulis japonicus* y *Engraulis ringens*.

Sobre los factores que afectan la talla corporal Tabla 28, se encontró un total de 10 factores en donde destaca la disponibilidad de alimento, seguido por la temperatura del agua. El total de especies registradas en este análisis fue de seis, siendo las especies más estudiadas *Engraulis encrasicolus* y *Sardina pilchardus*.

En el caso de *Engraulis ringens* existen 11 estudios referentes a factores que afectan el crecimiento, y en 8 de ellos aparece la temperatura como causa principal. Por su parte, se encontró

solo dos estudios enfocados en la talla corporal, con la temperatura como principal causa, seguida de la disponibilidad de alimento.

Por su parte, la revisión de los Informes Técnicos de las sesiones de los CCT PP entre 2019-2022 arrojó como posible causa de la disminución en la talla media y talla de madurez de la anchoveta en la zona norte: (1) la presión ejercida por la pesca o algún gatillante ambiental, o (2) la migración de los ejemplares más pequeños hacia áreas más aptas, como la zona centro norte. Adicionalmente se plantea que la disminución de las tallas y pesos medios no se relaciona a otros efectos, como un potencial cambio de selectividad al arte de pesca, porque la información de los cruceros hidroacústicos, donde se usa una red con amplio espectro de captura, muestra la misma tendencia decreciente.

Tabla 27. Lista de variables que afectan las tasas de crecimiento de grupo de los Clupeidos.

Variable	Factor	Especie de estudio	Principales hallazgos	Referencias
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis encrasicolus</i>	Juveniles presentan tasas de crecimiento significativamente mayores en las zonas cálidas en comparación a aguas costeras (más frías).	Aldanondo et al. (2010)
Múltiples	Temperatura Disponibilidad de alimento	<i>Clupea harengus</i>	Las temperaturas más altas combinadas con la limitación de alimento redujeron significativamente el crecimiento y la cinemática de natación de las larvas. Específicamente, las larvas mostraron locomoción reducida y movimientos verticales reducidos.	Allan et al. (2022)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Clupea harengus</i>	Un aumento en la temperatura por sobre el umbral fisiológico de tolerancia produce una reducción en la tasa de crecimiento y un aumento en la mortalidad de larvas.	Ariola et al. (2015)
Variables ambientales	Temperatura	Clupeidae	El fenómeno del encogimiento de los peces ante aguas más calientes es general en la historia evolutiva de los clupeiformes y en toda su	Avaria-Llautureo et al. (2021)

			distribución geográfica mundial. Existe una alta probabilidad de que estas especies enfrenten riesgos de extinción mayores producto del cambio climático ya que se ve limitada su capacidad de encontrar hábitats óptimos.	
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis encrasicolus</i>	Las diferencias de crecimiento entre cohortes se debieron principalmente a las diferencias de temperatura del agua que encontraron los peces durante sus períodos larvarios y juveniles. Las altas tasas de crecimiento de los individuos de la cohorte de verano pueden haberles conferido ventajas ecológicas y mejorado su supervivencia.	Bacha y Amara (2012)
Variables ambientales	Clorofila	<i>Engraulis encrasicolus</i>	Se observó una gran variación del crecimiento entre áreas, explicándose principalmente por cambios en la concentración de clorofila, mientras que el efecto de la temperatura era más importante para el parámetro de longitud asintótica.	Basilone et al. (2004)
Variables ambientales	Temperatura Clorofila	<i>Engraulis encrasicolus</i>	La temperatura y la concentración de clorofila parecen tener un claro efecto en la tasa de crecimiento de juveniles. Por otra parte, el mes en el que eclosionan las larvas parece también ser importante, determinando diferentes patrones de crecimiento. Estos hallazgos podrían atribuirse tanto a mecanismos de crecimiento intrínsecos como a factores externos.	Basilone et al. (2009)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis encrasicolus</i>	La temperatura es el factor determinante del crecimiento, especialmente a la talla-edad 1. Adicionalmente, se indica una relación negativa con la	Basilone et al. (2017)

			productividad primaria, pero positiva con la transparencia. La menor concentraci3n de alimentos en 1reas costeras puede compensarse con una mayor visibilidad de las presas.	
Interacciones tr3ficas	Disponibilidad alimento	<i>Clupea pallasii</i>	Los arenques j3venes del a1o pueden crecer mejor en a1os c1lidos porque el momento de las presas clave coincide mejor con su primera alimentaci3n.	Batten et al. (2016)
M3ltiples	Competencia intraespec3fica Temperatura Salinidad	<i>Clupea harengus</i>	La disminuci3n de la talla est1 alineada con factores denso-dependientes, con un aumento de la biomasa desovante y una posible disminuci3n del suministro de alimento durante la d3cada de 1990. Sin embargo, la temperatura y la salinidad tambi3n fueron importantes.	Becker et al. (2020)
Denso-dependiente	Competencia intraespec3fica	<i>Engraulis encrasicolus</i> <i>Sardina pilchardus</i>	Factores denso-dependientes tiene un fuerte efecto en el crecimiento de la anchoveta a edad 0 y 1, m1s que los factores ambientales. Mientras que para la sardina el mayor efecto se vio relacionado con la disponibilidad de alimento. Aunque la pesca ejerci3 una fuerte presi3n de selecci3n en la anchoveta, se produjo mortalidad selectiva a mayores tallas, incluso con tasas de captura bajas en ambas especies, lo que sugiere que esto podr3a ser un proceso natural que afecta a estas peque1as especies de peces pel1gicos.	Bo3ns et al. (2021)
M3ltiples	Competencia intraespec3fica Disponibilidad de alimento	<i>Engraulis encrasicolus</i> <i>Sardina pilchardus</i>	Pese a tener patrones ecol3gicos similares, los factores determinantes del crecimiento son diferentes. Mientras que en anchoveta los factores parecen estar relacionados con la	Bo3ns et al. (2023)

			abundancia (biomasa) y la desaparici3n de ejemplares grandes (¿pesquería?), para la sardina los factores est3n relacionados con procesos bottom-up (cambios en la cantidad y calidad de alimento).	
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis encrasicolus</i>	El per3odo de crecimiento m3s lento para machos y hembras se estima entre febrero y abril, que es el per3odo con una temperatura del agua relativamente baja y, en consecuencia, la anchoa en el sur del Mar Negro tiene un patr3n de crecimiento estacional.	Bolgin et al. (2013)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Clupea harengus</i>	La temperatura del agua es un factor determinante para el crecimiento a nivel de especie, afectando directamente la tasa de crecimiento (k) e inversamente relacionada al peso asint3tico. El calentamiento global deber3a mejorar el crecimiento de las clases de edad m3s j3venes, pero reducir el crecimiento de los individuos mayores y acortar la vida 3til del arenque.	Brunel y Dickey-Collas (2010)
Interacciones tr3ficas	Calidad de las presas	<i>Engraulis spp.</i> <i>Sardinops sagax</i>	El cambio hacia un plancton m3s peque1o ha provocado una reducci3n en la tasa de crecimiento de ambas especies. El efecto fue m3s perjudicial sobre el crecimiento de la anchoveta porque no puede filtrar peque1as part3culas.	Canales et al. (2016)
Interacciones tr3ficas	Disponibilidad alimento	<i>Engraulis sp</i>	La disminuci3n del plancton ha provocado una reducci3n en la tasa de crecimiento, debido a que la anchoveta es incapaz de filtrar part3culas peque1as.	Canales et al. (2015)
Denso-dependiente	Competencia interespec3fica	<i>Clupea harengus</i>	Un aumento en la abundancia de espadines desacopla el crecimiento del arenque con respecto a factores hidrodin3micos y se convierte en el	Casini et al. (2010)



			principal impulsor de las variaciones en el crecimiento del arenque.	
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis anchita</i>	El crecimiento en estado larval est1 determinado por las condiciones ambientales. La talla a la primera alimentaci3n est1 determinada por la temperatura, produciendo diferencias entre stock a lo largo de su distribuci3n	Castello y Castello (2002)
M1ltiples	Temperatura Efecto parental	<i>Strangomera bentincki</i>	Las condiciones ambientales encontradas por las cohortes durante el per3odo de desove podr3an modular la tasa de crecimiento de la sardina com1n a1o tras a1o, pero la posibilidad de que otros factores intr3secos afecten la din1mica de crecimiento de la sardina com1n tambi3n podr3a ser importantes y merecen ser considerados en estudios futuros.	Castillo-Jord1n et al. (2010)
M1ltiples	Temperatura Disponibilidad de alimento	<i>Engraulis encrasicolus</i>	Altas temperaturas junto con poco alimento son perjudiciales para el crecimiento de larvas.	Catal1n et al. (2010)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis ringens</i>	Existe una alta plasticidad en el patr3n de crecimiento temprano de <i>E. ringens</i> , con la temperatura desempe1ando un papel fundamental en las variaciones espacio-temporales. Altas temperaturas se asocian con mayor crecimiento diario. No se encontr3 una relaci3n positiva entre clorofila y tasa de crecimiento temprano.	Cerna et al. (2022)
M1ltiples	Temperatura Selecci3n no natural por pesquera	<i>Engraulis japonicus</i>	La tasa de crecimiento de las larvas es dependiente de la temperatura. Un aumento en la mortalidad por pesca reduce la densidad, incrementando la tasa de crecimiento individual	Chiu y Chen (2000)

Múltiples	Condición maternal Temperatura	<i>Clupea harengus</i>	Los factores intrínsecos (edad y maduración) determinan en gran medida el crecimiento, pero factores extrínsecos como la temperatura también tienen cierta influencia. Si bien el papel de los factores intrínsecos fue independiente de la duración de la serie temporal, la importancia de los factores extrínsecos varía mucho según el período de tiempo analizado. En general, los efectos ambientales sobre el crecimiento se volvieron menos claros y relevantes a medida que aumentaban las series temporales. Por lo tanto, lo que impulsa la variación en el crecimiento puede cambiar con el tiempo, potencialmente debido a impactos como la pesca o el cambio climático.	Claireaux et al (2022)
Variables ambientales	NA	<i>Engraulis ringens</i>	No se encontró una relación entre la tasa de crecimiento y las variables oceanográficas, lo que sugiere que otros factores (e.g. efecto parental), pueden explicar la disminución de las tasas de crecimiento larvario.	Contreras et al. (2016)
Variables ambientales	NA	<i>Engraulis encrasicolus</i>	No se encontró relación entre la tasa de crecimiento y los factores ambientales analizados (concentración alimento, temperatura, salinidad)	Cotano et al. (2008)
Denso-dependiente	Competencia intraespecífica	<i>Anchoa mitchilli</i>	Las tasas de crecimiento de las larvas tendieron a disminuir a medida que aumentaba la densidad de huevos.	Cowan y Houde (1990)
Denso-dependiente	Competencia intraespecífica	<i>Anchoa mitchilli</i>	A menores densidades poblacionales, la anchoveta aumentaría la tasa de crecimiento para disminuir la mortalidad y aumentar la reproducción.	Cowan et al. (1999)

Múltiples	Temperatura Factores intrínsecos	<i>Clupea pallasii</i> <i>Clupea harengus</i>	Meta-análisis de 26 stocks de arenques en el mundo. Plantea diversas razones o factores que explicarían las diferencias encontradas con respecto a crecimiento, talla y condición entre stocks: Temperatura, patrones migratorios, hábitats, adaptaciones locales.	dos Santos Schmidt et al. (2021)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Clupea harengus</i>	Es probable que el crecimiento haya disminuido en aguas más cálidas debido a la dura competencia de las presas para sustentar los costos reproductivos.	dos Santos Schmidt et al. (2020)
Múltiples	Temperatura Disponibilidad de alimento	<i>Engraulis encrasicolus</i>	El crecimiento de las larvas se ve afectado por la temperatura y la densidad del alimento.	Dulcic y Kraljevic (1996)
Variables ambientales	Oxígeno	<i>Engraulis capensis</i> <i>Clupea harengus</i> <i>Sardinops sagax</i>	Altos niveles de hipoxia alteran la capacidad de crecimiento a nivel de individuos y modifica la distribución a nivel de especie hacia lugares no comunes.	Ekau et al. (2010)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis ringens</i>	Existe una limitación térmica del crecimiento.	Flores-Valiente et al. (2023)
Variables ambientales	CO <sub>2</sub>	<i>Clupea harengus</i>	Los resultados indican que un aumento en el dióxido de carbono puede afectar negativamente el metabolismo de los embriones de arenque y por consiguiente reducir el crecimiento somático de las larvas.	Franke y Clemmesen (2011)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Sprattus fuegensis</i>	Se encontró una fuerte correlación entre la temperatura y la modulación del crecimiento de estados tempranos. Se considera la salinidad como posible factor. La salinidad modifica la distribución del zooplankton, afectando indirectamente el crecimiento de	García et al. (2020)

			estados tempranos.	
Interacciones tr3ficas	Disponibilidad alimento	<i>Engraulis encrasicolus</i>	Larvas deben encontrar parches de larvas de cop3podos para poder alimentarse, crecer y sobrevivir.	Garrido et al (2012)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Sardina pilchardus</i>	Se destaca c3mo peque1os cambios en la temperatura de desove pueden provocar grandes cambios en la supervivencia y el crecimiento de las larvas de sardina.	Garrido et al (2016)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis ringens</i>	La entrada de aguas m1s c1lidas a la costa podr3a explicar diferencias en la tasa de crecimiento entre cohortes, ya que el desarrollo larvario de cada cohorte pudo haber ocurrido en aguas con diferentes caracter3sticas.	Hern1ndez y Castro (2000)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis ringens</i>	La temperatura del agua parece ser un controlador importante del crecimiento diario para juveniles de <i>E. ringens</i> en la Corriente de Humboldt.	Hern1ndez et al. (2020)
M3ltiples	Disponibilidad alimento Competencia intraespec3fica	<i>Anchoa mitchilli</i>	La tasa de crecimiento en larvas se incrementa al aumentar la concentraci3n de alimento y disminuye al aumentar la densidad.	Houde (1977)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis encrasicolus</i>	Se proporciona evidencia circunstancial de que la temperatura influye principalmente en el reclutamiento a trav3s de los procesos de crecimiento y supervivencia durante el per3odo larval temprano.	Huebert et al. (2018)
M3ltiples	Competencia intraespec3fica Temperatura	Clupeidae	En general, se ha demostrado que la abundancia est1 correlacionada negativamente con las tasas de crecimiento del arenque y el espad3n. Tamb3n se ha demostrado que la temperatura est1	Hunter et al. (2019)

			correlacionada con el crecimiento y la maduraci3n, y aunque el efecto es consistente dentro de las especies, los efectos de la temperatura difieren entre el arenque y el espadin.	
Múltiples	Parámetros bioenergéticos Temperatura Disponibilidad de alimento	Clupeidae	Los resultados del modelo demuestran cómo la especificidad geográfica de los parámetros bioenergéticos, junto con la variaci3n específica de la temperatura y la disponibilidad de alimento, pueden combinarse para determinar las respuestas locales y regionales del crecimiento de los peces al forzamiento climático.	Ito et al. (2015)
Interacciones tróficas	Disponibilidad alimento	<i>Anchoa mitchilli</i>	Ni la temperatura ni la salinidad explican los cambios en las tasas de crecimiento, pero si la aparici3n de parches de zooplancton.	Jordan y Cowen (2000)
Variables ambientales	Salinidad	<i>Sprattus fuegensis</i>	No se encontró relaci3n entre crecimiento y salinidad.	Landaeta et al. (2012)
Múltiples	Disponibilidad alimento	<i>Engraulis mordax</i>	No se encontró correlaci3n entre el crecimiento y la temperatura, pero si con el alimento.	Methodt y Kramer (1979)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis ringens</i>	Aumento en la temperatura afecta negativamente las tasas de crecimiento de larvas.	Molina-Valdivia et al. (2020)
Interacciones tróficas	Calidad de las presas	<i>Clupea harengus</i> <i>Sprattus sprattus</i>	La disminuci3n de la tasa de crecimiento, el peso, la fertilidad y la abundancia de ambas especies se debe probablemente al cambio en la composici3n del zooplancton.	Möllmann et al. (2004)
Denso-dependiente	Competencia interespecífica	<i>Engraulis japonicus</i> / <i>Sardinops melanostictus</i>	La competencia intra-específica por alimento favorece a la especie que crece más rápido.	Nishikawa et al. (2022)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis ringens</i>	Larvas criadas en cautiverio crecieron más rápido en condiciones de mayor temperatura	Ofelio et al. (2023)

			(18.5°C) y alta concentración de presas, con respecto a condiciones opuestas.	
Variables ambientales	Temperatura	<i>Sardinops melanostictus</i>	Se espera que el crecimiento en la principal región de desove en un escenario de calentamiento global sea significativamente más lento que en el escenario actual.	Okunishi et al. (2012)
Denso-dependiente	No especifica	<i>Engraulis ringens</i>	Se sugiere un factor denso-dependiente que influenciaría las tasas de crecimiento.	Palomares et al. (1986)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis encrasicolus</i>	La temperatura parece tener un efecto positivo en las tasas de crecimiento de las larvas.	Palomera et al. (1988)
Múltiples	No especifica	<i>Engraulis mordax</i>	Existe variaciones en la tasa de crecimiento de larvas y juveniles entre diferentes latitudes y por stocks. Las variaciones en juveniles entre stocks podrían deberse a factores genéticos, diferencias en la estacionalidad del desove o factores ambientales.	Parrich et al. (1985)
Interacciones tróficas	Disponibilidad alimento	<i>Clupea harengus</i>	La limitación de alimentos puede ser un problema grave y recurrente para las larvas de peces en hábitats costeros. Ciertas presas cumplen un papel crucial en determinar las tasas de crecimiento de las larvas y, por lo tanto, el potencial reclutamiento.	Paulsen et al (2016)
Interacciones tróficas	Calidad de las presas	<i>Clupea harengus</i>	La reducción en el crecimiento de larvas se debe probablemente a la reducción de la cantidad y/o de la calidad del alimento.	Payne et al (2013)
Múltiples	Temperatura Disponibilidad de alimento	<i>Engraulis ringens</i>	El cambio en la temperatura produce un cambio en la comunidad planctónica. Sin embargo, estos cambios no habrían provocado una fluctuación en el crecimiento sugiriendo una plasticidad importante de la anchoveta, especialmente durante su fase	Plaza et al. (2018)

			juvenil, para hacer frente a las cambiantes limitaciones ambientales.	
Interacciones tróficas	Calidad de las presas	<i>Engraulis encrasicolus</i>	Se encontró una relación directa entre el potencial de crecimiento y el comportamiento alimentario. Las tasas de crecimiento más altas fueron registradas en individuos con <b>valores de <math>\delta^{15}\text{N}</math></b> significativamente mayores y, por lo tanto, mostraron una posición trófica más alta.	Quintanilla et al. (2015)
Interacciones tróficas	Disponibilidad alimento	<i>Clupea harengus</i>	Existe un trade-off entre el crecimiento y la reproducción. Al existir condiciones adversas (poco alimento) las proteínas son redirigidas desde el músculo a los ovarios, disminuyendo el crecimiento y la talla.	Rajasilta et al (2015)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis ringens</i>	El crecimiento larval tiene una relación positiva con la temperatura.	Rioual et al. (2021)
Interacciones tróficas	Disponibilidad alimento	<i>Engraulis encrasicolus</i>	La diferencia en la tasa de crecimiento de larvas es mayor en verano que en otoño e invierno, producto de una mayor productividad de plancton.	Schismenou et al. (2013)
Múltiples	Temperatura Disponibilidad de alimento	<i>Engraulis encrasicolus</i>	La tasa de crecimiento diario de la anchoveta está influenciada por la temperatura, mostrando un óptimo a 24,5°C, y aumenta significativamente con el aumento de la concentración de meso-zooplancton (i.e., disponibilidad de alimento).	Schismenou et al. (2014)
Denso-dependiente	Competencia intraespecífica	<i>Clupea harengus</i>	Mayores densidades poblacionales podrían afectar el tamaño asintótico, ya que existe mayor competencia por alimento.	Shin et al. (1998)
Denso-dependiente	Competencia interespecífica	<i>Clupea harengus</i>	El crecimiento del arenque del Báltico está bajo la fuerte influencia de la competencia interespecífica entre el arenque y el espadín, pero	Smolinski (2019)

			también con los patrones de precipitación en el área y las condiciones hidrológicas dentro del Mar Báltico. Sin embargo, las relaciones entre el crecimiento del arenque y las condiciones abióticas u otros componentes del ecosistema pueden variar con el tiempo.	
Denso-dependiente	Competencia intraespecífica	<i>Clupea harengus</i>	Existe una fuerte relación entre factores denso-dependiente (abundancia) y las tasas de crecimiento	Stenevik et al (2022)
Múltiples	Temperatura Disponibilidad de alimento	<i>Engraulis japonicus</i>	Se encontró que las tasas de crecimiento larval tardío estaban reguladas más fuertemente por la temperatura del agua que por la densidad de copépodos en aguas <16° C, y más fuertemente por la densidad de copépodos que por la temperatura cuando la biomasa de copépodos <100 mg DW m <sup>-2</sup> . Por lo tanto, los factores que regulan el crecimiento pueden variar entre años.	Takahashi y Watanabe (2005)
Interacciones tróficas	Disponibilidad alimento	<i>Engraulis mordax</i>	Un retraso en la surgencia provocó escasez de oferta alimentaria afectando la tasa de crecimiento de larvas y juveniles.	Takahashi et al. (2012)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis japonicus</i>	La tasa de crecimiento parece aumentar al aumentar la temperatura, pero esto solo ocurre hasta la Temperatura de Crecimiento Óptima. Después de este punto la tasa de crecimiento disminuye. No se encontró relación con la densidad de alimento (plancton).	Takasuka et al. (2006)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis japonicus</i>	Se calcula la temperatura óptima de crecimiento para <i>E. japonicus</i> , dada como principal factor que regula la tasa de crecimiento. Sin embargo,	Takasuka et al. (2007)



			también se reconoce que pueden existir otros factores que actúan de forma sinérgica (interacciones tróficas y pesquería).	
Variables ambientales	No especifica	<i>Engraulis japonicus</i>	Existe una diferencia en las tasas de crecimiento entre cohortes (verano vs. invierno), sugiriendo una influencia de variables ambientales.	Takasuka et al. (2008)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis japonicus</i>	La tasa de crecimiento larval está principalmente afectada por la temperatura del agua. La menor tasa de crecimiento observada en la zona norte parece ser consecuencia de la migración de larvas de otras áreas.	Takasuka y Aoki (2002)
Interacciones tróficas	Calidad de las presas	<i>Engraulis mordax</i>	Sugiere que el crecimiento larval es más sensible al éxito de alimentación basada en presas más grandes, ya que la larva de anchoveta requeriría una mayor biomasa de presas para sobrevivir u obtener la máxima tasa de crecimiento.	Urtizberea y Fiksen (2013)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis mordax</i>	Las especies que habitan áreas cercanas a su límite fisiológico de temperatura tendrán tasas de crecimiento similares en su hábitat y en laboratorio.	Urtizberea et al. (2008)
Interacciones tróficas	Calidad de las presas	<i>Engraulis encrasicolus</i> <i>Sardina pilchardus</i> <i>Sprattus sprattus</i>	Se sugiere un control bottom-up (disponibilidad y composición de presas) como factor principal para el crecimiento. Adicionalmente se menciona la posibilidad de una enfermedad que podría afectar las tasas de crecimiento.	Van Beveren et al. (2014)
Estructura poblacional	Características intrínsecas de la especie	<i>Engraulis encrasicolus</i>	La diferencia en las tasas de crecimiento se debe a la presencia de dos stocks con diferentes parámetros.	Ventero et al. (2017)

Múltiples	Calidad de las presas Condición maternal	<i>Sardina pilchardus</i>	Una menor abundancia y calidad del plancton (alimento) puede causar la disminución en la condición corporal de la sardina y sus tasas de crecimiento (talla al año). Considera que las reservas de ácidos grasos de sardinas adultas transferidas a la progenie depende de su ecología alimentaria. Una condición corporal más baja de las sardinas adultas podría conducir a una menor tasa de crecimiento de los próximos individuos teniendo repercusiones en la dinámica de la población.	Véron et al. (2020)
Múltiples	Disponibilidad alimento Temperatura	<i>Engraulis capensis</i>	La escasa disponibilidad de alimento producto de la disminución del viento (post El Niño) influyó negativamente en la tasa de crecimiento de estados tempranos. Altas temperaturas y cambios en la producción de copépodos (principal alimento) son también importantes.	Waldron (1995)
Denso-dependiente	No especifica	<i>Engraulis capensis</i>	Las tasas de crecimiento fueron estadísticamente diferentes entre meses de eclosión. Las tasas de crecimiento más lentas se produjeron en anchovetas que habían nacido durante el período de mayor desove a finales de la primavera y principios del verano. Sin embargo, no se discuten posibles razones.	Waldron et al. (1989)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Etrumeus teres</i>	La temperatura es el principal factor determinante de las tasas de crecimiento larval. Otros factores ambientales, como la disponibilidad de alimento, no afectaron sustancialmente las tasas de crecimiento de las larvas en aguas costeras a lo largo de la corriente subtropical de Kuroshio (Japón).	Watanabe et al (2013)

Variables ambientales	Temperatura	<i>Etrumeus teres</i> <i>Engraulis japonicus</i> <i>Sardinops melanostictus</i>	Diferentes especies muestran diferentes respuestas a variaciones en la temperatura. Esto puede constituir una base ecológica para diferencias en patrones de migración entre las tres especies.	Watanabe et al. (2014)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis ringens</i>	Un aumento en la temperatura del agua debido a El Niño 1997-1998 disminuyó considerablemente la tasa de crecimiento de la especie respecto a años previos.	Xu et al. (2013)
Variables ambientales	Salinidad	<i>Coilia nasus</i>	Baja salinidad reduce el crecimiento de juveniles.	Xu et al. (2016)
Múltiples	Temperatura Disponibilidad de alimento Oxígeno	<i>Engraulis japonicus</i>	La tasa de crecimiento de la anchoveta japonesa aumentó con el aumento de la temperatura, pero el crecimiento estuvo limitado por la disponibilidad de presas y/u otros factores, como el bajo nivel de oxígeno disuelto, a temperaturas más altas. Adicionalmente se discute la posibilidad de que una disminución de los nutrientes en el área haya provocado la disminución de las densidades de copépodos.	Yamamoto et al. (2018)
Efecto parental	Condición maternal	<i>Engraulis japonicus</i>	El crecimiento de las larvas está condicionado por la disponibilidad de alimento que tuvo la madre.	Yoneda et al. (2022)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis japonicus</i>	La tasa de crecimiento se relacionó positivamente con la temperatura y no con la densidad de zooplancton y la densidad larval.	Yusue y Takasuka (2009)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Opisthonema libertate</i>	Se encontró una relación inversa entre la temperatura superficial del mar y el crecimiento de la sardina. Los resultados sugieren que la temperatura afecta el metabolismo y consecuentemente el crecimiento.	Zamora et al. (2022)
Interacciones tróficas	Disponibilidad alimento	<i>Engraulis japonicus</i>	La tasa de crecimiento somática y la tasa de crecimiento a la talla	Zenitani et al. (2009)

			dependen de la disponibilidad de alimento, m1s que de la temperatura.	
Variables ambientales	Temperatura Clorofila	<i>Engraulis japonicus</i>	El crecimiento est1 positivamente influenciado por factores ambientales tales como la temperatura y la clorofila. En ambientes fr1os, la tasa de crecimiento de la anchoveta est1 condicionado principalmente por la temperatura, mientras que en condiciones m1s c1lidas la disponibilidad de alimento es m1s importante.	Zhu et al. (2023)

Tabla 28. Variables que afectan la talla corporal del grupo de los Clupeidos

Variable	Factores	Especie de estudio	Principales hallazgos	Referencias
Variables ambientales	Temperatura	<i>Clupeiformes</i>	Se espera que la talla disminuya en el tiempo frente a un aumento de la temperatura, reduciendo su capacidad de desplazamiento (migraci3n) y especiaci3n.	Avaria-Llautureo et al. (2021)
Variables ambientales	Temperatura Oxígeno	<i>Sprattus sprattus</i>	El tamaño de los peces se reducirá en respuesta a los cambios de temperatura y oxígeno inducidos por el clima. Los cuerpos más pequeños que se proyectan para el futuro ya se pueden detectar en el Mar del Norte.	Baudron et al. (2014)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Clupea harengus</i>	Poblaciones de áreas cálidas responden peor a un aumento de la TSM que poblaciones que habitan áreas frías. Las tallas parecen estar más influenciadas por cambios ambientales que por el efecto de la pesca.	Beaudry-Sylvestre et al. (2024)
Múltiples	Competencia intraespecífica Temperatura Salinidad	<i>Clupea harengus</i>	La disminuci3n de la talla est alineada con factores denso-dependientes, con un aumento de la biomasa desovante y una posible disminuci3n del suministro de alimento durante la década de 1990. Sin embargo, la temperatura y la salinidad también fueron importantes.	Becker et al. (2020)
Interacciones tróficas	Disponibilidad de alimento	<i>Engraulis mordax</i>	La reducci3n en la talla est relacionada con una disminuci3n en la disponibilidad de alimento.	Butler (1989)
Múltiples	Temperatura Disponibilidad de alimento	<i>Engraulis ringens</i>	Se observa una menor talla al aumentar la temperatura debido probablemente a una intensificaci3n del proceso reproductivo (trade-off). La reducci3n de la talla también pudo causarse por el empeoramiento de	Canales et al. (2018)

			las condiciones de alimento (menor concentraci3n de plancton o baja en la calidad del plancton).	
Variables ambientales	Ox3geno	<i>Clupea harengus</i>	Altos niveles de hipoxia disminuyen la talla de eclosi3n.	Ekau et al. (2010)
Variables ambientales	Temperatura CO <sub>2</sub>	<i>Clupea harengus</i>	Sugieren que el ambiente de calentamiento y acidificaci3n previsto es estresante para las larvas de arenque, induciendo una disminuci3n en el tama1o.	Joly et al. (2023)
M3ltiples	Temperatura Disponibilidad de alimento	<i>Clupea harengus</i>	Los efectos de la temperatura en la digesti3n y el metabolismo interact3an con los efectos de la disponibilidad de luz, el tama1o de las presas y accesibilidad al alimento y, por lo tanto, determinan el tama1o 3ptimo.	Ljungstr3m et al. (2024)
M3ltiples	Disponibilidad de alimento Claridad del agua	<i>Clupea harengus</i>	La accesibilidad de las presas es el factor m3s influyente en el tama1o corporal, determinado principalmente por el tama1o de las presas, pero tambi3n por la claridad del agua, lo que impone restricciones visuales en los encuentros con las presas y, por lo tanto, limita las tasas de alimentaci3n.	Ljungstr3m et al. (2020)
Variables ambientales	Temperatura	<i>Clupea harengus</i>	Se observ3 una relaci3n negativa no lineal entre el tama1o adulto y la temperatura superficial media durante la primera temporada de crecimiento. La longitud se correlacion3 negativamente con la Oscilaci3n Multidecadal del Atl3ntico. Se detectaron asociaciones m3s d3biles con indicadores de disponibilidad de alimento y tama1o de la poblaci3n. Las disminuciones en la talla y las asociaciones con la temperatura	Lyashevskaya et al. (2020)

			fueron m1s pronunciadas en la poblaci3n del Mar Celta, que puede ser vulnerable al aumento de la temperatura del mar debido a su posici3n en el l1mite sur de la distribuci3n de la especie.	
M1ltiples	Temperatura Disponibilidad de alimento	<i>Engraulis encrasicolus</i> <i>Sardina pilchardus</i>	El medio ambiente por s1 solo, la temperatura y el zooplancton, explican una parte importante de las diferencias regionales observadas en crecimiento.	Menu et al. (2023)
M1ltiples	Disponibilidad de alimento Caracter1sticas intr1nsecas de la especie	<i>Clupea harengus</i>	Aproximadamente el 60% de la disminuci3n de la talla espec1fica a la edad podr1a atribuirse a factores ecol3gicos, en particular a factores denso-dependientes. Se estima que el efecto directo de la mortalidad selectiva por tama1o s3lo tiene impacto marginal en el crecimiento corporal. Sin embargo, alrededor del 25% de la disminuci3n en la talla espec1fica de la edad podr1a atribuirse a cambios evolutivos en el tama1o en la maduraci3n, lo que resulta en un crecimiento som1tico m1s lento en etapas m1s tempranas de la vida.	Östman et al. (2014)
Interacciones tr3ficas	Disponibilidad de alimento	<i>Clupea harengus</i>	Existe un trade-off entre el crecimiento y la reproducci3n. Al existir condiciones adversas (poco alimento) las prote1nas son redirigidas desde el m1sculo a los ovarios, disminuyendo el crecimiento y la talla.	Rajasilta et al. (2015)
Interacciones tr3ficas	Disponibilidad de alimento	<i>Clupea pallasii</i>	Los efectos denso-dependientes pueden suplantar los denso-independientes en la historia de vida temprana del arenque. Las distribuciones espaciales del arenque y sus presas (zooplancton) indican que las reducciones en el crecimiento pueden explicarse por	Reum et al. (2013)

			cambios de hábitat denso-dependientes que conducen a una reducción de la superposición del arenque con el zooplancton.	
Variables ambientales	Temperatura	<i>Engraulis ringens</i>	La temperatura tuvo un efecto significativo en la talla a la edad, pero no en la forma del cuerpo.	Rioual et al. (2021)
Múltiples	Disponibilidad de alimento Características intrínsecas de la especie	<i>Sardina pilchardus</i> <i>Engraulis encrasicolus</i>	Desaparición de especímenes mayores puede deberse a factores como la migración, enfermedades, muerte por inanición, y trade-off entre reproducción y supervivencia.	Saraux et al. (2018)
Múltiples	Competencia intraespecífica	<i>Engraulis encrasicolus</i>	Se encontró una fuerte asociación entre alta abundancia de anchoveta y un tamaño reducido de juveniles. Esta tendencia no es tan clara en adultos. Aumento de competidores y depredadores producto del calentamiento de las aguas. En adultos, la temperatura parece ser el principal factor que regula el tamaño corporal.	Taboada et al. (2023)
Múltiples	Disponibilidad de alimento Desaparición tallas grandes	<i>Engraulis encrasicolus</i> <i>Sardina pilchardus</i> <i>Sprattus sprattus</i>	Se piensa que la disminución de la talla se debe a una ralentización del crecimiento causada por cambios en la cantidad y/o calidad del alimento, y la desaparición de los ejemplares mayores debida a mortalidad masiva causada por enfermedades.	Van Beveren et al. (2014)
Interacciones tróficas	Calidad y disponibilidad de alimento	<i>Sardina pilchardus</i>	Una menor abundancia y calidad del plancton (alimento) puede causar la disminución en la condición corporal de la sardina y sus tasas de crecimiento (talla al año).	Véron et al. (2020)



#### 4.3 Objetivo específico 2.2.3. *Establecer recomendaciones para el manejo pesquero, bajo distintos escenarios basados en las hipótesis planteadas en el estudio.*

Se elaboró una matriz de conocimiento considerando aspectos biológicos y ambientales relevantes en el crecimiento de pequeños pelágicos los cuales podrían afectar procesos biológicos de la especie (Tabla 31 a Tabla 33). La matriz incorporó los resultados de la revisión bibliográfica y los resultados más relevantes del presente estudio, generando recomendaciones de manejo. Además, se incorporó a la matriz recomendaciones emanadas de la revisión de las actas del comité de manejo de pequeños pelágicos.

Se realizó el taller de expertos según lo comprometido, con la participaron de expertos de España, Perú e investigadores de la academia chilena vinculados a la investigación y gestión pesquera, el listado de participantes se presenta en la Tabla 29 y Figura 64. El taller se llevó a cabo el 16 de enero de 2025 de manera telemática. Con el objetivo de resguardar la información presentada y las discusiones generadas, se llevó a cabo un registro audiovisual del evento (Anexo 3). El taller contempló, en una primera parte, una serie de presentaciones según el programa presentado en la Tabla 30. En la segunda parte, se realizó la discusión en torno a una serie de preguntas generadas por el equipo del proyecto.

Tabla 29. Lista de asistencia al taller de expertos.

Participantes	Institución
Leire Ibaibarriaga	Centro de investigación Marina y Alimentaria (AZTI)
Andrés Uriarte	Centro de investigación Marina y Alimentaria (AZTI)
Naroa Aldanondo	Centro de investigación Marina y Alimentaria (AZTI)
Erich Diaz	Instituto del Mar del Perú (IMARPE)
Cristian Canales	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV)
Guido Plaza	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV)
Luis Cubillos	Universidad de Concepción (UDEC)
Leonardo Castro	Universidad de Concepción (UDEC)



Fabi3n Tapia	Universidad de Concepci3n (UDEEC)
Carola Hern3ndez	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
Jessica Bonicelli	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
Graciela P3rez	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
Eduardo D3az	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
Francisco Cerna	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
3lvaro Saavedra	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
Jorge Castillo	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
Claudio Bernal	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
Naiti Morales	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
Juan Carlos Saavedra	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
Ljubitz3 Clavijo	Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)

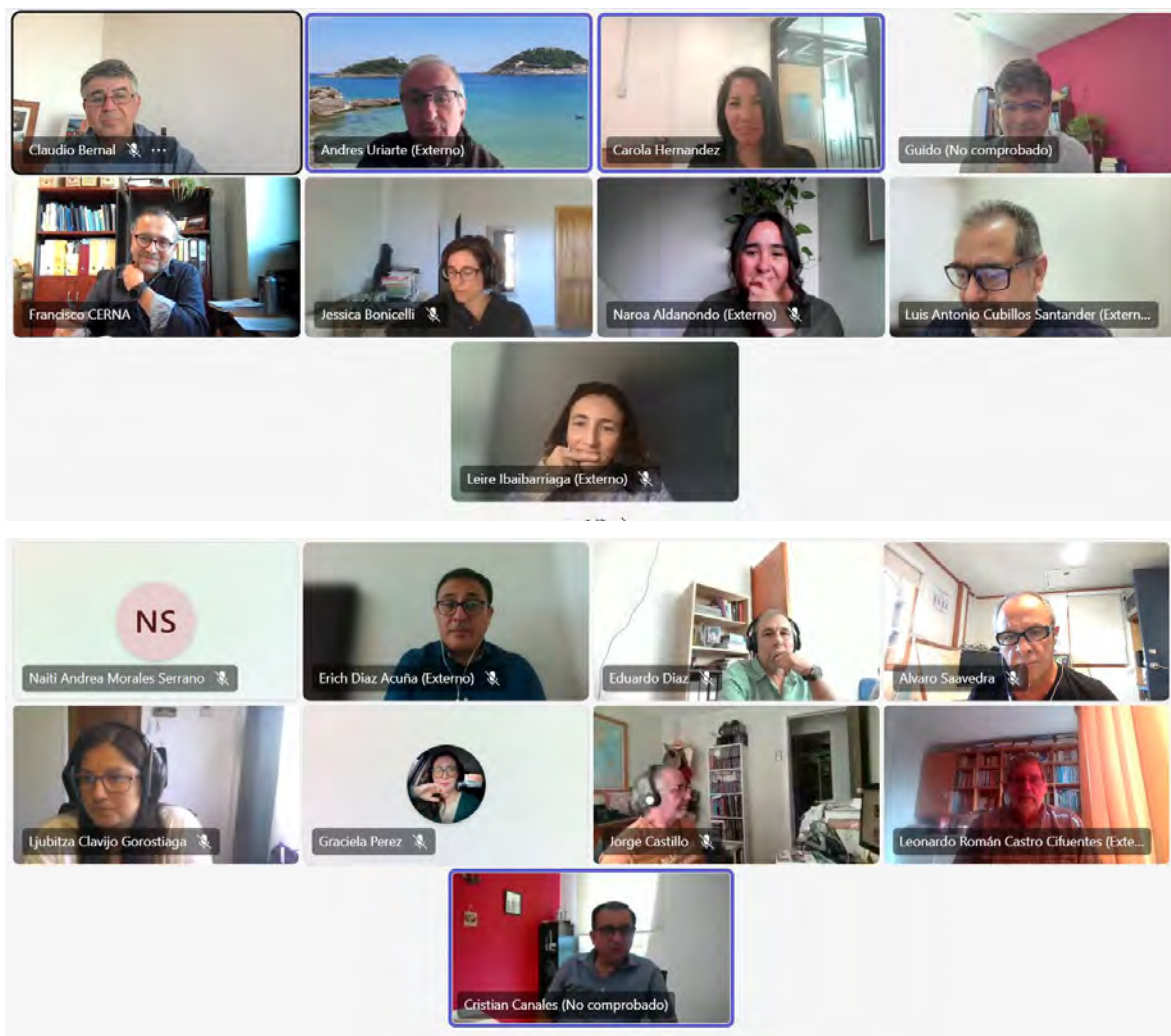


Figura 64. Participantes del taller de expertos realizado telemáticamente.

Tabla 30. Programa del taller de expertos.

### TALLER DE EXPERTOS

Objetivo: Establecer recomendaciones para el manejo pesquero, bajo distintos escenarios basados en las hipótesis planteadas en el estudio.

Proyecto FIPA 2023-20 “Determinación de los factores causantes de los cambios estructurales de la población de anchoveta de la zona norte en el periodo reciente y sus implicancias”.

#### AGENDA

Valparaíso, jueves 16 de enero del 2025, Online

- |               |                                                                                                                                              |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10:00 a 10:25 | Principales resultados del proyecto. Carola Hernández (IFOP).                                                                                |
| 10:25 a 10:40 | Procedimiento de manejo en pequeños pelágicos del norte de Chile. Carola Hernández (IFOP).                                                   |
| 10:40 a 10:55 | Procedimiento de manejo en pequeños pelágicos del sur de Perú. Erich Díaz (IMARPE).                                                          |
| 11:10 a 11:25 | Evolución en la evaluación y gestión pesquera en la Bahía de Vizcaya (incluyendo los años de cierre de la pesquería). Andrés Uriarte (AZTI). |
| 11:25 a 11:40 | Cambios en el crecimiento de la anchoa. Naroa Aldanondo (AZTI).                                                                              |
| 11:40 a 11:55 | Break                                                                                                                                        |
| 11:55 a 14:00 | Discusión en base a preguntas y recomendaciones de manejo. Jessica Binicelli (IFOP).                                                         |

Una vez concluidas las presentaciones, se inició una sesión de discusión, con el fin de recibir las recomendaciones de los expertos en función del diagnóstico sobre el crecimiento somático, obtenido a partir de la ejecución del proyecto FIPA 2023-30. Para ello, el grupo de trabajo del proyecto propuso una serie de preguntas, sobre las cuales se fueron explayando los especialistas. A continuación, se resumen las principales recomendaciones y observaciones que surgieron de la sesión.

## **Recomendaciones de manejo**

1. A la luz de los cambios observados en el crecimiento, ¿cómo deberían ajustarse las estrategias de manejo pesquero para asegurar la sostenibilidad a largo plazo de estas especies?

Recomendación: Revisar y/o redefinir los puntos biológicos de referencia y la biomasa de referencia frente a un escenario de cambio en la biología de estos recursos. Esto dado que, estos puntos de referencia dependen del peso, y más aún si se considera un cambio en la talla de primera madurez. Una respuesta fenotípica clásica en especies estresadas es anticipar la reproducción, generando cambios en los valores de referencia. Se debe considerar que un cambio en los puntos biológicos de referencia es complicado para la gestión pesquera, dado que no se tiene certeza si los cambios evidenciados representan una anomalía o una tendencia que se mantendrá en el tiempo.

Recomendación: Aunque una gestión conjunta del stock entre Perú y Chile es incierta, al menos desde el mundo científico se debe avanzar hacia una compatibilidad entre las recomendaciones y medidas de manejo que se realizan en ambos países. Por ejemplo, cada país estima una cuota inconsultamente con el otro, dado que no hay un organismo que lo exija. Sin embargo, podría darse el caso que ambos seamos muy optimistas y efectivamente dupliquemos la cuota que el stock pueda soportar, llevando al stock a caer en sobreexplotación. En Perú se ha implementado medidas como la protección del desove de invierno, y la prohibición a embarcaciones industriales de operar dentro de las 5 primeras millas, lo que pretende minimizar la interacción con la flota artesanal<sup>1</sup>, proteger la biodiversidad y resguardar la fase juvenil, que parece ser más abundante en esta zona que en áreas más distantes de la costa. En resumen, existen medidas ya implementadas y que debiesen promoverse para lograr cierta armonización entre los sistemas de manejo de ambos países, independiente si se logra implementar el funcionamiento de un organismo de regulación en conjunto. Se recomienda una mirada integradora del stock que actualmente es compartido con Perú. Por lo tanto, es importante establecer un modelo conceptual, que indique claramente dónde y cuándo desova

---

<sup>1</sup> Es importante mencionar que hay diferencias entre países en la clasificación de embarcaciones.

el stock compartido y dónde ocurre el reclutamiento, y sobre esta base acordar medidas de protección coordinadas entre ambos países.

2. ¿Son adecuados los modelos de evaluación de stock estadístico-basados, para estimar biomasa y abundancia en especies de crecimiento somático rápido y de vida corta? ¿Cuáles son las experiencias para este recurso y otros de naturaleza similar en otras partes del mundo? ¿Qué otro tipo de aproximación de evaluación de stock se podría utilizar para estas especies?

Recomendación: Considerar el manejo pesquero en base a campañas de evaluación directa y de alta frecuencia. Revisar los procesos aplicados en Chile y considerar aquellos utilizados en Perú. En Perú las estimaciones de las capturas se basan en cruceros de evaluación acústica realizados dos veces al año, considerando el crecimiento rápido que tiene el recurso. Además, las estimaciones de biomasa se consideran como absolutas. La historia del stock norte centro de la anchoveta del Perú es ejemplo de una pesquería con manejo exitoso en la actualidad. Sin embargo, este stock en su historia ya pasó por un periodo en que la evaluación se basaba en modelos y que fracasó. La pesquería entró en estado de sobreexplotación, colapsando en los años 70 después de los mayores registros de captura. En la actualidad el manejo se realiza sobre la base de evaluaciones directas y de alta frecuencia. Para el caso del stock norte de Chile, se consideran dos reclutamientos y dos desoves al año, por lo que aplicar un modelo de evaluación en diciembre y adoptarlo de manera rígida para todo el año parece poco realista. En el caso de Chile, se podría utilizar el modelo de evaluación para validar la estrategia de manejo. Se recomienda revisar la utilización de modelos estadísticos complejos para la estimación del tamaño del stock de anchoveta, puesto que la alta dinámica biológica de la especie y la dependencia de cambios ambientales de alta frecuencia aumentan la incertidumbre en la predicción, debiendo tener presente que en general estos modelos fueron creados para especies de vida larga con dinámica biológica más lenta.

3. En un escenario de disminución de crecimiento somático y juvenilización de la población, se esperaría que gran parte del crecimiento se maximice antes de la primera madurez sexual. En este escenario, ¿qué tan ventajosas son las vedas de reclutamiento y su extensión, para garantizar la sostenibilidad de la población?

Recomendación: Revisar el periodo y duración de la veda. Mantener la veda de reclutamiento, pero no el periodo fijo. La discusión se concentró en la utilidad de las prohibiciones de pesca en los periodos de reclutamiento, las distintas ponencias podrían resumirse en la siguiente tabla.

A favor	En contra
<ul style="list-style-type: none"> <li>Desde el punto de vista precautorio, la veda de reclutamiento puede ser importante para cautelar que los juveniles alcancen su primer desove y asegurar que se consiga el mayor potencial reproductivo. Especialmente en los últimos años en que el potencial reproductivo se ha sustentado en individuos de menor talla, incluso en ejemplares entre 8 y 11,5 cm, por lo que la veda de reclutamiento (&lt;12 cm) podría ser una acción enfocada hacia ese objetivo.</li> <li>Mantener una veda en un periodo fijo permite planificar las actividades de mantención de flotas y plantas.</li> <li>El rendimiento pesquero de los juveniles es menor que en los ejemplares adultos, y la producción de harina o aceite de pescado es menor en ejemplares juveniles, por lo que se puede considerar que la flota prefiere evitar la pesca de esa fracción.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>En el caso español, hay una auto regulación de la flota pesquera, puesto que los precios de los ejemplares de menor talla son menores.</li> <li>En el caso de la industria de reducción o conservas, es reconocido que los adultos tienen un mejor rendimiento comercial, pero al no existir prohibición de pesca, habrá incentivos para operar, más allá de los rendimientos, por lo que se haría necesario introducir cambios en los incentivos económicos a los operadores, que deberían ser auto establecidos.</li> <li>La reducción de la mortalidad por pesca debido a la veda no es evidente en el caso de la estimación del tamaño de la población por modelamiento (caso chileno), puesto que la mortalidad por pesca es un indicador anual o trimestral, por lo que descartar la veda como medida de administración no afecta el modelo.</li> <li>Es necesario revisar, actualizar e implementar la ecuación de crecimiento y la talla de primera madurez, puesto que se modificarán los periodos en los que se deben aplicar las vedas.</li> </ul>

Recomendaci3n: Revisar los procedimientos de manejo de manera que sean flexibles, principalmente en la decisi3n de la CBA. En este sentido, se recomienda la flexibilizaci3n en los procedimientos de manejo, principalmente en el establecimiento de las cuotas de pesca. Por ejemplo, resolver el impedimento legal que actualmente existe en reducir las cuotas establecidas al inicio del ciclo de manejo, una vez que se han sumado todas las piezas de informaci3n. Por lo tanto, y en el entendido que se est1 discutiendo la nueva ley de pesca, se recomienda establecer claramente los articulados de esta ley que impiden que se pueda avanzar en t1rminos de nuevas medidas de regulaci3n, y que permitan que 1stas sean adaptativas y que mejoren las condiciones del stock en el tiempo, particularmente el stock de anchoveta.

4. ¿Es necesario modificar las cuotas de captura o el tama1o m1nimo de los ejemplares en las capturas, en respuesta de los cambios en el crecimiento de los peque1os pel1gicos? Si es as1, ¿qu1 criterios utilizar1amos para definir estos l1mites?

Recomendaci3n: Revisar la talla utilizada como indicador en los diferentes monitoreos realizados en la zona norte. La talla de madurez (L50%) se utiliza como talla de referencia tanto en los cruceros (reclutamiento y MPDH) como en los monitoreos de los procesos de reclutamiento y desove realizados en el marco del seguimiento. En tanto, la reducci3n de talla de madurez deber1a impactar metodol3gicamente los cruceros y monitoreos. La adopci3n de este indicador en la gesti3n del recurso debiera ser adoptada por el Comit1 Cient1fico, Comit1 de Manejo y Subsecretar1a de Pesca, debiendo en cualquier caso ser adoptado el indicador actualizado por el IFOP que indica que la talla de primera madurez es menor a los 12 cm. En este sentido, se podr1a adoptar con fines de monitoreo una talla distinta a la de madurez, como por ejemplo el percentil m1s bajo de madurez como es el caso de la zona centro sur, que adem1s permita cierres espaciales o temporales. Es necesario tener presentes los impactos de los eventos como El Ni1o, que por efecto de aguas c1ldas genera la profundizaci3n de los individuos adultos, quedando m1s accesibles a la pesquer1a ejemplares de menor tama1o, afectando el L50% y generando conclusiones err3neas.



5. El resultado del presente proyecto demuestra que la especie se encuentra en situaci3n muy vulnerable, debido a que el crecimiento es un indicador de salud poblacional. Tambi3n es bien conocido que los pel3gicos peque1os comprimen su distribuci3n a reductos primordiales de crianza, cuando alcanzan estos niveles de vulnerabilidad. Por consiguiente, ¿se hace necesario avanzar hacia la identificaci3n de estos reductos para generar cierres de 1reas de pesca? ¿sería recomendable avanzar hacia un r3gimen moratorio temporal?

Brechas: Determinar 1reas de reclutamiento y desove para realizar un monitoreo efectivo. Debido a la disminuci3n de la talla promedio de la anchoveta, es necesario revisar los criterios de veda para evitar que la pesquería se mantenga cerrada utilizando como talla de referencia los 11,5 cm. Adem1s, se debe tener presente que mientras m1s peque1o sea el pez, la tasa de explotaci3n tendría que ser m1s baja. En la medida que disminuye la mortalidad por pesca y los niveles de captura, se garantizan los escapes necesarios y la adaptaci3n de la industria, a los menores niveles de captura.

Brechas: Realizar un cierre moratorio o desembarque bajo estas condiciones. La situaci3n actual de la anchoveta puede tener un origen no pesquero, sin embargo, es claro que la pesca ejerce un efecto importante. Por lo tanto, disminuir las cuotas de capturas o eventualmente hacer cierre o moratoria permitiría mejorar probablemente las condiciones del stock. Esto es una recomendaci3n desde el punto de vista netamente biol3gico, que no considera las implicancias socio-econ3micas de una medida como esta.

Brechas: Determinar si los cambios se deben a un cambio micro evolutivo. En este punto de la discusi3n surge una pregunta de segundo nivel: si el fenotipo de talla peque1a es heredable a la progenie, o si existe una auto correlaci3n en el rasgo. Desarrollar investigaci3n que permita abordar este aspecto nos ayudaría a esclarecer si la situaci3n actual de la poblaci3n de anchoveta es reversible y buscar una posible conexi3n con cambios micro evolutivos. En este sentido, la veda temporal ayuda bastante, pero en t3rminos espaciales se debe conocer el modelo de conectividad entre juveniles y adultos.

Brechas: Determinar la condici3n de la anchoveta. Para el caso de la anchoveta del Golfo de Vizcaya se ha demostrado que la anchoveta ha disminuido su talla, pero con 3ndices de condici3n relativamente estables en los 3ltimos a3os. M3s a3un, a pesar de la ca3da en la talla y peso medio, la poblaci3n muestra elevados niveles de biomasa. Para la anchoveta de la zona norte de Chile, se demostr3 que la ca3da el peso y talla media estuvo asociada a una ca3da en el crecimiento som3tico en los distintos estados ontogen3ticos, pero no necesariamente la ca3da en el crecimiento debe estar asociada a una mala condici3n. Es importante se3alar que los engra3lidos tienen una gran capacidad adaptaci3n, y que la juvenilizaci3n de la poblaci3n a escala de d3cadas puede ser una respuesta para garantizar su persistencia bajo una presi3n ambiental y antr3pica intensa. Por ello ser3a interesante comparar una serie hist3rica de un 3ndice de condici3n, por estado ontogen3tico, para la zona norte de Chile, con estimaciones de biomasa desovante o estimaciones de biomasa directa, para determinar hasta qu3 punto los resultados son sincr3nicos entre especies y ecosistemas.

Tabla 31. Matriz de conocimiento y recomendaciones de manejo basada en revisión bibliográfica y los resultados del presente estudio.

Categoría	Elemento/Aspecto	Impacto esperado de los cambios en el crecimiento	Resultados principales FIPA 2023-20	Estrategias propuestas: Comité de manejo	Estrategias de Manejo Recomendadas	Estudios futuros
Especies Pesqueras	Tasa de crecimiento	El crecimiento está determinado por factores ambientales como la disponibilidad de alimento y la temperatura. El crecimiento podría variar estacional, interanualmente y decadal asociado con el alimento y la temperatura.	Tendencia a la baja en las tasas globales de crecimiento, menores TG en los años recientes. Menor crecimiento		Ajustar las cuotas de captura en función de las tasas de crecimiento observadas. Monitoreo continuo de las tasas de crecimiento de las poblaciones y ajuste bianual. Monitorear y revisar anualmente los impactos de la tasa de crecimiento en la época y área de desove, de manera de realizar una protección efectiva.	
	Longitud y Edad de madurez sexual	Un crecimiento más rápido puede adelantar la madurez, impactando en las estrategias de manejo. La talla de madurez está alrededor de 12 cm. Sin embargo, se observa una disminución en los últimos años, llegando hasta 10.5 cm LT. El estado de madurez de las hembras depende de su dieta y la temperatura ambiental. Las tasas de crecimiento aumentan en la zona sur de Chile probablemente por mejores condiciones, lo que lleva a un retraso en el desarrollo de las gónadas y, por tanto, a un aumento del tamaño en la madurez.	Menor tasa global (TG) de crecimiento en los adultos (Mayor en reclutas). TG fue menor en verano-otoño (Mayor en invierno-primavera)	Revisión de la talla de madurez. <b>Resguardar procesos biológicos*</b> importantes (desove, reclutamiento) para asegurar la conservación y el uso sostenible de los recursos pesqueros, aplicando el enfoque precautorio y ecosistémico, fuera de los periodos de veda biológica.	Re-evaluar los indicadores utilizados en los diferentes monitoreos que utilicen como criterio la talla de madurez. Revisar la estacionalidad del proceso de reclutamiento, asociado con el menor crecimiento de la cohorte de verano.	
Métodos de Pesca	Selección de tamaños	Prácticas pesqueras que determinan el tamaño de los individuos capturados.	Si las especies alcanzan su tamaño de madurez más rápido, es posible que se capturen antes de tiempo.		Implementar métodos de pesca selectivos que eviten la captura de individuos inmaduros. Fomentar el uso de redes de mayor tamaño de malla y modificar las tallas mínimas de captura.	Si un eventual análisis de la base genética de los cambios de crecimiento en la anchoveta sustenta la hipótesis de que la extracción sostenida de la fracción más grande ha tenido un efecto selectivo (como se discute en Conover y Munch 2002, Conover et al. 2005, y más recientemente Therkildsen et al. 2019), las medidas de manejo futuras debiesen re-evaluar el valor de establecer tallas mínimas para la persistencia de la población.

Tabla 32. Matriz de conocimiento y recomendaciones de manejo basada en revisión bibliográfica y los resultados del presente estudio.

Categoría	Elemento/Aspecto	Impacto esperado de los cambios en el crecimiento	Resultados principales FIPA 2023-20	Estrategias propuestas: Comité de manejo	Estrategias de Manejo Recomendadas	Estudios futuros
Factores Ambientales	Temperatura del agua	Aumento de la temperatura puede acelerar el crecimiento de ciertas especies, pero alterar su ciclo reproductivo.	Las temperaturas superficiales han disminuido en las últimas décadas, tanto en época de desove como de crecimiento larval, a razón de 0.2-0.35 grados celsius por década. La superficie costera afectada por enfriamiento significativo varía dependiendo de la época del año que se considere, pero en todos los casos cubre la franja costera de la región de estudio.	Incorporar los efectos del cambio climático en los planes de manejo pesquero, ya que el cambio climático afecta la vulnerabilidad de la pesquería. Se sugiere realizar estudios más detallados sobre los efectos del cambio climático en las pesquerías del norte de Chile.	Monitoreo y adaptación de las prácticas pesqueras en función de las predicciones de temperatura. Implementar políticas de protección para áreas sensibles afectadas por el cambio climático.	
	Disponibilidad de alimentos	Cambios en la disponibilidad de alimento pueden afectar la tasa de crecimiento, reduciendo la salud de las poblaciones.	Tendencia a la baja en la abundancia y proporción de copépodos. La abundancia de copépodos fue menor en otoño que en primavera.		Gestionar las pesquerías en base a la disponibilidad de recursos tróficos. Implementar prácticas de pesca responsable que no afecten los ecosistemas de base.	
	Tamaño del alimentos	Cambios en la estructura de tamaño del zooplankton puede tener consecuencias importantes en los eslabones superiores que se alimentan principalmente de este grupo	Tendencia de la pendiente de la estructura de tamaños del zooplankton hacia valores menos negativos. Indica que los grupos de mayor tamaño están teniendo una mayor representatividad dentro de la comunidad zooplanctónica. Este cambio puede ser debido al aumento que tuvieron los gelatinosos, los que en general, son de mayor tamaño que los demás grupos taxonómicos.		Implementar análisis de espectros de tamaños de las muestras de zooplankton colectadas en los cruceros del IFOP con equipos de laboratorio específicos para ello, tales como ZooScan y FlowCam. Esto permitirá adquirir conocimiento acerca del cambio temporal y espacial de la estructura de tamaño del zooplankton.	Estudiar el impacto del tamaño del alimento en la anchoveta y sus efectos en el crecimiento y metabólicos. Estudiar cambios fisiológicos en las estructuras de alimentación de la anchoveta (número y separación de las branquiespinas)
	Depredadores	El aumento de depredadores podría afectar el reclutamiento futuro.	Aumento en la abundancia de depredadores gelatinosos en primavera a partir del 2014 y principalmente en la primavera de 2020.		Implementar monitoreos específicos para la cuantificación de gelatinosos en las muestras de zooplankton y en los lances pesqueros, que se realizan en los cruceros acústicos del IFOP	

Tabla 33. Matriz de conocimiento y recomendaciones de manejo basada en revisión bibliográfica y los resultados del presente estudio.

Categoría	Elemento/Aspecto	Impacto esperado de los cambios en el crecimiento	Resultados principales FIPA 2023-20	Estrategias propuestas: Comité de manejo	Estrategias de Manejo Recomendadas	Estudios futuros
Normativas y Regulaciones	Tallas mínimas de captura	La aceleración del crecimiento podría hacer que las especies alcancen la madurez antes de llegar al tamaño mínimo de captura.			Reevaluar las tallas mínimas de captura con base en las tasas de crecimiento y la edad de madurez sexual. Regular la pesca en función del tamaño y la edad de las especies.	
	Zonas de veda	Cambios en el crecimiento pueden hacer que las especies migren o se reproduzcan en diferentes lugares o épocas.	Tendencia a la baja en las tasas globales de crecimiento, menores TG en los años recientes. Menor crecimiento. Menor tasa global crecimiento en los adultos (Mayor en reclutas). TG fue menor en verano-otoño (Mayor en Invierno-Primavera)		Ajustar las zonas de veda según los cambios en los patrones de migración y reproducción, asegurando que las áreas clave estén protegidas.	
Monitoreo y Control	Monitoreo de crecimiento de poblaciones	La variabilidad en el crecimiento puede hacer que los modelos predictivos sean menos precisos, lo que requiere ajustes continuos.			Implementar sistemas de monitoreo adaptativo que permitan ajustar las regulaciones pesqueras a medida que se obtiene nueva información sobre el crecimiento y la salud de las poblaciones.	

## 5. DISCUSI3N

---

En el presente estudio la variaciones interanuales del crecimiento se abordaron a trav3s de 4 aproximaciones: (i) an3lisis cronol3gicos de grosores a trav3s de un modelo GAM, (ii) un 3ndice de crecimiento derivado de un modelo GLM, donde la LT fue explicada por la cohorte de nacimiento, la edad a la captura y la estaci3n de nacimiento, (iii) relaci3n edad-talla a la fecha de captura para diferentes cohortes anuales de crecimiento y (iv) cambios en las tasas de crecimiento globales por cohortes bi-estacionales de crecimiento. Cada una de estas aproximaciones evidenci3 cambios interanuales significativos en el crecimiento de la anchoveta. A continuaci3n se discuten algunos elementos particulares asociados a cada una de ellas.

En relaci3n con el crecimiento de anchoveta de la zona norte de Chile, encontramos cambios temporales importantes en las tasas de crecimiento y longitud media de los peces con respecto a la edad, al menos en los primeros 150 d3as (5 meses) de vida. El resultado se sustenta mayormente en los peces nacidos en la 3poca principal de desove, que corresponde a invierno y primavera, estaciones en que se recolect3 la mayor parte (68%) de las muestras analizadas. El an3lisis cronol3gico del grosor de los incrementos, utilizado como proxy de la tasa de crecimiento, muestra en el resumen hist3rico un perfil del efecto parcial para cada estaci3n un patr3n similar al reportado por Cerna y Plaza (2016), con un m3ximo de GI a los 50 d3as en invierno, primavera y verano, y algo desplazado en otoño hacia los 60-70 d3as. Aunque el m3ximo de otoño es el 3nico peak que ocurre 10 d3as despu3s que lo observado para el resto de las estaciones, los grosores medios estimados por el modelo GAM indican que existe diferencias significativas entre estaciones, lo cual puede estar relacionado con la alta variabilidad en el crecimiento dado por las distintas condiciones ambientales de cada estaci3n del año, como tambi3n entre cohortes. El mismo modelo detect3 diferencias significativas entre cohortes en el grosor medio, mostrando una tendencia decreciente en el tiempo, lo que sugiere una disminuci3n de la tasa de crecimiento despu3s del 2009. Es importante tener en consideraci3n que un menor grosor puede reflejar una menor incorporaci3n de carbonato de calcio en el otolito, el que, al igual que otros elementos, tiene en parte un origen org3nico proveniente de la alimentaci3n (H3ussy et al. 2020).

La longitud media del pez con respecto a la edad observada al momento de la captura fue modelada con un GLM que mostr3 un alto desempe1o, explicando el 89% de la devianza, para datos que se distribuyeron en forma normal, con homocedasticidad de varianza y una baja presencia de puntos fuera de tendencia. Se decidi3 modelar en forma lineal la relaci3n edad-longitud, para contar con un adecuado balance de la distribuci3n de datos entre las distintas cohortes comparadas, lo cual se logr3 restringiendo el an1lisis al rango de edades entre 50 y 150 d1as de vida. Esta selecci3n permiti3 la comparaci3n de 11 de las 15 cohortes en que se leyeron otolitos, las que fueron suficientes para caracterizar la variaci3n hist3rica de la variable respuesta. El resultado mostr3 diferencias significativas entre las cohortes, con coeficientes que muestran dos periodos con altos valores y posteriores descensos. El primero muestra un coeficiente alto en la relaci3n lineal entre la edad-talla del pez, para la cohorte 1972-1973 y un descenso posterior hasta el 2001-2002, y un segundo periodo con un alto coeficiente el 2009-2010, similar al de 1972-1973, que tambi3n disminuye en las cohortes siguientes hasta el 2022-2023. Las longitudes medias predichas a partir del modelo muestran una disminuci3n inter-cohorte que incluye a cada una de las estaciones. Es decir, la longitud media a una edad de 108 d1as de vida present3 el mismo patr3n observado en los coeficientes de los ajustes de cada cohorte dentro del modelo. Esto es, dos per1odos entre 1972 y 2022 en que la talla media estuvo alta y luego descendió paulatinamente. El primer periodo de ca1da de la longitud media se registr3 entre 1972-1973 y 2001-2002, donde la longitud media disminuy3 en 2,6 cm. En el segundo periodo, desde el 2009-2010 a 2022-2023, la longitud disminuy3 en 2,9 cm. Este hallazgo fue coherente con la disminuci3n observada en la tasa de crecimiento de anchoveta a trav3s del ajuste Laird-Gompertz para nueve cohortes analizadas entre 1991-1992 y 2022-2023. En estas cohortes el par1metro alfa del modelo, que corresponde a la tasa instant1nea de crecimiento, fue m1s alto en las cohortes 1991-1992, 1992-1993, 2009-2010 y 2014-20215 en relaci3n con el resto de las cohortes a partir del 2019-2020. Los resultados de disminuci3n de la longitud media y tasa de crecimiento en dos periodos sugieren que los cambios parecieran no ser exclusivos de la 1ltima d3cada. Antes del 2001 ocurrieron cambios en las condiciones ambientales, bi3ticas y abi3ticas, que afectaron el tama1o medio de los peces, aunque el cambio fue mayor entre 2009-2010 y 2022-2023.

Las tasas de crecimiento globales (TCG) son registros absolutos, que representan el promedio del crecimiento para una etapa particular, sin tener en cuenta los cambios que pueden ocurrir a escalas menores a nivel diario (Campana et al. 1992; Panfili et al. 2002). Sin embargo, cuando se realiza un análisis por separado y por etapa de vida, puede otorgar una buena aproximaci3n, para determinar las fluctuaciones del crecimiento diario a diferentes escalas temporales. En el presente estudio fue posible disponer con una base de datos que permiti3 analizar las fluctuaciones en las TCG para 18 a1os. Ciertamente el análisis de las fluctuaciones del crecimiento diario debe realizarse a nivel de cohorte de nacimiento, porque este indicador de condici3n varía notablemente en funci3n de las fluctuaciones de los principales controladores ambientales del crecimiento somático en los estadios tempranos de peces (e.g., alimento disponible y temperatura (Kuzuhara et al. 2019; Vagner et al. 2019). Estrictamente, el análisis debiese llevarse a nivel de cohortes mensuales; sin embargo, abordar un dise1o de esta magnitud es impracticable, debido a los costos financieros requeridos. No obstante, para el presente estudio, la base de datos permiti3 efectuar un análisis por separado para ejemplares nacidos en las cohortes de invierno-primavera y verano-oto1o. La justificaci3n para este análisis se bas3 en un criterio biol3gico, porque las cohortes representan la duraci3n aproximada de la 3poca de principal de esta especie y la 3poca secundaria de verano, donde se ha evidenciado tambi3n actividad de desove a inicios de oto1o (e.g., Claramunt et al. 2019). Esta reagrupaci3n tambi3n permiti3 incrementar el tama1o de muestra lo que repercute tambi3n en la potencia y confiabilidad de los análisis.

#### Variabilidad en las condiciones oceanogr3ficas y de productividad

Se observaron periodos con claras diferencias en el forzamiento atmosf3rico sobre la regi3n, tanto en t3rminos del stress de viento paralelo a la costa, que genera transporte de Ekman y consecuentemente la surgencia costera, como en t3rminos del rotor de viento y el Bombeo de Ekman generado por 3ste sobre una banda costera de 25-50 km de ancho. A mediados de la d3cada de 1990 hubo un incremento abrupto en la magnitud de ambos procesos de afloramiento, el cual se mantuvo



hasta comienzos de la d3cada de 2010, con una ca3da mucho m3s gradual y niveles actuales que son comparables o levemente superiores a los observados a inicios de la d3cada de 1980.

A partir del an3lisis de wavelets se observaron diferencias importantes entre zonas en cuanto a periodos en que la se1al estacional del transporte de Ekman (y supuestamente de la surgencia costera) se volvi3 m3s importante. Estos cambios interanuales en la fuerza de la se1al estacional de la surgencia podr3an ser muy relevantes para el ecosistema costero completo, puesto que, si no hay estacionalidad en la surgencia, las condiciones de advecci3n horizontal en la capa superficial y de inyecci3n de nutrientes en la capa f3tica debiesen ser constantes durante el a1o, y la productividad primaria estar3a controlada mayormente por la radiaci3n solar. En una condici3n como esta, cambios en el *timing* del desove de peces pel3gicos no debiesen tener un impacto tan grande sobre la dispersi3n, alimentaci3n y sobrevivencia de larvas como el que tendr3a un desacople entre el desove y un ciclo estacional marcado. Si esto se suma a cambios interanuales en el bombeo de Ekman, y los efectos que esto podr3a tener sobre la composici3n / estructura de tama1os del fitoplancton, dichos periodos podr3an ser cr3ticos para la renovaci3n poblacional de la anchoveta.

Tanto el transporte como el bombeo de Ekman son procesos clave para la din3mica de las condiciones f3sico-qu3micas y productividad de las aguas costeras, as3 como tambi3n para la composici3n y estructura de tama1os del fitoplancton y zooplancton. Estudios realizados en la costa de California indican que variaciones interanuales en el afloramiento de agua por Bombeo de Ekman sobre una banda costera m3s ancha, m3s que la surgencia costera debida al transporte de Ekman en la l3nea de costa, pueden explicar cambios en la abundancia relativa de peces pel3gicos peque1os a trav3s de su influencia sobre las condiciones de nutrientes y estructura de tama1os del plancton (Rykaczewski y Checkley 2008).

Del 3ndice de enfriamiento costero calculado a partir de anomal3as de TSM latitud-espec3ficas y de las fluctuaciones a escala sin3ptica de la TSM en la regi3n, se observ3 una clara intensificaci3n en el enfriamiento costero a partir de 2006-2007, sugiriendo una intensificaci3n del proceso de surgencia

costera a partir de ese periodo que es consistente con lo documentado para áreas costeras ubicadas más al sur (Schneider et al. 2017, Weidberg et al. 2020), y que difiere del patrón interanual en intensidad de la surgencia que se podría esperar a partir del análisis de viento. Este último habría predicho un enfriamiento más intenso de la costa entre 1995 y 2010, y un enfriamiento menos intenso en años recientes. No obstante, lo anterior, los años en que se observaron cambios en los niveles medios y en la amplitud de la variación estacional de la clorofila coinciden más con los cambios en el régimen de viento que con los índices de enfriamiento.

En cuanto a la clorofila superficial, hubo claras diferencias a escala interanual tanto en el nivel medio como en la importancia de la señal estacional. La identificación de tres periodos con diferencias significativas en el nivel medio de clorofila permitió calcular y comparar climatologías mensuales dentro de las tres zonas de interés, y constatar que en Arica se perdió todo indicio de estacionalidad en la clorofila superficial costera a partir de 2006, y los niveles medios de clorofila en años recientes superan aquellos observados antes de 2006, sobre todo en septiembre. En Iquique la señal estacional se acentuó entre 2006 y 2016, a pesar de una caída en el nivel medio de clorofila, que mostró una recuperación después de 2016, con excepción de los meses de octubre-noviembre, en que la clorofila cayó aún más. Finalmente, en Antofagasta los niveles medios de clorofila-a durante la primavera disminuyeron marcadamente a partir del año 2006, y no mostraron una recuperación en años posteriores. la señal estacional, aunque leve, se mantuvo en años posteriores a 2016.

### Variabilidad interanual de la oferta alimentaria

Los resultados muestran cambios interanuales y estacionales en la abundancia y estructura comunitaria del zooplancton en la región norte de Chile. Se detectaron decaimientos de la abundancia total y de copépodos, y aumentos importantes de gelatinosos, que podrían estar asociados con un forzamiento ambiental. Se destacó la disminución de la abundancia de copépodos a partir del 2016 en otoño y entre 2014 y 2016 en verano, que coincide con el desarrollo de El Niño 2015-2016, uno de los

eventos c3lidos m3s largos e intensos de las 3ltimas d3cadas (Stramma et al., 2016). Otros trabajos han demostrado decaimientos en la abundancia de cop3podos, as3 como otros crust3ceos, a raz3 del desarrollo de eventos c3lidos (Beaugrand et al., 2002; Torres et al., 2021). Torres et al. (2021) mostraron un decaimiento de la abundancia del cop3podo *Centropages brachiatus* en la costa peruana durante El Ni3o costero 2017. Brodeur et al. (2019) reportaron un decaimiento de los crust3ceos, en especial de eufa3sidos, y un aumento de gelatinosos asociado al evento c3lido del 2015-2016 en el ecosistema de la corriente de California. As3 mismo, un estudio desarrollado en el Golfo de M3xico mostr3 una disminuci3n en la abundancia de eufa3sidos en el periodo c3lido 2014-2015, asociado a las olas calor marinas (MWH por sus siglas en ingl3s) del 2014 y al evento El Ni3o 2015-2016 (Garc3a-Fern3ndez et al., 2023). Recientemente ha llamado la atenci3n el efecto que tienen las olas de calor en la abundancia de algunos grupos del zooplancton (Garc3a-Fern3ndez et al., 2023), dado que se ha proyectado que la probabilidad de ocurrencia de estos eventos va a aumentar en el futuro (Fr3licher et al., 2018). Esto podr3a tener dr3sticas consecuencias en la comunidad del zooplancton y con ello, en las poblaciones de peces pel3gicos, como la anchoveta, que se alimenta principalmente de este grupo.

Por otro lado, el aumento progresivo de los gelatinosos a partir del 2014, coincide con el inicio del periodo c3lido, como se observ3 en el estudio de Brodeur et al. (2019). Una dominancia de gelatinosos podr3a tener graves consecuencias en el aporte nutricional de los peces que se alimentan de zooplancton, y con ello alterar su crecimiento, peso y talla. Cabe destacar los mayores peaks de abundancia que tuvieron los gelatinosos carn3voros en la primavera, en especial las medusas y cten3foros, que son potenciales depredadores de huevos y larvas de peces (Pag3s et al., 2001). Un aumento en la abundancia de estos grupos durante esta 3poca del a3o, podr3a ser perjudicial para la sobrevivencia de los estadios tempranos de anchoveta, dado que su m3ximo desove se da en primavera (Hern3ndez-Santoro et al., 2019, 2013).

Cabe destacar la tendencia que tuvo la pendiente de la estructura de tama3os del zooplancton hacia valores menos negativos. Esto indica que los grupos de mayor tama3o est3n teniendo una mayor representatividad dentro de la comunidad zooplanct3nica. Este cambio puede ser debido al aumento que han tenido los gelatinosos, los que en general son de mayor tama3o que los dem3s grupos

taxon3micos. Cambios en la estructura de tama1o del zooplancton puede tener consecuencias importantes en los eslabones superiores que se alimentan principalmente de este grupo (Ay3n et al., 2011). Ay3n y colaboradores (2011) mediante el an3lisis de 15.000 muestras de zooplancton colectadas desde los a1os 60 en el mar peruano, Ay3n et al. (2011) encontraron una alta correlaci3n entre la biomasa de anchoveta y la dominancia de eufaúsidos, y una alta correlaci3n entre la biomasa de sardina y la dominancia de zooplancton peque1o, lo que refuerza la hip3tesis de que el cambio en el tama1o del alimento pudo haber gatillado la alternancia observada entre ambas especies.

En nuestros resultados, las variaciones inter-anales de la pendiente del espectro de tama1os refleja un aumento en la representatividad de los organismos m3s grandes, mas no un aumento en el tama1o de los organismos de un grupo en particular. Para ello se requiere un an3lisis por grupo taxon3mico, y de esta manera descartar que los cambios observados se deban a que los organismos est3n disminuyendo su tama1o corporal producto del cambio clim3tico (Brand3o et al., 2021). A pesar de ello, los resultados son preocupantes, ya que apuntan hacia un cambio en la comunidad del zooplancton, que normalmente est3 dominada por copépodos, pero se ha transformado a una comunidad donde los organismos gelatinosos poseen una mayor representatividad.

Cabe destacar la variabilidad estacional que se observ3 en la comunidad del zooplancton entre estaciones del a1o para el periodo 2014-2020. La diferencia en la comunidad del zooplancton fue explicada principalmente por los copépodos. Dicho grupo present3 sus mayores abundancias en primavera, lo que es consistente con trabajos previos (Escribano et al. 2007) que encontraron mayores abundancias de copépodos en la misma 3poca y lo asociaron con una surgencia m3s intensa y una capa de m3nimo ox3geno m3s somera.

#### Variabilidad del crecimiento som3tico y forzantes ambientales

El presente estudio demostr3 que la anchoveta ha experimentado una ca3da significativa del crecimiento som3tico, en funci3n de las tendencias consistentes que evidenciaron diferentes aproximaciones anal3ticas, tanto, de las tasas de crecimiento globales independiente del estado ontogen3tico (i.e., pre-reclutas, reclutas o adultos), as3 como tambi3n en el índice estandarizado de

crecimiento, obtenido a trav3s de diferentes enfoques de modelaci3n (GAM y GLM). En este sentido, los resultados del crecimiento estandarizado a trav3s de la modelaci3n GAM mostr3 que el transporte de Ekman tuvo una relaci3n significativa en el modelo, explicando entre un 10 a 12% de la variabilidad total con un efecto positivo en el crecimiento con transportes de agua fuera de la costa menores a 5. Lo anterior, podr3a estar relacionado con los efectos del transporte de Ekman en el tama1o y abundancia del plancton en las zonas de surgencia. Estos hallazgos concuerdan con el estudio de Rykaczewski y Checkley (2008), que evidenciaron un efecto positivo del transporte de Ekman (mayor velocidad de afloramiento) en el aporte de nutrientes, que se tradujo en mayores tama1os corporales de fito y zooplancton. Contrariamente, una menor intensidad en el afloramiento costero se asocia con menores tama1os de fito y zooplancton, lo que podr3a estar limitando el crecimiento de la anchoveta. Al respecto, varios estudios han sugerido una relaci3n directa entre los cambios en el tama1o, composici3n y la calidad del alimento y el crecimiento de pel3gicos peque1os (e.g., Van Beveren et al. 2014; Brosset, Le Bourg, et al. 2016; Brosset, Lloret, et al. 2016). Por ejemplo, Van Beveren et al. (2014) evidenci3 un cambio en el tama1o de las presas que consumieron ejemplares adultos de sardina (*Sardina pilchardus*) del Golfo de Lyon, donde la alimentaci3n cambi3 de presas de gran tama1o con alta contribuci3n de clad3ceros > 1mm antes del 2008 a presas con tama1os <1 mm. Este cambio en el tipo de alimentaci3n se tradujo en una menor condici3n corporal y de crecimiento atribuido a un control de tipo bottom-up. Es importante destacar que hasta la fecha la hip3tesis m3s plausible en base a la evidencia cient3fica acumulada sugiere que las fluctuaciones en la productividad de los peces pel3gicos peque1os est3n controladas por factores bottom-up (Schwartzlose & Alheit, 1999; Saraux et al., 2019), donde los cambios de productividad del fito y zooplancton, presumiblemente modulados tambi3n por forzantes ambientales, parecen jugar un rol crucial.

Es importante destacar que dos estudios recientes evaluaron, bajo condiciones experimentales, la relaci3n entre la condici3n som3tica y de crecimiento de la sardina con las variaciones en el tama1o del alimento (Queiros et al. 2019; Thorat et al. 2021). Estos autores demostraron que el consumo de presas peque1as impact3 negativamente en el crecimiento y condici3n corporal, debido a que la acumulaci3n de l3pidos se registr3 al ingerir grandes cantidades de presas de mayor tama1o (Queiros

et al. 2019). En estos estudios tambi3n se demostr3 que la tasa de crecimiento y masa corporal disminuyeron con una baja raci3n de presas grandes, pero sin estimular respuestas metab3licas. Por el contrario, la alimentaci3n con partculas pequeas, en cualquier cantidad, indujo ahorro de energa en las mitocondrias que son t3picas de un desafa energ3tico severo asociado con un cambio en el modo de alimentaci3n de partculas a filtrador, m3s costoso en t3rminos energ3ticos (Thoral et al. 2021).

Los resultados derivados del proceso de modelaci3n revelaron que los indicadores t3rmicos explican entre un 5 y 10% de la variabilidad interanual de los ndices de crecimiento. En este contexto es importante destacar que cambios a escala diaria en la tasa de crecimiento se han reportado para *Engraulis capensis* en Sud3frica (Waldron 1995), estimando una disminuci3n en la tasa de crecimiento instant3nea entre 1985 y 1991, que se atribuy3 a variaciones en la temperatura superficial del mar, acopladas con cambios en el viento y la producci3n de cop3podos, uno de los componentes de la dieta de anchoveta en esa zona. En otros estudios en peces pel3gicos pequeos como la sardina (*Sardina pilchardus*) y anchoveta (*Engraulis encrasicolus*) en aguas europeas se ha documentado una reducci3n del tamao promedio, el peso, la condici3n y el crecimiento de los peces en las 3ltimas dos d3cadas en el noreste Atl3ntico (Doray et al., 2018; V3ron et al., 2020; Bo3ns et al., 2021) y el Mediterr3neo (Brosset et al., 2017; Albo-Puigserver et al., 2021) para cada clase de edad. Menu et al. (2022) estudiaron el origen de estos cambios aplicando un modelo bioenerg3tico, el que dio como resultado que las variaciones espaciales en el crecimiento en una parte importantes obedecen a cambios en la temperatura y el zooplancton. Otra posible respuesta para explicar los cambios en tamao de los peces a la edad es la aportada por Taboada et al. (2023) quienes proponen un proceso de selecci3n, aunque indican que la temperatura fue el mejor predictor de la disminuci3n del tamao de los adultos. Dado que los cambios exceden en gran medida la variaci3n intraespec3fica, Taboada et al. (2023) concluyeron que se requiere evidencia adicional para terminar de entender la naturaleza de estos cambios. Para la anchoveta *Engraulis ringens* presente en la costa frente a Chile solo existe evidencia de que la temperatura es uno de los principales factores que determina el cambio de crecimiento a nivel espacial (Cerna et al. 2022; Hern3ndez et al. 2020). Sin embargo, no se dispone

aún de estudios que permitan explicar las variaciones temporales en las tasas de crecimiento y el tamaño a la edad.

Los resultados del análisis interanual del TCG mostraron que independiente del estado ontogenético (i.e., pre-reclutas, reclutas o adultos), se observa una tendencia hacia una disminuci3n en las tasas de crecimiento globales en las últimas dos décadas, aunque la tendencia apareci3 mucho más variable a nivel interanual en reclutas, que fue la etapa que contó con una matriz de datos más extensa y consistente de registros micro-estructurales. Esta mayor variabilidad interanual en las TCG observada en los reclutas fue consistente con los resultados derivados de los índices estandarizados de crecimiento de los modelos GLM y GAM. Estos hallazgos son promisorios porque son indicativos de que las variaciones del crecimiento de los reclutas estarían capturando el efecto de forzantes que pueden operar a escalas de mayor frecuencia a nivel interanual y aquellos que operarían a menor frecuencia a escala interdecadal. En este contexto es importante destacar que el crecimiento somático es un indicador de la condici3n de una especie, ya que es un variable concomitante que puede variar en funci3n de los forzantes que la controlan (e.g., Daufresne et al., 2009; Oke et al., 2020). Por ello, sería muy valioso seguir extendiendo la serie de tiempo con el fin de evaluar si las variaciones interanuales del crecimiento somático de juveniles concuerdan con los cambios de abundancia. Si este fuera el caso, estaríamos frente a una evidencia robusta de que el crecimiento está vinculado con la sobrevivencia de esta especie, dentro del marco del paradigma de la relaci3n crecimiento mortalidad en peces marinos (Cowan y Houde, 1992; Meekan et al., 1996; Robert et al., 2022).

Es importante destacar que la caída gradual en las tasas de crecimiento globales fue evidenciada consistentemente por medio de dos técnicas analíticas distintas (i.e., GLM y GAM), lo que sustenta los resultados pese a que el diseño no fue enteramente balanceado. Las tasas globales representan un registro absoluto del crecimiento que integra una parte de toda la historia de vida y, en caso de peces adultos, contiene la influencia del crecimiento rápido en las primeras etapas (Campana et al., 1991; Panfili et al., 2002). Por ello, es razonable que el crecimiento sea más bajo aún después de que el ejemplar haya alcanzado la adultez. La primera pregunta que surge a la luz de estos hallazgos es

¿cuál o cuáles podrían ser las causas que expliquen esta caída consistente del crecimiento somático en esta especie? Hasta la fecha no existen estudios a este nivel de escala interanual, que hayan utilizado un enfoque metodológico similar en otras especies emparentadas, como para efectuar un análisis comparativo. Sin embargo, es importante subrayar que estudios recientes en peces pelágicos pequeños también han reportado caídas sostenidas en las tallas medias (como índice indirecto de crecimiento somático) (e.g., Brosset et al. 2015; Menu et al. 2023). Por ejemplo, Veron et al. (2020) reportaron una caída en la talla media estandarizada desde el 2003 al 2015 para la sardina europea *Sardina pilchardus*. Mas recientemente, Taobada et al. (2024) reportaron una caída de la talla media desde juveniles a adultos para la anchoveta europea *Engraulis encrasicolus* en los últimos 30 años. Estos estudios demuestran el papel clave que juegan los mecanismos de control de tipo bottom-up, relevando particularmente la importancia de los forzantes extrínsecos térmicos y de productividad. Estos hallazgos coinciden en parte con los resultados del presente estudio para la anchoveta, donde los indicadores de temperatura superficial del mar y el transporte Ekman parecen jugar un rol esencial en las fluctuaciones del crecimiento somático de esta especie.

En el caso particular del presente estudio, la caída del crecimiento somático sincroniza bien con la tendencia hacia la disminución de la abundancia de esta especie reportada en las últimas dos décadas y con la caída de las tallas medias observadas (e.g., Canales et al., 2018; Böhm et al., 2020). Es importante subrayar que el crecimiento somático en peces puede ser afectado por mecanismos de denso-dependencia, donde los mayores niveles de abundancia se asocian a una drástica disminución de crecimiento somático y viceversa (e.g., Pedersen et al., 2018; Yang et al., 2021). Por lo tanto, los hallazgos en anchoveta no parecen sustentar que un mecanismo de este tipo esté operando en esta especie en la zona de estudio, debido a que las tendencias son inversas. Estos hallazgos coinciden con los resultados reportados por Taobada et al. (2024), que demostraron que el efecto denso-dependiente fue menos importante en la predicción de la caída en las tallas medias de la anchoveta europea a escala inter-decadal. De los resultados de este estudio reciente en una especie emparentada, y de los resultados del presente estudio en *E. ringens*, se releva el rol que pueden tener factores extrínsecos independientes de la pesca en la caída de la condición somática de la anchoveta,



como por ejemplo forzantes oceanográficos y/o de productividad, como los identificados en el presente estudio.

Un hallazgo distintivo del análisis de las TCG por etapa de vida fue la caída gradual observada en el crecimiento de los adultos > 12 cm en los últimos tres años, lo que contrastó con los valores relativamente estables de TCG a inicios de los años 90. Aunque las TCG son un índice de crecimiento integrado de toda la historia de vida y la serie es todavía muy corta, estos resultados otorgan una primera evidencia de que gran parte de la caída del crecimiento pudiese estar ocurriendo en la fase adulta, presumiblemente vinculada a la madurez sexual. Es importante señalar que en animales ectotermos existe un vínculo muy estrecho entre metabolismo, crecimiento y reproducción y que el impacto que se genere en alguno de ellos, por efecto de algún forzante, se traduciría en un ajuste fenotípico del otro, para garantizar la adaptabilidad y resiliencia (e.g., **Kozłowski et al.**, 2020; White et al., 2022). En este contexto es importante subrayar que se ha reportado un fenómeno de juvenilización para la anchoveta en el norte de Chile, indicando una caída en la talla media de madurez en los últimos años (Hernández et al. 2023). Por lo tanto, bajo un escenario de juvenilización pareciera razonable inferir que la especie esté destinando una mayor fracción de la energía a la reproducción, después de alcanzar un tamaño mínimo competente para desarrollar y madurar sus células sexuales. Para poner a prueba esta hipótesis sería muy valioso indagar, a través de un estudio de análisis histológico y de crecimiento en un mismo ejemplar, si los otolitos pueden registrar el primer desove, a través de un cambio en el patrón de grosor de los micro-incrementos u otros rasgos microestructurales, que permitan diferenciar el crecimiento pre-y post desove.

## 6. CONCLUSIONES

---

- Se confirma la hip3tesis donde planteamos que la disminuci3n de la longitud media para la anchoveta de la zona norte podr3a estar asociada con una disminuci3n en el crecimiento somático.
- Los perfiles de grosores medios globales estandarizados por el efecto de la variabilidad interanual, a trav3s de un modelo aditivo generalizado, siguieron un patr3n parab3lico independiente de la cohorte estacional de nacimiento (i.e., verano, otoño, invierno o primavera), evidenciándose adem3s un crecimiento sostenido para los primeros dos meses de vida, seguido de un decaimiento hacia el quinto mes de vida.
- Los índices de crecimiento derivados de modelos GLM y GAM, a la relaci3n talla edad a la fecha de captura, estandarizados por el efecto de la cohorte estacional de nacimiento y zona de captura, para ejemplares de entre 50 y 150 d3as de vida, bajo un enfoque de una serie de tiempo discreta, evidenciaron dos periodos de disminuci3n en productividad somática, uno desde 1972 hasta 2002 y otro entre 2009 y 2022.
- Las tasas promedio de crecimiento global evidenciaron una tendencia decreciente en las últimas dos d3cadas a nivel general, con un 30% de disminuci3n que sigui3 el mismo patr3n independiente de la etapa ontogénica (pre-reclutas, reclutas y adultos) y la estaci3n bimensual de nacimiento.
- El proceso de surgencia costera se intensific3 en el área de estudio a partir de 2006-2007.
- La abundancia total del zooplancton y de los copépodos present3 una disminuci3n, con un aumento concomitante en la abundancia relativa de gelatinosos.
- En otoño la abundancia de copépodos disminuye a partir del 2016 y entre 2014 y 2016 en verano.
- La disminuci3n de la longitud media de la anchoveta en la zona fue explicada principalmente por la edad, la cohorte de nacimiento, estaci3n del año e indicadores de procesos de surgencia como el transporte de Ekman e indicadores de temperatura, explicando entre un 90 a 91% de la variabilidad total.

- Los resultados del presente estudio, a trav3s diferentes 3ndices estandarizados, demostraron que el crecimiento som3tico de la anchoveta en los 4 3ltimos a3os correspondi3 a los registros m3s bajos de la serie interanual analizada, reflejando que esta especie se encuentra en una condici3n som3tica cr3tica, que amerita la aplicaci3n de medidas urgentes de manejo y evaluaci3n que garanticen su sustentabilidad en el corto y mediano plazo

Una de las principales recomendaciones emanadas del taller de expertos fueron las siguientes:

- Considerar el manejo pesquero en base a campa3as de evaluaci3n directa y de alta frecuencia. Revisar los procesos aplicados en Chile y tender a la adopci3n de procedimientos similares a los utilizados en Per3.
- Revisar y/o redefinir los puntos biol3gicos de referencia y la biomasa de referencia frente a un escenario de cambio en la biolog3a de estos recursos.
- Revisar el periodo y duraci3n de la veda de reclutamiento. Mantener la veda como medida, pero no el periodo fijo.
- Revisar los procedimientos de manejo de manera que sean flexibles. Principalmente en la decisi3n de la CBA.
- Revisar la talla utilizada como indicador en los diferentes monitoreos realizados en la zona norte.
- Considerar un cierre moratorio o desembarque bajo estas condiciones.

## 7. PLAN DE ACTIVIDADES

1. Actividades generales	Total /Actividad	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abri	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1.1 Reunión de Cordinación y planificación general																	
1.2 Informe de Avance																	
1.3 Informe Pre- Final																	
1.3 Taller de Resultados																	
1.4 Informe Final																	
<b>Objetivo específico 1</b>																	
2.1 Búsqueda y selección otolitos																	
1.2 Montaje de otolitos																	
1.3 Pulido y toma de imágenes de los otolitos																	
1.4 Lectura y mediciones de microincretetos de otolitos																	
1.5 Elaboración de base de datos completa																	
1.6 Ejercicios de calibración de lecturas																	
1.7 Análisis de crecimiento																	
1.8 Dirección y supervisión Objetivo 1																	
<b>Objetivo específico 2</b>																	
2.1 Búsqueda bibliografica																	
2.1 Recopilación de las bases de datos de los cruceros																	
2.2 Analisis de la información																	
<b>Objetivo específico 3</b>																	
3.1 Revisión de los planes de manejo																	
3.2 Analisis de las recomendaciones de manejo en base a resultados																	
3.3 Taller de discusión de las recomendaciones de manejo																	
3.4 Analisis de los resultados del taller de discusión de las recomendaciones de manejo																	

---

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Aldanondo, N., Cotano, U., Tiepolo, M., Boyra, G., & Irigoien, X. (2010). Growth and movement patterns of early juvenile European anchovy (*Engraulis encrasicolus* L.) in the Bay of Biscay based on otolith microstructure and chemistry. *Fisheries Oceanography*, 19(3), 196-208
- Alheit, J., Niquen, M., 2004. Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. *Prog. Oceanogr.* 60, 201–222. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2004.02.006>
- Allan, B. J., Browman, H. I., Shema, S., Skiftesvik, A. B., Folkvord, A., Durif, C. M., & Kjesbu, O. S. (2022). Increasing temperature and prey availability affect the growth and swimming kinematics of Atlantic herring (*Clupea harengus*) larvae. *Journal of Plankton Research*, 44(3), 401-413.
- Amarasinghe, U.S., Pauly, D., 2021. The relationship between size at maturity and maximum size in cichlid populations corroborates the gill-oxygen limitation theory (Golt). *Asian Fish. Sci.* 34, 14–22. <https://doi.org/10.33997/j.afs.2021.34.1.002>
- Anderson, M.J. (2017). Permutational Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA). Wiley StatsRef: Statistics Reference Online, 1–15. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07841>
- Arellano-Valle, R.B., Contreras-Reyes, J.E., Stehlík, M., 2017. Generalized skew-normal negentropy and its application to fish condition factor time series. *Entropy* 19. <https://doi.org/10.3390/e19100528>
- Aronés, K., Grados, D., Ay3n, P., Bertrand, A. (2019). Spatio-temporal trends in zooplankton biomass in the northern Humboldt current system off Peru from 1961-2012. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 169–170. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.104656>
- Avaria-Llautureo, J., Venditti, C., Rivadeneira, M. M., Inostroza-Michael, O., Rivera, R. J., Hernández, C. E., & Canales-Aguirre, C. B. (2021). Historical warming consistently decreased size, dispersal and speciation rate of fish. *Nature Climate Change*, 11(9), 787-793.
- Ay3n, P., Swartzman, G., Espinoza, P., Bertrand, A. (2011). Long-term changes in zooplankton size distribution in the Peruvian Humboldt Current System: Conditions favouring sardine or anchovy. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 422, 211–222. <https://doi.org/10.3354/meps08918>
- Bacha, M., & Amara, R. (2012). Inter-cohort differences in growth, condition and feeding of juvenile anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Gulf of Béjaia (Algerian coast, SW Mediterranean):

- Implications for recruitment success. *Fisheries Research*, 129, 73-81.
- Bakun, A. (1996). Patterns in the ocean: ocean process and marine population dynamics. Cent. Investig. biológicas del Nord. La Paz, Mex. Univ. Calif. Sea Grant, San Diego, USA 325p.
- Barneche, D.R., White, C.R., Marshall, D.J.(2018). With Body Size 645, 642–645.
- Basilone, G., Guisande, C., Patti, B., Mazzola, S., Cuttitta, A., Bonanno, A., & Kallianiotis, A. (2004). Linking habitat conditions and growth in the European anchovy (*Engraulis encrasicolus*). *Fisheries Research*, 68(1-3), 9-19.
- Basilone, G., Mangano, S., Pulizzi, M., Fontana, I., Giacalone, G., Ferreri, R., ... & Bonanno, A. (2017). European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) age structure and growth rate in two contrasted areas of the Mediterranean Sea: the paradox of faster growth in oligotrophic seas. *Mediterranean Marine Science*, 18(3), 504-516.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B.M., Walker, S.C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *J. Stat. Softw.* 67. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Batten, S. D., Moffitt, S., Pegau, W. S., & Campbell, R. (2016). Plankton indices explain interannual variability in Prince William Sound herring first year growth. *Fisheries Oceanography*, 25(4), 420-432.
- Baudron, A. R., Needle, C. L., Rijnsdorp, A. D., & Tara Marshall, C. (2014). Warming temperatures and smaller body sizes: synchronous changes in growth of North Sea fishes. *Global change biology*, 20(4), 1023-1031.
- Beaugrand, G., Reid, P.C., Ibañez, F., Lindley, J.A., & Edwards, M. (2002). Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science*, 296, 1692–1694. <https://doi.org/10.1029/134GM10>
- Beamish, R.J., Fournier, D.D.A. (1981). A method for comparing the precision of a set of age determinations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 38, 982–983. <https://doi.org/10.1139/f81-132>
- Beaudry-Sylvestre, M., Benoît, H. P., & Hutchings, J. A. (2024). Coherent long-term body-size responses across all Northwest Atlantic herring populations to warming and environmental change despite contrasting harvest and ecological factors. *Global Change Biology*, 30(3), e17187.

- Becker, J. R., Cieri, M. D., Libby, D. A., St. Gelais, A., Sherwood, G., & Chen, Y. (2020). Temporal variability in size and growth of Atlantic herring in the Gulf of Maine. *Journal of Fish Biology*, 97(4), 953-963.
- Bilgin, S., Tařçı, B., & Bal, H. (2013). Sexual seasonal growth of the European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) caught by mid-water trawl and purse seine in the southern Black Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 93(2), 333-339.**
- Boëns, A., Ernande, B., Petitgas, P., & Lebigre, C. (2023). Different mechanisms underpin the decline in growth of anchovies and sardines of the Bay of Biscay. *Evolutionary Applications*, 16, 1393–1411. <https://doi.org/10.1111/eva.13564>
- Boëns, A., Grellier, P., Lebigre, C., & Petitgas, P. (2021). Determinants of growth and selective mortality in anchovy and sardine in the Bay of Biscay. *Fisheries Research*, 239, 105947.
- Böhm, G., Hernández, C., Díaz, E., Pérez, G., Ojeda, R., Gómez, M., Reyes, H., Pizarro, M., Cifuentes, U., Aravena, R., Muñoz, G., Gaspar, C. (2021). Convenio I: Asesoría Integral para la Pesca y Acuicultura. Convenio de Desempeño. Programa Seguimiento de las Pesquerías pelágicas 151p.
- Brosset, P., Le Bourg, B., Costalago, D., Bănar, D., Van Beveren, E., Bourdeix, J.H., Fromentin, J.M., Ménard, F., Saraux, C. (2016). Linking small pelagic dietary shifts with ecosystem changes in the Gulf of Lions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 554, 157–171. <https://doi.org/10.3354/meps11796>
- Brosset, P., Ménard, F., Fromentin, J.M., Bonhommeau, S., Ulses, C., Bourdeix, J.H., Bigot, J.L., Van Beveren, E., Roos, D., Saraux, C. (2015). Influence of environmental variability and age on the body condition of small pelagic fish in the Gulf of Lions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 529, 219–231. <https://doi.org/10.3354/meps11275>
- Brodeur, R.D., Auth, T.D., & Phillips, A.J. (2019). Major shifts in pelagic micronekton and macrozooplankton community structure in an upwelling ecosystem related to an unprecedented marine heatwave. *Frontiers in Marine Science*, 6(APR), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00212>
- Brunel, T., & Dickey-Collas, M. (2010). Effects of temperature and population density on von Bertalanffy growth parameters in Atlantic herring: a macro-ecological analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 405, 15-28.

- Butler, J. L. (1989). Growth during the larval and juvenile stages of the northern anchovy, *Engraulis mordax*, in the California Current during 1980-84. *Fishery Bulletin*, 87(3), 645-652.
- Cahuin, S. M., Cubillos, L. A., Niquen, M., & Escribano, R. (2009). Climatic regimes and the recruitment rate of anchoveta, *Engraulis ringens*, off Peru. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(4), 591-597.
- Canales, C. M., Adasme, N. A., Cubillos, L. A., Cuevas, M. J., & Sánchez, N. (2018). Long-time spatio-temporal variations in anchovy (*Engraulis ringens*) biological traits off northern Chile: an adaptive response to long-term environmental change?. *ICES Journal of Marine Science*, 75(6), 1908-1923.
- Canales, T. M., Law, R., & Blanchard, J. L. (2016). Shifts in plankton size spectra modulate growth and coexistence of anchovy and sardine in upwelling systems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 73(4), 611-621.
- Canales, T. M., Law, R., Wiff, R., & Blanchard, J. L. (2015). Changes in the size-structure of a multispecies pelagic fishery off Northern Chile. *Fisheries research*, 161, 261-268.
- Casini, M., Bartolino, V., Molinero, J. C., & Kornilovs, G. (2010). Linking fisheries, trophic interactions and climate: threshold dynamics drive herring *Clupea harengus* growth in the central Baltic Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 413, 241-252.
- Castello, L., & Castello, J. P. (2003). Anchovy stocks (*Engraulis anchoita*) and larval growth in the SW Atlantic. *Fisheries Research*, 59(3), 409-421.
- Castillo-Jordán, C., Cubillos, L. A., & Navarro, E. (2010). Inter-cohort growth rate changes of common sardine (*Strangomera bentincki*) and their relationship with environmental conditions off central southern Chile. *Fisheries Research*, 105(3), 228-236.
- Catalan, I. A., Folkvord, A., Palomera, I., Quílez-Badía, G., Kallianoti, F., Tselepides, A., & Kallianotis, A. (2010). Growth and feeding patterns of European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) early life stages in the Aegean Sea (NE Mediterranean). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86(2), 299-312.
- Cerna, F., Gómez, M., Moyano, G., Plaza, G., Morales-Nin, B. (2022). Spatial and inter-annual changes in the growth patterns of young-of-year anchovy in a high productive ecosystem. *Fish. Res.* 249.



- <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106236>
- Cerna, F., Plaza, G. (2016). Daily growth patterns of juveniles and adults of the Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) in northern Chile. *Mar. Freshw. Res.* 67, 899–912. <https://doi.org/10.1071/MF15032>
- Cubillos, L.A., Arcos, D.F., Bucarey, D.A., Canales, M.T. (2001). Seasonal growth of small pelagic fish off Talcahuano, Chile (37°S, 73°W): A consequence of their reproductive strategy to seasonal upwelling? *Aquat. Living Resour.* 14, 115–124. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(01\)01112-3](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(01)01112-3).
- Cowan, J. H., & Houde, E. D. (1992). Size-dependent predation on marine fish larvae by ctenophores, Scyphomedusae, and planktivorous fish. *Fisheries Oceanography*, 1(2), 113–126. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.1992.tb00030.x>
- Daufresne, M., Lengfellner, K., Sommer, U., 2009. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems, *PNAS* August.
- Chavez, F.P., Ryan, J., Lluch-Cota, S.E., Niquen, C.M. (2003). Climate: From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science* (80-). 299, 217–221. <https://doi.org/10.1126/science.1075880>
- Chambers, R.C., Trippel, E.A., (1997). *Early Life History And Recruitment In Fish Populations*. Edited by R. C. Chambers & E. A. Trippel. Fish and Fisheries Series 21. 596pp
- Chiu TS, Chen CS (2001) Growth and temporal variation of two Japanese anchovy cohorts during their recruitment to the East China Sea. *Fish Res* 53:1–15
- Claireaux, M., Zimmermann, F., Ernande, B., Heino, M., & Enberg, K. (2022). Environmental drivers of herring growth and how the perception shifts with time series length. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 79(8), 1282-1290.
- Claramunt, G., Serra, R., Castro, L.R., Cubillos, L. (2007). Is the spawning frequency dependent on female size? Empirical evidence in *Sardinops sagax* and *Engraulis ringens* off northern Chile. *Fish. Res.* 85, 248–257. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2007.01.009>
- Contreras, J. E., Rodríguez-Valentino, C., Landaeta, M. F., Plaza, G., Castillo, M. I., & Alvarado-Niño, M. (2017). Growth and mortality of larval anchoveta *Engraulis ringens*, in northern Chile during winter and their relationship with coastal hydrographic conditions. *Fisheries Oceanography*,

26(6), 603-614.

- Cotano, U., Irigoien, X., Etxebeste, E., Alvarez, P., Zarauz, L., Mader, J., & Ferrer, L. (2008). Distribution, growth and survival of anchovy larvae (*Engraulis encrasicolus* L.) in relation to hydrodynamic and trophic environment in the Bay of Biscay. *Journal of Plankton Research*, 30(4), 467-481.
- Cowan Jr, J. H., & Houde, E. D. (1990). Growth and survival of bay anchovy *Anchoa mitchilli* larvae in mesocosm enclosures. *Marine ecology progress series*. Oldendorf, 68(1), 47-57.
- Cowan Jr, J. H., Rose, K. A., Houde, E. D., Wang, S. B., & Young, J. (1999). Modeling effects of increased larval mortality on bay anchovy population dynamics in the mesohaline Chesapeake Bay: evidence for compensatory reserve. *Marine Ecology Progress Series*, 185, 133-146.
- Dieckmann, U., Heino, M. (2007). Probabilistic maturation reaction norms: Their history, strengths, and limitations. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 335, 253–269. <https://doi.org/10.3354/meps335253>
- Dos Santos Schmidt, T. C., Devine, J. A., Slotte, A., Claireaux, M., Johannessen, A., Enberg, K., ... & Kjesbu, O. S. (2020). Environmental stressors may cause unpredicted, notably lagged life-history responses in adults of the planktivorous Atlantic herring. *Progress in Oceanography*, 181, 102257.
- Dos Santos Schmidt, T. C., Hay, D. E., Sundby, S., Devine, J. A., Óskarsson, G. J., Slotte, A., ... & Kjesbu, O. S. (2021). Adult body growth and reproductive investment vary markedly within and across Atlantic and Pacific herring: a meta-analysis and review of 26 stocks. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 31, 685-708.
- Dulcic, J., & Kraljevic, M. (1996). Larval growth of anchovy, *engraulis encrasicolus* (fishes) in the eastern adriatic sea. *vie et milieu/life & environment*, 73-78.
- Ekau, W., Auel, H., Pörtner, H. O., & Gilbert, D. (2010). Impacts of hypoxia on the structure and processes in pelagic communities (zooplankton, macro-invertebrates and fish). *Biogeosciences*, 7(5), 1669-1699.
- Emery, W.J., Thomson, R.E. (1998). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon Press.
- Espinoza, P., Bertrand, A. (2008). Revisiting Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) trophodynamics

- provides a new vision of the Humboldt Current system. *Prog. Oceanogr.* 79, 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.022>
- Espinoza, P., Bertrand, A., 2014. Ontogenetic and spatiotemporal variability in anchoveta *Engraulis ringens* diet off Peru. *J. Fish Biol.* 84, 422–435. <https://doi.org/10.1111/jfb.12293>
- Espinoza, P., Bertrand, A., Lingen, C.D. Van Der, Garrido, S., Rojas, B., Mendiola, D. (2009). **Author's personal copy** Diet of sardine ( *Sardinops sagax* ) in the northern Humboldt Current system and comparison with the diets of clupeoids in this and other eastern boundary upwelling systems **Author ' s personal copy** 83, 242–250. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.045>
- Falkowski, P.G., Oliver, M.J. (2007). Mix and match- how climate selects phytoplankton- Falkowski and Oliver. *Nature* 5, 813–819.
- Feuilloley, G., Fromentin, J. M., Stemmann, L., Demarcq, H., Estournel, C., & Saraux, C. (2020). Concomitant changes in the environment and small pelagic fish community of the Gulf of Lions. *Progress in Oceanography*, 186, 102375.
- Flores-Valiente, J., Lett, C., Colas, F., Pecquerie, L., Aguirre-Velarde, A., Rioual, F., ... & Brochier, T. (2023). Influence of combined temperature and food availability on Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) early life stages in the northern Humboldt Current system: A modelling approach. *Progress in Oceanography*, 215, 103034.
- Franke, A., & Clemmesen, C. (2011). Effect of ocean acidification on early life stages of Atlantic herring (*Clupea harengus* L.). *Biogeosciences*, 8(12), 3697-3707.
- Fr3licher, T.L., Fischer, E.M., & Gruber, N. (2018). Marine heatwaves under global warming. *Nature*, 560(7718), 360–364. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9>
- Garc3s, C., Niklitschek, E.J., Leisen, M., Toledo, P., Cerna, F., Barra, F. (2019). Anchoveta *Engraulis ringens* along the Chilean coast: Management units, demographic units and water masses: Insights from multiple otolith - based approaches 735–750. <https://doi.org/10.1111/fog.12455>
- Garcia Alonso, V. A., Brown, D. R., P3jaro, M., & Capitanio, F. L. (2020). Growing up down south: spatial and temporal variability in early growth of Fuegian sprat *Sprattus fuegensis* from the Southwest Atlantic Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 7, 322.
- Garc3a-Fern3ndez, F., G3mez-Guti3rrez, J., De Silva-D3vila, R., Hakspiel-Segura, C., Ambriz-Arreola,

- I., Mart3nez-L3pez, A., S3nchez-Uvera, A.R., et al. (2023). Interannual response of euphausiid community abundance during the anomalous warming period (2014–2016) in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 212(3917), 1–51.  
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.102994>
- Garrido, S., Crist3v3o, A., Caldeira, C., Ben-Hamadou, R., Baylina, N., Batista, H., ... & Santos, A. M. P. (2016). Effect of temperature on the growth, survival, development and foraging behaviour of *Sardina pilchardus* larvae. *Marine Ecology Progress Series*, 559, 131-145.
- Garrido, S., Saiz, E., Peters, J., R3, P., 3lvarez, P., Cotano, U., ... & Irigoien, X. (2012). Effect of food type and concentration on growth and fatty acid composition of early larvae of the anchovy (*Engraulis encrasicolus*) reared under laboratory conditions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 434, 16-24.
- Grift, R.E., Rijnsdorp, A.D., Barot, S., Heino, M., Dieckmann, U. (2003). Fisheries-induced trends in reaction norms for maturation in North Sea plaice 257, 247–257.
- Hare, J.A., Cowen, R.K. (1997). Size, growth, development, and survival of the planktonic larvae of *Pomatomus saltatrix* (Pisces: Pomatomidae). *Ecology* 78, 2415–2431.  
[https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[2415:sgdaso\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[2415:sgdaso]2.0.co;2)
- Heino, M., God3, O.R. (2002). Fisheries-induced selection pressures in the context of sustainable fisheries. *Bull. Mar. Sci.* 70, 639–656.
- Hern3ndez, A., Plaza, G., Guti3rrez, J., Cerna, F., & Niklitschek, E. J. (2020). Spatiotemporal analysis of the daily growth traits of the prerecruits of a small pelagic fish in response to environmental drivers. *Fisheries Oceanography*, 29(6), 457-469.
- Hern3ndez, C., Morales, N., D3az, E., Lichtenberg, M., P3rez, G., Ojeda, R., Pizarro, M., Bustamante, A., Aravena, R., Mu3oz, G., Gaspar, C. y Y3ñez, O. (2023). Convenio I: Asesor3a Integral para la Pesca y Acuicultura. Convenio de Desempe3o. Programa Seguimiento de las Pesquer3as pel3gicas 316p.
- Hernandez, E. H., & Castro, L. R. (2000). Larval growth of the anchoveta *Engraulis ringens* during the winter spawning season off central Chile. *Fishery Bulletin*, 98(4), 704-704.
- Hern3ndez-Santoro, C., Contreras-Reyes, J., Landaeta, M. (2019a). Intra-seasonal variability of sea

- surface temperature influences phenological decoupling in anchovy (*Engraulis ringens*). *J. Sea Res.* 152. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2019.101765>
- Hernández-Santoro, C., Landaeta, M.F., Castillo Pizarro, J. (2019b). Effect of ENSO on the distribution and concentration of catches and reproductive activity of anchovy *Engraulis ringens* in northern Chile. *Fish. Oceanogr.* 28, 241–255. <https://doi.org/10.1111/fog.12405>
- Houde, E. D. (1977). Food concentration and stocking density effects on survival and growth of laboratory-reared larvae of bay anchovy *Anchoa mitchilli* and lined sole *Achirus lineatus*. *Marine Biology*, 43, 333-341.
- Huebert, K. B., Pätsch, J., Hufnagl, M., Kreuz, M., & Peck, M. A. (2018). Modeled larval fish prey fields and growth rates help predict recruitment success of cod and anchovy in the North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 600, 111-126.
- Hunter, A., Speirs, D. C., & Heath, M. R. (2019). Population density and temperature correlate with long-term trends in somatic growth rates and maturation schedules of herring and sprat. *PLoS One*, 14(3), e0212176.
- Hüssy, K., Limburg, K.E., de Pontual, H., Thomas, O.R.B., Cook, P.K., Heimbrand, Y., Blass, M., Sturrock, A.M. (2020). Trace element patterns in otoliths: the role of biomineralization. *Rev. Fish. Sci. Aquac.* 29, 1–33.
- Ikpewe, I.E., Baudron, A.R., Ponchon, A., Fernandes, P.G. (2021). Bigger juveniles and smaller adults: Changes in fish size correlate with warming seas. *J. Appl. Ecol.* 58, 847–856. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13807>
- Ito, S. I., Rose, K. A., Megrey, B. A., Schweigert, J., Hay, D., Werner, F. E., & Aita, M. N. (2015). Geographic variation in Pacific herring growth in response to regime shifts in the North Pacific Ocean. *Progress in Oceanography*, 138, 331-347.
- Jacob, B.G., Tapia, F.J., Quiñones, R.A., Montes, R., Sobarzo, M., Schneider, W., Daneri, G., Morales, C.E., Montero, P., González, H.E. (2018). Major changes in diatom abundance, productivity, and net community metabolism in a windier and dryer coastal climate in the southern Humboldt Current. *Prog. Oceanogr.* 168, 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.10.001>
- Jennings, S., Greenstreet, S.P.R., Reynolds, J.D. (1999). Structural change in an exploited fish

- community: A consequence of differential fishing effects on species with contrasting life histories. *J. Anim. Ecol.* 68, 617–627. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.1999.00312.x>
- Joly, L. J., Boersma, M., Giraldo, C., Mazurais, D., Madec, L., Collet, S., ... & Meunier, C. L. (2023). Smaller herring larval size-at-stage in response to environmental changes is associated with ontogenic processes and stress response. *Conservation Physiology*, 11(1), coad072.
- Jordan, R. C., Gospodarek, A. M., Schultz, E. T., Cowen, R. K., & Lwiza, K. (2000). Spatial and temporal growth rate variation of bay anchovy (*Anchoa mitchilli*) larvae in the mid Hudson River estuary. *Estuaries*, 23, 683-689.
- Kimura, D., 1980. Likelihood methods for the von bertalanffy growth curve. *Fish. Bull.* 77(4), 765–776.
- Landaeta, M. F., L3pez, G., Su3rez-Donoso, N., Bustos, C. A., & Balbont3n, F. (2012). Larval fish distribution, growth and feeding in Patagonian fjords: potential effects of freshwater discharge. *Environmental Biology of Fishes*, 93, 73-87.
- Ljungstr3m, G., Claireaux, M., Fiksen, 3., & J3rgensen, C. (2020). Body size adaptations under climate change: zooplankton community more important than temperature or food abundance in model of a zooplanktivorous fish. *Marine Ecology Progress Series*, 636, 1-18. <https://doi.org/10.3354/meps13241>
- Ljungstr3m, G., Langbehn, T., & J3rgensen, C. (2024). Bergmann patterns in planktivorous fishes: A light-size or zooplankton community-size rule is just as valid explanation as the temperature-size rule. *Global Ecology and Biogeography*, 33(1), 17-33.
- Llanos-Rivera, A., Castro, L.R. (2006). Inter-population differences in temperature effects on *Engraulis ringens* yolk-sac larvae. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 312, 245–253. <https://doi.org/10.3354/meps312245>
- Lyashevskaya, O., Harna, C., Minto, C., Clarke, M., & Brophy, D. (2020). Long-term trends in herring growth primarily linked to temperature by gradient boosting regression trees. *Ecological Informatics*, 60, 101154.
- Meekan, M. G., & Fortier, L. (1996). Selection for fast growth during the larval life of Atlantic cod *Gadus morhua* on the Scotian shelf. *Marine Ecology Progress Series*, 137, 25–37.
- Menu, C., Pecquerie, L., Bacher, C., Doray, M., Hattab, T., van Der Kooij, J., & Huret, M. (2023). Testing the bottom-up hypothesis for the decline in size of anchovy and sardine across European waters

- through a bioenergetic modeling approach. *Progress in Oceanography*, 210, 102943.
- Methot, R. D., & Kramer, D. (1979). Growth of northern anchovy, *Engraulis mordax*, larvae in the sea. *Fish. Bull. US*, 77(2), 413-423.
- Michaud, W.K., Dempson, J.B., Power, M. (2010). Changes in growth patterns of wild Arctic charr (*Salvelinus alpinus* (L.)) in response to fluctuating environmental conditions. *Hydrobiologia* 650, 179–191. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0091-4>
- Molina-Valdivia, V., Landaeta, M. F., Castillo, M. I., Alarc3n, D., & Plaza, G. (2020). Short-term variations in the early life history traits of common sardine *Strangomera bentincki* and anchoveta *Engraulis ringens* off central Chile. *Fisheries research*, 224, 105460.
- M3llmann, C., Kornilovs, G., Fetter, M., and Koster, F.W., Feeding ecology of central Baltic Sea herring and sprat, *J. Fish Biol.* (2004). 65, pp. 1563–1581
- Nelson, G. (2019). Fishery Science Methods and Models Package ‘fishmethods.’ Massachusetts Div. Mar. Fish.**
- Nishikawa, H., Itoh, S., Yasuda, I., & Komatsu, K. (2022). Overlap between suitable nursery grounds for Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) and Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) larvae. *Aquaculture, Fish and Fisheries*, 2(3), 179-188.
- Ofelio, C., Moyano, M., Sswat, M., Rioual, F., Moullec, F., Aguirre-Velarde, A., & Peck, M. A. (2023). Temperature and prey density drive growth and otolith formation of the world's most valuable fish stock. *Scientific Reports*, 13(1), 16001.
- Okunishi, T., Ito, S. I., Hashioka, T., Sakamoto, T. T., Yoshie, N., Sumata, H., ... & Yamanaka, Y. (2012). Impacts of climate change on growth, migration and recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific. *Climatic Change*, 115, 485-503.
- 3stman, 3., Karlsson, O., P3nni, J., Kaljuste, O., Aho, T., & G3rdmark, A. (2014). Relative contributions of evolutionary and ecological dynamics to body size and life-history changes of herring (*Clupea harengus*) in the Bothnian Sea. *Evolutionary Ecology Research*, 16(5), 417-433.
- Pag3s, F., Gonz3lez, H.E., Ram3n, M., Sobarzo, M., & Gili, J.M. (2001). Gelatinous zooplankton assemblages associated with water masses in the Humboldt Current System, and potential predatory impact by *Bassia bassensis* (Siphonophora: Calycophorae). *Marine Ecology Progress*

- Series, 2010, 13–24.
- Palomares, M. L., Muck, P., Mendo, J., Chuman, E., Gomez, O., & Pauly, D. (1987). Growth of the Peruvian anchoveta (*Engraulis ringens*), 1953 to 1982.
- Palomera, I., Morales-Nin, B., & Leonart, J. (1988). Larval growth of anchovy, *Engraulis encrasicolus*, in the Western Mediterranean Sea. *Marine Biology*, 99(2), 283-291.
- Parada, C., Yannicelli, B., Hormazábal, S., Vásquez, S., Porobi, J., Ernst, B., Gatica, C., Arteaga, M., Montecinos, A., Núñez, S., Gretchina, A. (2013). Variabilidad ambiental y recursos pesqueros en el Pacífico suroriental: estado de la investigación y desafíos para el manejo pesquero. *Environmental variability and fisheries in the southeastern Pacific: research status and challenges for fisheries management* 41, 1–28.
- Parrish, R. H., Mallicoate, D. L., & Mais, K. F. (1985). Regional variations in the growth and age composition of northern anchovy, *Engraulis mordax*. *Fishery Bulletin*, 83(4), 483-496.
- Paulsen, M., Clemmesen, C., Hammer, C., Polte, P., & Malzahn, A. M. (2017). Food-limited growth of larval Atlantic herring *Clupea harengus* recurrently observed in a coastal nursery area. *Helgoland Marine Research*, 70(1), 17.
- Pauly, D. (2010). Gasping fish and panting squids: oxygen, temperature and the growth of water-breathing animals. *Excell. Ecol.* 22.
- Pauly, D., Cheung, W.W.L. (2018a). Sound physiological knowledge and principles in modeling shrinking of fishes under climate change. *Glob. Chang. Biol.* 24, e15–e26. <https://doi.org/10.1111/gcb.13831>
- Pauly, D., Cheung, W.W.L. (2018b). On confusing cause and effect in the oxygen limitation of fish. *Glob. Chang. Biol.* 24, e743–e744. <https://doi.org/10.1111/gcb.14383>
- Payne, M. R., Ross, S. D., Clausen, L. W., Munk, P., Mosegaard, H., & Nash, R. D. (2013). Recruitment decline in North Sea herring is accompanied by reduced larval growth rates. *Marine Ecology Progress Series*, 489, 197-211.
- Peterson, W. (1989). Zooplankton feeding and egg production in comparison to primary production along the west coast of South Africa. *Proc Plankton Dyn Mini-Symp*, May 1989, Cape Town, South Africa. *Benguela. Ecol. Program. Rep.* 17, 1–5.



- Pedersen, E. J., Goto, D., Gaeta, J. W., Hansen, G. J., Sass, G. G., Vander Zanden, M. J., ... & Rypel, A. L. (2018). Long-term growth trends in northern Wisconsin walleye populations under changing biotic and abiotic conditions. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 75(5), 733-745.
- Plaza, G., Cerna, F. (2015). Validation of daily microincrement deposition in otoliths of juvenile and adult Peruvian anchovy *Engraulis ringens* 203–216. <https://doi.org/10.1111/jfb.12561>
- Plaza, G., Cerna, F., Landaeta, M. F., Hernández, A., & Contreras, J. E. (2018). Daily growth patterns and age-at-recruitment of the anchoveta *Engraulis ringens* as indicated by a multi-annual analysis of otolith microstructure across developmental stages. *Journal of fish biology*, 93(2), 370-381. <https://doi.org/10.1111/jfb.13773>
- Plaza, G., Honda, H., Sakaji, H., Nashida, K. (2005). Preparing sagittae for examination of daily growth increments of young-of-the-year fishes: A modification of the embed method. *J. Fish Biol.* 66, 592–597. <https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2005.00625.x>
- Portner, H., Peck, M. (2010). Climate change effects on fishes and fisheries: towards a cause-and-effect understanding. *J. Fish Biol.* 77, 1745–1779.
- Queiros, Quentin et al. (2019). “Food in the Sea: Size Also Matters for Pelagic Fish.” *Frontiers in Marine Science* 6(JUL). 2021. “Is Starvation a Cause of Overmortality of the Mediterranean Sardine?” *Marine Environmental Research* 170.
- Quintanilla, J. M., Laiz-Carri3n, R., Uriarte, A., & García, A. (2015). Influence of trophic pathways on daily growth patterns of western Mediterranean anchovy *Engraulis encrasicolus* larvae. *Marine Ecology Progress Series*, 531, 263-275.
- Rajasilta, M., Eklund, J., Hanninen, J., Vuorinen, I., & Laine, P. (2015). Female Baltic herring *Clupea harengus* allocate resources from growth to reproduction in poor feeding conditions. *Journal of Fish Biology*, 86(2), 575-591.
- Rioual, F., Ofelio, C., Rosado-Salazar, M., Dionicio-Acedo, J., Peck, M. A., & Aguirre-Velarde, A. (2021). Embryonic development and effect of temperature on larval growth of the Peruvian anchovy *Engraulis ringens*. *Journal of Fish Biology*, 99(6), 1804-1821.
- Rykaczewski, R.R., Checkley, D.M. (2008). Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in

- upwelling regions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 105, 1965–1970.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0711777105>
- Saraux, C., Van Beveren, E., Brosset, P., Queiros, Q., Bourdeix, J. H., Dutto, G., ... & Fromentin, J. M. (2019). Small pelagic fish dynamics: A review of mechanisms in the Gulf of Lions. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 159, 52-61.
- Schismenou, E., Giannoulaki, M., Tsiaras, K., Lefkaditou, E., Triantafyllou, G., & Somarakis, S. (2014). Disentangling the effects of inherent otolith growth and model-simulated ecosystem parameters on the daily growth rate of young anchovies. *Marine Ecology Progress Series*, 515, 227-237.
- Schismenou, E., Tsiaras, K., Kourepini, M. I., Lefkaditou, E., Triantafyllou, G., & Somarakis, S. (2013). Seasonal changes in growth and condition of anchovy late larvae explained with a hydrodynamic-biogeochemical model simulation. *Marine Ecology Progress Series*, 478, 197-209.
- Schneider, W., Donoso, D., Garc3s-Vargas, J., Escibano, R., 2017. Water-column cooling and sea surface salinity increase in the upwelling region off central-south Chile driven by a poleward displacement of the South Pacific High. *Progress in Oceanography*, 151, 38–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.11.004>
- Shin, Y., & Rochet, M. J. (1998). A model for the phenotypic plasticity of North Sea herring growth in relation to trophic conditions. *Aquatic Living Resources*, 11(5), 315-324.
- Shoji, J., Tanaka, M. (2006). Growth-selective survival in piscivorous larvae of Japanese Spanish mackerel *Scomberomorus niphomus*: Early selection and significance of ichthyoplankton prey supply. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 321, 245–254. <https://doi.org/10.3354/meps321245>
- Smoliński, S. (2019).** Sclerochronological approach for the identification of herring growth drivers in the Baltic Sea. *Ecological Indicators*, 101, 420-431.
- Schwartzlose, R. A., & Alheit, J. (1999). Worldwide large-scale fluctuations of sardine and anchovy populations. *African Journal of Marine Science*, 21.
- Stramma, L., Fischer, T., Grundle, D.S., Krahnmann, G., Bange, H.W., & Marandino, C.A. (2016). Observed El Niño conditions in the eastern tropical Pacific in October 2015. *Ocean Sci.*, 12(4), 861–873. <https://doi.org/10.5194/os-12-861-2016>

- Stenevik, E. K., H3lleland, S., Enberg, K., H3ines, 3., Salthaug, A., Slotte, A., ... & Aanes, S. (2022). Predicting density-dependent somatic growth in Norwegian spring-spawning herring. *ICES Journal of Marine Science*, 79(4), 1340-1352.
- Taboada, F. G., Chust, G., Santos Mocoroa, M., Aldanondo, N., Font3n, A., Cotano, U., ... & Ibaibarriaga, L. (2024). Shrinking body size of European anchovy in the Bay of Biscay. *Global Change Biology*, 30(1), e17047.
- Takahashi, M., & Watanabe, Y. (2005). Effects of temperature and food availability on growth rate during late larval stage of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in the Kuroshio–Oyashio transition region. *Fisheries Oceanography*, 14(3), 223-235.
- Takahashi, M., Checkley Jr, D. M., Litz, M. N., Brodeur, R. D., & Peterson, W. T. (2012). Responses in growth rate of larval northern anchovy (*Engraulis mordax*) to anomalous upwelling in the northern California Current. *Fisheries Oceanography*, 21(6), 393-404.
- Takasuka, A., & Aoki, I. (2002). Growth rates of larval stage of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* and environmental factors in the Kuroshio Extension and Kuroshio-Oyashio transition regions, western North Pacific Ocean. *Fisheries science*, 68(sup1), 445-446.
- Takasuka, A., & Aoki, I. (2006). Environmental determinants of growth rates for larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in different waters. *Fisheries Oceanography*, 15(2), 139-149.
- Takasuka, A., Aoki, I., Mitani, I. (2004). Three synergistic growth-related mechanisms in the short-term survival of larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Sagami Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 270, 217–228. <https://doi.org/10.3354/meps270217>
- Takasuka, A., Oozeki, Y., & Aoki, I. (2007). Optimal growth temperature hypothesis: why do anchovy flourish and sardine collapse or vice versa under the same ocean regime?. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64(5), 768-776.
- Takasuka, A., Oozeki, Y., Aoki, I., Kimura, R., Kubota, H., Sugisaki, H., & Akamine, T. (2008). Growth effect on the otolith and somatic size relationship in Japanese anchovy and sardine larvae. *Fisheries Science*, 74, 308-313.
- Torres, D., Ay3n, P., Castro, J., Quesqu3n, R., & Correa, D. (2021). Cambios en la distribuci3n y abundancia *Centropages brachiatus* (DANA, 1849). Entre 2016 y 2017, frente a la costa centro-

- norte del Perú. Boletín Del Instituto Del Mar Del Perú, 36(2), 463–475.
- Thoral, E., Queiros, Q., Roussel, D., Dutto, G., Gasset, E., McKenzie, D.J., Romestaing, C., Fromentin, J.M., Saraux, C., Teulier, L. (2021). Changes in foraging mode caused by a decline in prey size have major bioenergetic consequences for a small pelagic fish. *J. Anim. Ecol.* <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13535>
- Ulloa, O., Escribano, R., Hormazabal, S., Quifiones, R.A., Gonzalez, R.R., Ramos, M. (2001). Evolution and biological effects of the 1997-98 E1 Nifio in the upwelling ecosystem off northern Chile. *Geophys. Res. Lett.* 28, 1591–1594.
- Urtizberea, A., Fiksen, Ø (2013). Effects of prey size structure and turbulence on feeding and growth of anchovy larvae. *Environ Biol Fish* 96, 1045–1063. <https://doi.org/10.1007/s10641-012-0102-6>
- Urtizberea, A., Fiksen, Ø., Folkvord, A., & Irigoien, X. (2008). Modelling growth of larval anchovies including diel feeding patterns, temperature and body size. *Journal of Plankton Research*, 30(12), 1369-1383.
- Van Beveren, E., Bonhommeau, S., Fromentin, J.M., Bigot, J.L., Bourdeix, J.H., Brosset, P., Roos, D., Saraux, C. (2014a). Rapid changes in growth, condition, size and age of small pelagic fish in the Mediterranean. *Mar. Biol.* 161, 1809–1822. <https://doi.org/10.1007/s00227-014-2463-1>
- Ventero, A., Iglesias, M., & Villamor, B. (2017). Anchovy (*Engraulis encrasicolus*) otoliths reveal growth differences between two areas of the Spanish Mediterranean Sea. *Scientia Marina*, 81(3), 327-337.
- Véron, M., Duhamel, E., Bertignac, M., Pawlowski, L., & Huret, M. (2020). Major changes in sardine growth and body condition in the Bay of Biscay between 2003 and 2016: Temporal trends and drivers. *Progress in Oceanography*, 182, 102274.
- Waldron, M. E. (1995). Evidence of reduced growth rates of anchovy recruits off South Africa in 1989 and 1991. *South african journal of marine science*, 15(1), 263-267.
- Waldron, M., Armstrong, M. J., & Prosch, R. M. (1989). Aspects of the variability in growth of juvenile anchovy *Engraulis capensis* in the southern Benguela system. *South African Journal of Marine Science*, 8(1), 9-19.
- Wang, Y., Gharouni, A., Friedland, K. D., & Melrose, D. C. (2021). Effect of environmental factors and

- density-dependence on somatic growth of Eastern Georges Bank haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). *Fisheries Research*, 240, 105954.
- Walker, D.R., Peterson, W.T. (1991). Relationships between hydrography, phytoplankton production, biomass, cell size and species composition, and copepod production in the southern benguela upwelling system in april 1988. *South African J. Mar. Sci.* 11, 289–305. <https://doi.org/10.2989/025776191784287529>
- Watanabe, Y., Ochiai, S. I., & Fukamichi, K. (2014). Larval growth rates differ in response to seasonal temperature variations among clupeoid species inhabiting the Pacific coastal waters of Japan. *Fisheries science*, 80, 43-51.
- Watanabe, Y., Suzuki, T., & Tsuno, K. (2013). Temperature determines growth rates of larval round herring *Etrumeus teres* in the Pacific coastal waters off southern Japan. *Fisheries science*, 79, 757-766.
- Weidberg, N., Ospina-Alvarez, A., Bonicelli, J., Barahona, M., Aiken, C.M., Broitman, B.R., Navarrete, S.A. (2020). Spatial shifts in productivity of the coastal ocean over the past two decades induced **by migration of the Pacific Anticyclone and Bakun's effect** in the Humboldt Upwelling Ecosystem. *Global and Planetary Change*, 193, 103259. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103259>
- Wood, S. (2006). *An Introduction to Generalized Additive Models with R*. Chapman Hall. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Xu, J., Deng, P., Shi, Y., Zhang, G., Zhang, H., Yan, Y., ... & Wang, Y. (2016). Effect of salinity on the survival and growth of the larvae and juveniles of Japanese grenadier anchovy *Coilia nasus*. *North American journal of aquaculture*, 78(1), 1-7.
- Xu, Y., Chai, F., Rose, K. A., Ñiquen, M., & Chavez, F. P. (2013). Environmental influences on the interannual variation and spatial distribution of Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) population dynamics from 1991 to 2007: A three-dimensional modeling study. *Ecological Modelling*, 264, 64-82.
- Yamamoto, K., Saito, M., & Yamashita, Y. (2018). Relationships between the daily growth rate of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* larvae and environmental factors in Osaka Bay, Seto Inland Sea, Japan. *Fisheries science*, 84(2), 373-383.

- Yasue, N., & Takasuka, A. (2009). Seasonal variability in growth of larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* driven by fluctuations in sea temperature in the Kii Channel, Japan. *Journal of Fish Biology*, 74(10), 2250-2268.
- Yoneda, M.; Fujita, T.; Yamamoto, M.; Tadokoro, K.; Okazaki, Y.; Nakamura, M.; Takahashi, M.; Kono, N.; Matsubara, T.; Abo, K.; et al. (2022). Bottom-up processes drive reproductive success of Japanese anchovy in an oligotrophic sea: A case study in the central Seto Inland Sea, Japan. *Prog. Oceanogr.* 206, 102860.
- Zamora-Sarabia, F. K. G., Arreguín-Sánchez, F., Anda-Montañez, J. A. D., & Jacob-Cervantes, M. L. (2022). Effect of sea surface temperature on the growth performance of the thread herring *Opisthonema libertate* (Günther, 1868) in the southern Gulf of California. *Latin american journal of aquatic research*, 50(1), 31-38.
- Zenitani, H., Kono, N., Tsukamoto, Y., & Masuda, R. (2009). Effects of temperature, food availability, and body size on daily growth rate of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* larvae in Hiuchi-nada. *Fisheries Science*, 75(5), 1177-1188.
- Zhu, Q., Wu, R., Masuda, Y., Takahashi, Y., Okabe, K., Koizumi, K., ... & Katayama, S. (2023). Spawning Phenology and Early Growth of Japanese Anchovy (*Engraulis japonicus*) off the Pacific Coast of Japan. *Fishes*, 8(1), 11.



## ANEXOS

---



## ANEXO 1

### Acta de la primera reuni3n con presidente del FIPA

---





## ACTA REUNI3N

ASUNTO : Reuni3n inicial proyecto FIPA 2023-20

FECHA : 05 de septiembre de 2024

LUGAR : Base IFOP Valparaíso

### 1. PARTICIPANTES

N°	Nombre	Instituci3n	Asistencia	
1	Carola Hern3ndez	Instituto de Fomento Pesquero	Si	
2	Camila Sagua Cepeda	Subsecretarí3 de Pesca	Si	
3	Silvia Hern3ndez	Subsecretarí3 de Pesca	si	
4	Rafael Hern3ndez Vidal	Fondo de Investigaci3n Pesquera	Si	
5	Naití Morales	Instituto de Fomento Pesquero	Si	

Tema	Observaciones	Acuerdos
Carta Gantt	En la propuesta no queda claro cuáles son los puntos (objetivos) que incluirán cada uno de los informes: Informe de Avance e Informe Final.	Se decide agregar una línea vertical que marque el límite entre los ítems que serán incorporados en cada uno de los informes.  El objetivo 1 y parte del objetivo 2 serán incluido en el Informe de Avance, mientras la otra parte del Objetivo 2 y el Objetivo 3 en el informe final.  <b>Respuesta</b>  Se adjunta una nueva versi3n de la carta Gantt.
Objetivo 1: Período de muestreo	En la propuesta se plantea analizar otolitos de tres periodos, donde se incluyen el evento ENSO 97-98 por lo que se discute la representatividad del	Se acuerda reevaluar los periodos analizados, especialmente los años 97-98.  <b>Respuesta</b>

	periodo.	<p>Los ejecutores se comprometen en reemplazar los años 1997-1998 por otros que no tengan la influencia de un evento de El Niño.</p> <p>La selección de los años dependerá de la colección de otolitos disponibles en las bodegas del IFOP, aunque se deja de manifiesto que no se analizarán nuevas muestras, más allá del tamaño de muestra comprometido en la propuesta técnica</p>
Objetivo 1: Metodología	<p>Las tallas de anchoveta muestran una tendencia decreciente en la zona norte de Chile. En la actualidad no se sabe si la disminución de las tallas es producto de:</p> <p>1.- Una disminución real de las tallas donde se encontrarán edades adultas con tallas pequeñas.</p> <p>2.- Concordancia entre talla y edad</p> <p>Se plantea una disconformidad entre el objetivo y la metodología propuesta.</p>	<p>Se solicita aclarar la metodología de manera de responder de mejor forma a las necesidades de este objetivo.</p> <p><b><u>Respuesta</u></b></p> <p>La comparación de los patrones de edad y crecimiento de juveniles y adultos, desde los periodos de mayor productividad a mediados de la década del 90 hasta los años recientes, permitirá revelar si la disminución de la talla media de la anchoveta registrada en los últimos años, es producto de un menor crecimiento de los ejemplares adultos con un aumento su edad relativa.</p>
Objetivo 3	En la propuesta está escrito que se revisarán y evaluarán los “Planes actuales de manejo” junto a los resultados emanados de los objetivos específicos 1 y 2.	Se acuerda cambiar “planes actuales de manejo” por “Actas de Comité Científico”

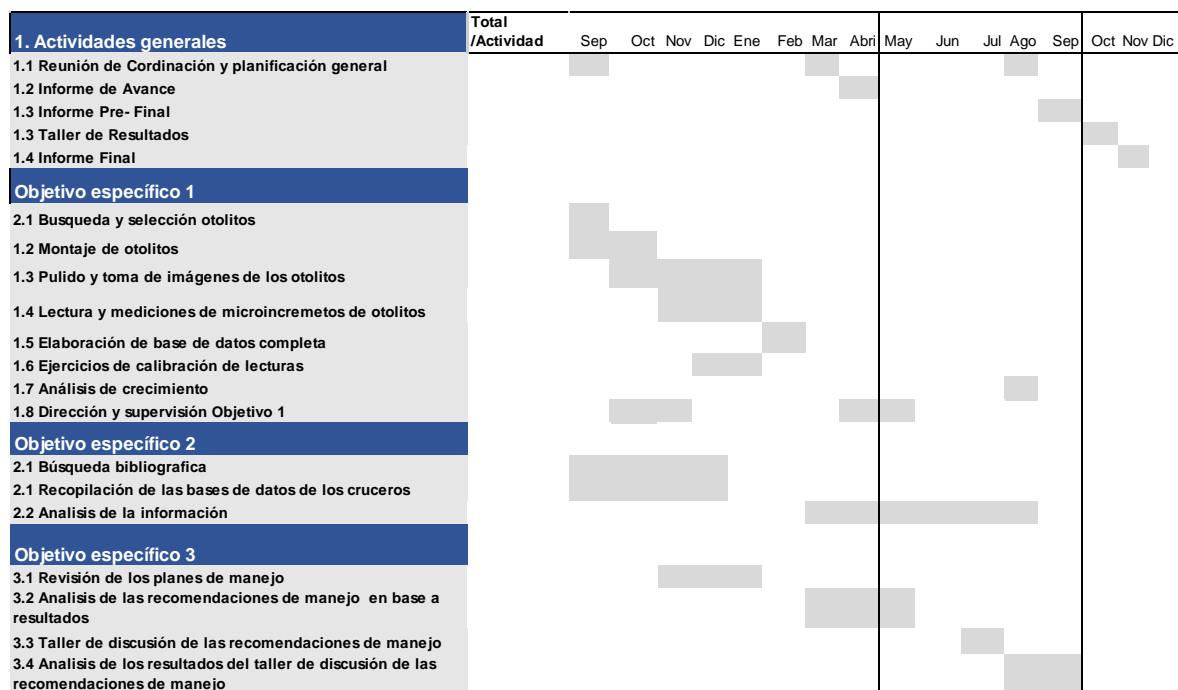
Objetivo 3	<p>El proyecto plantea analizar la informaci3n emanada de los objetivos anteriores, adem1s de las actas del comit1 científico. Estos resultados ser1an analizados por un taller de expertos de manera de elaborar una lista de recomendaciones que permitan aportar al entendimiento de la din1mica de la pesquer1a de la anchoveta y su dependencia con cambios ambientales a escala local y regional.</p> <p>El par t1cnico plantea la necesidad de incluir evaluaciones a las medidas de manejo pesquero actuales seg1n los resultados obtenidos en el proyecto.</p>	<p>Se propuso por parte de SUBPESCA la conformaci3n de un equipo multidisciplinarios de expertos tanto de IFOP, como externos, para evaluar la contingencia y la efectividad de las medidas de manejo pesquero actuales (veda, tallas, etc.) en conformidad con los resultados obtenidos en los objetivos anteriores.</p> <p><b><u>Respuesta</u></b></p> <p>El desarrollo de este objetivo se realizar1 en los t1rminos se1alados en la propuesta t1cnica. Donde se propone a partir de la informaci3n generada durante el actual estudio y la recopilada a trav1s de una revisi3n bibliogr1fica y talleres (ejemplo brechas de investigaci3n) se elaborar1 una matriz de conocimiento y del estado de situaci3n del recurso anchoveta. Dentro de esta se identificar1n las diferentes amenazas, los vac1os de informaci3n, debilidades operativas y administrativas de su pesquer1a y prioridades de investigaci3n tal como lo elabor3 Acuña et al. (2018).</p> <p>Una vez elaborada la matriz de conocimiento se llevar1 a cabo un taller de expertos, para que, considerando el estado actual del recurso, se identifiquen brechas del conocimiento y se determinen l1neas de acci3n futuras. A partir de este diagn3stico integrado y del trabajo participativo con el grupo de expertos, y de acuerdo con criterios bio-pesqueros, socioecon3micos y de gobernanza, se propondr1n orientaciones y acciones para el</p>

		<p>desarrollo sustentable (estrategias de manejo) de la pesquería de este recurso.</p> <p>Además, se incorporarán algunos escenarios para analizar durante el desarrollo del taller de expertos. En este contexto es importante clarificar que el desarrollo del primer objetivo permitirá obtener el primer diagnóstico, para identificar si las caídas en las tallas medias de esta especie es producto de una reducción del crecimiento somático o debido a remoción de ejemplares de mayor tamaño, por efecto de la pesca. Cualquiera sea el diagnóstico, en el taller se explorarán las causas potenciales, que en términos generales podrían ser de naturaleza ambiental, antropogénica, o ambas. Es importante destacar que recientemente algunos estudios han evidenciado caída en las tallas medias en varias especies pelágicas en otros ecosistemas, lo que podría estar asociado a tele conexiones más globales.</p>
--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Observaciones generales:**

-Se propone organizar dos nuevas reuniones de coordinación con el par técnico para zanzar las modificaciones y el inicio del proyecto.

## 2. Carta Gantt actualizada





## ANEXO 2

### Personal participante del equipo de trabajo por actividad

---



## INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO / DIVISIÓN INVESTIGACIÓN PESQUERA

Personal			2023					2024			
1. Actividades generales		Intitución	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Reunión de Cordinación y planificación general	Carola Hernández Santoro	IFOP	5			3			7		1
	Francisco Cerna Troncoso	IFOP				3					1
	Jessica Bonicelli Proaño	IFOP	3			3			2		1
	Naití Morales	IFOP				3					1
	Jorge Castillo Pizarro	IFOP				3					1
	Juan Carlos Saavedra	IFOP				3					1
	Guido Plaza Pastén	PUCV	3			5				5	1
	Fabián Tapia Jorquera	UDEC				3					1
Informe de Avance	Carola Hernández Santoro	IFOP								28	
	Francisco Cerna Troncoso	IFOP									
	Jessica Bonicelli Proaño	IFOP								18	
	Naití Morales	IFOP								10	
	Fabián Tapia Jorquera	UDEC								10	
Objetivo específico 1											
Busqueda y selección otolitos	Francisco Cerna Troncoso	IFOP	8								
	Ericka López Soto	PUCV	22								
	Guido Plaza Pastén	PUCV									
	Osneider Palominos	PUCV									
	Claudeth Asencio	IFOP									
Pulido y toma de imágenes de los otolitos	Francisco Cerna Troncoso	IFOP									
	Ericka López Soto	IFOP		58	40	40	40				
	Guido Plaza Pastén	PUCV									
	Osneider Palominos	PUCV									
	Claudeth Asencio	PUCV									
Lectura y mediciones de microincretetos de otolitos	Francisco Cerna Troncoso	IFOP									
	Ericka López Soto	IFOP			40	36	36				
	Guido Plaza Pastén	PUCV					15	15	15	15	15
	Osneider Palominos	PUCV		72	72	72	72	72	72	72	72
	Claudeth Asencio	PUCV		72	72	72	72	72	72	72	72
Elaboración de base de datos completa	Francisco Cerna Troncoso	IFOP						8			
	Ericka López Soto	IFOP									
	Guido Plaza Pastén	PUCV									
	Osneider Palominos	PUCV									
	Claudeth Asencio	PUCV									
Ejercicios de calibración de lecturas	Francisco Cerna Troncoso	IFOP				4	4				
	Ericka López Soto	IFOP				4	4				
	Guido Plaza Pastén	PUCV				4	4				
	Osneider Palominos	PUCV				4	4				
	Claudeth Asencio	PUCV				4	4				
Elaboración de Informes	Francisco Cerna Troncoso	IFOP								22	
	Ericka López Soto	IFOP									
	Guido Plaza Pastén	PUCV				30	30				40
	Osneider Palominos	PUCV				8	8				8
	Claudeth Asencio	PUCV				8	8				8
Análisis de crecimiento	Francisco Cerna Troncoso	IFOP								40	
	Ericka López Soto	IFOP									
	Guido Plaza Pastén	PUCV									
	Osneider Palominos	PUCV									
	Claudeth Asencio	PUCV									
Dirección y supervisión	Francisco Cerna Troncoso	IFOP		8	8				8		8
	Ericka López Soto	IFOP									
	Guido Plaza Pastén	PUCV	3			5				5	
	Osneider Palominos	PUCV									
	Claudeth Asencio	PUCV									
Objetivo específico 2											
Revisión bibliografica	Carola Hernández Santoro	IFOP	10	10	10						
	Jessica Bonicelli Proaño	IFOP	8	8	8						
	Naití Morales	IFOP	18	23	23						
	Juan Carlos Saavedra	IFOP									
	Fabián Tapia Jorquera	UDEC									
Recopilación de las bases de datos de los cruceros	Carola Hernández Santoro	IFOP	13	13	13						
	Jessica Bonicelli Proaño	IFOP									
	Naití Morales	IFOP									
	Juan Carlos Saavedra	IFOP									
	Fabián Tapia Jorquera	UDEC									
Análisis de la información	Carola Hernández Santoro	IFOP			15	15	15	15			
	Jessica Bonicelli Proaño	IFOP			15	15	15	15			
	Naití Morales	IFOP									
	Juan Carlos Saavedra	IFOP					5				
	Fabián Tapia Jorquera	UDEC			30	24	20	20			



# Anexo 3

## Documentaci3n del Taller de expertos del Proyecto FIPA 2023-20



El presente anexo corresponde a la documentación recopilada en el marco del Proyecto FIPA 2023-20, titulado *“Determinación de los factores causantes de los cambios estructurales de la población de anchoveta de la zona norte en el período reciente y sus implicancias”*. En este contexto, se realizó un taller en el que participaron diversos actores vinculados a la investigación y gestión pesquera. Con el objetivo de resguardar la información presentada y las discusiones generadas, se llevó a cabo un registro audiovisual del evento.

## 1. Presentación







## Resultados PROYECTO FIPA 2023-020

"DETERMINACI3N DE LOS FACTORES CAUSANTES DE LOS CAMBIOS ESTRUCTURALES DE LA POBLACI3N DE ANCHOVETA DE LA ZONA NORTE EN EL PERIODO RECIENTE Y SUS IMPLICANCIAS"

Equipo de Trabajo

Jessica Bonicelli Proaño  
(IFOP)



Naiti Morales Serrano  
(IFOP)



Carola Hernández Santoro  
(IFOP)

En Pantalla

Francisco Cerna Troncoso  
(IFOP)



Guido Plaza Pastén  
(PUCV)



Juan Carlos Saavedra  
Nievas (IFOP)



Fabián Tapia Jorquera  
(UDEC)



Jorge Castillo Pizarro  
(IFOP)



Instituto de Fomento Pesquero | Chile 



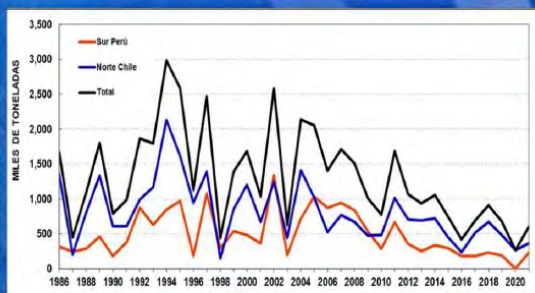
## TABLA DE CONTENIDO

1. Antecedentes
2. Hipótesis
3. Objetivos
4. Resultados del proyecto FIPA 2023-20
5. Conclusiones
6. Manejo Pesquero

Antecedentes

- La anchoveta (*Engraulis ringens*) es una especie pelágico-costera.
- Se distribuye desde el norte de Perú (4°30' S) hasta el sur de Chile (42°30'S)
- De gran importancia ecológica y económica en el sistema de la corriente de Humboldt.
- Altamente susceptible a cambios ambientales.

Capturas del stock entre Chile – Perú 1986 – 2021



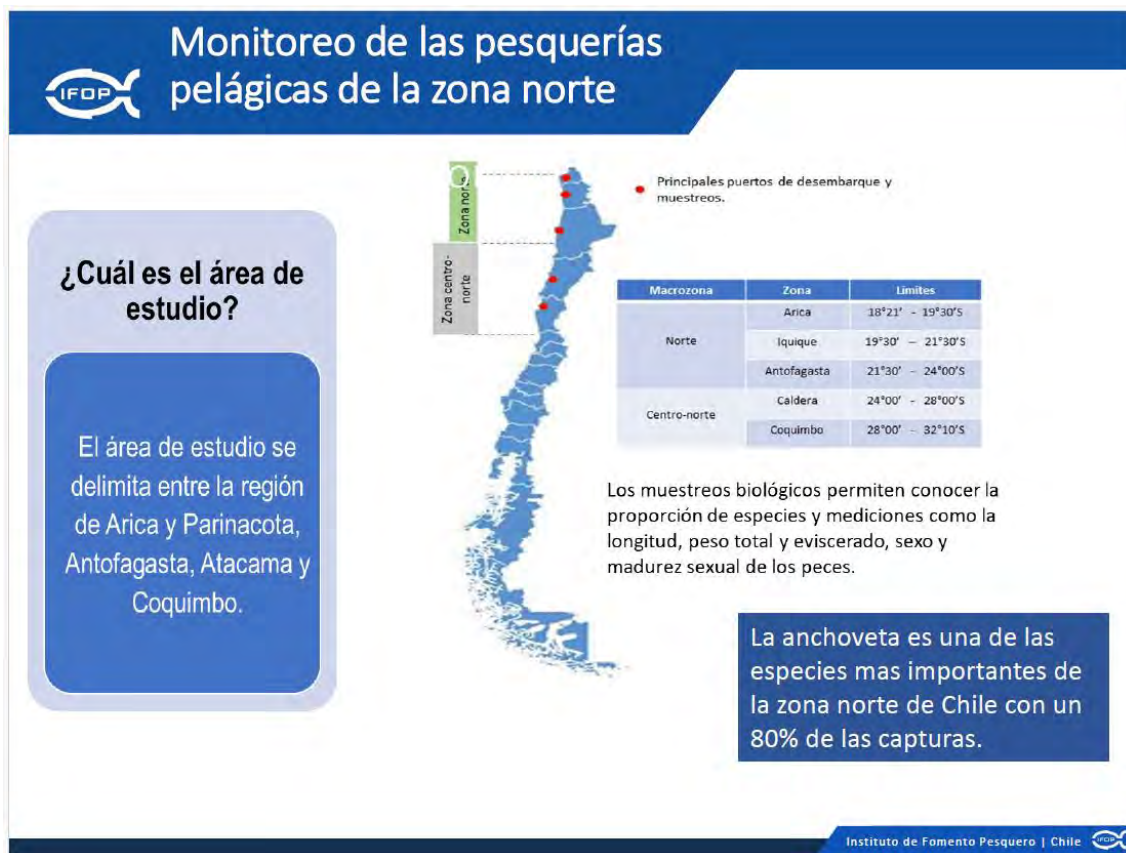
Área de estudio

Norte de Chile (18°21'a 24°S) parte del stock compartido (Chile -Perú)

Stock	1986-2005	2007-2015
Sur de Perú (*)	570 mil t	369 mil t
Norte de Chile (**)	1 millón t	568 mil t
Total	1,6 millón t	967 mil t

Fuente: IMARPE (\*) e IFOP (\*\*)

El área norte de Chile representa las mayores capturas.

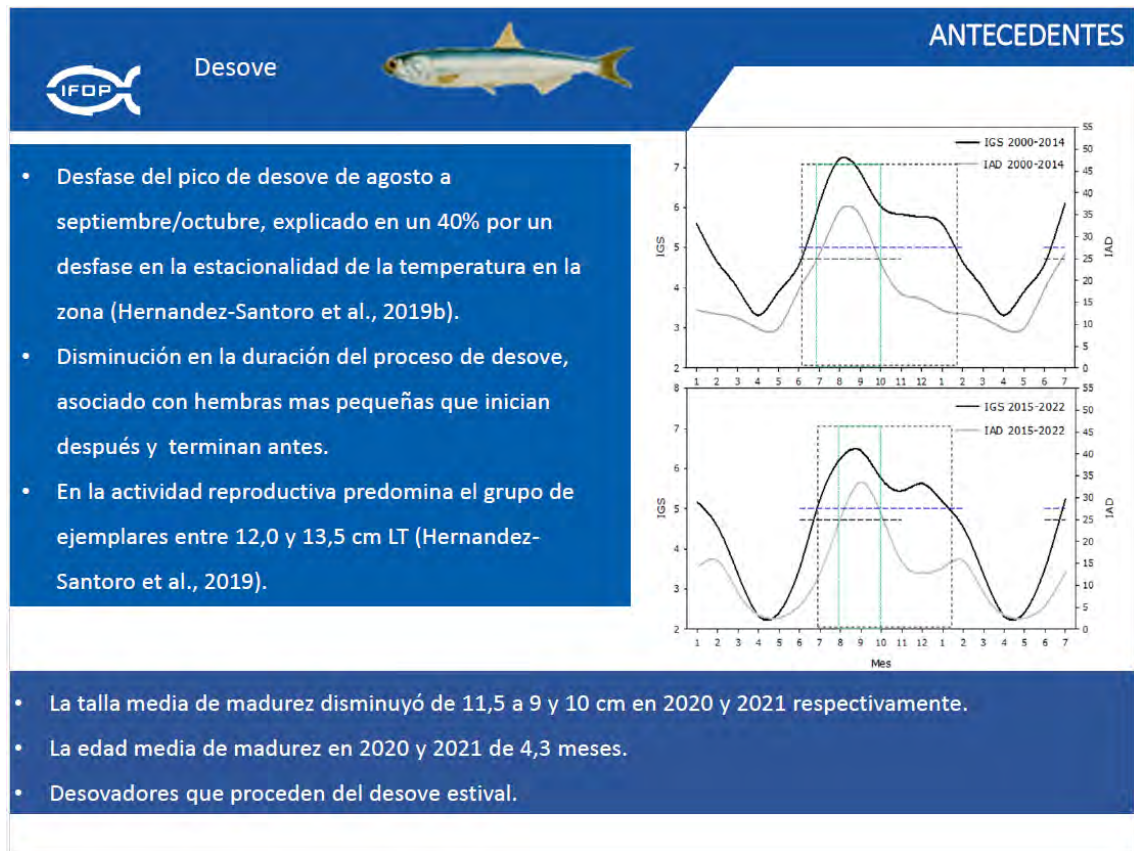


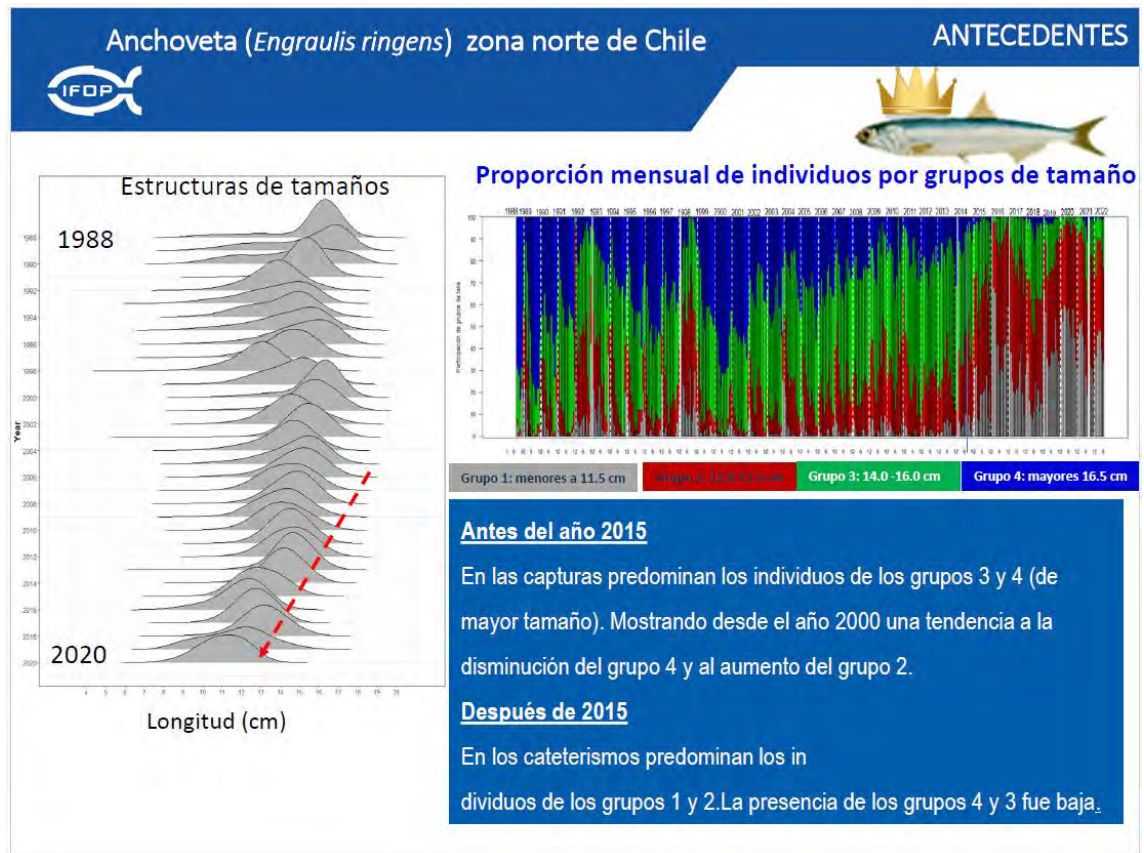


## PRINCIPALES CAMBIOS DE LA PESQUERÍA DE ANCHOVETA ZONA NORTE (Monitoreo de la flota)

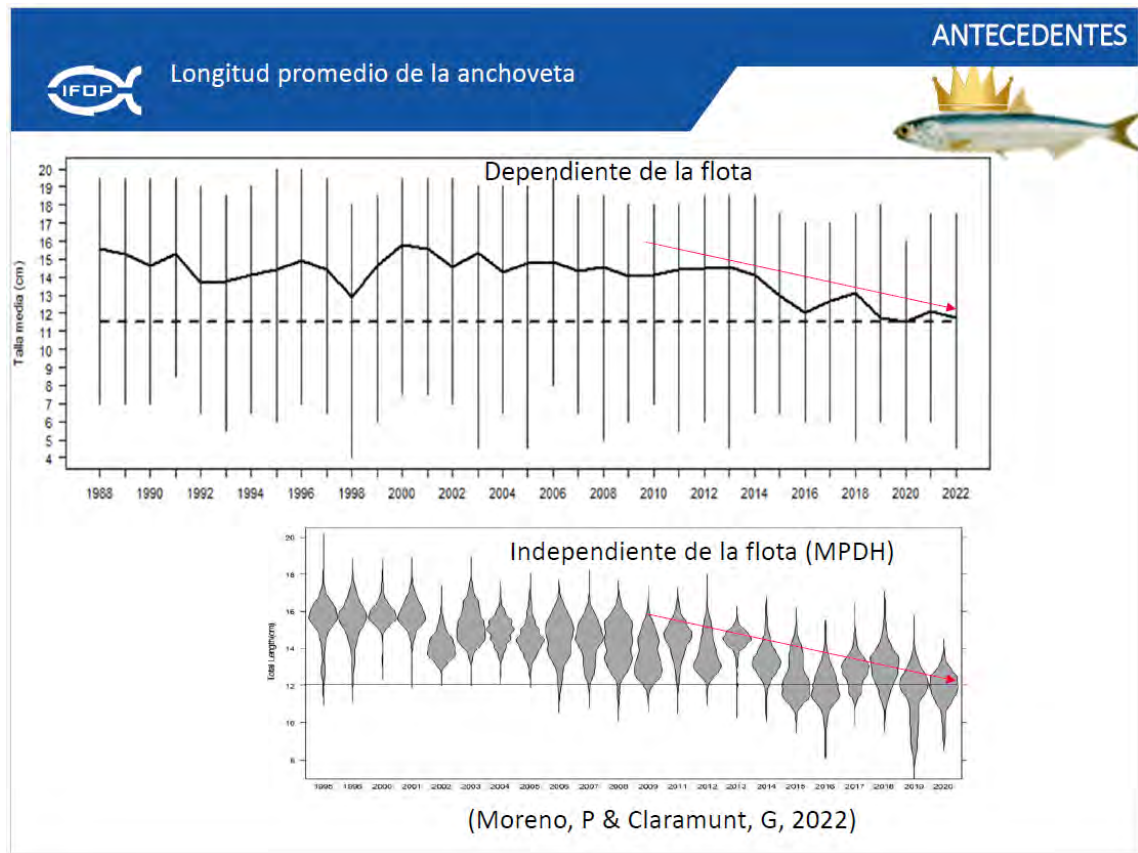


1. Tendencia decreciente del stock de anchoveta durante las últimas décadas, medida a través de los desembarques.
2. Distribución de las capturas, reducción en la ocupación del espacio y una mayor concentración en áreas costeras.
3. Disminución de la talla media de anchoveta, asociado con la reducción en la proporción de ejemplares mayores a 16,0 cm LT y un aumento de los individuos juveniles ( $\leq 11,5$  cm LT) en las capturas (Hernández-Santoro *et al.*, 2019a).
4. En la actividad reproductiva, aumento en la participación de individuos entre 12,5 y 13,5 cm LT que habitualmente no participan del proceso reproductivo (Hernández-Santoro *et al.*, 2019a).
5. En el patrón de reclutamiento de la anchoveta.
6. Tendencias negativas en el peso medio y factor de condición.













## HIPOTESIS

- La reducci3n de talla de anchoveta se produce por cambios en el h3bitat (cantidad y calidad de la oferta de alimento) y/o por factores ambientales que afecten el metabolismo (temperatura y oxigeno)". En ese sentido se acoge la sugerencia del evaluador para relacionar variables talla, FC, IGS vs efectos ambientales (variables f3sicas explicativas del metabolismo vs fitoplancton, zooplancton).
- El menor crecimiento en alguna de las etapas de desarrollo ontogen3tico provoca una disminuci3n en la talla media de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en la zona norte de Chile.
- La tasa de crecimiento de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en la zona norte de Chile depende de los cambios en la abundancia, tama1o y composici3n de sus presas.
- El aumento de la temperatura del mar provoca una disminuci3n del crecimiento en alguna de las etapas de desarrollo ontogen3tico de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en la zona norte de Chile.



## OBJETIVOS

**Objetivo General**

Determinar los factores causantes de los cambios estructurales de la poblaci3n de anchoveta de la zona norte de Chile, en el periodo reciente, y evaluar sus implicancias.

**Objetivos Específicos**

- i. Caracterizar los patrones de edad y crecimiento de juveniles y adultos de baja talla de anchoveta registrados en el periodo reciente, para clarificar sus impactos en los cambios que ha experimentado la especie.
- ii. Desarrollar y comprobar hipótesis respecto a los factores causantes de los cambios estructurales de la anchoveta, mediante el análisis y la comparaci3n de series históricas oceanográficas, biológicas y pesqueras, juntamente con investigaci3n y literatura asociada y discusiones de talleres de trabajo y comités.
- iii. Establecer recomendaciones para el manejo pesquero, bajo distintos escenarios basados en las hipótesis planteadas en el estudio

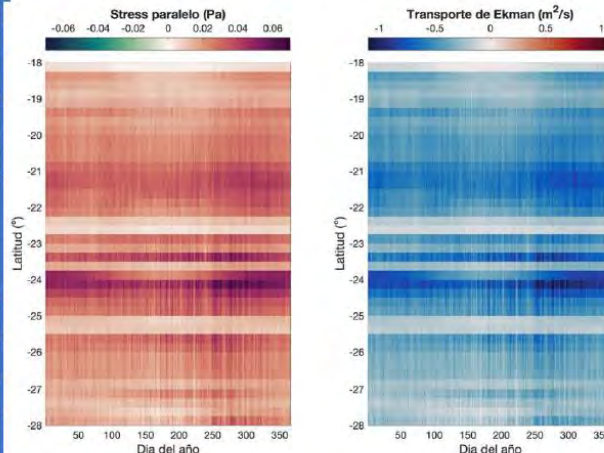


## Caracterizaci3n ambiental

## RESULTADOS

Diferencias en el forzamiento atmosférico, del estrés de viento paralelo a la costa que genera transporte de Ekman y la surgencia costera, como del rotor de viento y el bombeo de Ekman generado por este sobre una banda costera de 25-50 km de ancho.

A mediados de la d3cada de los noventa hubo un incremento abrupto en la magnitud de ambos procesos de afloramiento, el cual se mantuvo hasta la segunda d3cada del siglo XXI, con una ca3da mucho m3s gradual, y niveles actuales que son comparables o levemente superiores a los observados a inicios de la d3cada de los ochenta.



Climatología del stress de viento paralelo a la costa (izquierda) y del transporte de Ekman (derecha) en funci3n de la latitud. El tiempo se expresa como día del a3o. Los tonos rojos (valores positivos) del panel izquierdo corresponden a viento favorable a surgencia costera. Los tonos azules (valores negativos) del panel derecho indican transporte de Ekman en direcci3n costa afuera (surgencia).

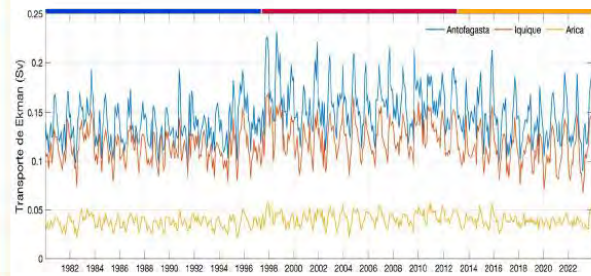


Caracterización ambiental

RESULTADOS

Las series de tiempo del Transporte de Ekman integrado a lo largo de las 3 secciones de la costa mostraron niveles sustancialmente menores en la sección norte (Arica) en relación con las otras dos secciones (Iquique y Antofagasta)

Se observó un patrón de variabilidad estacional en las tres zonas, aunque fue más aparente hacia el extremo sur de la región de estudio



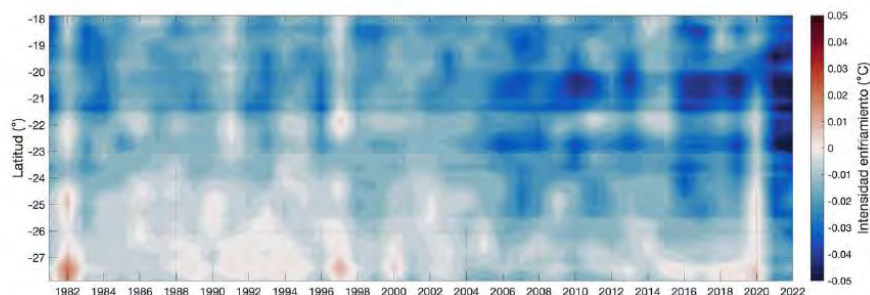
Serie temporal de transporte de Ekman (en  $Sv = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) calculado para cada una de las 3 secciones de la costa previamente definidas como áreas de interés. Las líneas grises corresponden a valores diarios y las líneas azules muestran las series suavizadas usando una media móvil de 10 días. Todos los valores se muestran con el signo opuesto al obtenido originalmente, por lo que valores positivos indican transporte de Ekman costa afuera (i.e. surgencia costera).





## PRINCIPALES RESULTADOS: Caracterizaci3n ambiental

De los **índices de enfriamiento costero** calculados a partir de anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) latitud-específicas y de las fluctuaciones a escala sin3ptica de la TSM del área de estudio, se observó una clara **intensificación en el enfriamiento costero a partir de 2006-2007**, sugiriendo una **intensificaci3n del proceso de surgencia costera a partir de ese período** y que difiere del patr3n interanual en intensidad de la surgencia que se podría esperar a partir del análisis de viento.

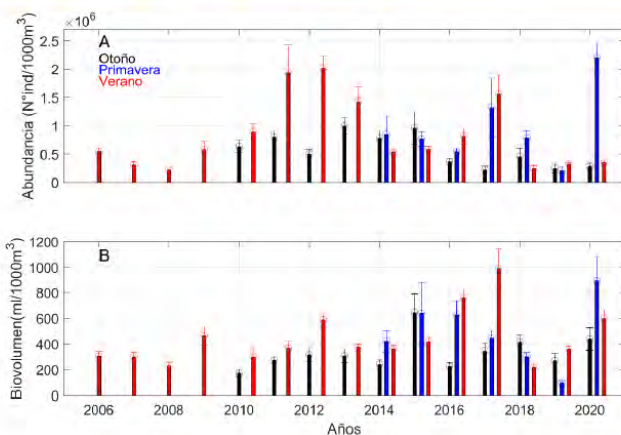


Variabilidad latitudinal e interanual de la intensidad del enfriamiento superficial en la regi3n de interés. El índice de enfriamiento se calcul3 para cada temporada primavera-verano (septiembre a marzo) a partir de imágenes AVHRR diarias para el período 1981-2023. Los años en el eje x indican el año de inicio de cada temporada, i.e., los valores que se muestran para cada latitud sobre el año 2010 corresponden a promedios de los valores diarios calculados entre el 1 de septiembre de 2010 y el 31 de marzo de 2011.



## PRINCIPALES RESULTADOS: Caracterización del zooplancton

En relación a la oferta alimenticia, los resultados muestran **cambios interanuales y estacionales en la abundancia y estructura comunitaria del zooplancton** en la región norte de Chile.



Serie de tiempo de la abundancia total de zooplancton promedio de otoño (A), primavera (B) y verano (C) y bio-volumen total de zooplancton promedio de otoño (D), primavera (E) y verano (F). Las barras verticales representan el error estándar.

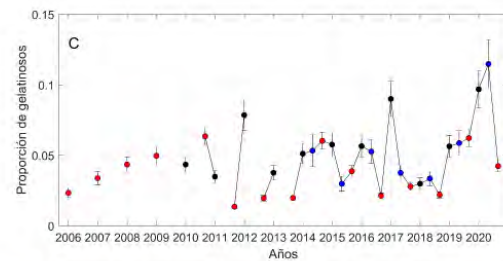
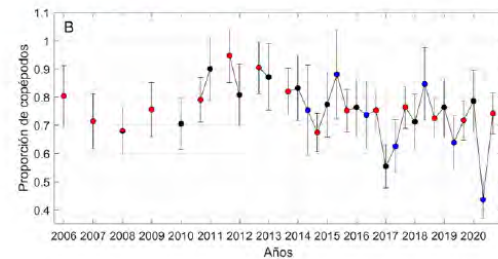




## PRINCIPALES RESULTADOS: Caracterizaci3n del zooplancton

Se detectaron descensos en la abundancia total y de copépodos, y aumentos importantes de gelatinosos (inicio del periodo cálido), que podrían estar asociados con un forzamiento ambiental. Se destacó una disminuci3n en la abundancia de los copépodos en otoño a partir del 2016 y entre 2014 y 2016 en verano.

Cabe destacar la variabilidad estacional que se observ3 en la comunidad del zooplancton entre estaciones del ańo para el periodo 2014-2020, esta variabilidad en la comunidad del zooplancton fue explicada principalmente por los copépodos, el cual present3 sus mayores abundancias en primavera.

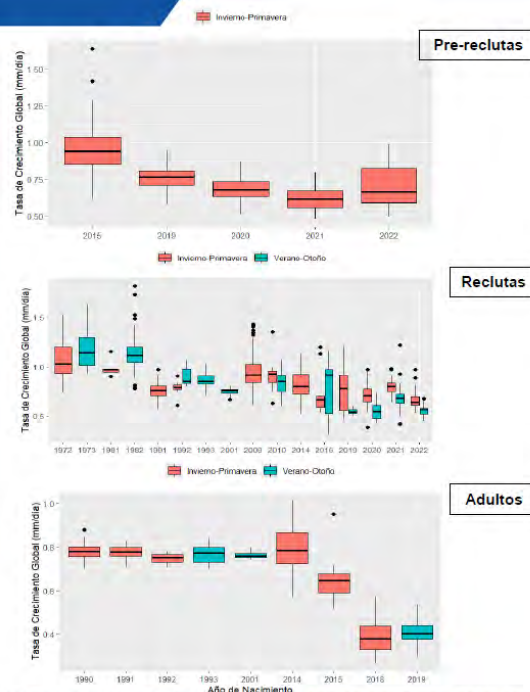


Serie de tiempo de la proporci3n de copépodos (B) y la proporci3n de gelatinosos (C) para otońo (negro), primavera (azul) y verano (rojo). Las barras verticales corresponden al error estándar calculado con todas las estaciones de cada ańo y estaci3n del ańo.



## PRINCIPALES RESULTADOS: Crecimiento

Las tasas medias de crecimiento global, calculadas como la relación entre la longitud y la edad de captura, mostraron una **tendencia decreciente** en las últimas dos décadas, representando una disminución del 30% en los últimos años, siguiendo un mismo patrón, independientemente de la etapa ontogenética (es decir, pre-reclutas, reclutas y adultos) y la cohorte bi-estacional de nacimiento (es decir, invierno-primavera vs verano-otoño).



Tendencias centrales, magnitudes y rangos la tasa de crecimiento global de ejemplares de anchoveta (*Engraulis ringens*).



## PRINCIPALES RESULTADOS:

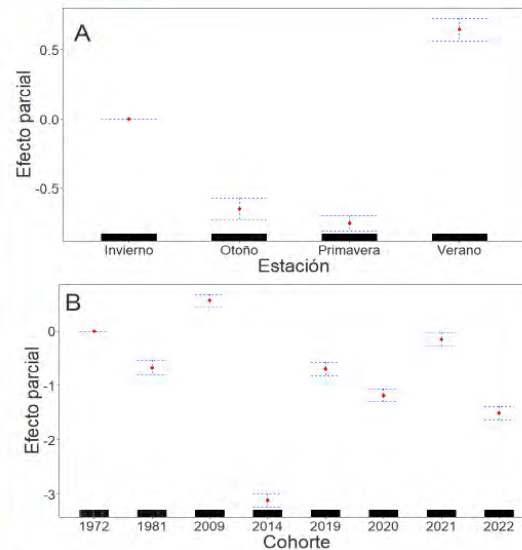
### Tasa de crecimiento

#### Perfiles de grosor de los incrementos (GAM)

En relación al crecimiento de anchoveta de la zona norte de Chile, una **tendencia a la baja independiente del estado ontogenético** (pre recluta, recluta y adultos), destacando para los adultos un menor crecimiento los últimos años.

Se destacan cambios temporales importantes en las tasas de crecimiento y longitud media de los peces con respecto a la edad, al menos en los primeros 150 días (5 meses) de vida.

El análisis cronológico de los grosores de los incrementos diarios en otolitos, como proxy de la tasa de crecimiento, modelado a través de un modelo aditivo generalizado (GAM), detectó **diferencias significativas en el grosor medio entre cohortes**, con una tendencia decreciente en el tiempo, lo que sugiere una **disminución de la tasa de crecimiento** después del año 2009.



Gráficos de interpolación de la edad desde el modelo aditivo generalizado (GAM) que muestran el efecto de las variables explicativas, estaciones del año (A) y cohortes (B) con respecto al GI.



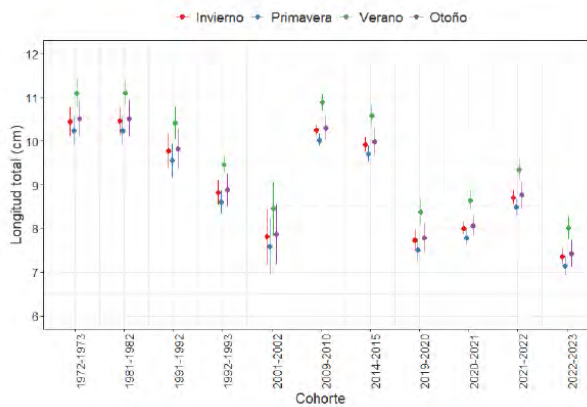
## PRINCIPALES RESULTADOS:

Tasa de crecimiento

### Variación de la talla edad retro-calculada (micro-incrementos)

La longitud media del pez con respecto a la edad observada al momento de la captura modelada con un GLM, mostró **diferencias significativas entre las cohortes**, con coeficientes que van disminuyendo en forma consistente desde la primera cohorte analizada (1972-1973) hasta la más reciente (2022-2023).

Las longitudes medias predichas a partir del modelo muestran una **disminución interanual en cada uno de los tres intervalos de edad analizados (50-79, 80-104 y 105-129)**, es decir, a una misma edad los peces juveniles de anchoveta entre 50 y 129 días de vida presentan un tamaño menor, que puede oscilar entre 2,6 a 5,8 cm menos en la longitud total que el registrado hace al menos 15 años atrás.



Longitud total media a la edad de 108 días estimadas a partir del modelo lineal generalizado para cada cohorte y estaciones. Las líneas verticales corresponden al intervalo al 95% de confianza.

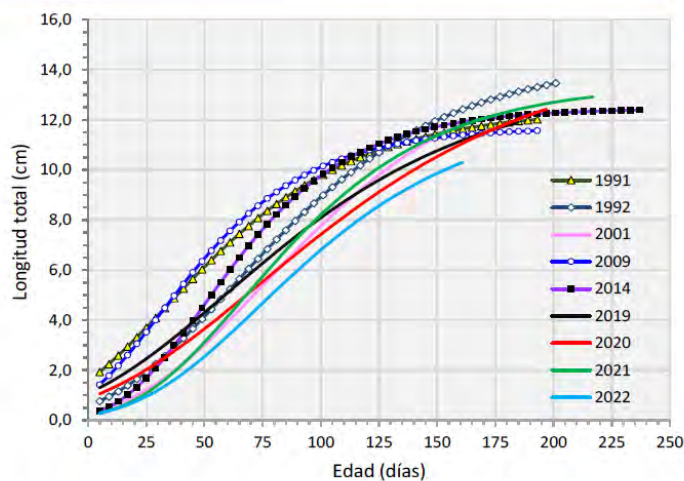




## PRINCIPALES RESULTADOS: Tasa de crecimiento

### Modelo de crecimiento Laird-Gompertz

Disminuci3n en la tasa de crecimiento de anchoveta que registr3 la disminuci3n significativamente en el tiempo.



Curvas medias de la relaci3n edad-longitud total de anchoveta estimadas a partir del modelo Laird-Gompertz para cada una de las cohortes analizadas.



## PRINCIPALES RESULTADOS: Modelamiento GAM

Resumen del ajuste para la totalidad de las cohortes. Pruebas de significancia estadística (A), coeficientes estimados de los términos paramétricos (B) y niveles y porcentajes de explicaci3n total y de cada termino (C).

(A) Prueba de significancia de términos					(B) Coeficientes estimados términos paramétricos				
Términos suavizados					Término Estimación EE Estadístico Valor P				
Término	GLE	GLR	Estadístico	Valor P	(Intercepto)	9,4859	0,7271	13,05	<0,0001
s(EK_TRA)	6,66	7,84	4,37	< 0,0001	EDAD_D	0,0094	0,0075	1,25	0,212
s(SOI_PRM)	7,92	8,71	6,68	< 0,0001	CH_1981-1982	-1,3877	0,9369	-1,48	0,139
Términos paramétricos					CH_1991-1992	-4,6118	1,1860	-3,89	<0,0001
Término	GL	Estadístico F	Valor p		CH_1992-1993	-7,8284	1,0047	-7,79	<0,0001
EDAD_D	1	1,56	0,212		CH_2001-2002	-10,4605	2,0509	-5,10	<0,0001
CH_	10	36,81	< 0,0001		CH_2009-2010	-4,2999	0,7869	-5,46	<0,0001
ESTACION	3	11,13	< 0,0001		CH_2014-2015	-5,2738	0,8598	-6,13	<0,0001
EDAD_D:CH_	10	26,17	< 0,0001		CH_2019-2020	-6,2740	0,7636	-8,22	<0,0001
					CH_2020-2021	-8,2672	0,7773	-10,64	<0,0001
					CH_2021-2022	-10,3525	0,7785	-13,30	<0,0001
					CH_2022-2023	-8,9485	0,7951	-11,26	<0,0001
					ESTACION_Primavera	-0,3774	0,0784	-4,81	<0,0001
					ESTACION_Verano	-0,0335	0,1476	-0,23	0,821
					ESTACION_Otoño	-0,4207	0,1725	-2,44	0,015
					EDAD_D:CH_1981-1982	0,0121	0,0096	1,25	0,21
					EDAD_D:CH_1991-1992	0,0401	0,0103	3,89	<0,0001
					EDAD_D:CH_1992-1993	0,0666	0,0093	7,15	<0,0001
					EDAD_D:CH_2001-2002	0,0722	0,0169	4,26	<0,0001
					EDAD_D:CH_2009-2010	0,0384	0,0080	4,78	<0,0001
					EDAD_D:CH_2014-2015	0,0456	0,0085	5,37	<0,0001
					EDAD_D:CH_2019-2020	0,0304	0,0080	3,79	<0,0001
					EDAD_D:CH_2020-2021	0,0538	0,0079	6,85	<0,0001
					EDAD_D:CH_2021-2022	0,0801	0,0079	10,15	<0,0001
					EDAD_D:CH_2022-2023	0,0554	0,0080	6,96	<0,0001

(C) Niveles y porcentajes de explicación		
Término	Pseudo-R2	% Explic.
EDAD_D:CH_	0,282	31,4 %
EDAD_D	0,188	20,9 %
CH_	0,181	20,1 %
s(SOI_PRM)	0,106	11,7 %
s(EK_TRA)	0,095	10,6 %
ESTACION	0,048	5,3 %
Total	0,900	100,0 %

Series de tiempo del factor de condi3n, peso medio y longitud media de la anchoveta por zona. La lnea representa las tendencias de los datos (horizontal) y los puntos de ruptura (vertical) estimados por el m3todo BFAT para el periodo entre 1997-2022.



## PRINCIPALES RESULTADOS:

### Modelamiento GAM

Resumen del ajuste para las cohortes desde 1981-1982. Pruebas de significancia estadística (A), coeficientes estimados de los t3rminos param3tricos (B) y niveles y porcentajes de explicaci3n total y de cada termino (C).

(A) Prueba de significancia de términos				
Términos suavizados				
Término	GLE	GLR	Estadístico	Valor P
s(EK_TRA)	6,12	7,33	6,88	< 0,0001
s(TSM_SINOP_Z)	4,92	6,05	3,90	< 0,0001
s(TSM_GR_DAZ)	7,19	8,19	8,17	< 0,0001
s(TSM_CO_INT_Z)	6,57	7,68	9,75	< 0,0001
Términos paramétricos				
Término	GL	Estadístico F	Valor p	
EDAD_D	1	6,2	0,0127	
CH_	9	26,9	< 0,0001	
ESTACION	3	13,5	< 0,0001	
EDAD_D:CH_	9	21,6	< 0,0001	
(C) Niveles y porcentajes de explicación				
Término	Pseudo-R <sup>2</sup>	% Explic.		
EDAD_D:CH_	0,246	27,0 %		
EDAD_D	0,172	18,9 %		
CH_	0,153	16,8 %		
s(EK_TRA)	0,100	11,0 %		
s(TSM_SINOP_Z)	0,066	7,3 %		
s(TSM_GR_DAZ)	0,065	7,2 %		
s(TSM_CO_INT_Z)	0,061	6,6 %		
ESTACION	0,048	5,3 %		
Total	0,911	100,0 %		

(B) Coeficientes estimados términos paramétricos				
Término	Estimación	EE	Estadístico	Valor P
(Intercepto)	9,0233	0,7118	12,68	< 0,0001
EDAD_D	0,0171	0,0068	2,50	0,013
CH_1991-1992	-2,5469	1,5539	-1,64	0,101
CH_1992-1993	-7,4111	0,9997	-7,41	< 0,0001
CH_2001-2002	-10,3245	2,0045	-5,15	< 0,0001
CH_2009-2010	-3,1474	0,7874	-4,00	< 0,0001
CH_2014-2015	-4,3884	0,8392	-5,23	< 0,0001
CH_2019-2020	-6,6942	0,7343	-9,12	< 0,0001
CH_2020-2021	-6,5003	0,7532	-8,63	< 0,0001
CH_2021-2022	-10,1214	0,8004	-12,65	< 0,0001
CH_2022-2023	-8,3729	0,8605	-9,73	< 0,0001
ESTACION_Primavera	-0,5535	0,0941	-5,88	< 0,0001
ESTACION_Verano	-0,2382	0,1676	-1,42	0,156
ESTACION_Otoño	-0,1659	0,2403	-0,69	0,49
EDAD_D:CH_1991-1992	0,0270	0,0124	2,19	0,029
EDAD_D:CH_1992-1993	0,0594	0,0100	5,92	< 0,0001
EDAD_D:CH_2001-2002	0,0703	0,0165	4,26	< 0,0001
EDAD_D:CH_2009-2010	0,0218	0,0075	2,91	0,004
EDAD_D:CH_2014-2015	0,0352	0,0079	4,46	< 0,0001
EDAD_D:CH_2019-2020	0,0284	0,0074	3,85	< 0,0001
EDAD_D:CH_2020-2021	0,0376	0,0073	5,17	< 0,0001
EDAD_D:CH_2021-2022	0,0750	0,0081	9,30	< 0,0001
EDAD_D:CH_2022-2023	0,0458	0,0088	5,20	< 0,0001





## PRINCIPALES RESULTADOS:

Los periodos de an3lisis comenzaron con el total de cohortes para los 3ndices de transporte y bombeo de Ekman, oscilaci3n del sur y vientos. Posteriormente, se incluyeron los 3ndices asociados a la temperatura superficial para las cohortes desde el 1981-1982, los 3ndices de clorofila superficial para las cohortes desde el 2001-2002 y finalmente los 3ndices asociados a la composici3n del zooplancton a partir de la cohorte 2009-2010 hasta la del 2021-2022.

Las tendencias a la baja en el crecimiento de la anchoveta en la zona norte fueron modeladas con GAM utilizando un 3ndice estandarizado de crecimiento siendo explicado principalmente la edad, cohorte, estaci3n y por el transporte de Ekman e indicadores de temperatura explicando entre un 90 a 91% de la variabilidad total.

Series de tiempo del factor de condici3n, peso medio y longitud media de la anchoveta por zona. La l3nea representa las tendencias de los datos (horizontal) y los puntos de ruptura (vertical) estimados por 3l m3todo BFAT para el periodo entre 1997-2022.







## CONCLUSIONES


- Se confirma la hip3tesis donde planteamos que **la disminuci3n de la longitud media** para la anchoveta de la zona norte, esta asociada con una **disminuci3n en el crecimiento somático**.
- Los perfiles de grosores medios globales estandarizados por el efecto de la variabilidad interanual, a trav3s de un modelo aditivo generalizado, siguieron un **patr3n parab3lico independiente de la cohorte estacional de nacimiento** (i.e., verano, otoño, invierno o primavera), evidenciándose, adem3s, un **crecimiento sostenido para los primeros dos meses de vida**, seguido de un decaimiento hacia el quinto mes de vida.
- Los índices de crecimiento derivados de modelos GLM y GAM, a la relaci3n talla edad a la fecha de captura, estandarizados por el efecto de la cohorte estacional de nacimiento y zona de captura, para ejemplares de entre 50 y 150 días de vida, bajo un enfoque de una serie de tiempo discreta, evidenciaron **dos ciclos de disminuci3n en productividad somática**, uno desde 1972 hasta 2002 y otro entre 2009 hasta 2022.
- Las tasas de crecimiento globales promedios evidenciaron una **tendencia decreciente en las últimas dos d3cadas** a nivel general, representado un 30% de disminuci3n, siguiendo el mismo patr3n, independiente de la etapa ontogénica (pre-reclutas, reclutas y adultos) y la estaci3n bimensual de nacimiento.




## CONCLUSIONES

- El 1rea de estudio report3 una **intensificaci3n del proceso de surgencia** a partir de 2006-2007.
- La abundancia total y de **copépodos** present3 una **disminuci3n** con un **aumento en el grupo de gelatinosos**.
- En otoño la abundancia de **copépodos** **disminuye** a partir del 2016 y entre 2014 y 2016 en **verano**.
- La disminuci3n de la longitud media de la anchoveta en la zona, fue explicada principalmente por **la edad, la corte de nacimiento, estaci3n** y por indicadores de **procesos de surgencia** como el índice de transporte Ekman e indicadores de temperatura explicando entre un 90 a 91% de la variabilidad total.
- Los resultados del presente estudio, a trav3s diferentes índices estandarizados, demostraron que **el crecimiento somático de la anchoveta en los 4 últimos años**, correspondió a los registros m1s bajos de la serie interanual analizada, reflejando que esta especie se encuentra en una **condici3n somática crítica**, que amerita la aplicaci3n de medidas urgentes de manejo y evaluaci3n que garanticen su sustentabilidad en el corto y mediano plazo.




Manejo Pesquero para la anchoveta de la zona norte de Chile

**Sobre-explotación**



**Recuperación**

→


### Planes de manejo pesquero

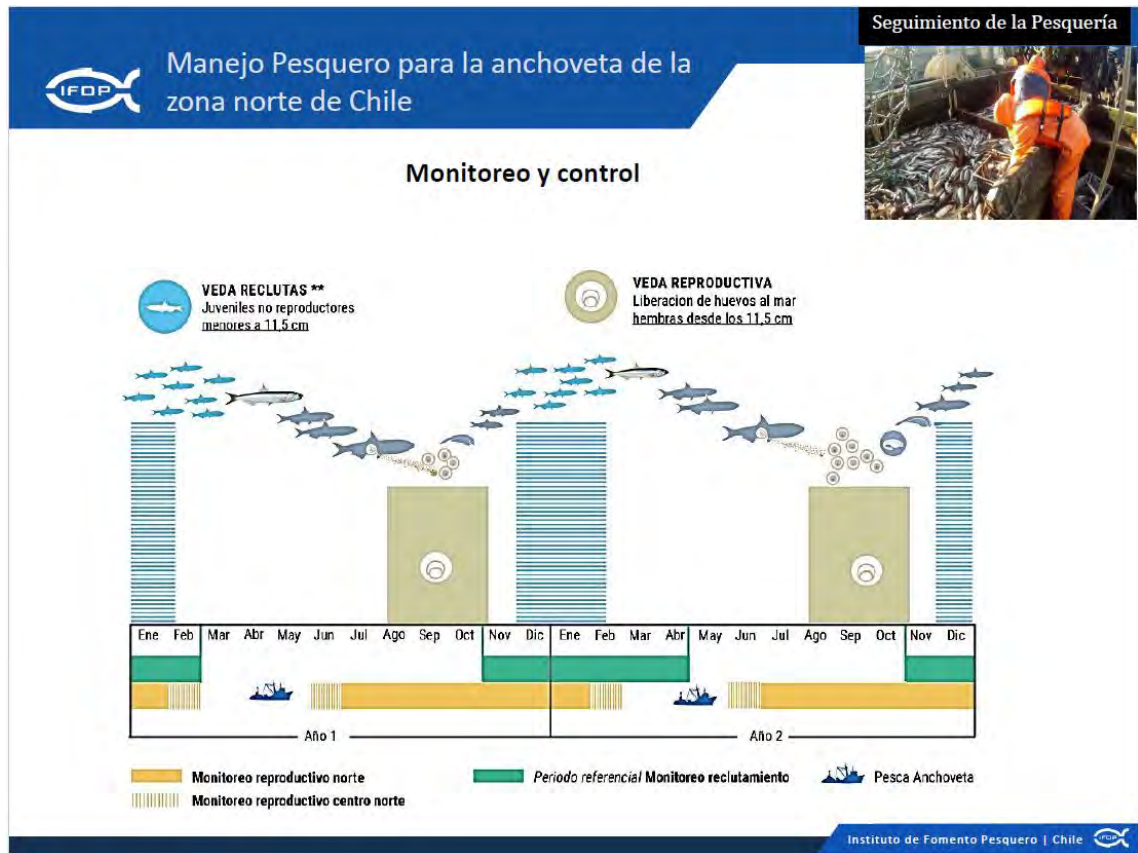
#### Comités de manejo

Son organismos consultivos y asesores de la autoridad pesquera, integrados por los principales representantes sectoriales de cada pesquería, así como funcionarios de esta Subsecretaría y de Sernapesca. Se dividen en dos grupos, dependiendo del artículo de la LGPA que los rige.

**Artículo 8° LGPA:** Comités de manejo de las pesquerías que tengan su acceso cerrado, así como las pesquerías declaradas en régimen de recuperación y desarrollo incipiente (por orden alfabético).

Comité de manejo Sardina austral	Comité de manejo Anchoveta y Sardina común
Comité de manejo Anchoveta y Sardina española XV-II	Comité de manejo Anchoveta y Sardina española III-IV
Comité de manejo Bacalao de Profundidad	Comité de manejo Congrio dorado Unidad de Pesquería Norte
Comité de manejo Congrio dorado Unidad de Pesquería Sur	Comité de manejo Crustáceos demersales

Instituto de Fomento Pesquero | Chile 





**Sostenibilidad y certificaciones:** Algunas empresas pesqueras en Chile que se dedican a la pesca de anchoveta cuentan con certificaciones de sostenibilidad, como el sello MSC (Marine Stewardship Council), que garantiza que la pesca se realiza de acuerdo con prácticas responsables y respetuosas con el medio ambiente.

**Investigación científica:** El manejo de la anchoveta en Chile también está respaldado por investigaciones científicas continuas, realizadas por instituciones como el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) y universidades, que evalúan el estado de las poblaciones de anchoveta, su comportamiento ecológico y su papel en la cadena alimentaria marina.

Este enfoque integral de manejo tiene como objetivo equilibrar la explotación económica de la anchoveta con la conservación de los ecosistemas marinos y la seguridad alimentaria.





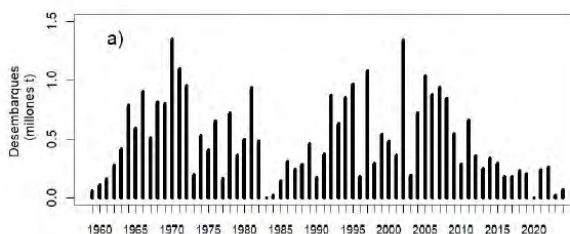
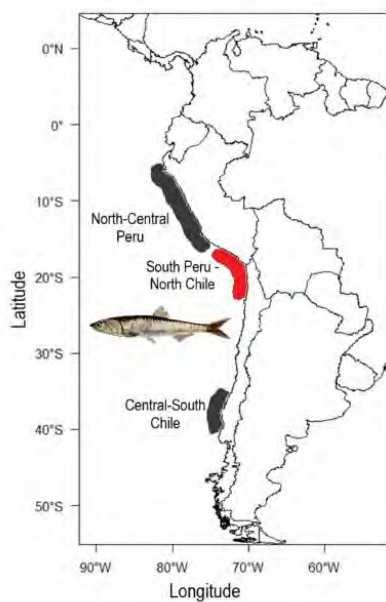


## Procedimiento de manejo de la pesquería de la anchoveta del sur del Perú



Marilu Bouchon  
Erich Díaz

Direcci3n General de Investigaciones en Recursos Pelágicos

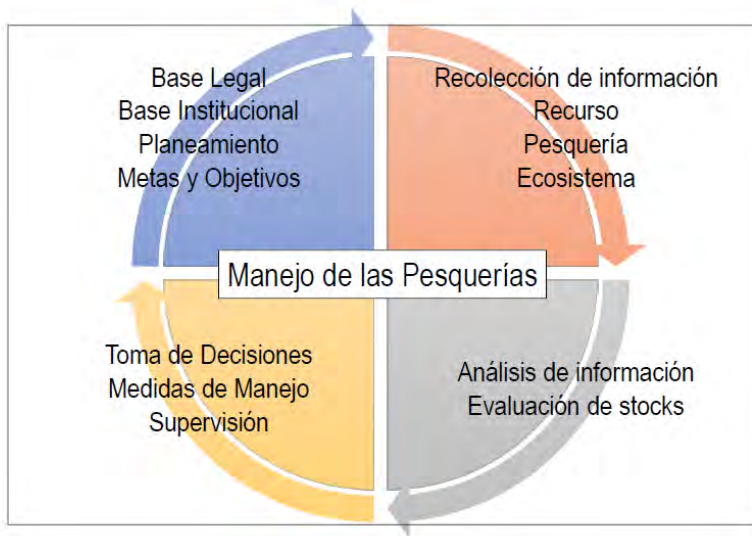


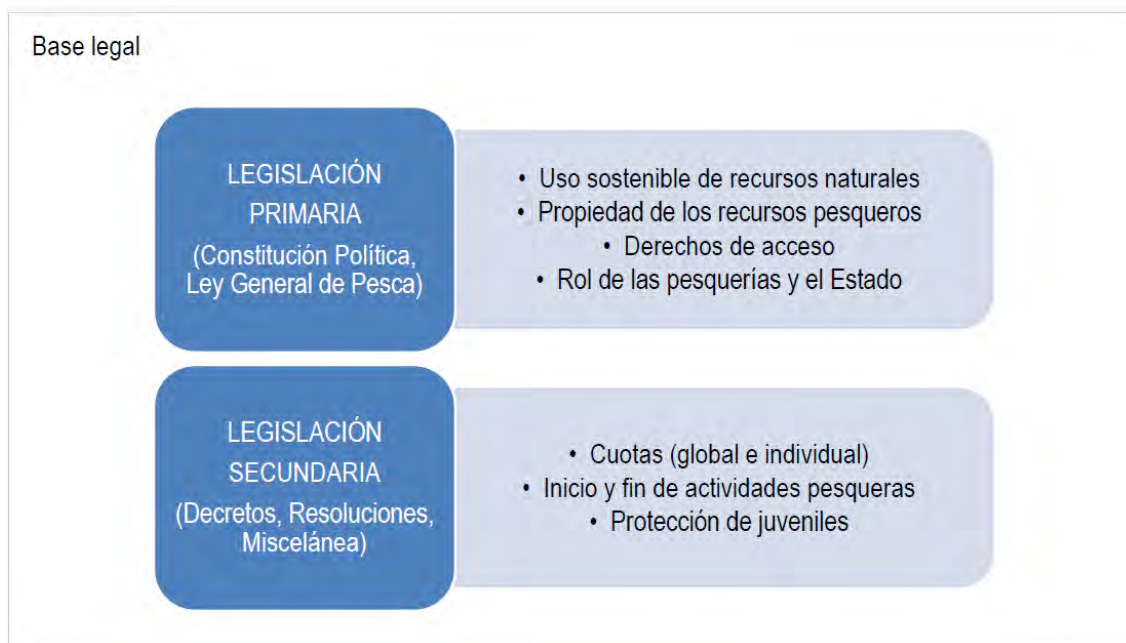
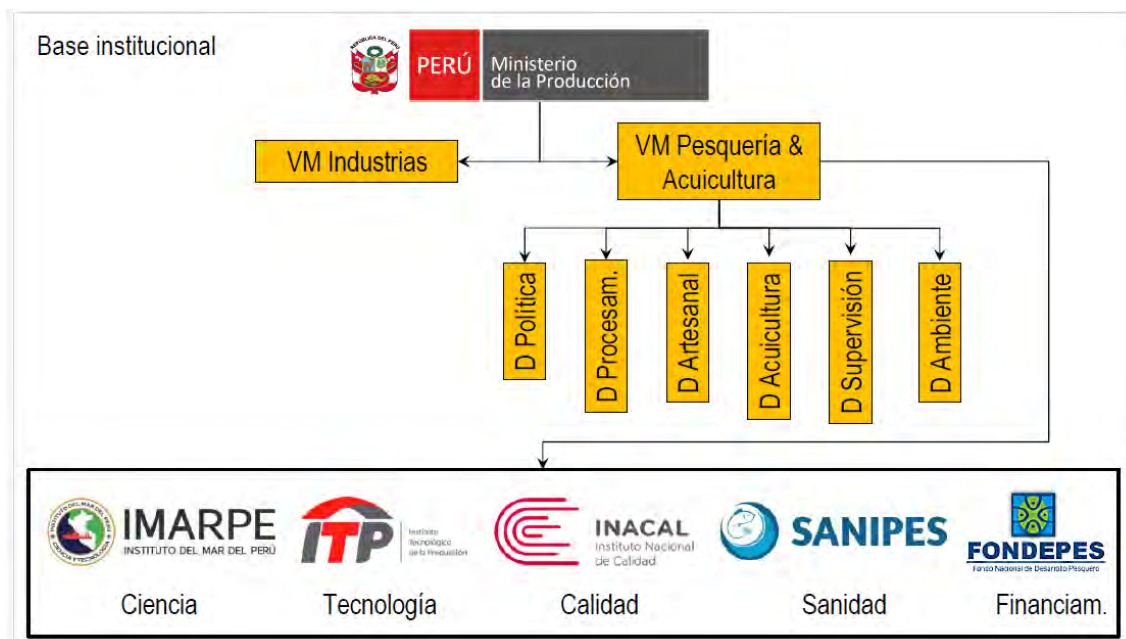
Acero (CB = 250 m<sup>3</sup>)



Madera (CB = 100 m<sup>3</sup>)





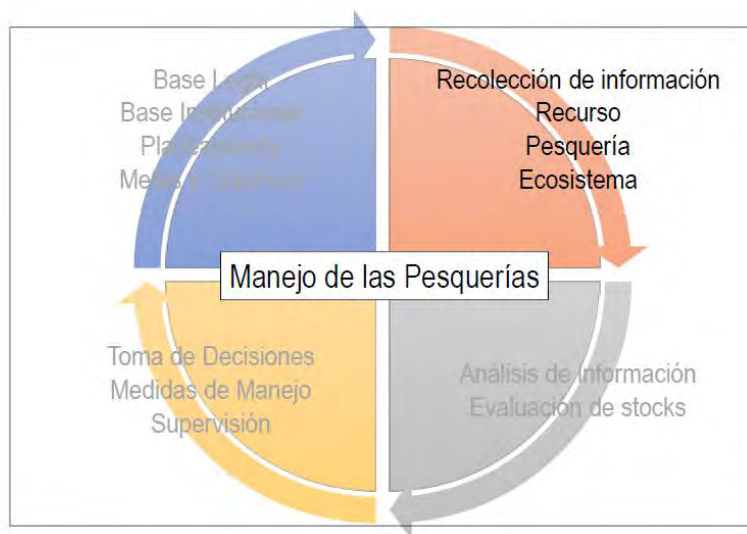


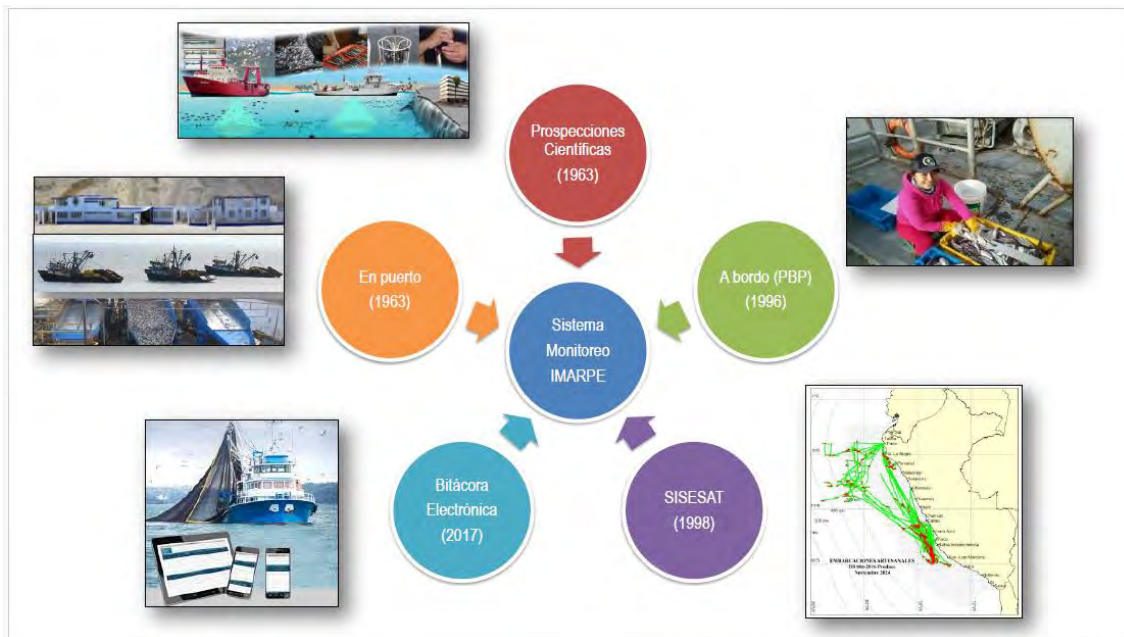
## Objetivo

Ley General de Pesca  
Decreto Ley N° 25977

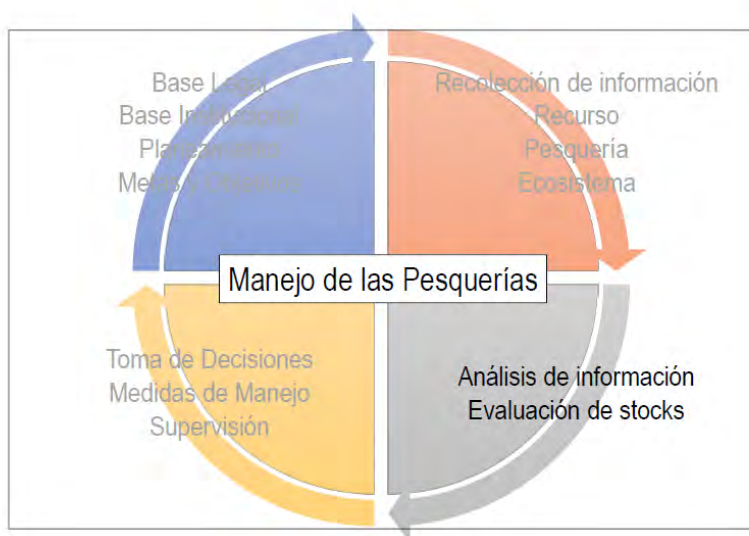
### TITULO I DE LAS NORMAS B3SICAS

Artículo 1.- La presente Ley tiene por objeto normar la actividad pesquera con el fin de promover su desarrollo sostenido como **fente de alimentaci3n, empleo e ingresos** y de asegurar un **aprovechamiento responsable de los recursos hidrobiol3gicos**, optimizando los beneficios econ3micos, en armonía con la **preservaci3n del medio ambiente** y la **conservaci3n de la biodiversidad**.



[illegible]

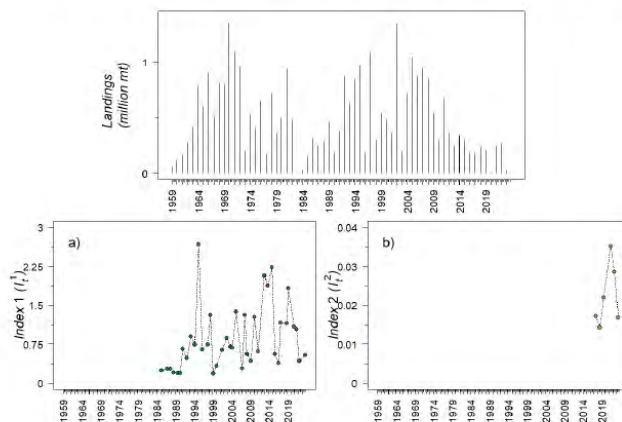
[https://www.imarpe.gob.pe/imarpe/archivos/reportes/I\\_temporada\\_2025.html](https://www.imarpe.gob.pe/imarpe/archivos/reportes/I_temporada_2025.html)



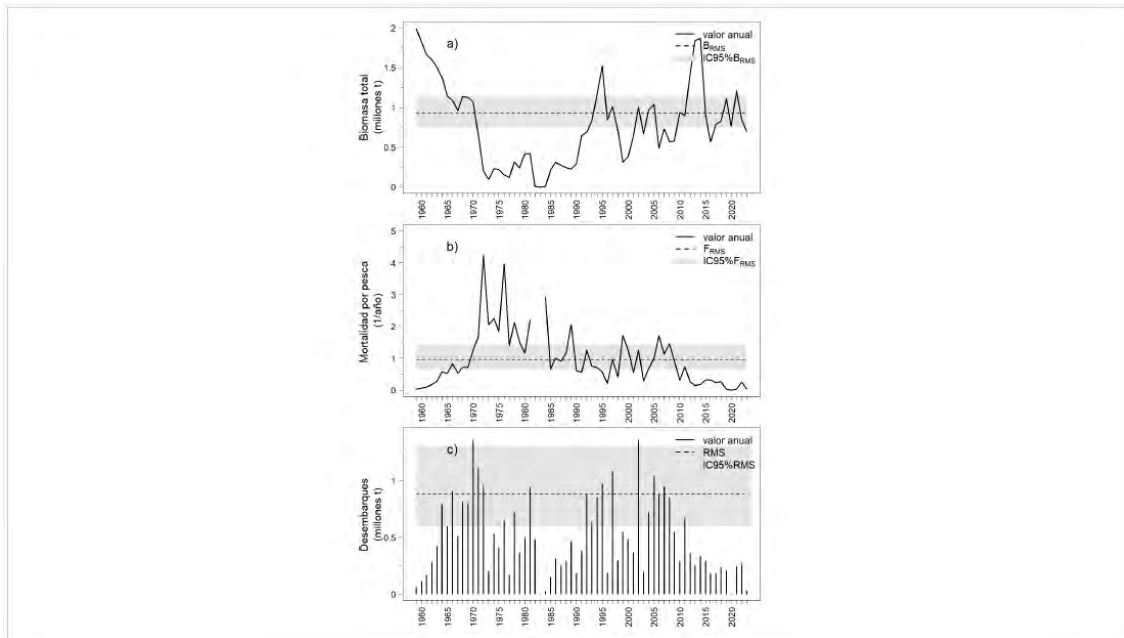


## EVALUACI3N DE LA ANCHOVETA DISPONIBLE EN LA REGI3N SUR DEL MAR PERUANO

✓ Modelo estoc3stico de producci3n excedente en tiempo continuo (SPiCT) (Pedersen and Berg, 2016)



Parameter	Description	Prior $\mu(\sigma)$	Estimate [95% confidence interval]
$B_0/K$	Initial depletion i. e., ratio of the initial biomass ( $B_0$ ) to carrying capacity ( $K$ )	0.8 (0.25)	0.79 [0.49 – 1.29]
$K$	Carrying capacity (millions mt)	3 (0.10)	2.83 [2.32 – 3.44]
$r$	Population growth rate (1/year)	–	0.76 [0.48 – 1.20]
$n$	Shape parameter determining the biomass at which productivity is maximized	0.599 (0.342)	0.79 [0.64 – 0.98]
$q_{I^1}$	Catchability index 1 (Acoustic)	1 (0.20)	0.98 [0.81 – 1.18]
$q_{I^2}$	Catchability index 2 (CPUE)	1 (2)	0.02 [0.01 – 0.03]
$\sigma_{I^1}$	Observation error Index 1 (Acoustic)	0.25 (0.25)	0.29 [0.17 – 0.50]
$\sigma_{I^2}$	Observation error Index 2 (CPUE)	0.25 (0.25)	0.25 [0.15 – 0.40]
$\sigma_C$	Observation error Catch	0.05 (Fixed)	–
$MSY$	Maximum Sustainable Yield (million t)	–	0.88 [0.59 – 1.30]
$B_{MSY}$	Biomass at Maximum Sustainable Yield (million t)	–	0.92 [0.74 – 1.14]
$F_{MSY}$	Fishing Mortality at Maximum Sustainable Yield (1/year)	–	0.95 [0.64 – 1.43]





Cuotas  
(global e Individual)

Protección de  
juveniles

Adicionales

Cuotas

(global e Individual) Captura similar al  
periodo reciente

Protección de  
juveniles

Adicionales

Captura igual al 80%  
RMS

Capas	Ene	Captura 2024 (millones t)	Biomasa remanente 01/01/25 (millones t)	Riesgo (B <sub>2025</sub> < B <sub>RMS</sub> ) (%)	Riesgo (B <sub>2025</sub> < B <sub>2024</sub> ) (%)
0.00	0.00	0.000	1.212	23	33
0.02	0.02	0.024	1.182	24	34
0.05	0.03	0.047	1.175	25	35
0.07	0.05	0.070	1.154	26	36
0.10	0.08	0.092	1.136	27	37
0.12	0.07	0.114	1.117	28	38
0.15	0.09	0.135	1.100	29	40
0.17	0.10	0.155	1.082	30	41
0.20	0.12	0.177	1.065	31	42
0.22	0.13	0.192	1.047	32	43
0.25	0.14	0.217	1.031	33	44
0.27	0.15	0.237	1.014	35	45
0.28	0.16	0.256	0.998	36	46
0.32	0.18	0.274	0.982	37	47
0.34	0.19	0.293	0.966	38	48
0.37	0.20	0.311	0.951	39	49
0.38	0.21	0.329	0.936	40	49
0.42	0.22	0.346	0.921	41	50
0.44	0.23	0.365	0.906	41	51
0.47	0.24	0.380	0.892	42	52
0.48	0.25	0.395	0.878	43	52
0.52	0.27	0.412	0.864	44	53
0.54	0.28	0.428	0.850	45	53
0.56	0.28	0.443	0.837	45	54
0.59	0.29	0.459	0.824	46	54
0.61	0.30	0.475	0.811	47	55
0.64	0.31	0.488	0.798	47	55
0.66	0.32	0.502	0.785	48	55
0.69	0.33	0.515	0.772	48	56
0.72	0.34	0.530	0.761	49	56
0.74	0.35	0.544	0.749	49	56
0.76	0.36	0.557	0.737	50	57
0.78	0.37	0.570	0.726	50	57
0.81	0.37	0.583	0.714	50	57
0.83	0.38	0.595	0.703	51	58
0.86	0.39	0.607	0.692	51	58
0.88	0.40	0.619	0.681	52	58
0.91	0.40	0.633	0.671	52	58
0.93	0.41	0.642	0.660	52	58
0.96	0.42	0.654	0.650	52	59
0.98	0.43	0.665	0.640	53	59
1.00	0.43	0.675	0.630	53	59
1.02	0.44	0.686	0.620	53	59
1.05	0.44	0.697	0.610	53	59
1.08	0.45	0.707	0.601	54	59

✓ Resolución Ministerial:


Apertura de temporada  
Ene-Jun y Jul-Dic  
Cuota Global

✓ Asignación de Cuota  
por Armador

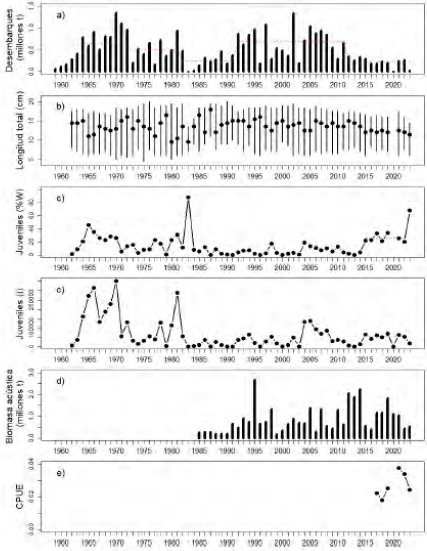


Captura que permite que  
la B sea igual a B<sub>RMS</sub>

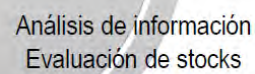
Captura que permite que  
la B<sub>2025</sub> sea igual a B<sub>2024</sub>



<p>Cuotas (global e Individual)</p> <p>Protecci3n de juveniles</p> <p>Adicionales</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tama1o de malla 13 mm</li> <li>✓ Talla m3nima de captura (12 cm)</li> <li>✓ <del>(Tolerancia 10%)</del> Cierres espacio-temporales</li> <li>✓ Evitar enmalle</li> <li>✓ Cuota de juveniles</li> </ul> 
-------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Cuotas (global e Individual)</p> <p>Protecci3n de juveniles</p> <p>Adicionales</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tama1o de malla 13 mm</li> <li>✓ Talla m3nima de captura (12 cm)</li> <li>✓ Cierres espacio-temporales</li> <li>✓ Evitar enmalle</li> <li>✓ Cuota de juveniles</li> </ul> 
-------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Cuotas (global e Individual)</p> <p>Protecci3n de juveniles</p> <p>Adicionales</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tama1o de malla 13 mm</li> <li>✓ Talla m3nima de captura (12 cm)</li> <li>✓ Cierres espacio-temporales</li> <li>✓ Evitar enmalle</li> <li>✓ Cuota de juveniles</li> </ul>	
<p>Cuotas (global e Individual)</p> <p>Protecci3n de juveniles</p> <p>Adicionales</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Regulaci3n del esfuerzo</li> </ul>	<div>   </div> <div> <p>Acero (CB = 250 m<sup>3</sup>)</p> <p>Madera (CB = 100 m<sup>3</sup>)</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sistema cerrado</li> <li>✓ Solo reemplazo</li> <li>✓ Trabajan en el sur los que cumplieron el 80% de su cuota individual en el NC</li> </ul>





**IMARPE**  
INSTITUTO DEL MAR DEL PER3



[www.gob.pe/imarpe](http://www.gob.pe/imarpe)



[/imarpe.pe](https://www.facebook.com/imarpe.pe)



[@institutomardelperu](https://www.instagram.com/institutomardelperu)



[@ImarpePeru](https://twitter.com/ImarpePeru)



[@institutomardelperu](https://www.tiktok.com/@institutomardelperu)



[@institutomardelperu](https://www.linkedin.com/company/institutomardelperu)



Photo from: <https://www.arroyabe.es/blog/pesca-de-la-anchova-a-bordo-del-santana-berria/>



## 1 ANCHOA EN EL GOLFO DE VIZCAYA

ICES evalúa anualmente el status de tres stocks de anchoa (*Engraulis encrasicolus*) en el Nordeste Atlántico:

- Un stock en el golfo de Vizcaya (Subarea 8)
- Dos stocks en las aguas Ibero Atlánticas (Division 9.a)

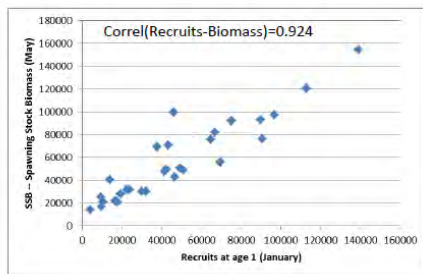
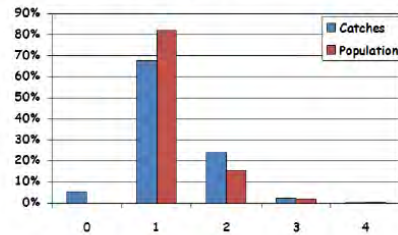




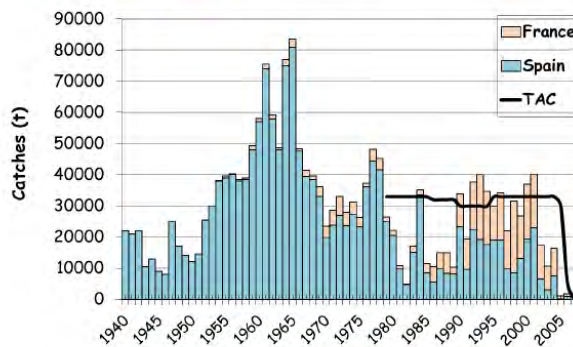
## 1- ANCHOA EN EL GOLFO DE VIZCAYA

### Principales características:

- Pequeño pez pelágico
- Comportamiento agregativo (cardúmenes)
- De vida corta (3-5 años); rápida regeneración
- 100% Maduro al primer año de vida
- Puesta en primavera
- Mortalidad natural alta y seguramente variable
- Predadores tanto en las fases juveniles como adultas: Tunidos, merluza, rapes (monkfish), y otros demersales, grandes caballas (mackerel), jureles etc...
- Cada años la población se apoya en la edad 1
- El 57% de las capturas (toneladas) soportadas por la edad 1 (43% por edades 2+) (en promedio 1992-2004)



## 2- Historia de la pesquería hasta este siglo



1940-1960: Modernización de la flota llevan a máximos de capturas y posterior declive hasta 1980

1980's: Introducción gradual la flota pelágica francesa

1986: Primer TAC Europeo ( 32 000 t) (90% España y 10% Francia pero con intercambios entre países)

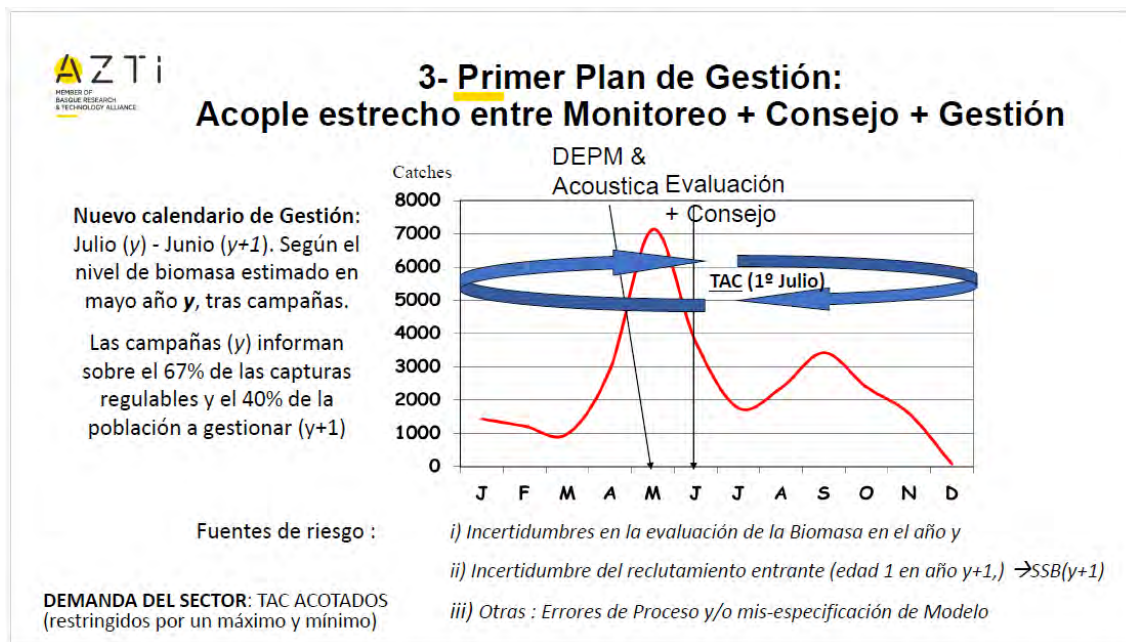
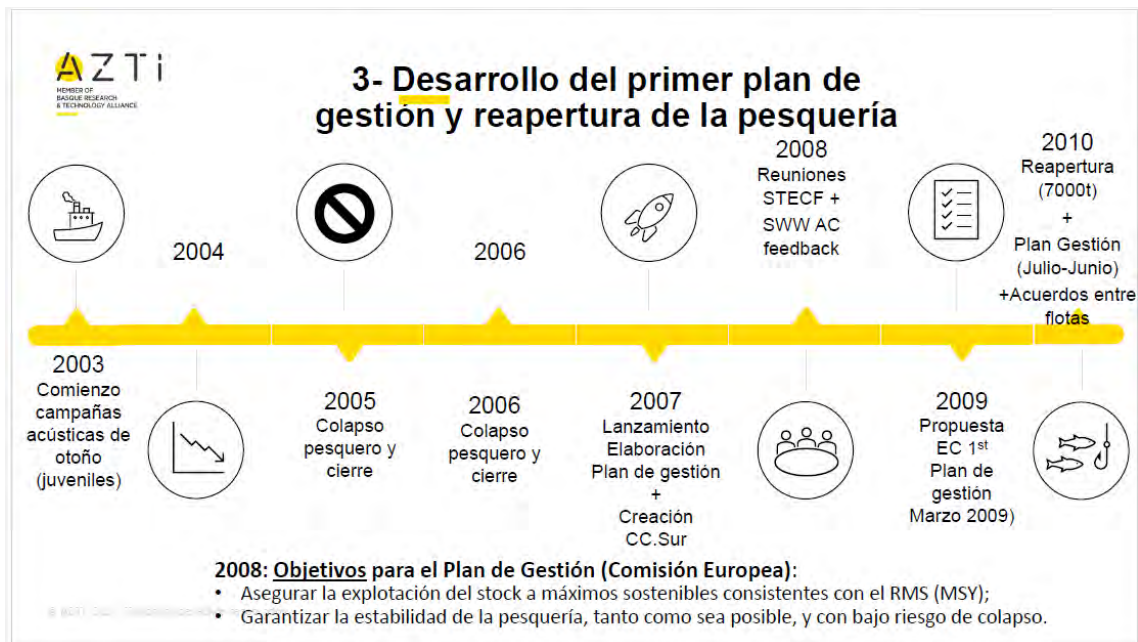
1987 comienzo campañas científica MPDH (DEPM) (BIOMAN) y comienzo campañas científica acústica (PELGAS) en 1989

1995: Primera evaluación del stock en ICES

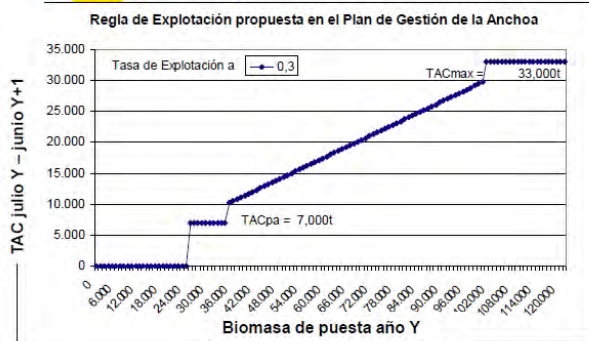
1986-2005: TAC fijo entre 30 000 - 33 000 t sin consideración del estado del stock: **No hay manejo efectivo de la pesquería**

### Pesquería:

Barcos de cerco españoles operando en primavera y arrastreros pelágicos franceses operando sobre todo en el segundo semestre del año



## 2010: REGLA DE EXPLOTACI3N ADOPTADA



✓ Base cientifica: Evaluaci3n del comportamiento de varias reglas alternativas mediante simulaciones de la poblaci3n y la pesqueria (Mangement Strategy Evaluation - MSE).

- ✓ Elementos principales de la Regla de Explotaci3n:
- Calendario: Julio-Junio
  - En t3rminos de Capturas (no de F)
  - Acotada: TAC m3ximo of 33 000t (TACmax)
  - M3nimo econ3mico viable TAC de 7000 t (TACmin)
  - Harvest rate: 0.3 (Tasa explotaci3n fracci3n SSB)

$$TAC_{July(y)-June(Y+1)} = \begin{cases} 0 & \text{si } \widehat{SSB}_y \leq 24000 \\ 7000 & \text{si } 24000 < \widehat{SSB}_y \leq 33000 \\ MIN(0.3 \cdot \widehat{SSB}_y ; 33000) & \text{si } \widehat{SSB}_y > 33000 \end{cases}$$

## 4- Segundo Plan de Gesti3n:

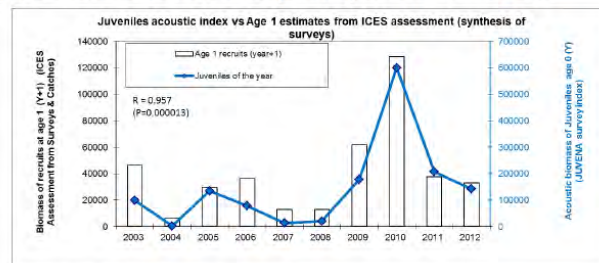
Revisi3n en 2014 requerida tras cuatro a1os de aplicaci3n

ICES Benchmark (ICES CM 2013/ACOM:46).

Cambios en el modelo de evaluaci3n (Ibaibarriaga et al. 2011 -CBBM)

Cambios en la din3mica poblacional (Mortalidad Natural) (Uriarte et al. 2016)

Inclusi3n de la campana ac3stica de Juveniles (edad 0) de oto1o : JUVENA



Boyra et al. 2013: ICES Journal of Marine Science, 70: 1354-1368.

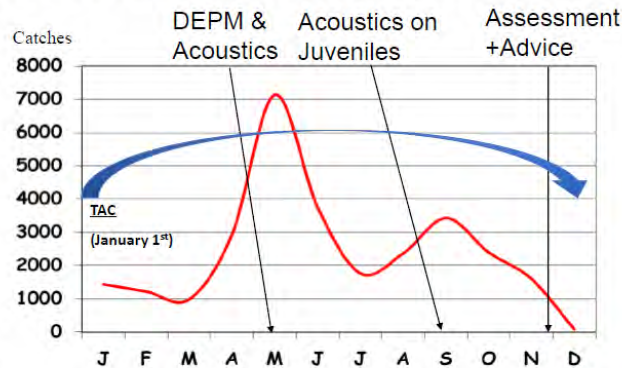


## 4- Segundo Plan de Gesti3n : Acople estrecho entre Monitoreo + Consejo + Gesti3n

### Nuevo calendario de gesti3n:

Enero – Diciembre ( $y+1$ ).  
Seg3n biomasa de adultos y  
de reclutas estimados en  
mayo y en oto3o tras las  
campa3as en el a3o  $y$ .

Las campa3as ( $y$ ) informan  
sobre el 98% de las capturas  
regulables y el 100% de la  
poblaci3n a gestionar (en  $y+1$ )



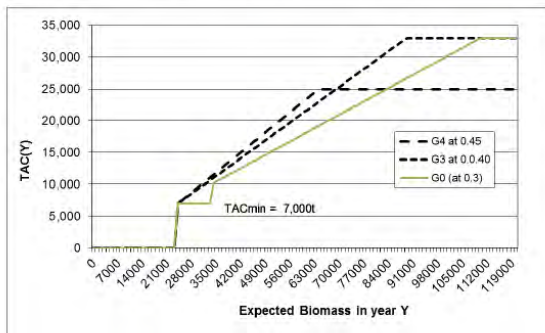
Fuentes de riesgo:

- i) Incertidumbres en la evaluaci3n de la Biomasa de adultos y reclutas y
- ii) Otras : Errores de Proceso y mis-especificaci3n de Modelo

DEMANDA DEL SECTOR: TAC ACOTADOS  
(restringidos por un m3ximo y m3nimo)

## 4- Segundo Plan de gesti3n: Resultados del MSE y decisiones

Results: Reglas de explotaci3n principales consideradas (de enero a diciembre)



- ✓ Elementos principales de la Regla de Explotaci3n:
  - Calendario: enero a diciembre
  - En t3rminos de Capturas (no de F)
  - TACmax 25000 (al comienzo) y 33 000t (final)
  - M3nimo econ3mico viable TAC de 7000 t
  - Harvest rate: 0.4 (Tasa explotaci3n fracci3n SSB)

- ✓ Gesti3n informada sobre el Reclutamiento entrante (TAC de enero a diciembre) logra:
  - Reducci3n del riesgo de caer debajo de Blim del 40%, con probabilidades de cierre similares
  - Esperanza de algo mayores capturas (~15%)
  - Y algo mayor estabilidad de las capturas

$$TAC_y = \begin{cases} 0 & \text{si } \widehat{SSB}_y \leq 24000 \\ -2600 + 0.40 \cdot \widehat{SSB}_y & \text{si } 24000 < \widehat{SSB}_y \leq 89000 \\ 33000 & \text{si } \widehat{SSB}_y > 89000 \end{cases}$$

## 5- Discusi3n y Conclusiones

1. Acople estrecho entre Monitoreo + Consejo + Gesti3n (modificando el calendario de evaluaci3n y gesti3n)
2. Beneficios de la informaci3n sobre el reclutamiento
3. Beneficios de realizar un proceso participativo con el sector pesquero (atender su demandas y preferencias)
4. Tipo de Reglas de explotaci3n para peque1os pel3gicos atendiendo a pol3ticas pesqueras MSY / mercados /Ecosist3mica (TAC acotados)
5. Estado actual de la pesquer3a y la poblaci3n (tras su gesti3n con el Plan de gesti3n)

© AZTI 2021. Todos los derechos reservados

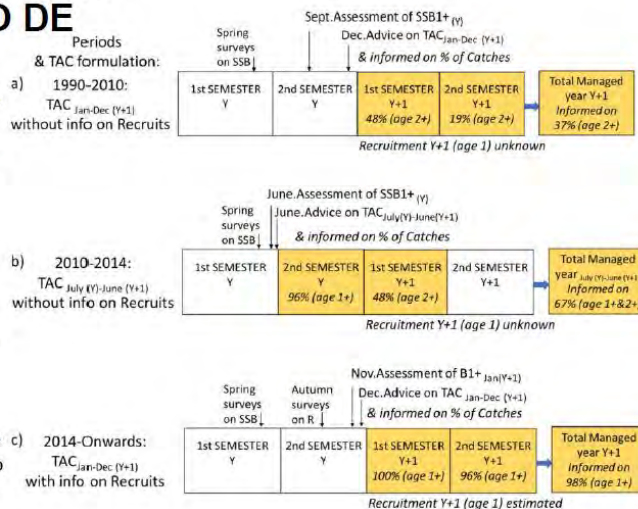
### IMPORTANCIA DEL CALENDARIO DE Gesti3N

en lograr un acoplamiento estrecho de la gesti3n al monitoreo + evaluaci3n, que maximice la informaci3n sobre el reclutamiento entrante, logra optimizar capturas para los niveles de riesgo aceptables (sostenibles)

La mejora lograda por las campa1as de reclutas fue algo modesta (+15%)

En parte debido a la incertidumbre de las estimas directas y de evaluaci3n

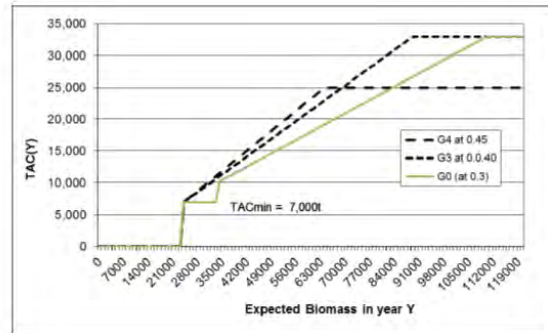
Y en parte porque la primera versi3n del Plan de gesti3n ya optimizo, con el calendario Julio Junio y la Regla de explotaci3n, las oportunidades de pesca basadas solo en las campa1as de adultos.





## EXPL0TACI3N DE PEQUE3OS PEL3GICOS

- Estrategias de explotaci3n acotadas (TACmax/min)
- Biomass based catch bounded (BBCB) rule incorporates part of the characteristics and benefits of the Conditional Constant Catch rule (Clark and Hare 2004) and of the biomass based catch adjustable rules (Deroba and Bence 2007), Market absorption capacity conditions the value of landings.
- Economic analysis supported the validity of TACmin and TACmax
- TAC max allows gaining stability
- Contrasts with the highly variable catches under Escapement strategies
- TACmin allows minimum profitable performance TAC max makes a larger fraction of the surplus production to be available, during years of high abundance, to top predators... facilitates inclusion of ecological considerations



## IMPORTANCIA DE PROCESOS PARTICIPATIVOS

### Valor del trabajo multidisciplinar y de la inclusi3n del punto de vista del sector pesquero

- El proceso lanzado por la Comisi3n Europea pretendi3 desde el comienzo ser abierto y participativo, formalmente consultativo (sensu Leite and Pita (2016)).
- La elaboraci3n del plan inicial (2008) y su revisi3n (2014) tomo cada vez dos a3os y dos reuniones cientificas (STECF), y facilit3 la participaci3n de del sector en la reuniones y la comunicaci3n de los cientificos con el Consejo Consultivo (CC.Sur)
- Sus inputs conformaron las HCRs hacia reglas de explotaci3n acotadas del recurso pare lograr viabilidad m3nima y beneficio m3ximo de la flota, mientras minimizaron la variabilidad de las capturas y los riesgos de cierres
- Estos beneficios de su participaci3n son consistentes con la literatura (Sampedro et al. 2017)



Los gestores apoyaron las preferencias del sector pesquero. Esto result3 en un 3xito del rol consultivo para la gesti3n de los Consejo Consultivos en la Uni3n Europea, logrado con acuerdos del sector pesquero de dos pa3ses, logrando as3 una relevante participaci3n funcional.



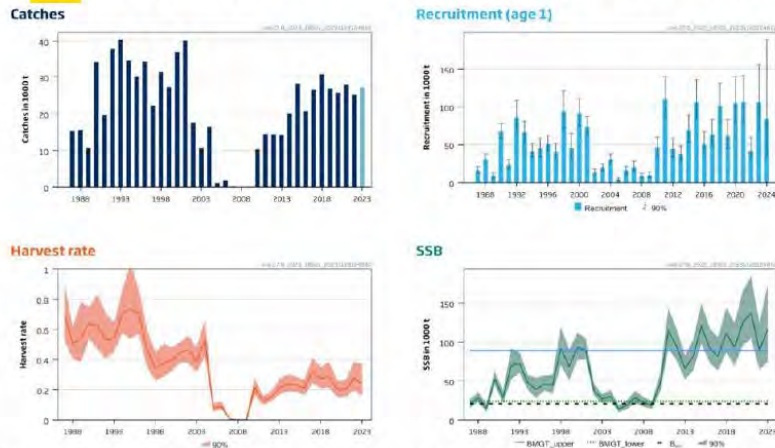


## CONCLUSIONES PARA EL MANEJO DE ESPECIES DE VIDA CORTA

- Para reducir incertidumbre: Monitoreo de adultos y juveniles (reclutas) y acoplamiento estrecho del monitoreo+Evaluaci3n con el consejo y la gesti3n
- Tanto la evaluaci3n Biol3gica como Econ3mica del funcionamiento de la Reglas de explotaci3n (por MSE) son de suma importancia.
- El Proceso debe ser consultativo y participativo con los Pescadores y la administraci3n  
Con beneficios para la definici3n de las Reglas de Explotaci3n que atiendan a sus necesidades  
La Variabilidad es inevitable : Pero mayor estabilidad con Reglas de capturas acotadas (TACmin/TACmax)  
Se facilita y mayor compromiso de los Pescadores con las Reglas de explotaci3n del Plan de Gesti3n.
- Las Reglas de capturas en funci3n de la biomasa, acotadas a m3ximos y m3nimos pueden conciliar mejor los intereses del sector pesquero (estabilidad de capturas) con consideraciones ecosist3micas por permitir beneficiarse m3s a otros predadores de los picos de producci3n de biomasa del recurso en las 3pocas de bonanza.



## ESTADO ACTUAL TRAS LA REAPERTURA



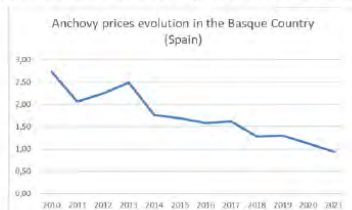
ICES (2023)

- Desde la recuperaci3n del stock y la aplicaci3n del Plan de Gesti3n, la anchoa viene siendo explotada sosteniblemente y permanece en un estado saludable (habiendo reducido a la mitad la mortalidad Pesquera)



## PERO PROBLEMÁTICO

- La recuperaci3n ha sido mayor que la esperada: Factores medioambientales favorables? (Bueno-Pardo et al., 2020; Chust et al., 2022; Taboada and Anad3n, 2016; Erauskin-Extramiana et al., 2019) y con cambios en la distribuci3n especial de las capturas (M. Andr3s... en preparaci3n)
- Los precios son ahora menores que lo esperado...
  - Tamaños de anchoa menores (bien por causas ambientales o por densodependencia) (Taboada et al. 2024)
  - Con p3rdida de mercado durante el cierre (incremento de importaciones de terceros pa3ses)



- Reducci3n de la flota pelágica Francesa por p3rdida de mercado atractivo para su venta (hoy en d3a no est3n pescando su propia cuota) (ICES 2022).

→ **EVITAR CIERRES!!!**



## Un trabajo en colaboraci3n entre cient3ficos, los profesionales del sector pesquero y los gestores de la administraci3n

Marine Policy 150 (2022) 105512



Contents lists available at ScienceDirect

Marine Policy

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/marpol](http://www.elsevier.com/locate/marpol)



Lessons learnt on the management of short-lived fish from the Bay of Biscay anchovy case study: Satisfying fishery needs and sustainability under recruitment uncertainty

Andr3s Uriarte<sup>a,\*</sup>, Leire Ibaibarriaga<sup>a</sup>, Sonia S3nchez-Moreno<sup>a</sup>, Pablo Abaunza<sup>a</sup>, Marga Andr3s<sup>a</sup>, Erwan Duhamel<sup>b</sup>, Ernesto Jardim<sup>c</sup>, Lionel Pawlowski<sup>d</sup>, Raul Puellezo<sup>e</sup>, Beatriz A. Roel<sup>f</sup>

<sup>a</sup> AZTI Marine Research, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Maritima Ekin, Pk.100, 48940 Leizor, Spain

<sup>b</sup> Centre Océanographique de Saint-Pierre, Institut National de l'Environnement du Littoral, 97500 Saint-Pierre, France

<sup>c</sup> IFREMER - Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Nantes, France

<sup>d</sup> Marine Conservation Council, One Hill St, Marine House, London EC1A 3DF, UK

<sup>e</sup> CERNIC Conservation, Pk.100, Leizor, Spain, 48940 Leizor, Spain



Advance View <a href="https://doi.org/10.3354/marpol12602">https://doi.org/10.3354/marpol12602</a>	MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES Mar Ecol Prog Ser	Available online: July 17, 2018
-------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------	------------------------------------

Contribution to the Theme Section 'Drivers of dynamics of small pelagic fish resources: Ecology, management and human factors'

### Challenges of management strategy evaluation for small pelagic fish: the Bay of Biscay anchovy case study

Sonia S3nchez-Moreno<sup>a</sup>, Leire Ibaibarriaga<sup>a</sup>, Andr3s Uriarte<sup>a</sup>, Raul Puellezo<sup>a</sup>, Marga Andr3s<sup>a</sup>, Pablo Abaunza<sup>a</sup>, Ernesto Jardim<sup>b</sup>, Sigrid Lehuta<sup>c</sup>, Lionel Pawlowski<sup>d</sup>, Beatriz Roel<sup>e</sup>

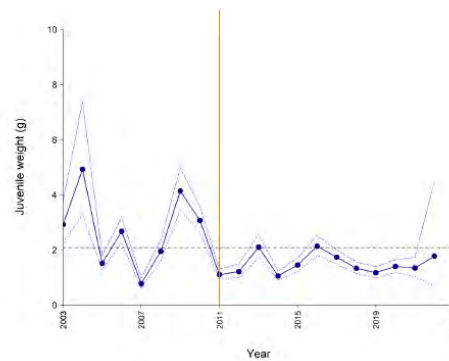
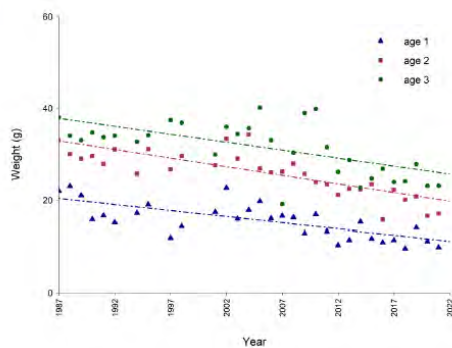


## Understanding the mechanisms behind the decline of anchovy size in the Bay of Biscay

N. Aldanondo, A. Font3n, F. Gonzalez-Taboada, M. Santos, G. Boyra, L. Ibaibarriaga, Unai Cotano

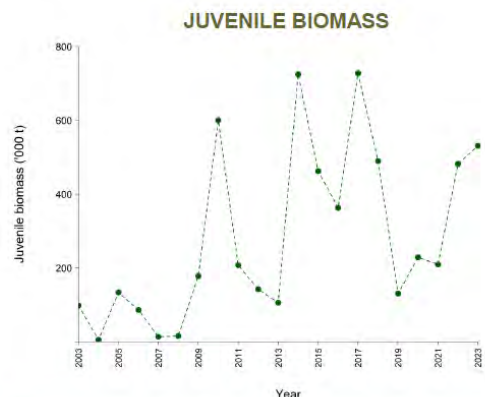
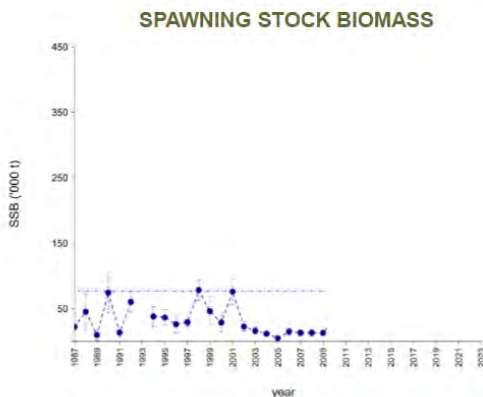
© 2023 IFOP. All rights reserved.

- El tama1o medio de la anchoa (talla y peso) ha disminuido durante los 3ltimos a1os en el Golfo de Bizkaia





- o La disminuci3n del tama1o se asocia a **condiciones desfavorables** para el estado de las poblaciones
- o Podr3a afectar a la **biomasa**, la **fenolog3a**, el **crecimiento**, la **din3mica de las poblaciones** y a la **estructura general del ecosistema**
- o La disminuci3n se puede deber a m3ltiples factores: **condiciones medioambientales** (e.g., cambio clim3tico), **cambios en la disponibilidad de alimentos**, **fluctuaciones en la abundancia**, **perturbaciones antropog3nicas** (e.g., pesca selectiva por tama1o)
- ✓ Obj 1: Conocer si este descenso del tama1o est3 reflejando una situaci3n de estr3s para la poblaci3n
- ✓ Obj 2: Estudiar los factores que pueden estar afectando a la disminuci3n del tama1o de la anchoa



- ✓ El descenso del tama1o observado en los 3ltimos a1os no est3 asociado a un descenso de la biomasa





### Hip3tesis de la presi3n pesquera

$H_0$ : La pesca disminuye la talla media por edad y efectúa una mayor extracci3n de los individuos m3s grandes

- Se mir3 mediante un modelo lineal la relaci3n entre la talla por edad y el factor pesca-cierre 1987 – 2019
- ✓ El cierre de la pesquería **no fue significativo** para ninguna clase de edad (Chust et al., 2022)
- ✓ Tampoco se observ3 que el peso medio por edad aumentase durante el cierre de la pesquería (2005 – 2010)
- ✓ El efecto es apreciable ya desde la edad 0, que no es objetivo de la flota

### HIP3TESIS RECHAZADA

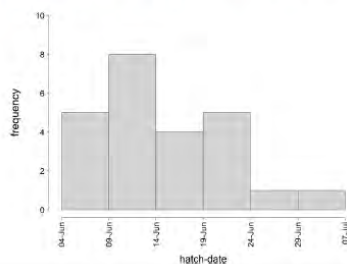


### Hip3tesis de las puestas tardías

Al comienzo de la 3poca de puesta, las anchoas m3s pequeñas de una misma cohorte siguen dedicando recursos al crecimiento som3tico, mientras que las m3s grandes ya est3n empezando a prepararse para la puesta (Txurruka, 2021)

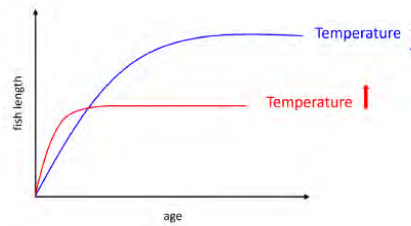
$H_0$ : Los individuos de menor tamaño procederían de puestas tardías (finales de julio – agosto)

- Individuos < 7 cm procedentes de un lance ( $6,4 \pm 2,6$  cm) que aportaba el 30% energía acústica ( $n = 24$ ) del 2018
- Edad individuos analizados: 63 – 91 días (SL = 3,3 – 6,6 cm) / Fechas nacimiento: 5 junio – 2 julio (96% junio)



### HIP3TESIS RECHAZADA

- En el Golfo de Bizkaia la SST ha aumentado en las tres 3ltimas d3cadas a una tasa de 0,3 °C/d3cada

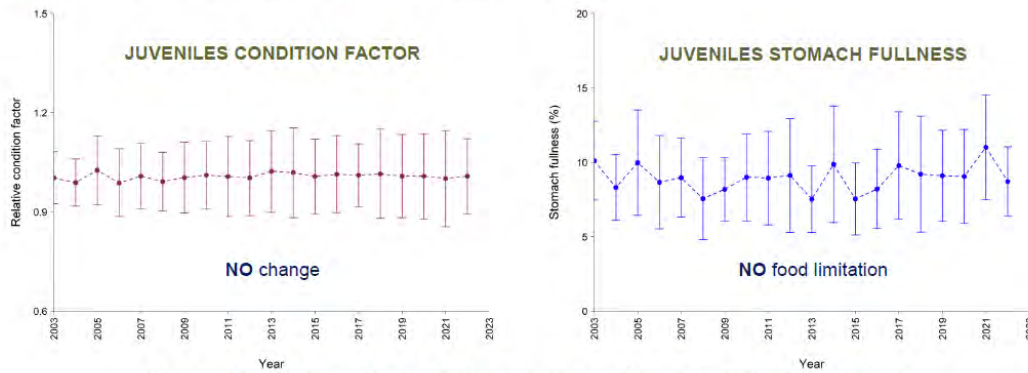


$H_0$ : La disminuci3n del tama1o podr3a ser una respuesta directa al calentamiento de los oc3anos y a la exposici3n progresiva de la anchoa a temperaturas m3s elevadas (debido a un crecimiento m3s lento)

- En el caso de los juveniles, se encontr3 una relaci3n d3bil entre la temperatura y el tama1o
- En el caso de los reclutas de primer a1o, la temperatura de la primavera anterior explica cerca del 20% de la variaci3n observada en el tama1o medio entre a1os
- La magnitud del efecto sugiri3 una disminuci3n del tama1o de la anchoa del 10% por grado de aumento de la temperatura del agua para los individuos de la edad 1. Esta disminuci3n se hizo mayor a medida que aumentaba la edad de la anchoa, llegando a ser de hasta el 14% en los individuos de edad 3+.
- ✓ El aumento de la temperatura puede tener un efecto significativo en la disminuci3n del tama1o de la anchoa

*Hip3tesis de las condiciones de alimentaci3n (competencia)*

$H_0$ : Cambios en la densidad de la poblaci3n de anchoa podrian llevar a un entorno alimentario empobrecido provocando una reducci3n tanto en las tasas de crecimiento somático como en su condici3n.



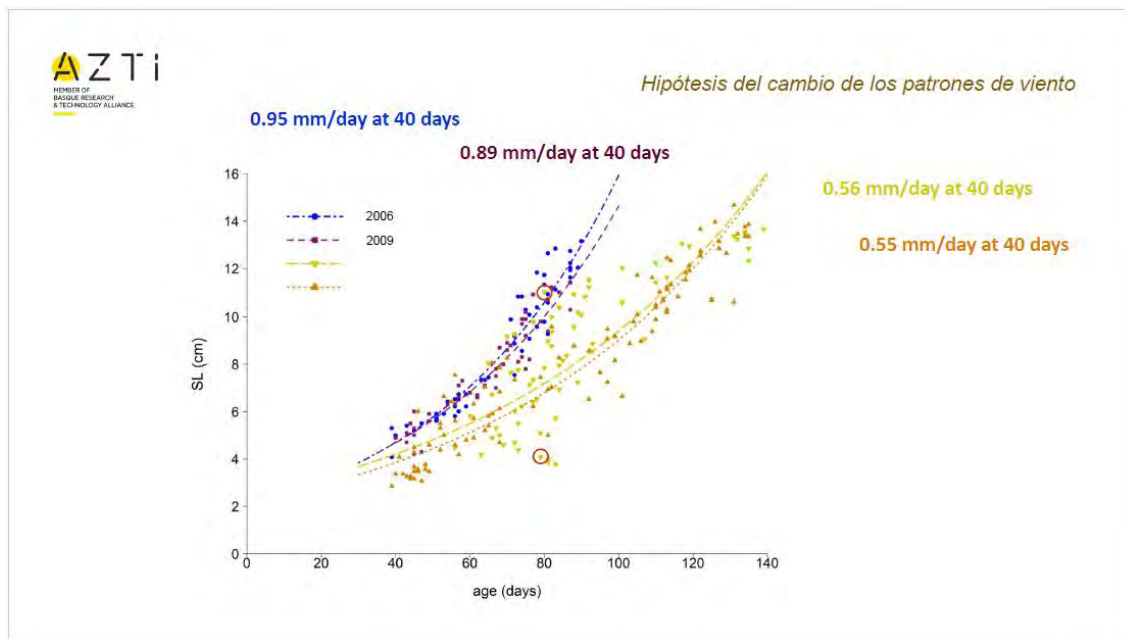
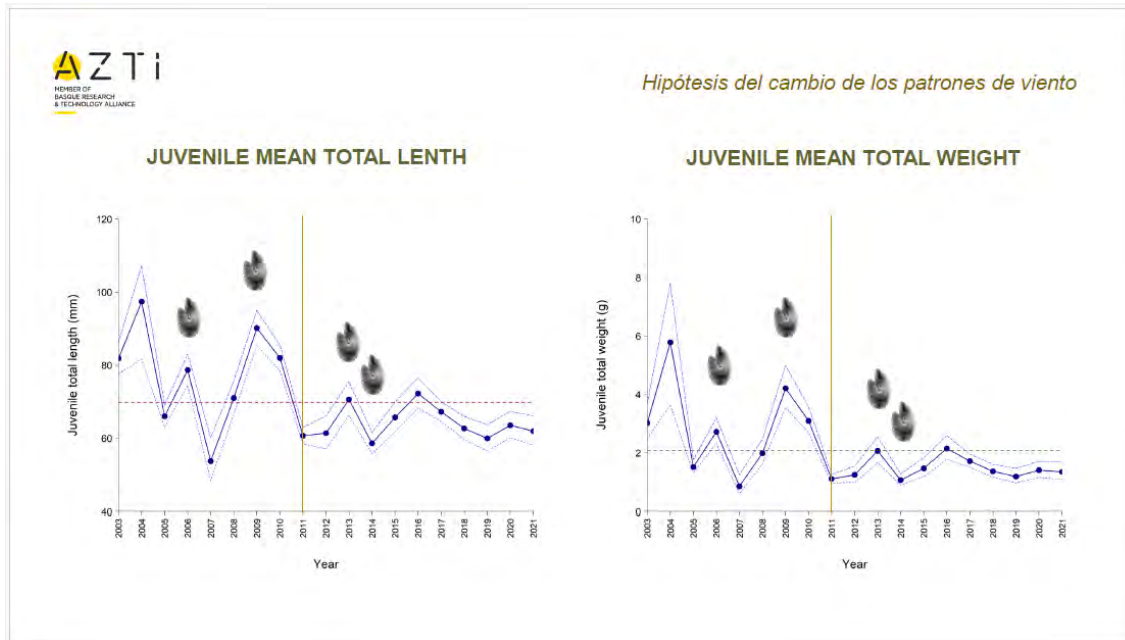
✓ La poblaci3n de anchoa no est en peores condiciones que en años anteriores

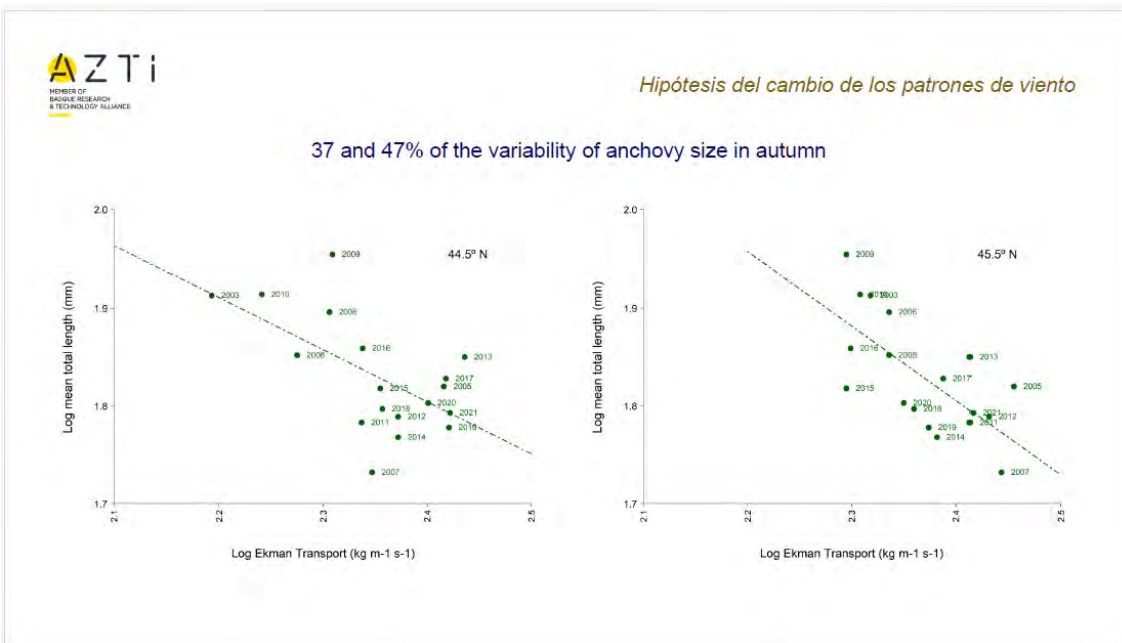
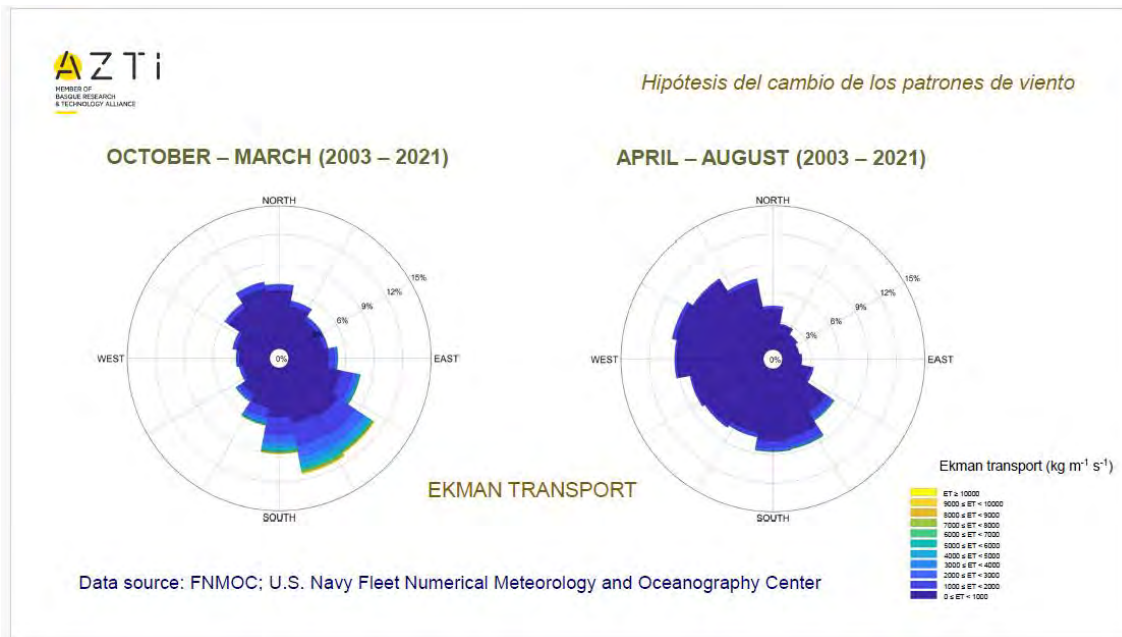
*Hip3tesis del cambio de los patrones de viento*


anchovy spawning and recruitment timing in the Bay of Biscay



$H_0$ : The transport of anchovy eggs and larvae off the shelf, with low predatory pressure, could favour the survival of individuals with different growth rates

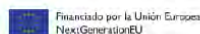




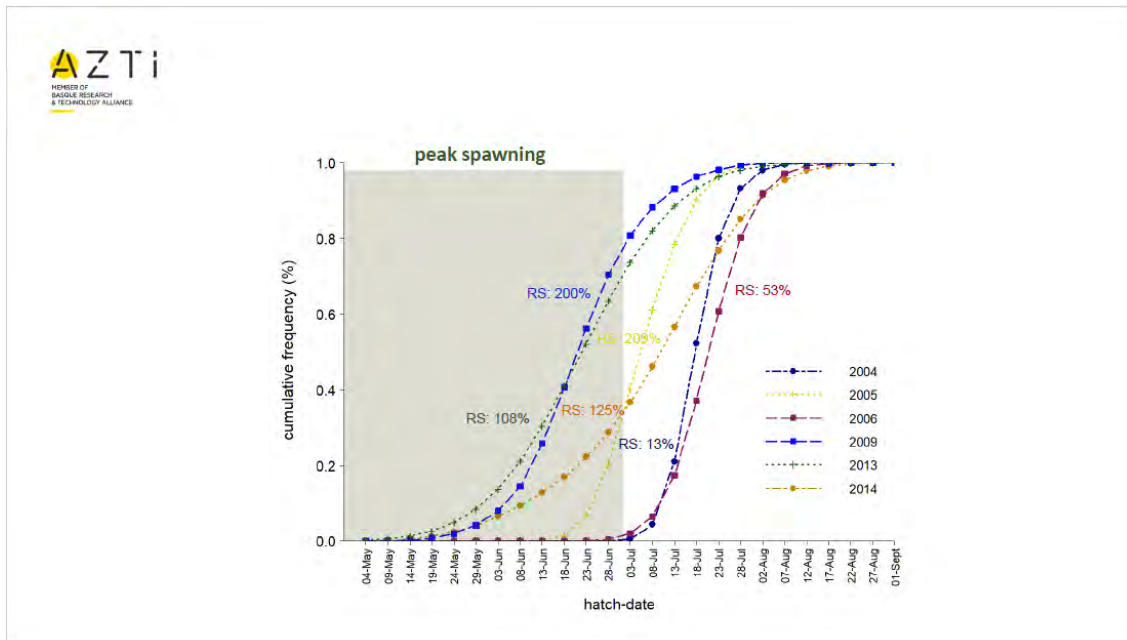


### Conclusiones

- ✓ El descenso observado en el tama1o de la anchoa en el Golfo de Bizkaia **no parece estar reflejando una situaci3n de estr3s para la poblaci3n**
- ✓ El aumento de la temperatura del agua puede tener un efecto significativo en la disminuci3n del tama1o de la anchoa
- ✓ El aumento de la intensidad del transporte de Ekman hacia el oeste (con menor presi3n de depredaci3n) provoca una disminuci3n del tama1o medio de los juveniles de anchoa









# Anexo 4

## Documentaci3n del Taller de difusi3n del Proyecto FIPA 2023-20





El presente anexo corresponde a la documentaci3n del taller de difusi3n del Proyecto FIPA 2023-20, titulado “*Determinaci3n de los factores causantes de los cambios estructurales de la poblaci3n de anchoveta de la zona norte en el per3odo reciente y sus implicancias*”. El taller se realiz3 el 19 de mayo entre las 9:30 y 14:00 hrs, en el cual participaron investigadores de la academia, Subsecretaria y la industria pesquera (Figura 1 y 2). Se realizaron un conjunto de presentaciones seg3n la agenda presentada a continuaci3n:

## TALLER DE DIFUSI3N DE RESULTADOS

---

Proyecto FIPA 2023-20 “**Determinaci3n de los factores causantes de los cambios estructurales de la poblaci3n de anchoveta de la zona norte en el per3odo reciente y sus implicancias**”.

### AGENDA

**Valpara3so, Lunes 19 de mayo del 2025, Online**

---

9:30 a 9:35	Palabras de bienvenida y presentaci3n del proyecto. Carola Hern3ndez
9:35 a 10:05	Condici3n ambiental y oceanogr3fica del 3rea de estudio. Fabian Tapia.
10:05 a 10:35	Variaciones en el zooplancton en el 3rea de estudio. Jessica Bonicelli.
10:35 a 11:05	Cambios en el crecimiento en la anchoveta de la zona norte. Francisco Cerna y Guido Plaza
11:05 a 11:20	Break
11:20 a 12:00	Resultados de la modelaci3n de la longitud de anchoveta y las condiciones de ambientales. Juan Carlos Saavedra.
12:00 a 12:25	Recomendaciones de manejo y conclusiones generales. Carola Hern3ndez.
12:25 a 13:00	Discusi3n

---

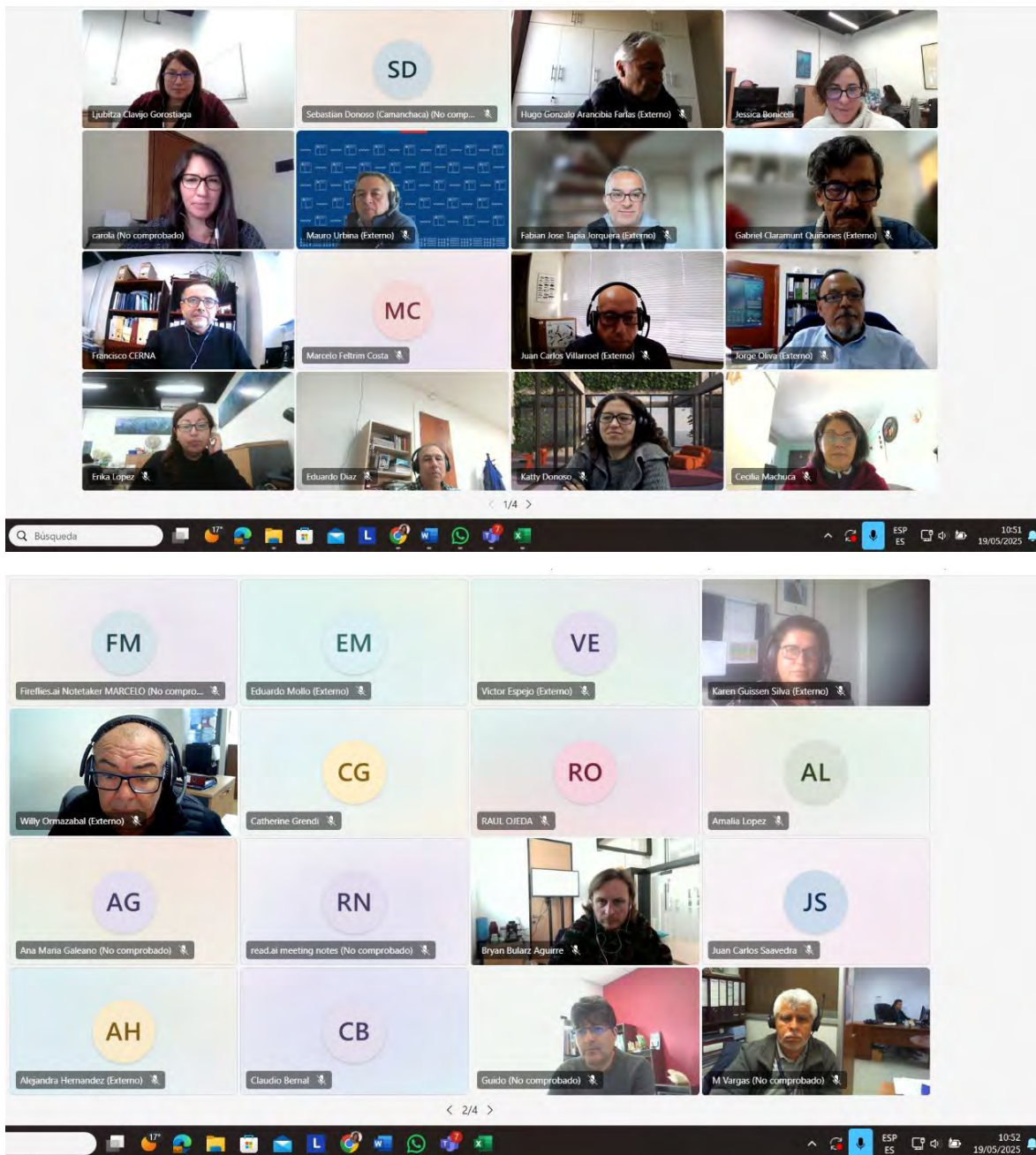


Figura 1: Lista de participantes al taller de difusi3n del proyecto FIPA 2023-20.

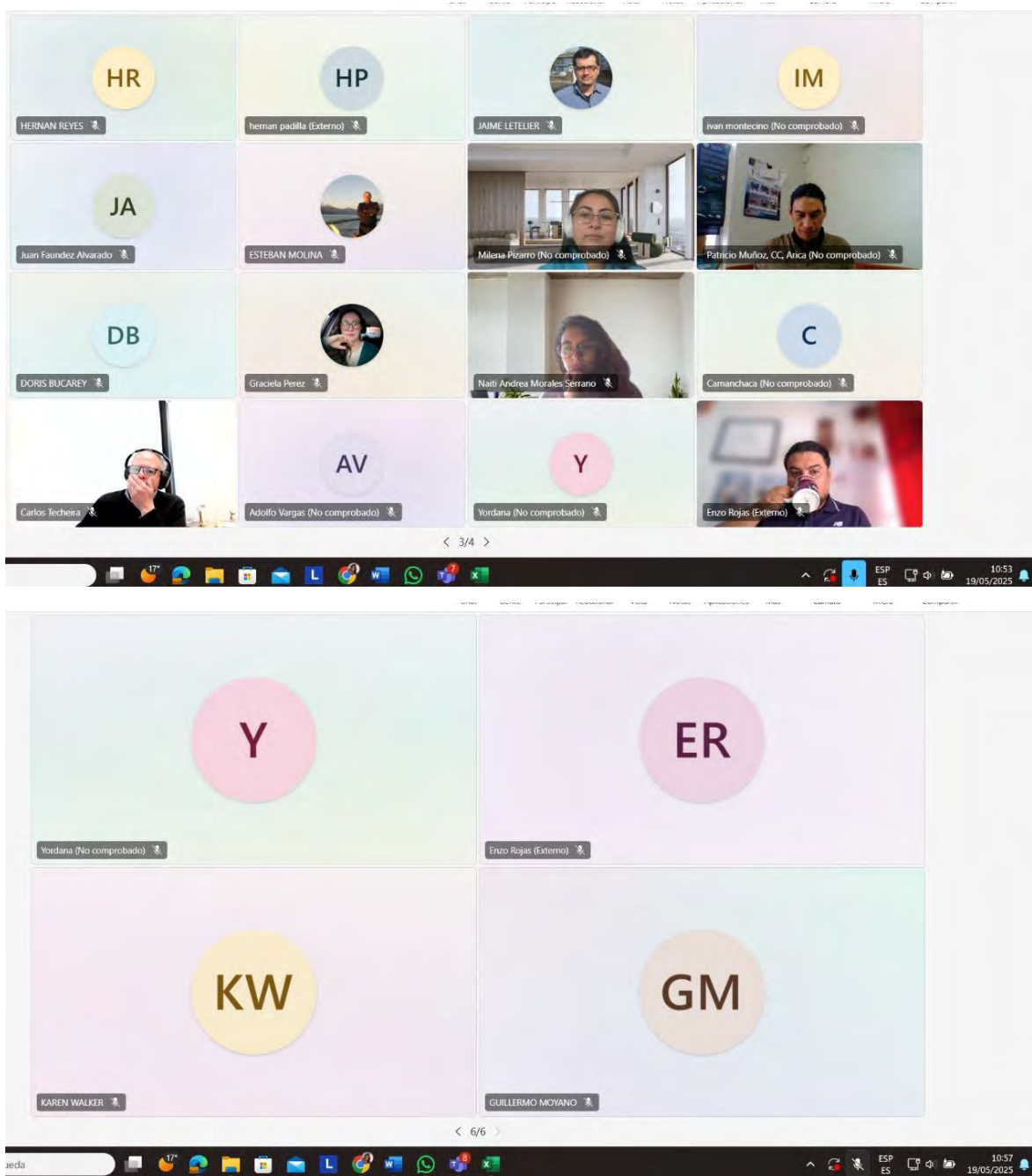


Figura 2: continuaci3n lista de participantes al taller de difusi3n del proyecto FIPA 2023-20.

## Recomendaciones

En el marco del taller de difusión de resultados del proyecto Fipa 2023-20, se realizaron algunas recomendaciones y sugerencias las cuales se detallan a continuación:

Se recomienda tomar con cautela la sugerencia de modificar el tamaño de la red, ya que resulta complejo establecer esta medida de manera directa. Además, se destaca que la condición topográfica y oceanográfica de las costas de Chile y Perú es distinta. Por ello, si bien en Perú se ha justificado la restricción de pesca dentro de las 5 millas, en Chile no existiría actualmente un fundamento técnico sólido para aplicar una medida similar.

Se sugiere considerar el uso del método de producción de huevos, dado que podría permitir visualizar tendencias temporales relevantes en la dinámica reproductiva. Asimismo, se recomienda explorar la dinámica espacial de la población, observando la distribución diferenciada entre hembras pequeñas, localizadas más cercanas a la costa, y hembras grandes, con una distribución más oceánica.

Se indica que se han unificado diferentes proyectos de investigación, integrando diversas variables con el fin de comprender los factores que inciden en el crecimiento de la anchoveta. En ese contexto, se propone profundizar en el estudio de las variables identificadas como relevantes, vinculándolas con objetivos específicos, como, por ejemplo, el análisis del crecimiento del zooplancton y su relación con la especie.

Desde la perspectiva de la Subsecretaría de Pesca, no se comparten las recomendaciones formuladas en el taller de expertos, ya que estas se enfocan exclusivamente desde el ámbito científico-técnico, sin considerar adecuadamente los lineamientos de manejo.

# Condición ambiental y oceanográfica del área de estudio

Fabián J. Tapia

Departamento de Oceanografía & COPAS-Coastal, Universidad de Concepción, Chile



Universidad  
de Concepción



COPAS  
COASTAL

Centro de  
Investigación  
Oceanográfica en el  
Pacífico Sur-Oriental





Contents lists available at ScienceDirect

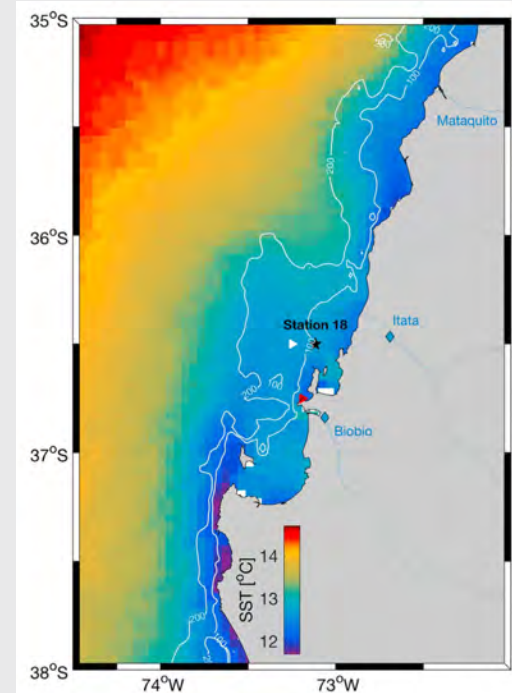
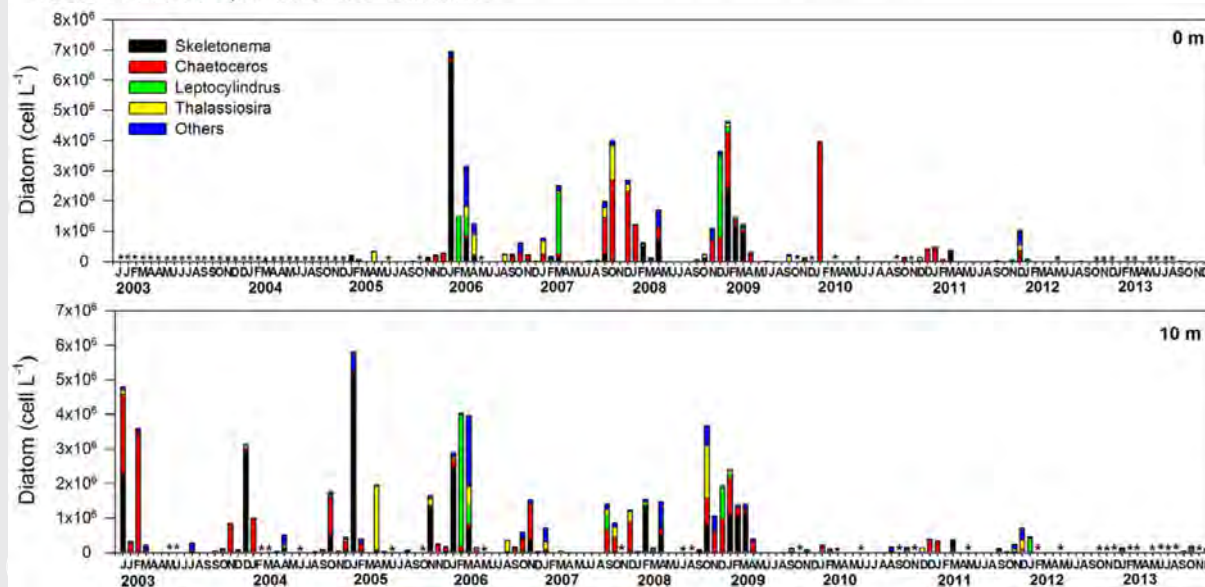
Progress in Oceanography

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/pocean](http://www.elsevier.com/locate/pocean)

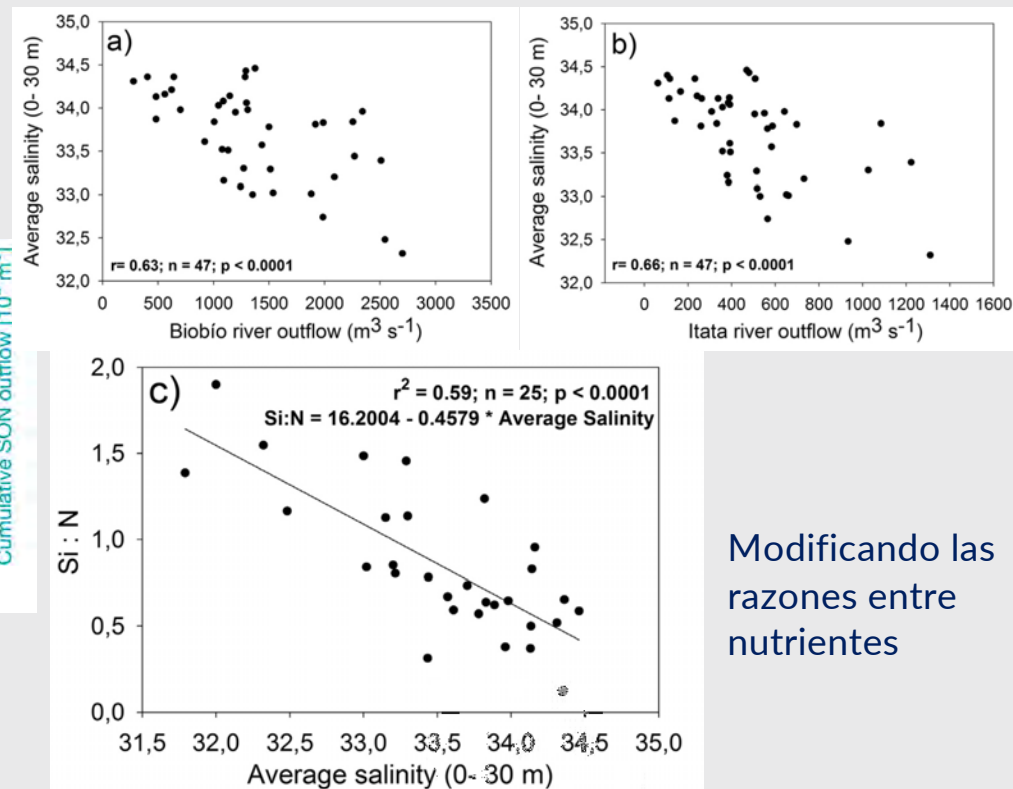
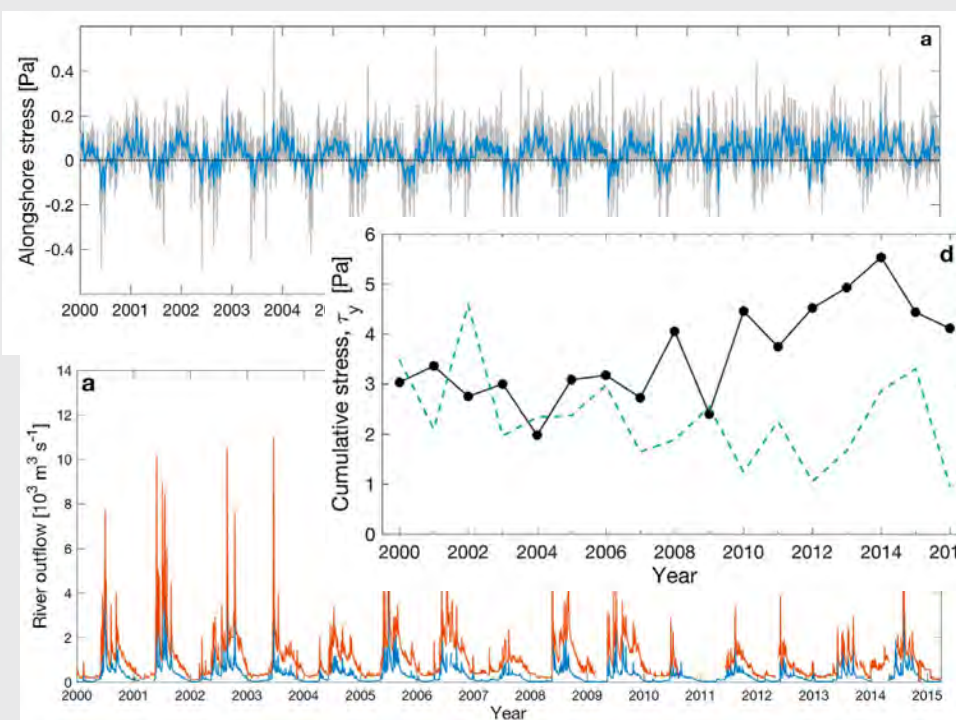


## Major changes in diatom abundance, productivity, and net community metabolism in a windier and dryer coastal climate in the southern Humboldt Current

Bárbara G. Jacob<sup>d,\*</sup>, Fabián J. Tapia<sup>a,b,c</sup>, Renato A. Quiñones<sup>a,b</sup>, Rodrigo Montes<sup>a</sup>, Marcus Sobarzo<sup>a,b</sup>, Wolfgang Schneider<sup>b,e</sup>, Giovanni Daneri<sup>c,d</sup>, Carmen E. Morales<sup>b,e</sup>, Paulina Montero<sup>c,d</sup>, Humberto E. González<sup>f,g</sup>



# Viento de surgencia más intenso en primavera interactúa con menores aportes de agua dulce

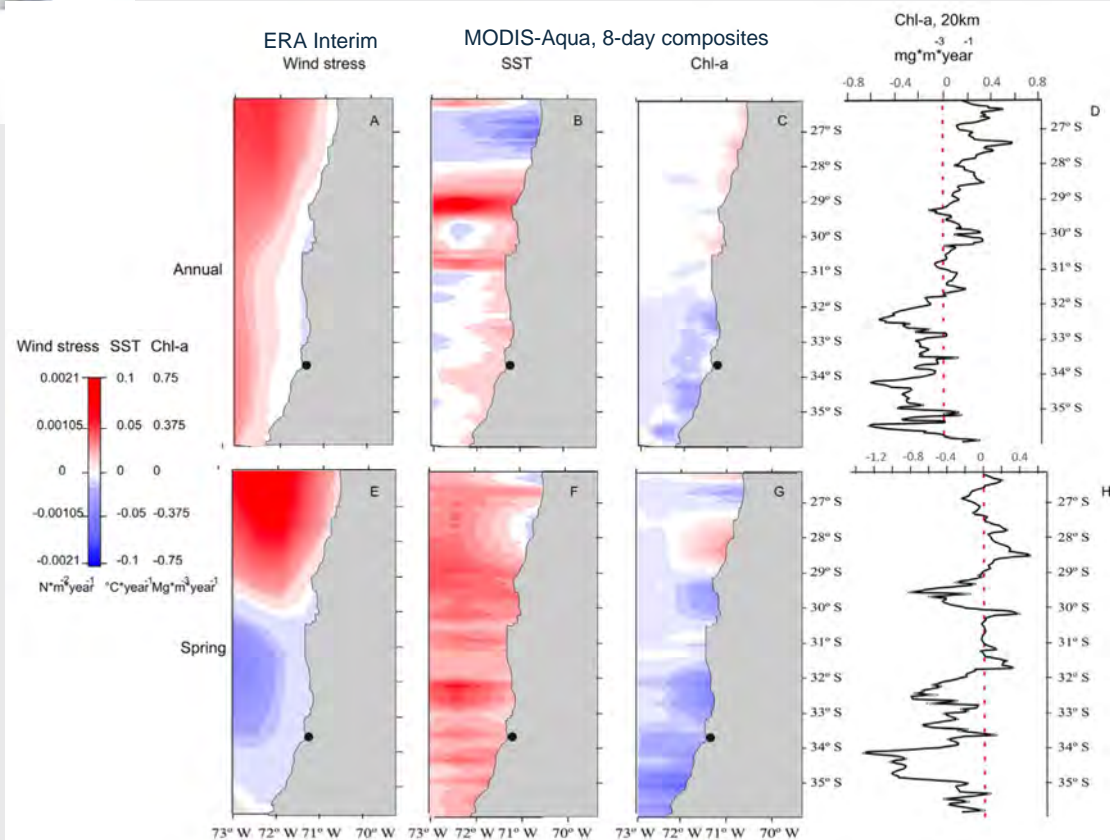
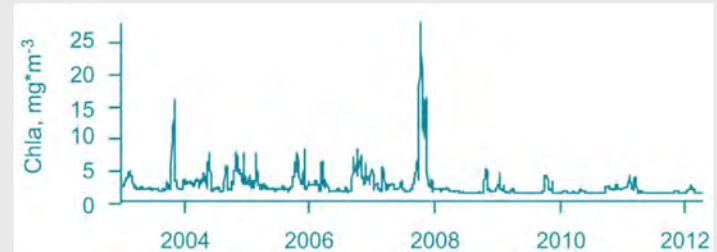
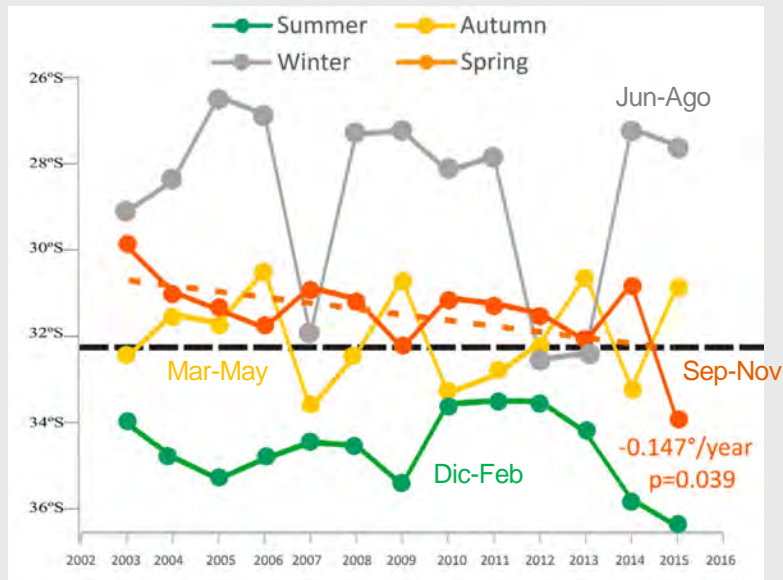


Modificando las razones entre nutrientes



# Spatial shifts in productivity of the coastal ocean over the past two decades induced by migration of the Pacific Anticyclone and Bakun's effect in the Humboldt Upwelling Ecosystem

Nicolas Weidberg<sup>a,b,\*</sup>, Andres Ospina-Alvarez<sup>c</sup>, Jessica Bonicelli<sup>d</sup>, Mario Barahona<sup>e</sup>, Christopher M. Aiken<sup>a</sup>, Bernardo R. Broitman<sup>e</sup>, Sergio A. Navarrete<sup>a</sup>



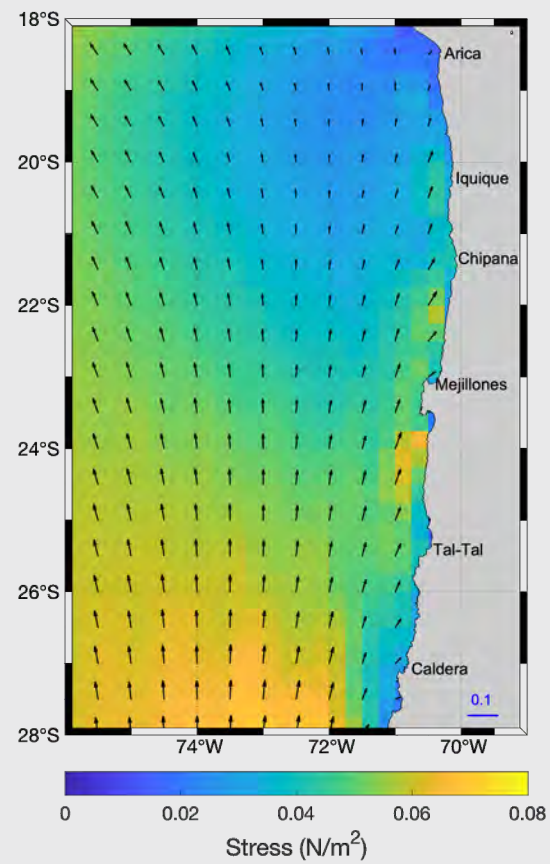
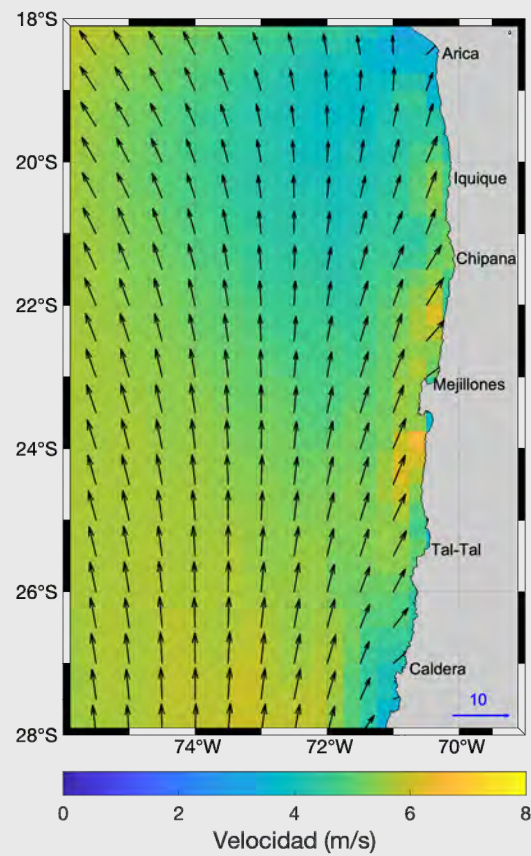


---

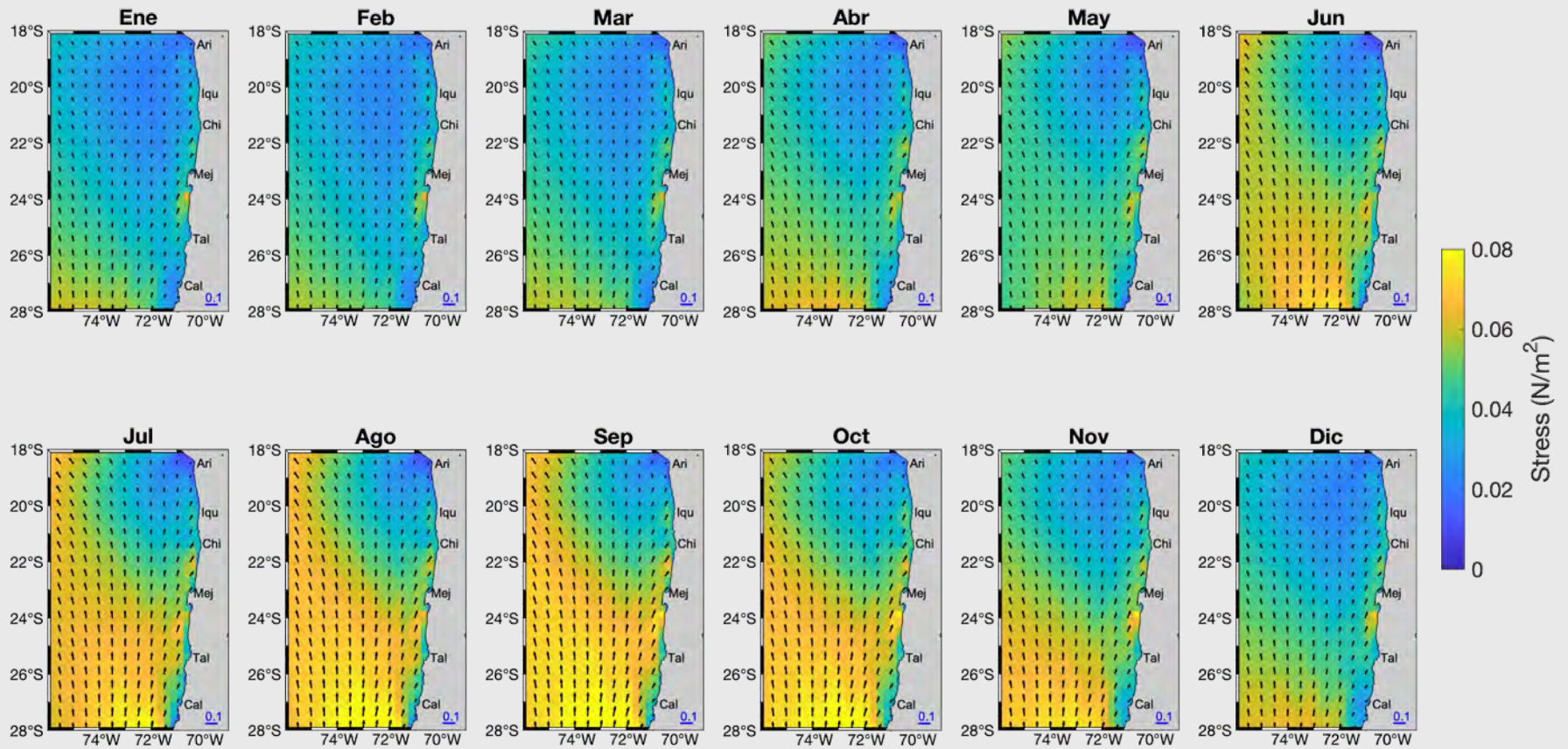
# Análisis de la variabilidad del viento

---

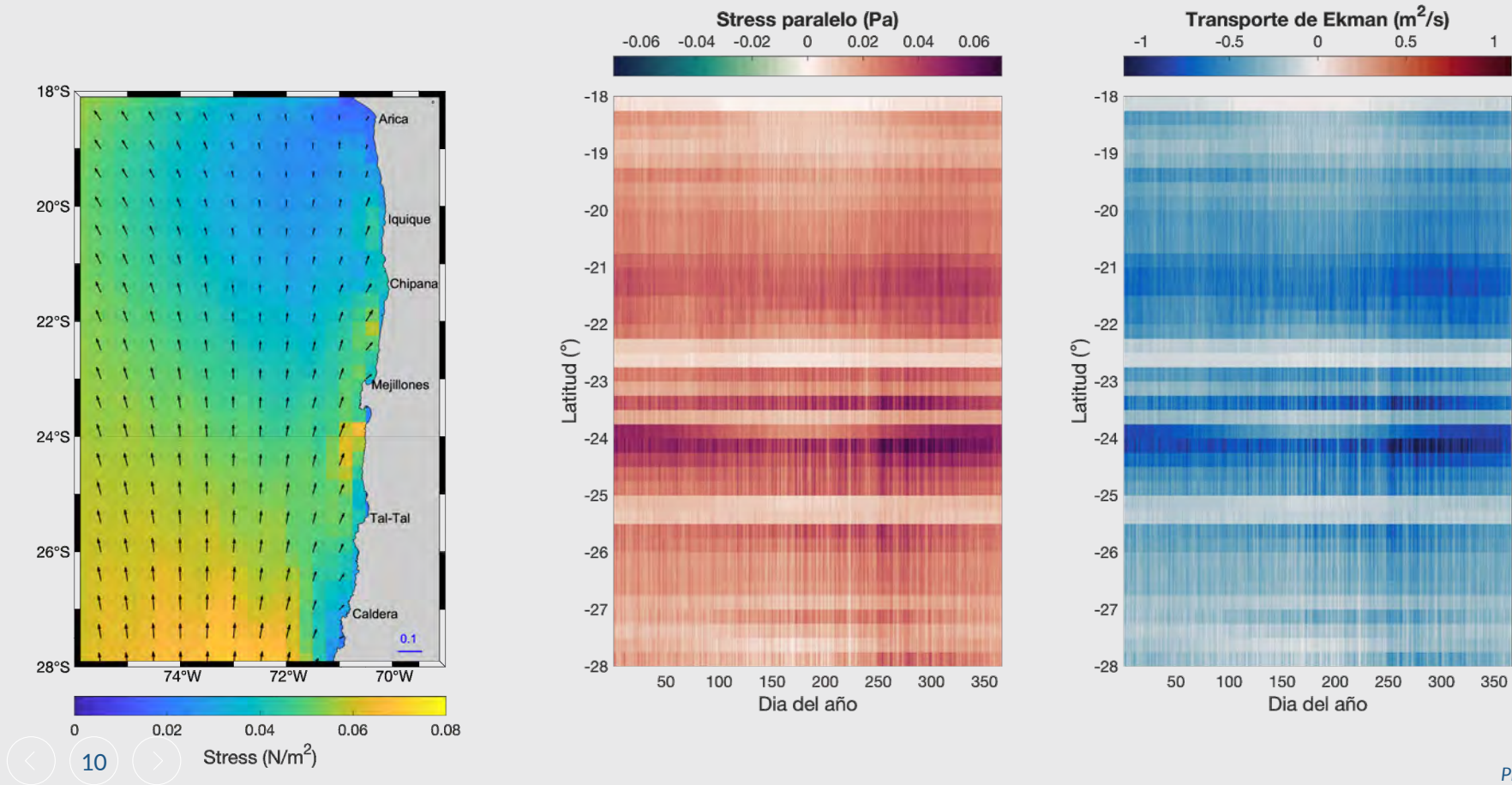
## Patrón promedio de viento en la región



# Climatología del stress del viento

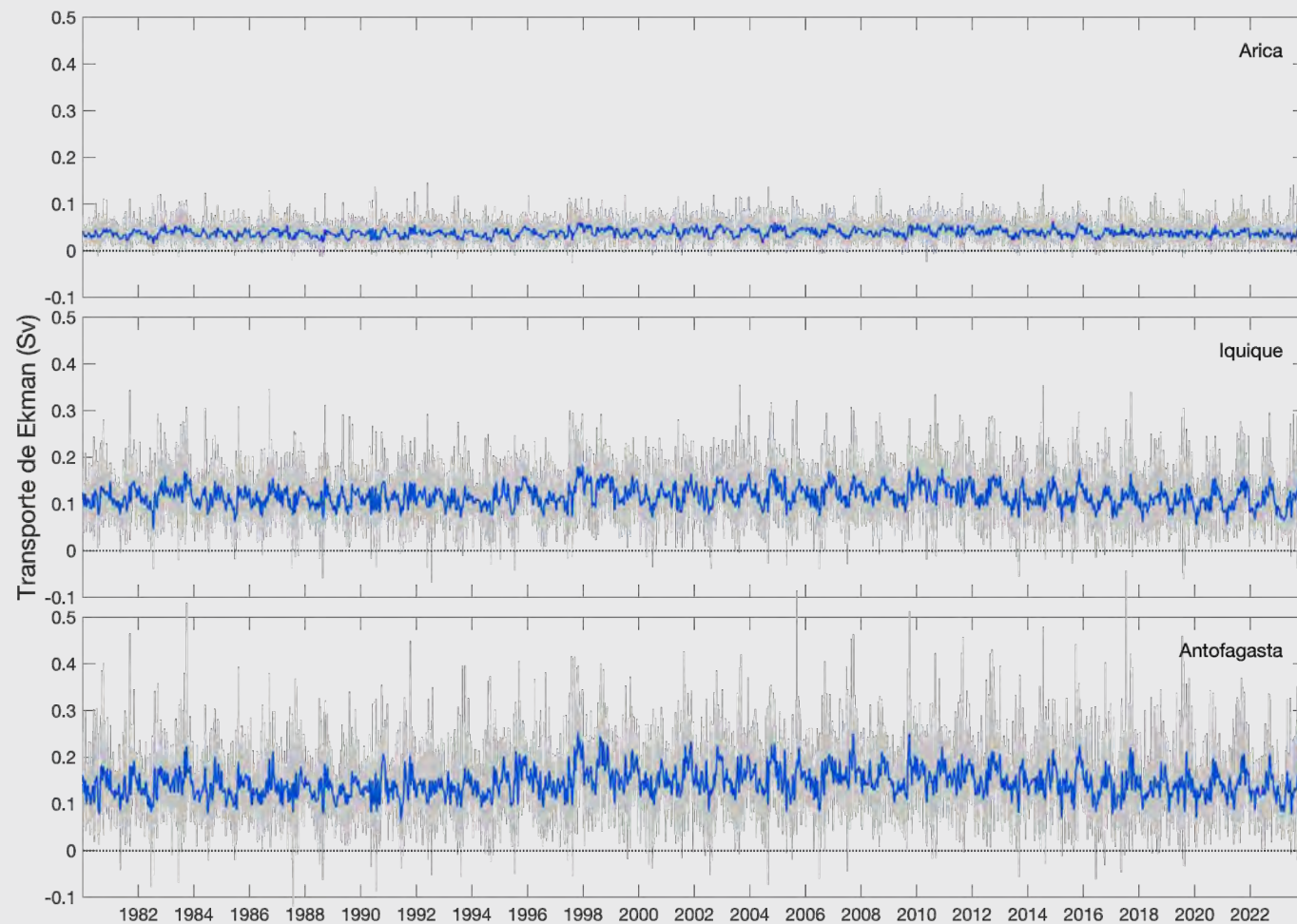


# Viento costero: stress paralelo a la costa y transporte de Ekman

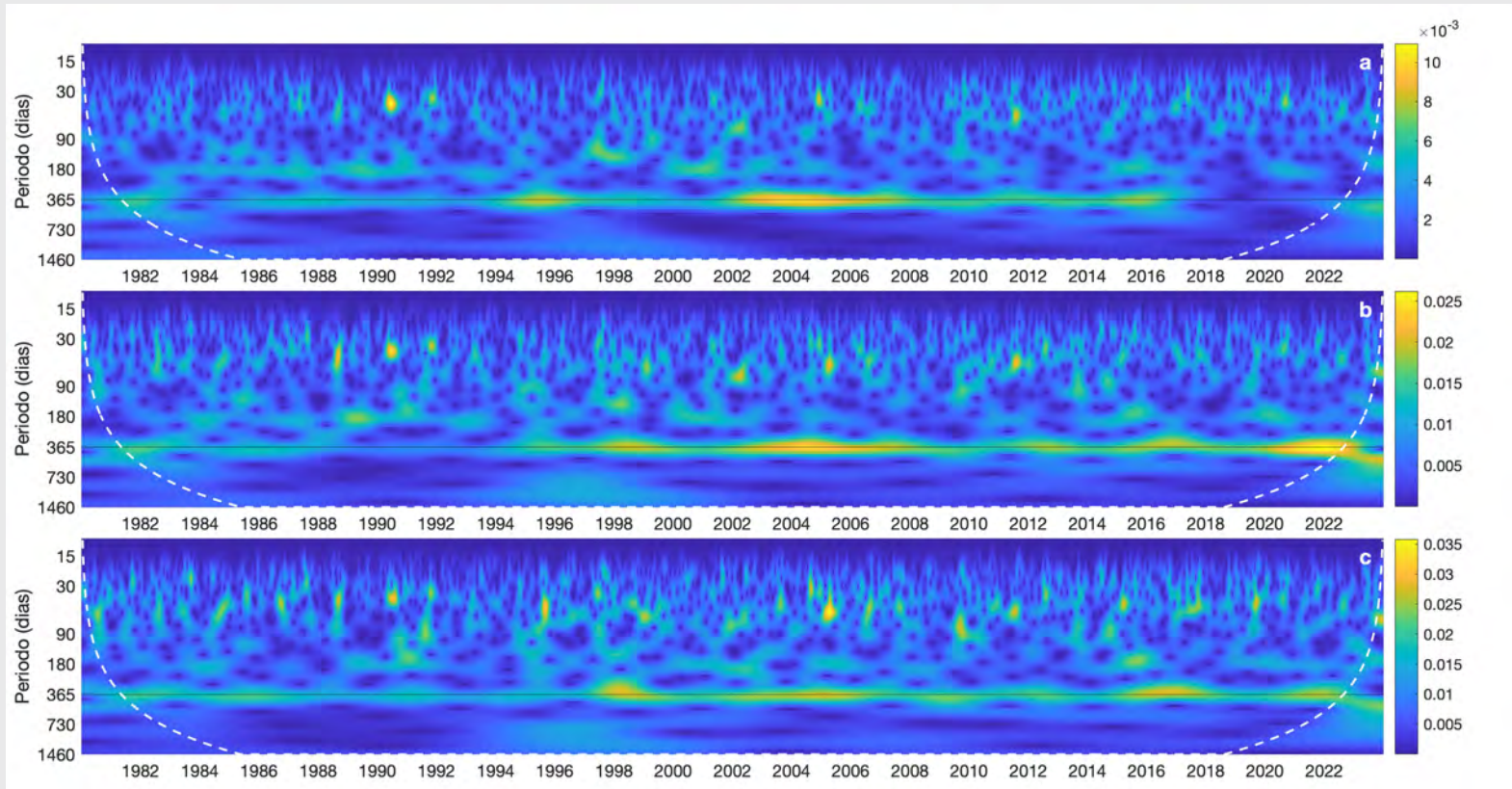




## Series diarias de Transporte de Ekman en 3 zonas



# Wavelets para Transporte de Ekman

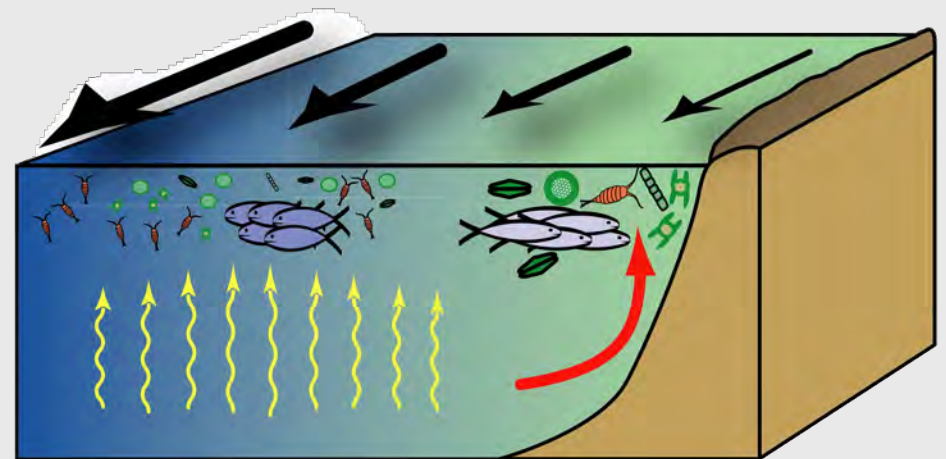
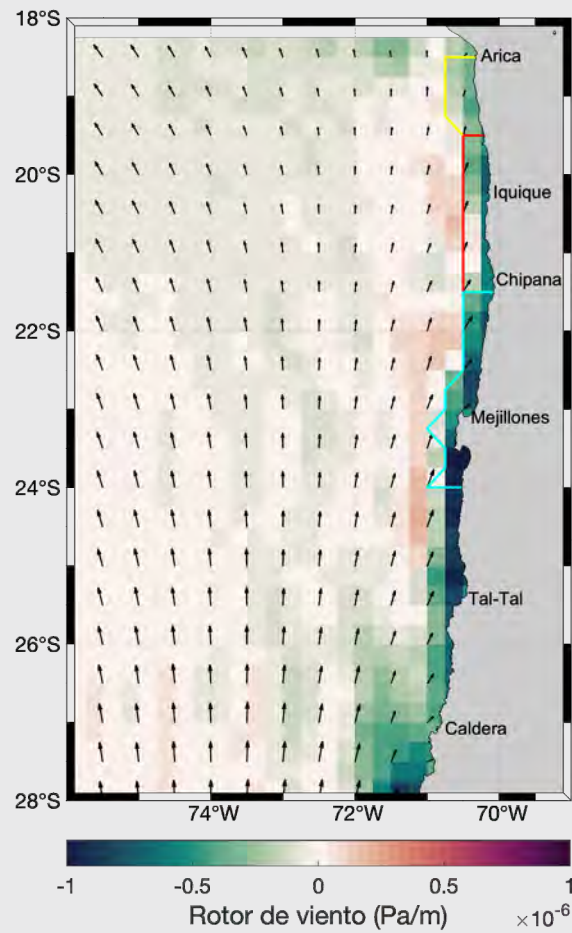


Arica

Iquique

Antofagasta

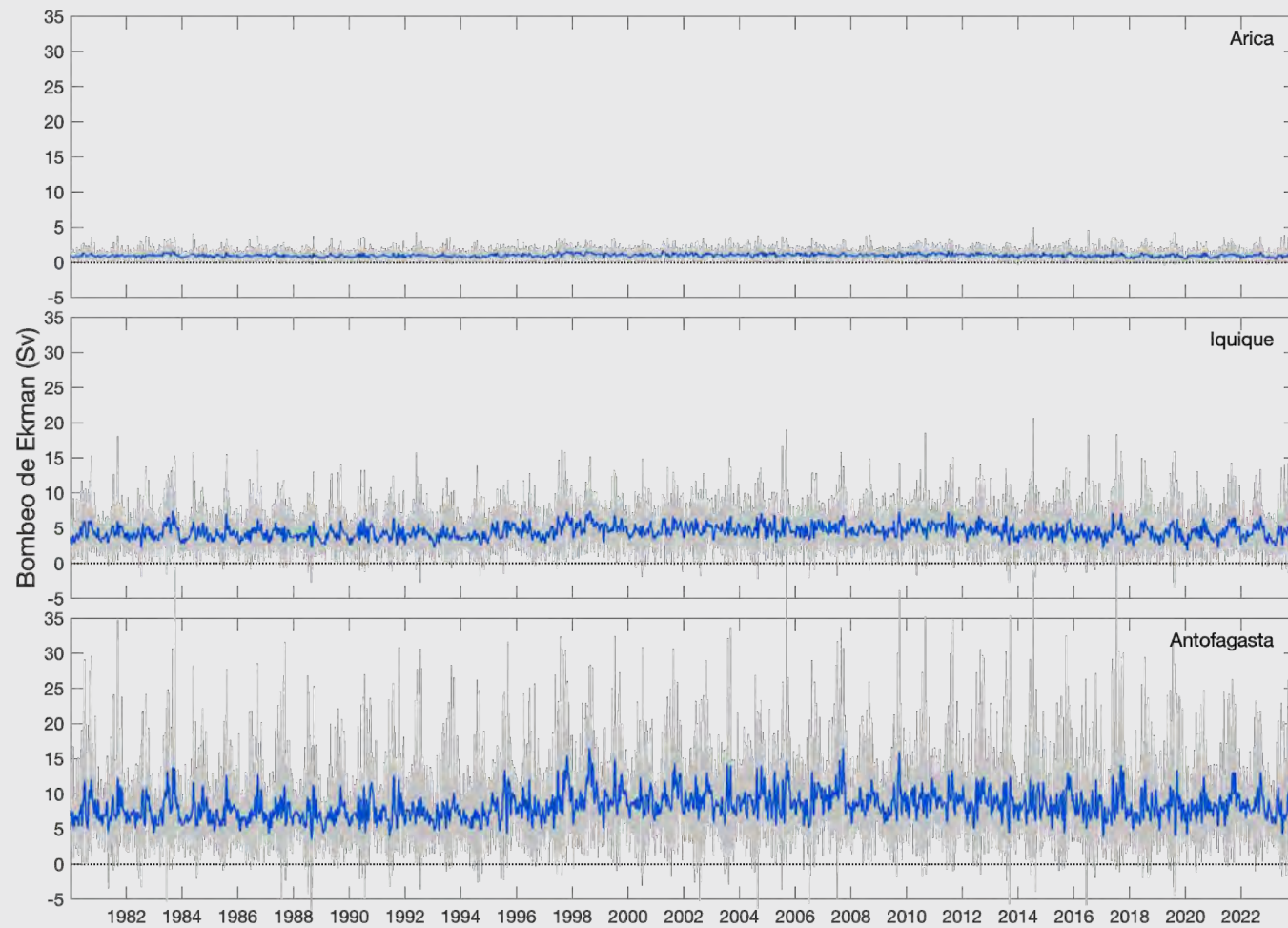
## Rotor de viento y bombeo de Ekman



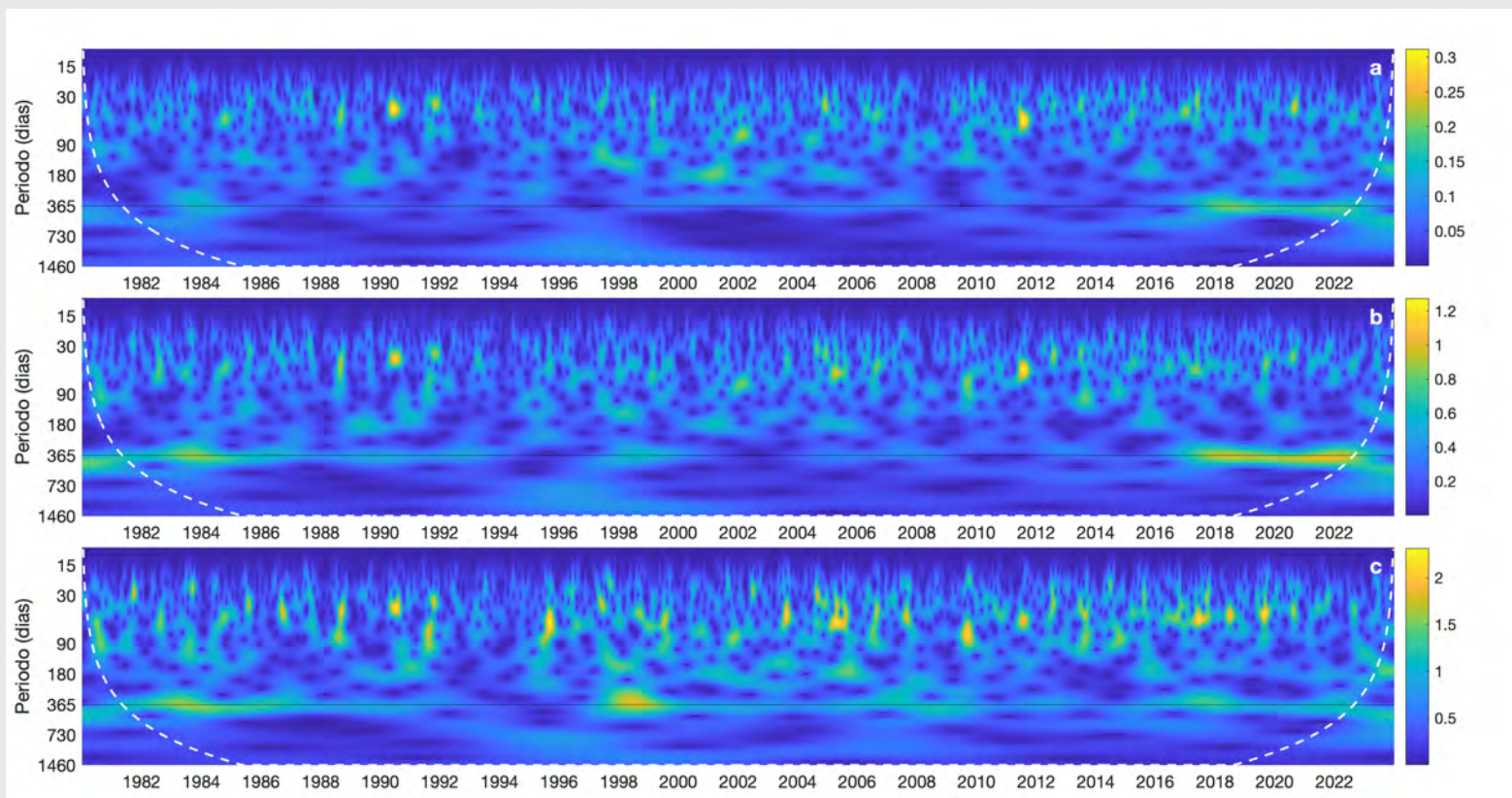
Rykaczewski & Checkley (2008) PNAS, 105(6): 1965-1970



## Series diarias de Bombeo de Ekman en 3 zonas



# Wavelets para Bombeo de Ekman

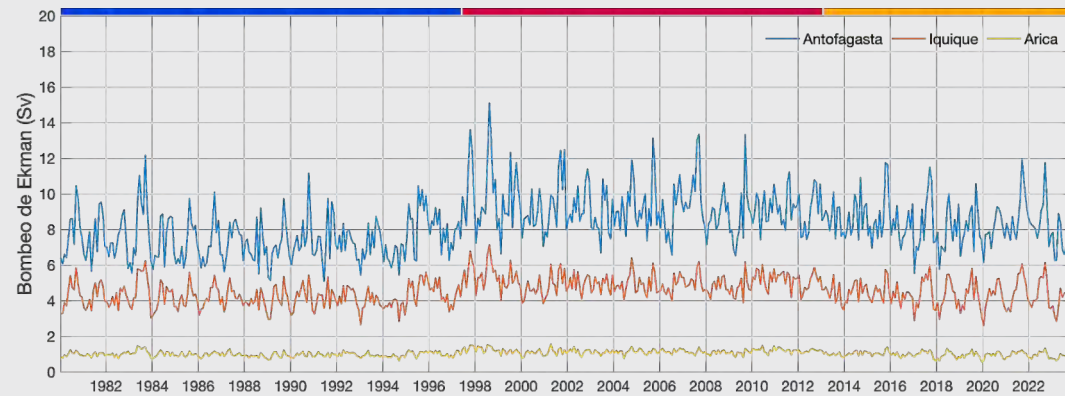
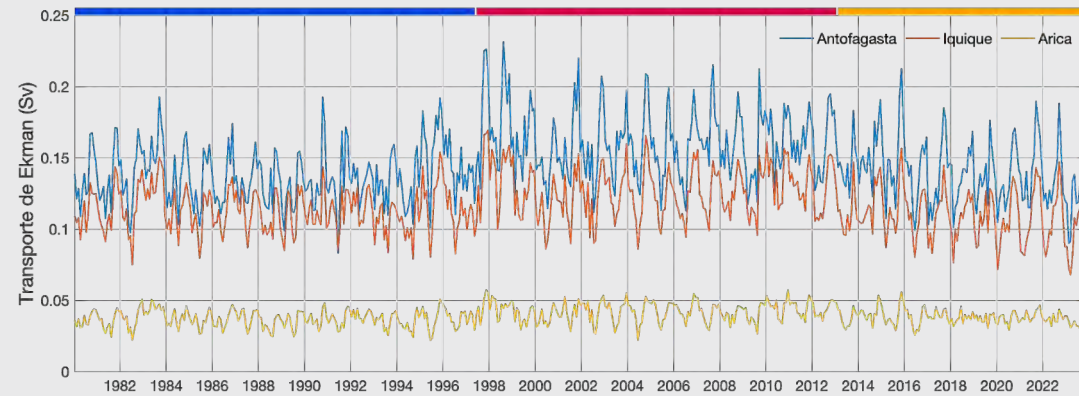
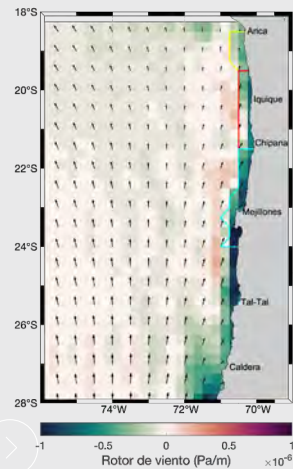
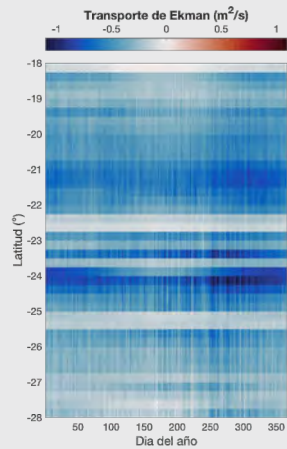


Arica

Iquique

Antofagasta

# Transporte de Ekman y bombeo de Ekman

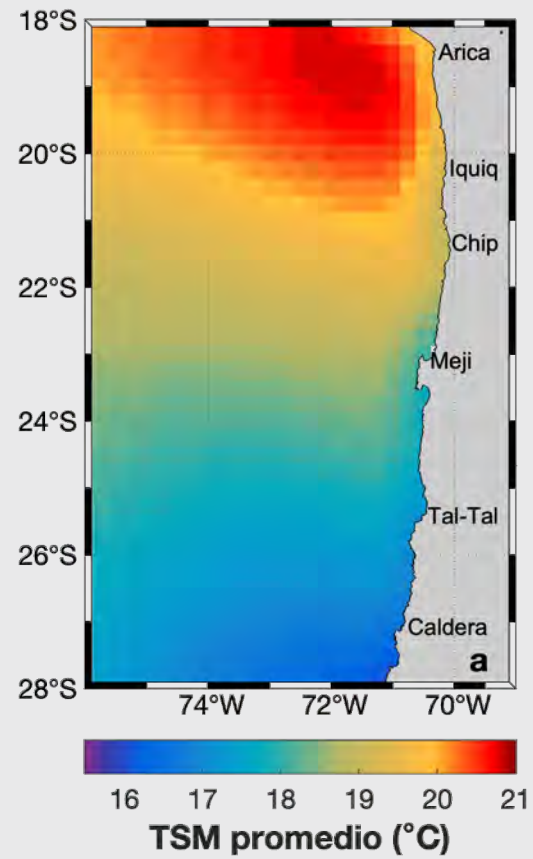


---

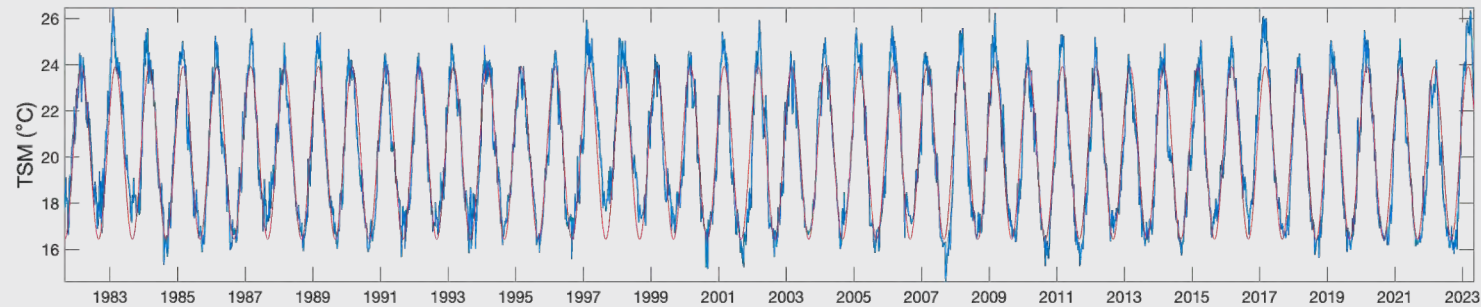
# Temperatura Superficial del Mar (TSM)

---

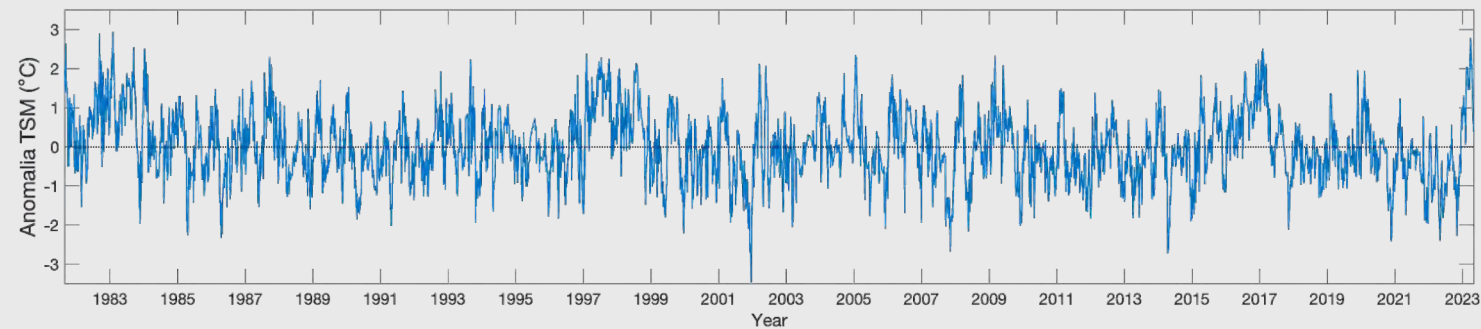
## TSM promedio 1980-2023 (AVHRR)



## Variabilidad estacional vs otros tipos



Var = 7.72



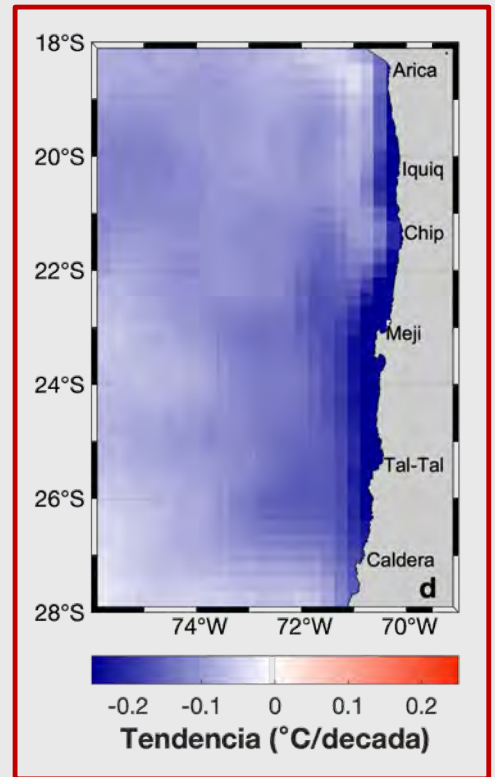
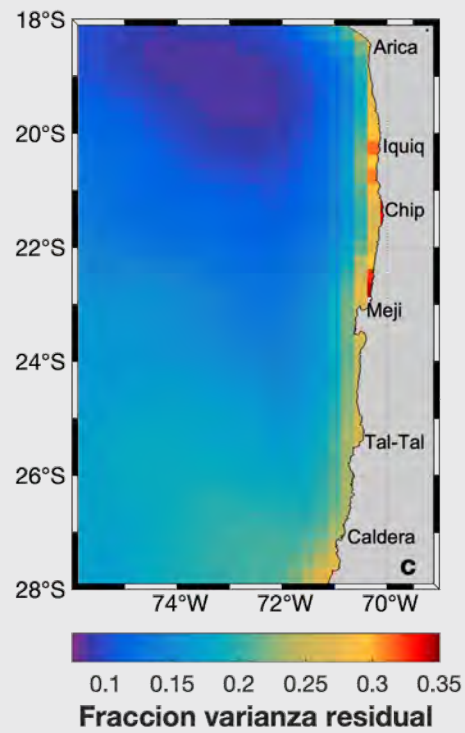
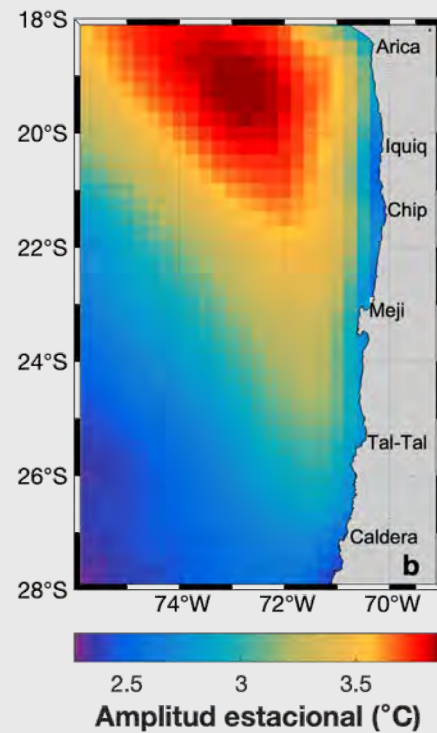
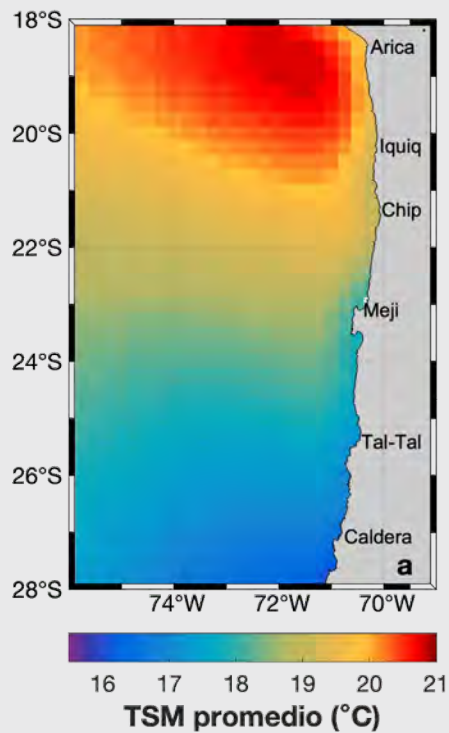
Var = 0.72

$$\text{Varianza residual} = 0.72 / 7.72 = 0.093 = 9.3\%$$



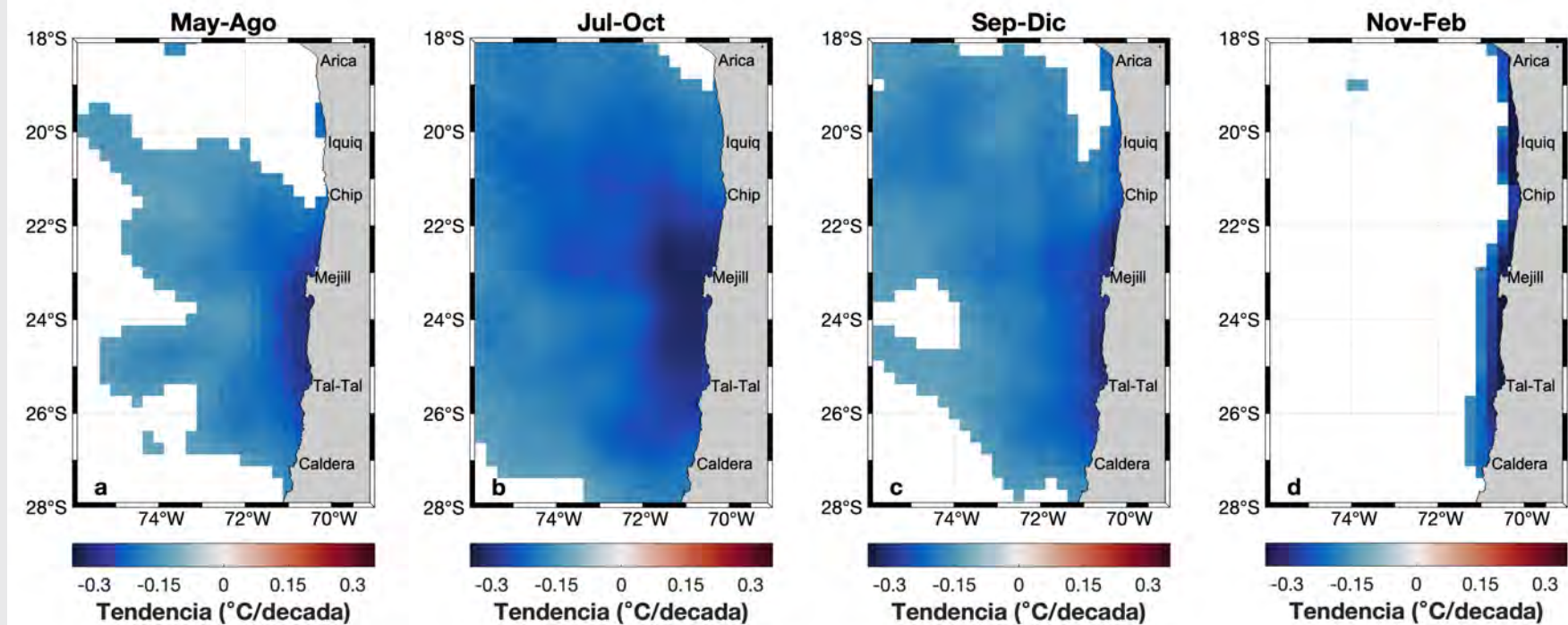


## TSM y su variabilidad entre 1980-2023

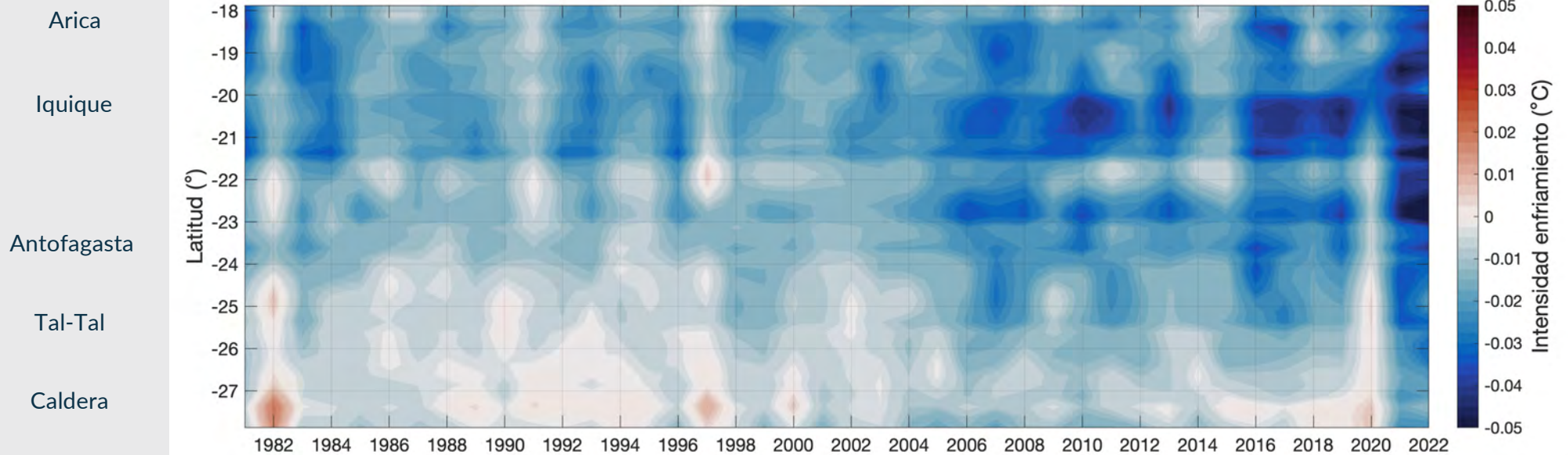




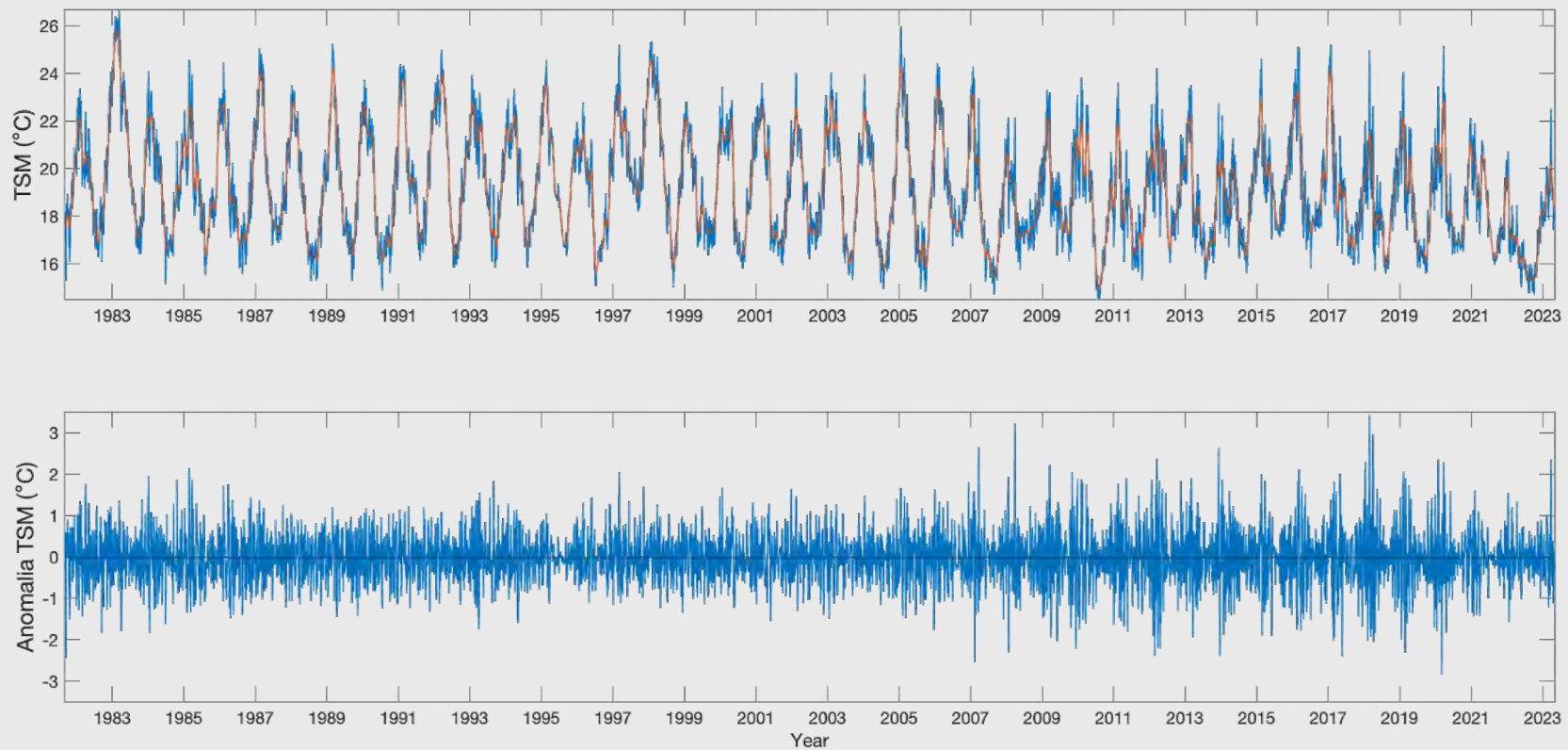
Tendencia al enfriamiento es siempre significativa, pero en diferentes secciones de la región de estudio



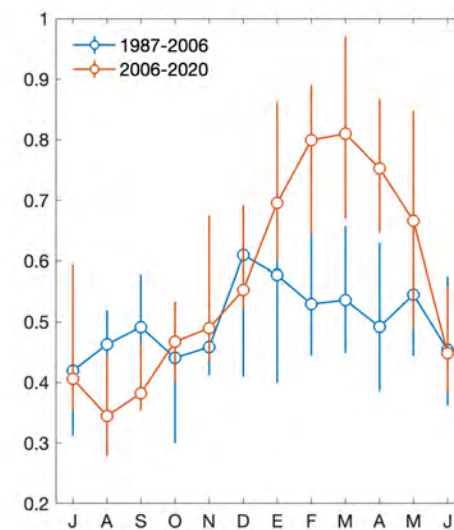
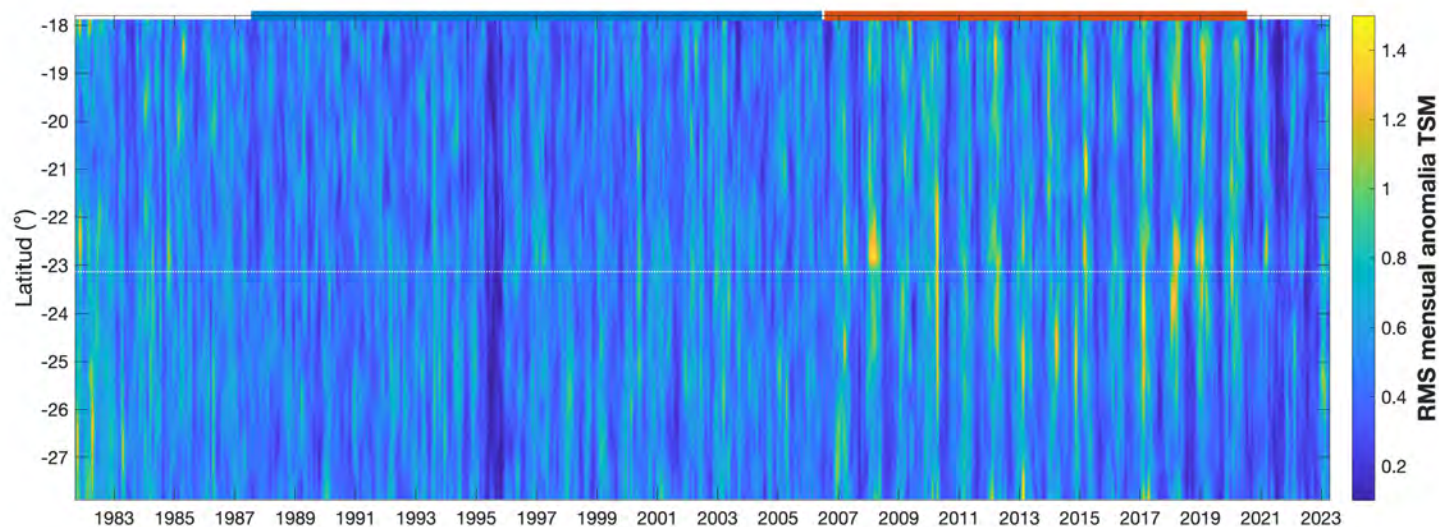
## Índice de enfriamiento superficial durante primavera-verano (septiembre - marzo)



## Separando la variabilidad sinóptica de TSM costera



## Variabilidad sinóptica de la TSM costera aumentó a partir de 2007 para meses de verano-otoño



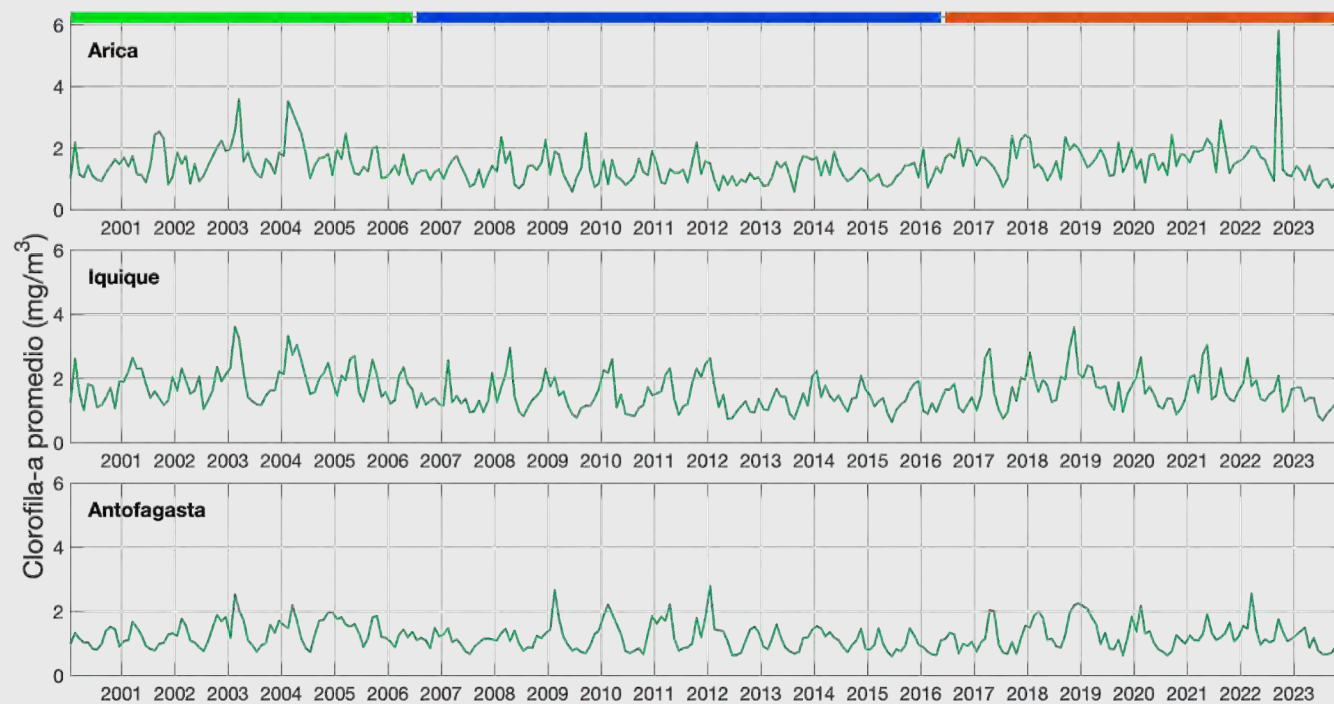
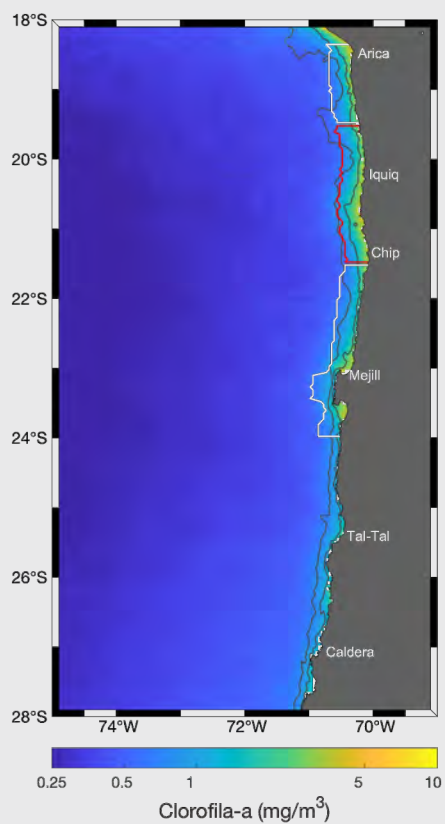
---

# Clorofila-a superficial

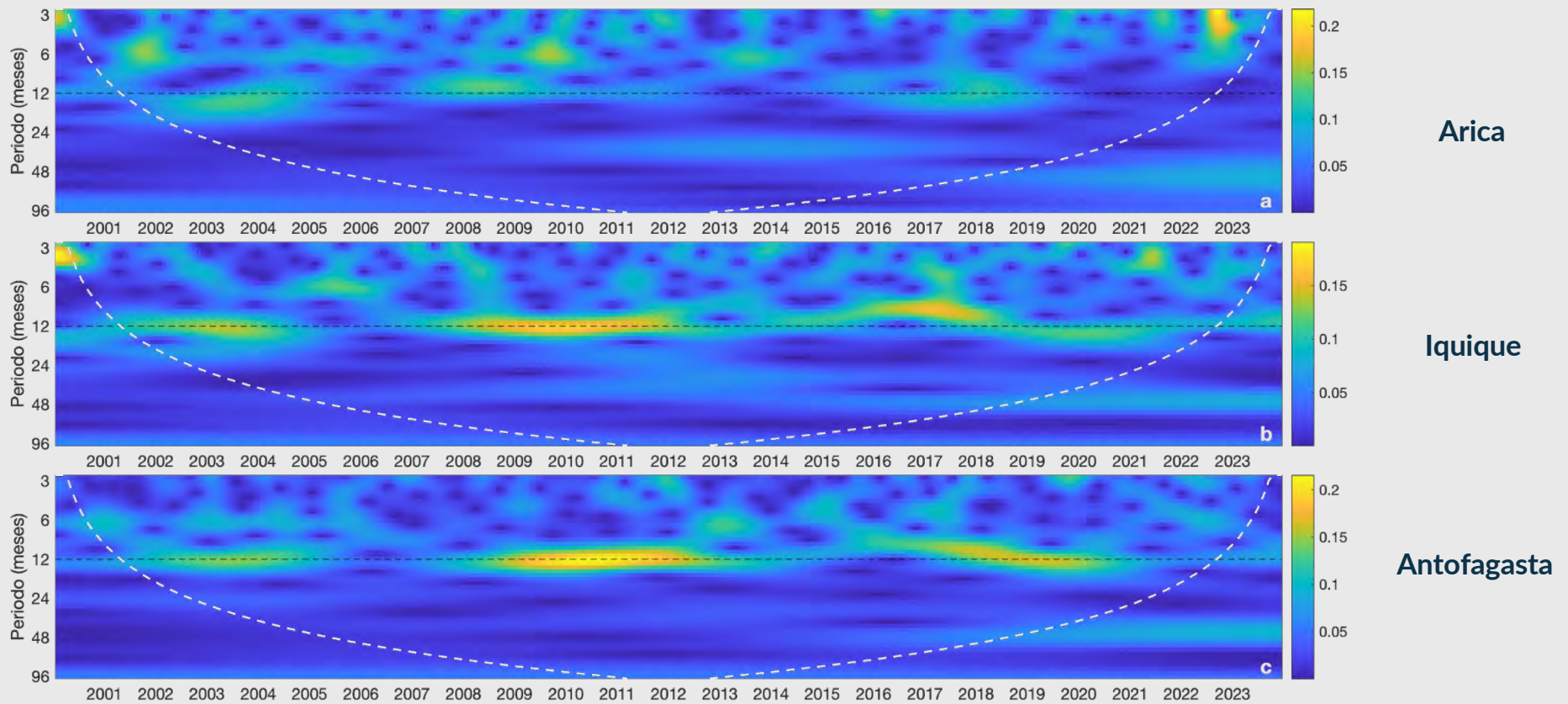
---



# Campo promedio y variabilidad temporal de la Chl-a costera

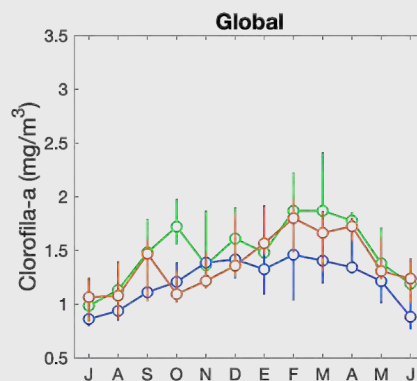
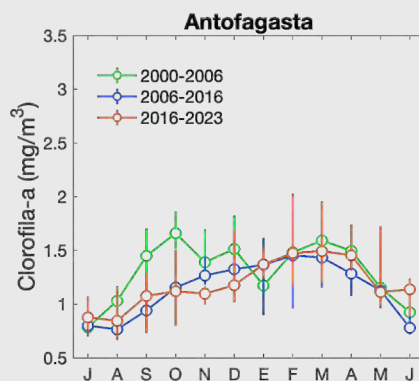
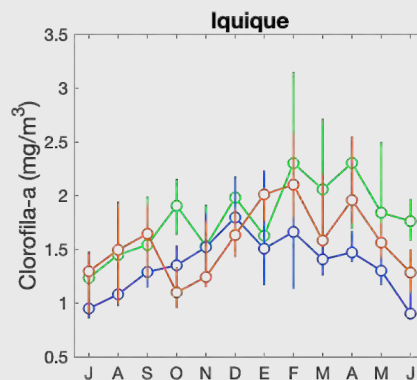
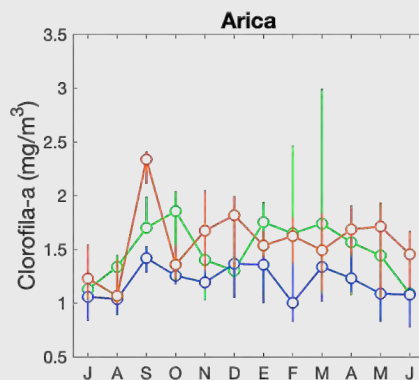


# Wavelets para Clorofila-a superficial





## Climatologías para los tres periodos identificados



- Marcada disminución en la clorofila-a superficial a partir de 2006.
- Recuperación en Arica desde 2016 en adelante.
- En Antofagasta se ha mantenido la caída de clorofila-a en invierno-primavera.
- Después de 2016, las condiciones han empeorado aún más entre octubre y diciembre en Iquique y Antofagasta.

## Resumiendo

- El viento en la región tiene un marcado patrón latitudinal. Se observaron cambios significativos en la magnitud del transporte y bombeo de Ekman entre 2007 y 2013-2014.
- Análisis de TSM muestra un marcado enfriamiento costero a partir de 2006 y un incremento en la variabilidad sinóptica en meses de verano-otoño.
- Clorofila superficial en invierno-primavera ha disminuido desde 2006 a la fecha en Antofagasta, y han empeorado aún más entre octubre y diciembre en Iquique. En Arica se han recuperado de 2016 en adelante.

Muchas gracias por su atención



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO

---

## Variaciones en el zooplancton en el área de estudio

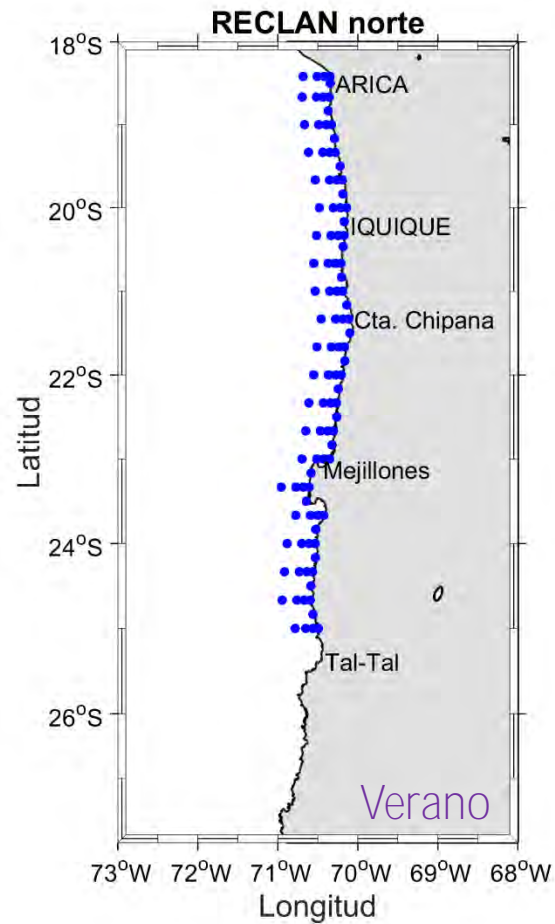
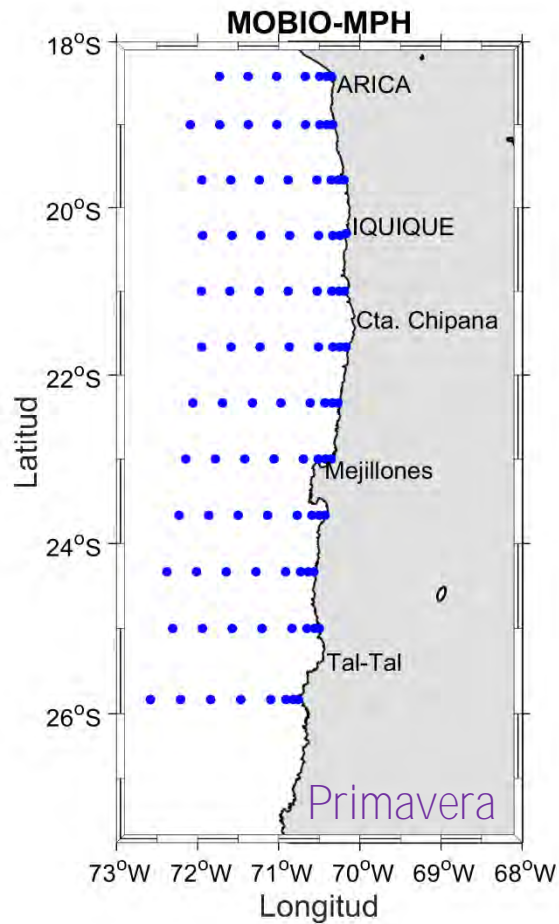
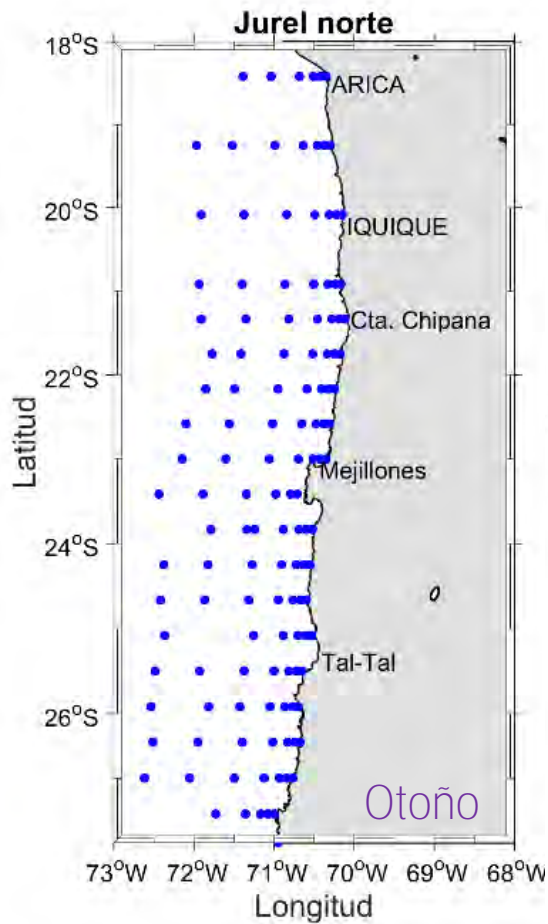
Jessica Bonicelli

Mayo, 2025

Objetivo 2: Desarrollar y comprobar hipótesis respecto a los factores causantes de los cambios estructurales de la anchoveta, mediante análisis de series históricas oceanográficas, biológicas y pesqueras, juntamente con investigación y literatura asociada y discusiones de talleres de trabajo y comités.



Se analizaron series de tiempo históricas de zooplancton y variable oceanográficas provenientes de 3 cruceros



Hasta las 20 mn de distancia a la costa  
Hasta los 25°S

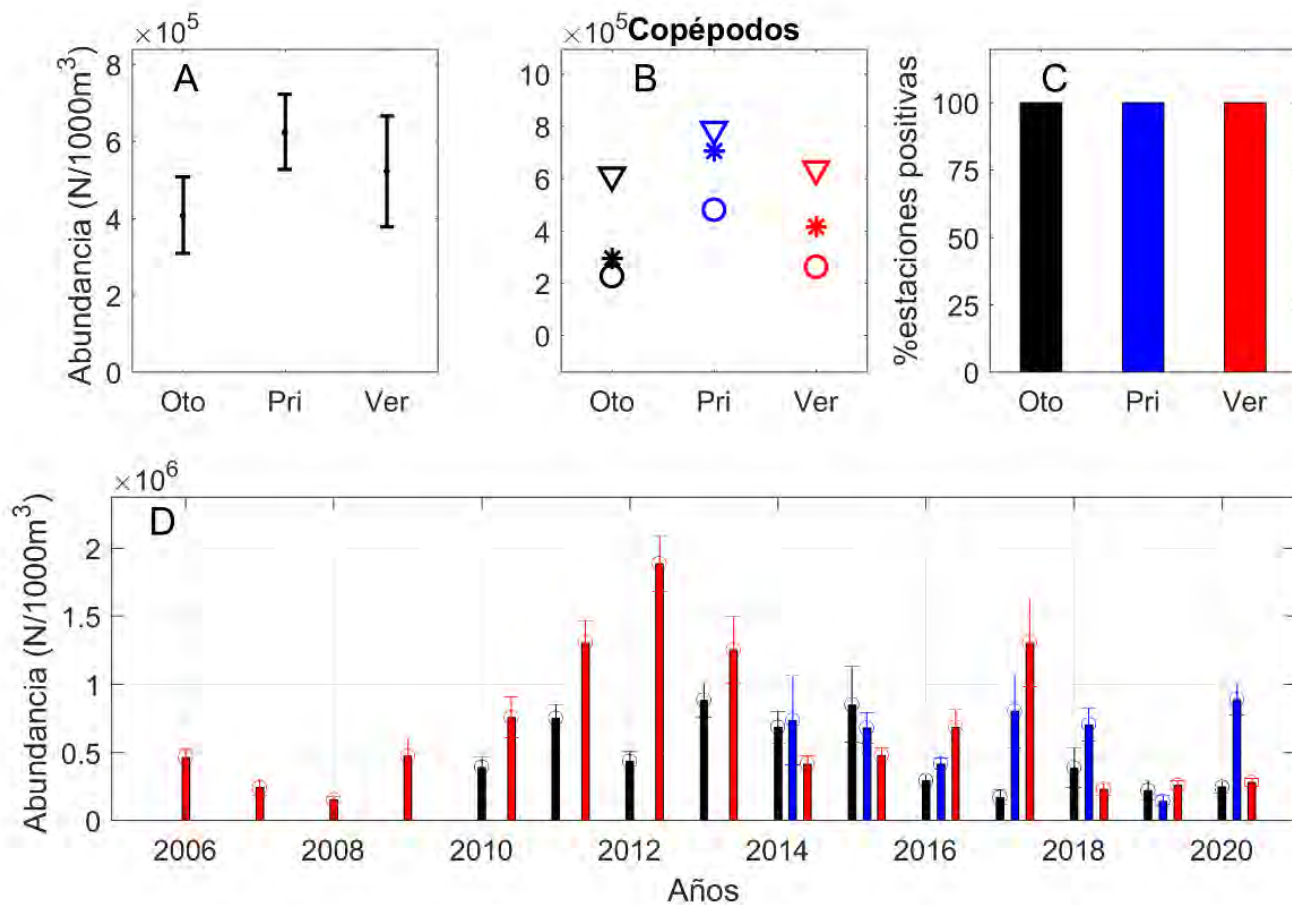
Abundancia de zooplancton  
Otoño (2010 - 2020)  
Primavera (2014 – 2020)  
Verano (2006 – 2020)

Pendientes de distribución de tamaños  
Otoño (2013 - 2020)  
Primavera (2014 – 2020)  
Verano (2010 – 2020)

Oxígeno disuelto (OD)  
Otoño (2012 - 2020)  
Primavera (2014 – 2020)  
Verano (2011 – 2020)

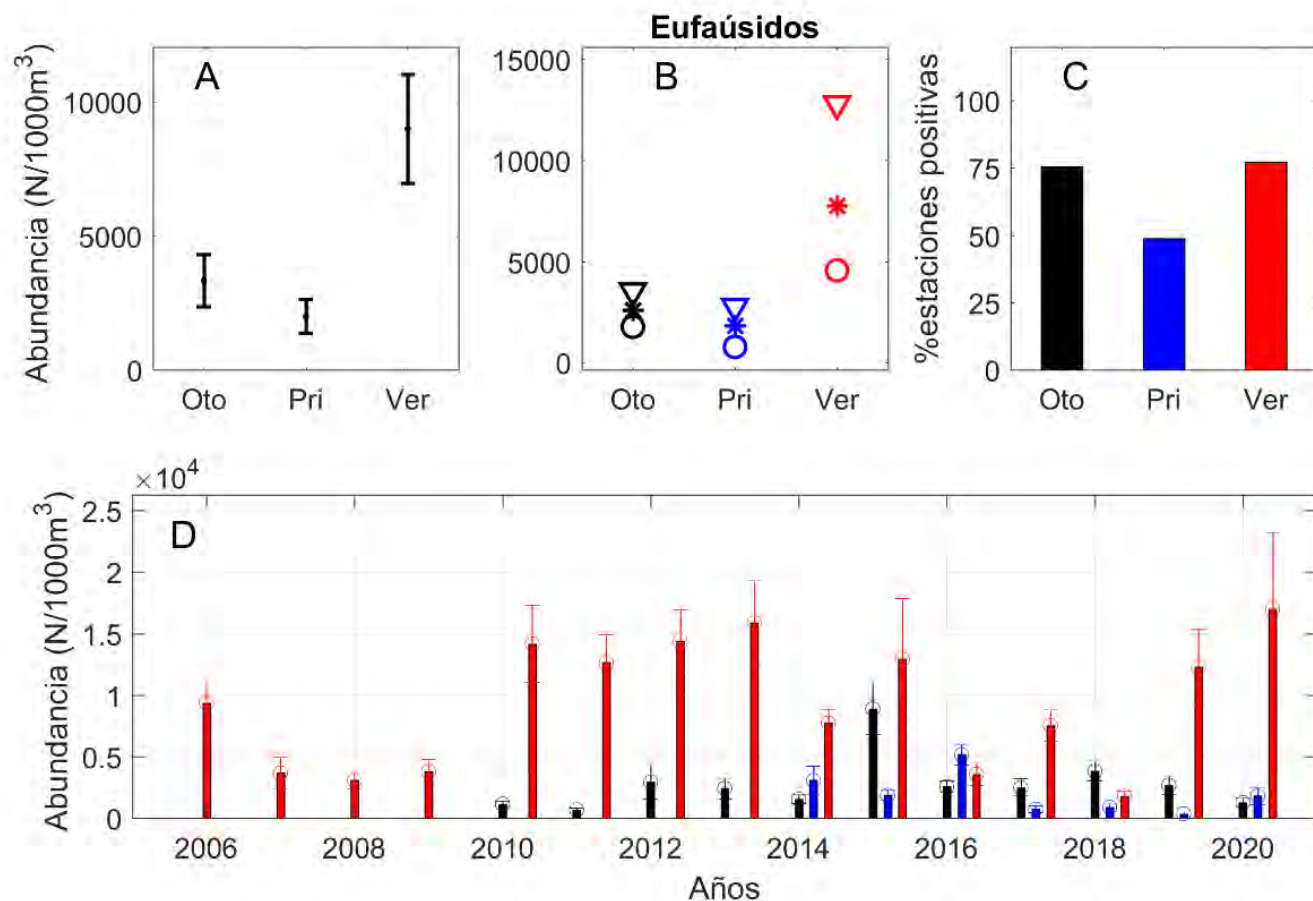


Otoño  
Primavera  
Verano

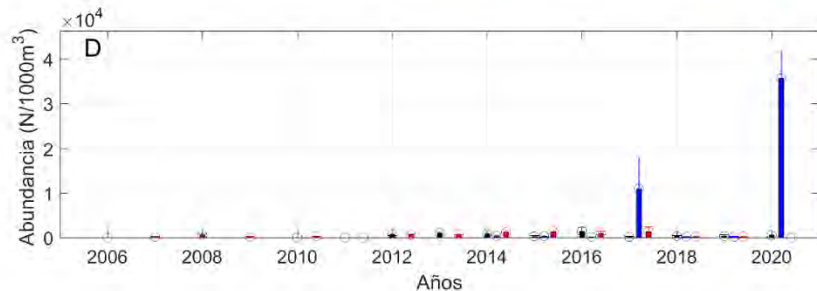
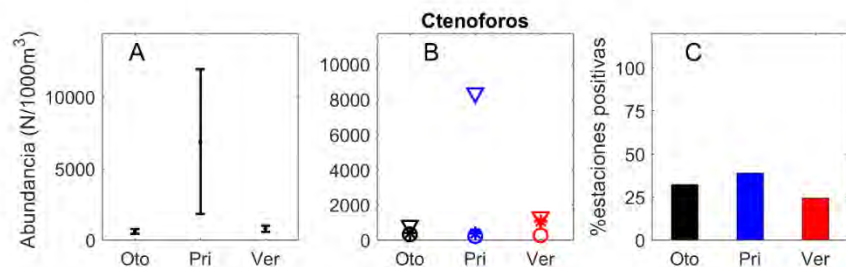
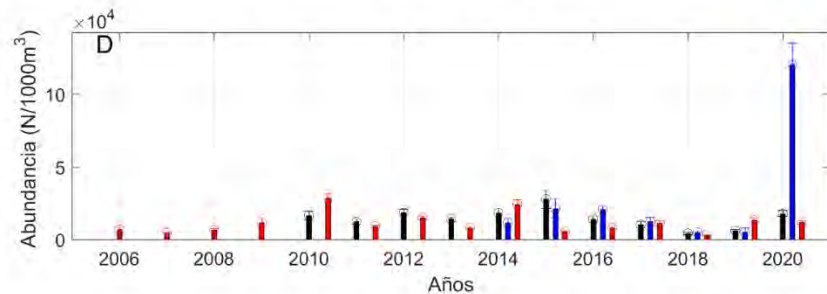
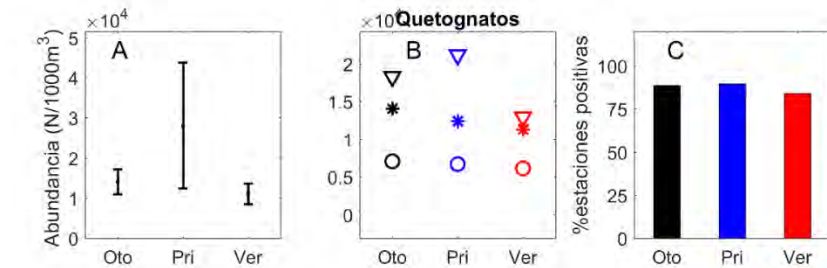
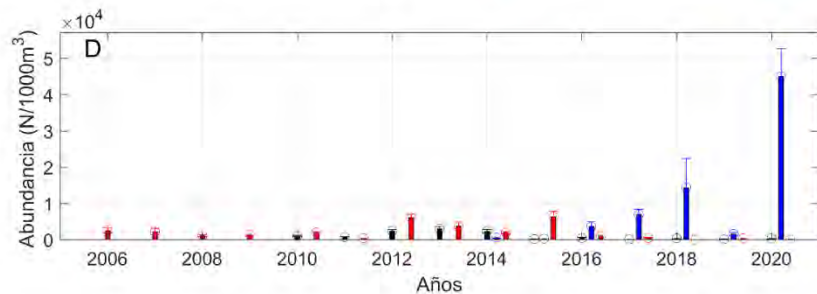
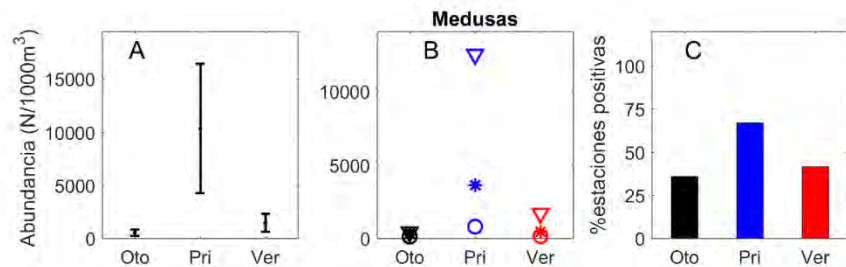


Decaimiento de copépodos en otoño a partir del 2016 y en **verano** entre 2014-2016 y entre 2018-2020.

Otoño  
Primavera  
Verano



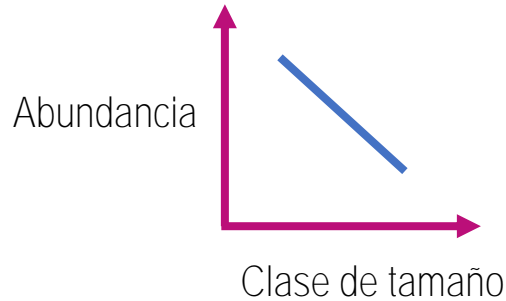
La abundancia promedio más alta en el **verano**, al igual que el percentil de 75%, la mediana y el percentil de 25%.



Un aumento de los gelatinosos en primavera.

Una posible amenaza para los estadios tempranos de la anchoveta que tiene *peaks* reproductivos en primavera

## 1. Pendiente de distribución de tamaños



Pendientes siempre son negativas  
 Mas negativas (mayor representatividad de organismos pequeños)  
 Menos negativas (menor representatividad de organismos pequeños)

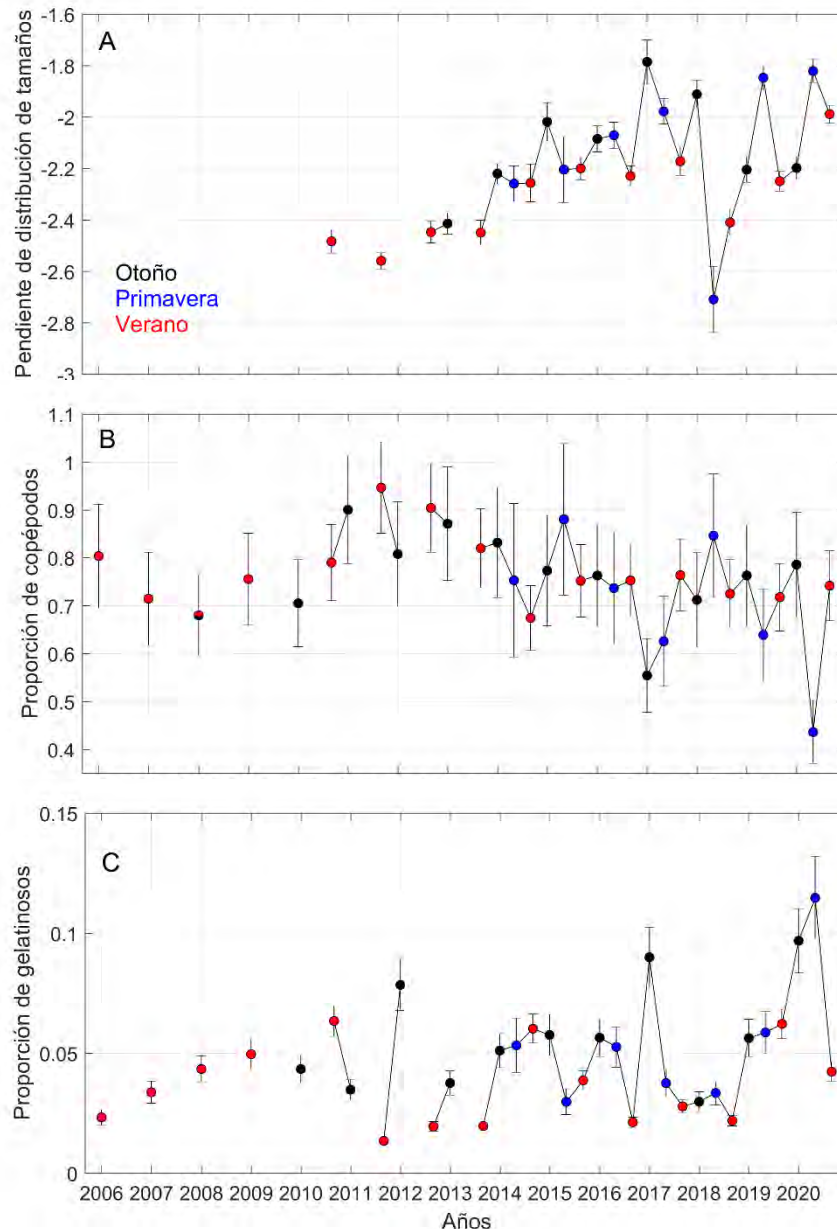
## 2. Proporción de copépodos

$$\frac{\text{Abundancia de copépodos}}{\text{Abundancia total}}$$

## 3. Proporción de gelatinosos

$$\frac{\text{Abun. ctenóforos} + \text{Abun. medusas} + \text{Abun. quetognatos}}{\text{Abundancia total}}$$

Los tres indicadores se calcularon para cada estación oceanográfica de manera independiente. Luego se calculó el promedio y el error estándar para cada año y estación del año (crucero).



- Los grupos de mayor tamaño están teniendo una mayor representatividad dentro de la comunidad
- La proporción de copépodos a disminuido en el tiempo.
- Aumento en la proporción de gelatinosos en primavera

## 1. Oxígeno disuelto (OD) promedio en los primeros 20 m de profundidad

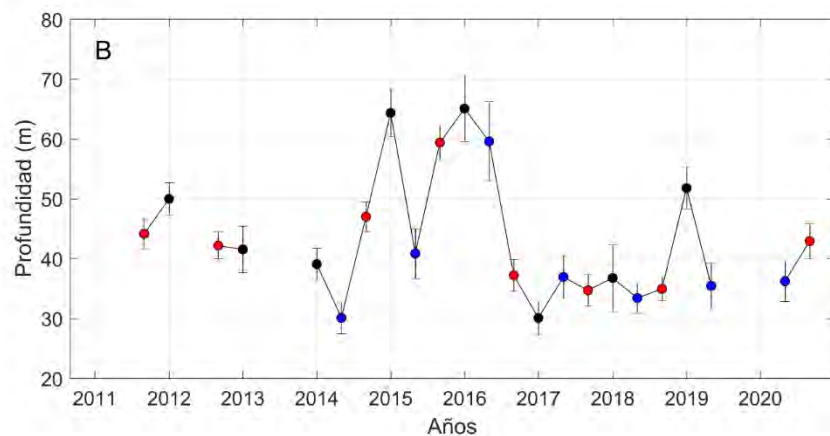
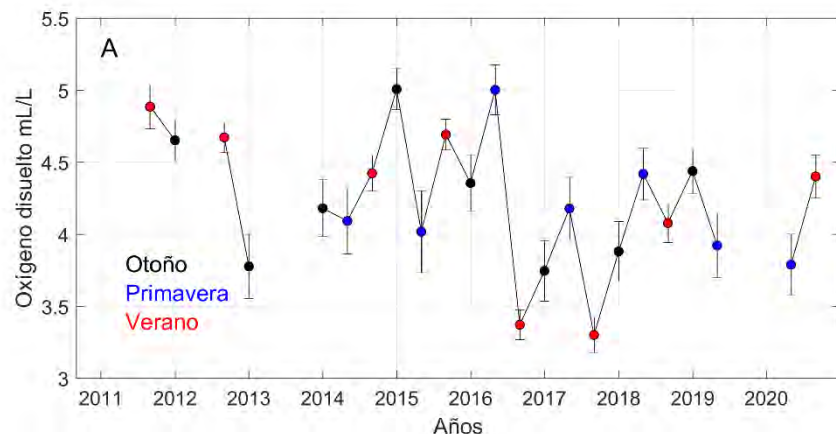
Se promediaron los valores de OD de los primeros 20 m de cada perfil de CTD-OF.

## 2. Nivel superior de la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO)

Se ubicó el valor más somero menor igual a 1 mL/L para cada perfil de CTD-OF

Los dos indicadores se calcularon para cada estación oceanográfica de manera independiente. Luego se calculó el promedio y el error estándar para cada año y estación del año (crucero).





En los años 2015 y 2016 el oxígeno disuelto (OD) promedio de los primeros 20 m de profundidad presentó un aumento y la profundidad del nivel superior de la ZMO se profundizó.

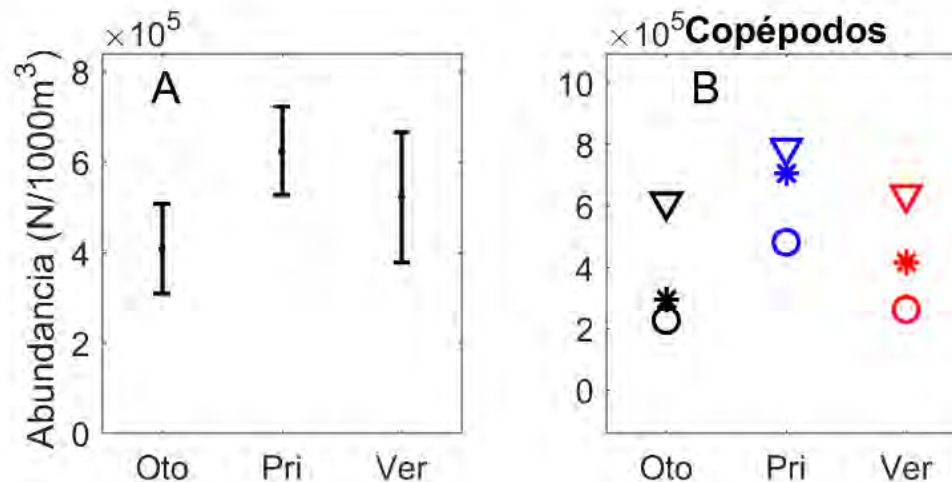
A partir del 2017 la profundidad del nivel superior de la ZMO estuvo generalmente sobre los 40 m de profundidad y el promedio de los primeros 20 m bajo los 4,5 mL/L.



El análisis multivariado basado en permutaciones mostró diferencias significativas en los ensambles de zooplancton entre estaciones del año PERMANOVA (pseudo  $F = 22,1$ ;  $p = 0,001$ )

Los copépodos fue el grupo que explico más del 70% de la disimilitud entre tratamientos

La abundancia de copépodos mostró diferencias significativas entre el otoño y primavera ( $p = 0,01$ )



- Se detectaron decaimientos de la abundancia de copépodos, y un aumento importante de gelatinosos.
- Se detectó un aumento en la abundancia y proporción de gelatinosos en primavera, lo que podría ser una posible amenaza para los estadios tempranos de la anchoveta que tiene *peaks* reproductivos en dicho periodo.
- Se observó una diferencia en la estructura comunitaria del zooplancton entre estaciones del año para el periodo 2014-2020.
- Cabe destacar la tendencia que tuvo la pendiente de la estructura de tamaños del zooplancton hacia valores menos negativos. Este cambio puede ser debido al aumento que tuvieron los gelatinosos, los que en general, son de mayor tamaño que los demás grupos taxonómicos.
- En los años 2015 y 2016 el OD promedio de los primeros 20 m de profundidad presentó un aumento y la profundidad del nivel superior de la ZMO se profundizó, asociado al evento el Niño 2015 – 2016.



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO



## FIPA 2023-20

Caracterizar los patrones de edad y crecimiento de juveniles y adultos de baja talla de anchoveta registrados en el período reciente, para clarificar sus impactos en los cambios que ha experimentado la especie

Francisco Cerna<sup>1</sup>, Guido Plaza<sup>2</sup>, Juan Carlos Saavedra<sup>3</sup>, Erika Lopez<sup>1</sup>, Claudeth Asencio<sup>2</sup>, Osneider Palomino<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sección Edad y Crecimiento, Dpto. Evaluación de Recursos, División de Investigación Pesquera, IFOP.

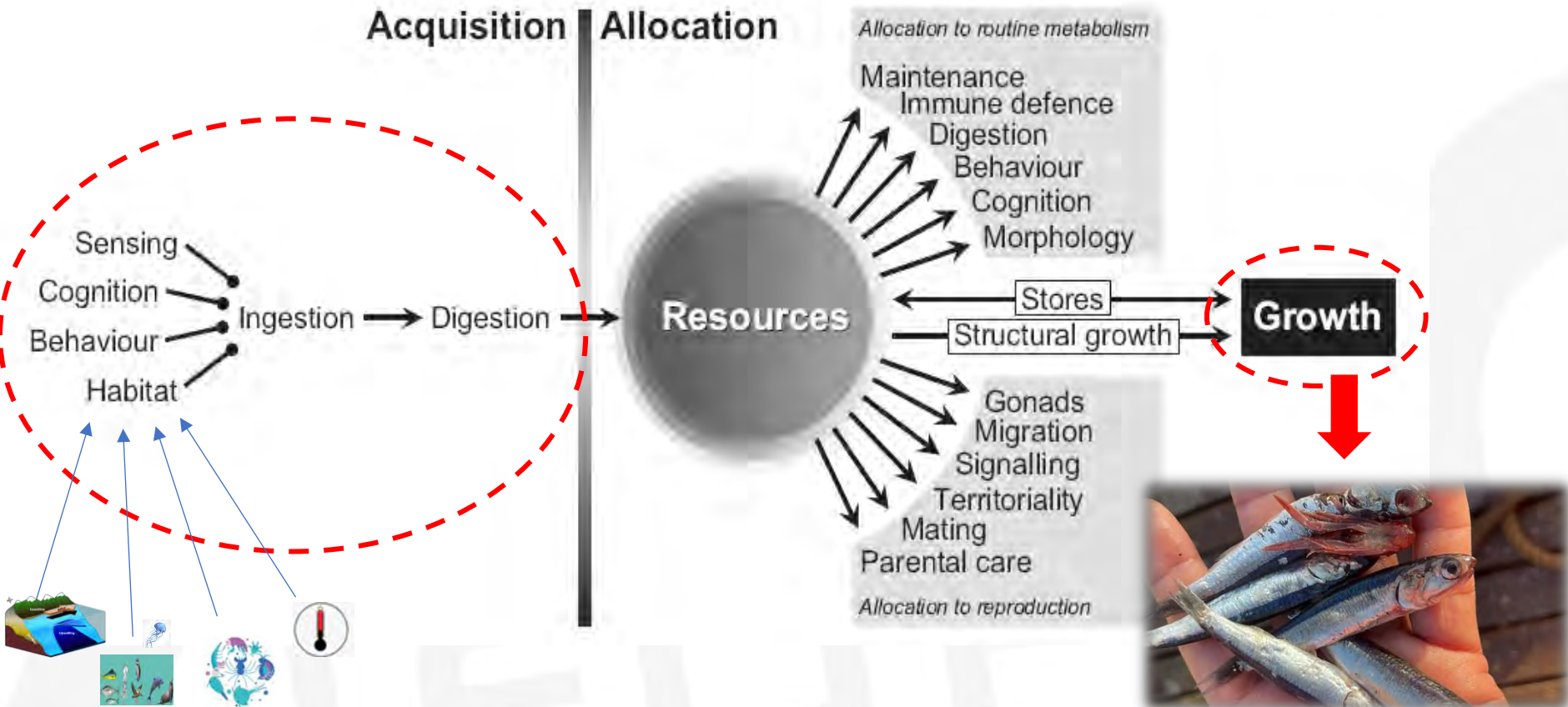
<sup>2</sup>Escuela de Ciencias del Mar, Facultad de Recursos Naturales, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

<sup>3</sup>División de Investigación Pesquera, Instituto de Fomento Pesquero.

# Introducción

Enberg, Jørgensen, Dunlop, Varpe, Boukal, Baulier, Eliassen & Heino

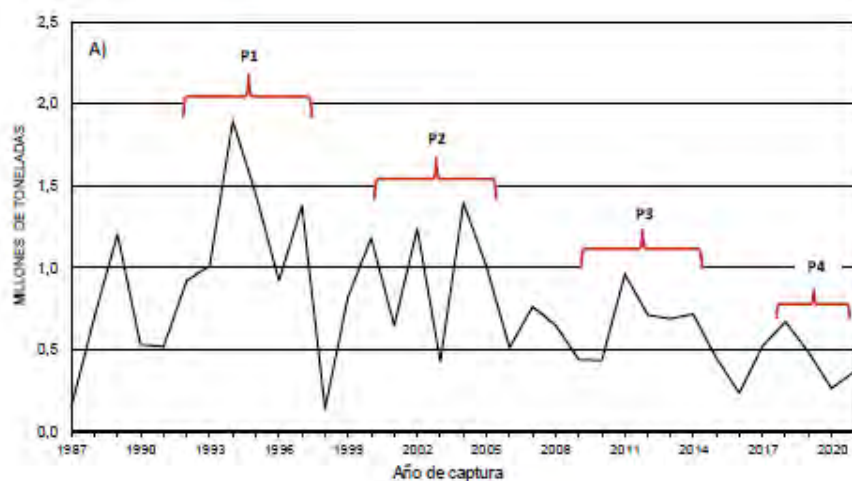
Fishing-induced evolution of growth



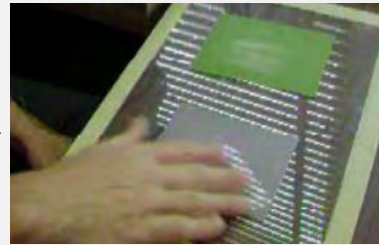
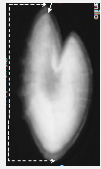


Resumen del número de pares de otolitos que se analizaron por cada cohorte anual. Se incluye la longitud y edad media, con su desviación estándar y rango

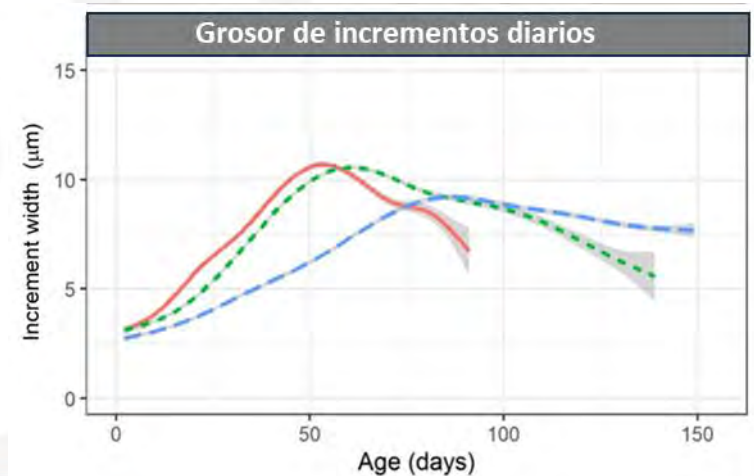
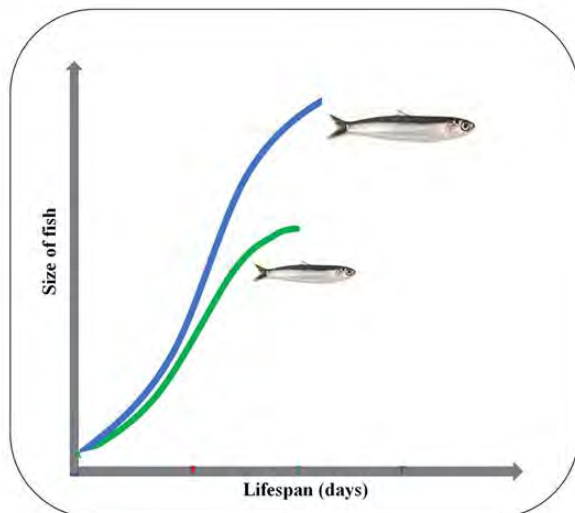
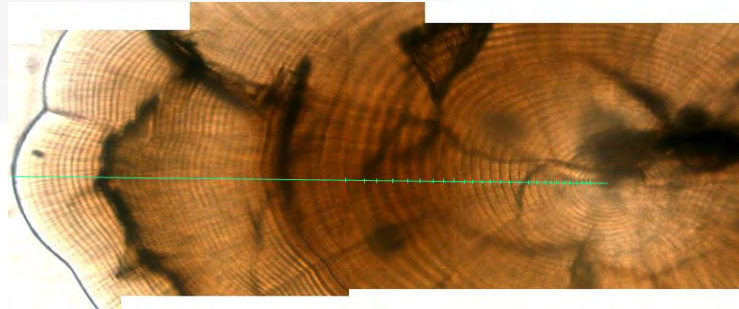
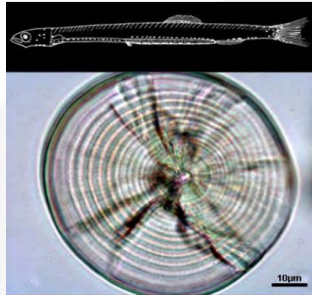
Cohorte	Longitud total (cm)		Edad (días)		Número de muestra
	Media±d.e	Rango	Media±d.e	Rango	
1972-1973	10,6±0,8	9,0-12,0	94±17	64-126	44
1981-1982	10,7±1,0	8,5-12,0	95±17	62-134	56
1990-1991	13,0±0,4	12,5-13,5	165±9	145-182	41
1991-1992	11,2±0,8	9,5-13,0	144±21	87-191	104
1992-1993	10,2±1,7	8,0-13,0	121±28	84-201	78
2001-2002	10,3±1,1	8,0-12,0	133±17	109-159	31
2009-2010	10,3±1,2	7,5-13,0	115±28	54-190	372
2010-2011	8,3±2,4	5,5-11,5	93±15	71-118	15
2014-2015	11,0±1,4	8,0-12,5	140±38	71-352	191
2015-2016	5,6±3,2	2,5-14,0	67±58	71-352	109
2018-2019	10,0±2,1	7,0-14,0	238±40	25-247	30
2019-2020	6,1±2,0	3,5-12,0	75±33	45-183	234
2020-2021	8,3±2,4	4,0-13,5	115±35	49-195	307
2021-2022	7,7±2,8	3,0-13,0	102±37	41-215	143
2022-2023	6,9±2,3	3,5-12,0	101±36	38-158	105
Global	9,2±2,7	2,5-14,0	101±36	38-158	1860



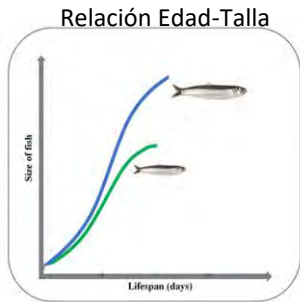
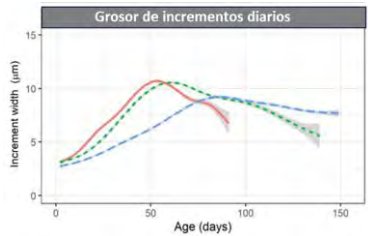
# Metodología



Otolith constitutes a permanent record of growth







## 1) Perfiles de grosor de los incrementos (GAM)

$$GI_{ijk} = \varphi = \beta_0 + s(\text{edad}_{ijk} * E_{ijk}) + E_{ijk} + Coh_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

donde  $\varphi$  representa la función que permite vincular la media de GI y los predictores aditivos;  $\beta_0$  es el intercepto del modelo (la media global del GI);  $GI_{ijk}$  corresponde al grosor de cada microincremento del  $i$ -ésimo pez, en la  $j$ -ésima estación del año ( $j=\{\text{invierno-primavera, verano, otoño}\}$ ); en la  $k$ -ésima cohorte ( $j=\{1972,1981,2009,2014,2019,2020,2021,2022\}$ );  $\text{edad}_{ijk}$  es la edad en que el  $i$ -ésimo incremento del pez, de la  $j$ -ésima estación de nacimiento y  $k$ -ésima cohorte.

## 2) Análisis aplicando un modelo lineal generalizado (GLM)

$$LT_{ijkl} = \beta_0 + \beta_1 (\text{edad}_{ijkl}) + \beta_j (\text{edad}_{ijkl} * Coh_j) + Coh_j + E_k + Z_l + \varepsilon_{ijkl}$$

$$LT_{ijkl} = \beta_0 + \beta_1 (\text{edad}_{ijkl}) + Coh_j + E_k + \beta_j (\text{edad}_{ijkl} * Coh_j) + \beta_k (\text{edad}_{ijkl} * E_k) + \varepsilon_{ijkl}$$

## 3) Análisis modelo de crecimiento Laird-Gompertz

$$L_t = L_{\infty} \exp[e^{\alpha(X-X_0)}]$$

## 4) Tasas de crecimiento Global (GLM, GAM)

$$TCG = (LT - LTe) * EC^{-1}$$

$$Y_i = \alpha + \gamma + \delta + \beta LT + \gamma LT + e_i,$$

donde  $Y$  es la TCG,  $\alpha$  es el intercepto global,  $\gamma$  es el efecto del año,  $\delta$  es el efecto estacional, y  $\beta$  son los coeficientes estimados para  $LT$  que actúan como covariables numéricas y  $e_i$  es el término de error.

$$TCG_{ij} = \varphi = \beta_0 + s(LT_{ij}) + Estado\ ontogéntico_{ij} + Cohorte_{ij}$$

donde  $\varphi$  representa la función que permite enlazar la media y el modelo (función de enlace); TCG correspondió a la tasa de crecimiento global;  $\beta_0$  es el intercepto del modelo;  $s$  es una función suavizadora.

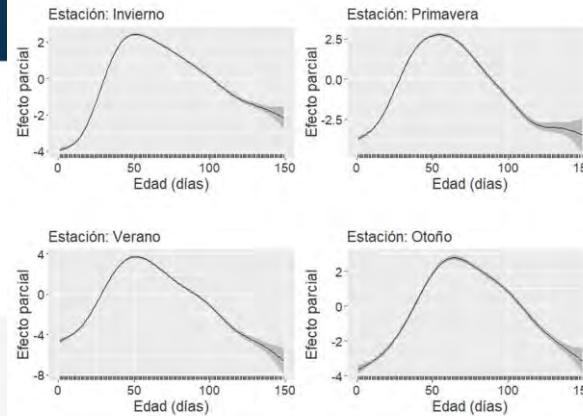
Resumen de los indicadores del modelo aditivo generalizado (GAM) que relaciona el grosor de los incrementos diarios con la edad. El modelo también considera como variables explicativas la estación del año y cohorte.

Variable	Estimación	E.E	t valor	Pvalor
Intercepto	8,751	0,05592	156,49	<2e-16
E_Primavera	-0,752	0,02711	-27,75	<2e-16
E_Verano	0,644	0,04065	15,85	<2e-16
E_Otoño	-0,649	0,03826	-16,96	<2e-16
Cohorte 1981-1982	-0,674	0,06821	-9,88	<2e-16
Cohorte 2009-2010	0,562	0,05508	10,21	<2e-16
Cohorte 2014-2015	-3,112	0,06022	-51,67	<2e-16
Cohorte 2019-2020	-0,693	0,06393	-10,84	<2e-16
Cohorte 2020-2021	-1,182	0,06008	-19,68	<2e-16
Cohorte 2021-2022	-0,153	0,06190	-2,47	0,0133
Cohorte 2022-2023	-1,511	0,06380	-23,69	<2e-16

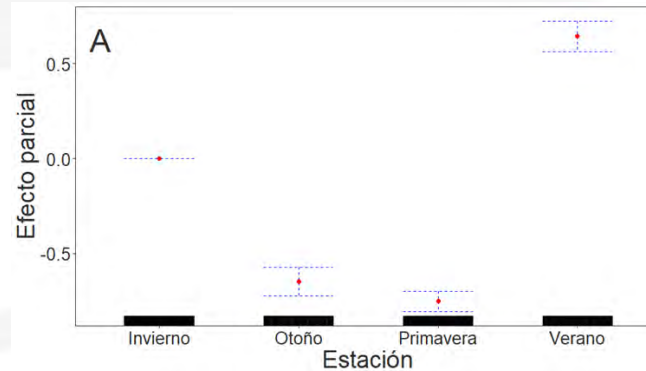
Significado aproximado de los términos suavizados:

	egl	Ref. gl	F	Pvalor
S(edad):E_Invierno	8,68	8,96	2496,1	<2e-16
S(edad):E_Primavera	8,36	8,84	1378,9	<2e-16
S(edad):E_Verano	8,41	8,87	1134,9	<2e-16
S(edad):E_Otoño	7,63	8,50	627,3	<2e-16

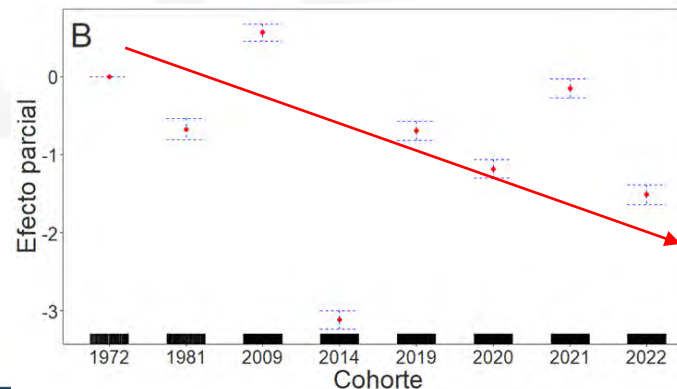
$$Gl_{ijk} = \varphi = \beta_0 + s(edad_{ijk} * E_{ijk}) + E_{ijk} + Coh_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$



Gráficos de interpolación de la edad desde el modelo aditivo generalizado (GAM)

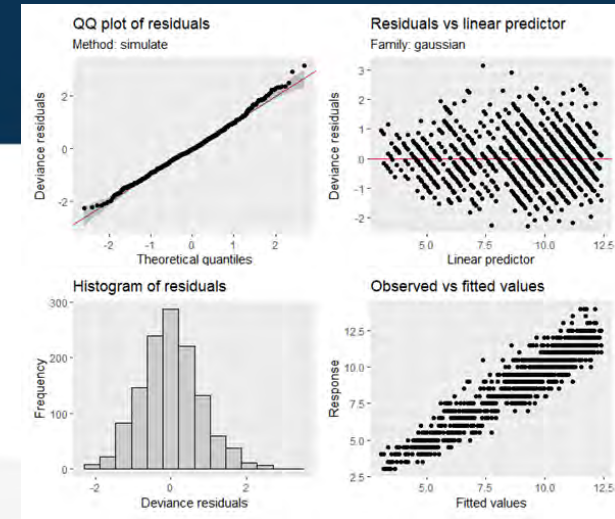


Gráficos de interpolación de la edad desde el modelo aditivo generalizado (GAM) que muestran el efecto de las variables explicativas, estaciones del año (A) y cohortes (B) con respecto al GI.



$$LT_{ijkl} = \beta_0 + \beta_1 (edad_{ijkl}) + Coh_j + E_k + \beta_j (edad_{ijkl} * Coh_j) + \beta_k (edad_{ijkl} * E_k) + \varepsilon_{ijkl}$$

Resumen de los resultados del modelo lineal generalizado (GLM) que relaciona la longitud total con la edad en días.



- Valor pseudo-R<sup>2</sup> =89,6%
- Test de uniformidad Kolmogórov-Smirnov (p=0,14) / datos dist. Normal
- Test de dispersión DHARMA p=0,52 / No hay sub o sobre dispersión de datos
- Test de outliers con un p=0,75, mostró, que solo 0,8% de los datos (n=10) están en esta condición

Resumen del análisis de varianza de los resultados del modelo lineal generalizado (GLM) que relaciona la longitud total con la edad en días.

Termino	Estimación	E.E.	tvalor	Pvalor
(Intercept)	9,51	0,744	12,8	3,19E-35
Edad	0,0087	0,00757	1,15	2,51e- 1
Cohorte 1981-1982	-3,21	0,962	-3,34	8,65e- 4
Cohorte 1991-1992	-4,71	1,11	-4,25	2,29e- 5
Cohorte 1992-1993	-9,86	0,94	-10,5	1,04E-24
Cohorte 2001-2002	-11,4	2,07	-5,51	4,27e- 8
Cohorte 2009-2010	-4,04	0,756	-5,35	1,04e- 7
Cohorte 2014-2015	-5,9	0,819	-7,2	1,04E-12
Cohorte 2019-2020	-6,64	0,744	-8,92	1,68E-18
Cohorte 2020-2021	-8,64	0,752	-11,5	4,20E-29
Cohorte 2021-2022	-10,1	0,767	-13,2	2,86E-37
Cohorte 2022-2023	-9,15	0,792	-11,5	2,29E-29
Estación Primavera	-0,832	0,219	-3,8	1,54e- 4
Estación Verano	1,94	0,534	3,63	2,92e- 4
Estación Otoño	1,96	0,629	3,12	1,84e- 3
Edad:Cohorte 1981-1982	0,0298	0,00988	3,02	2,60e- 3
Edad:Cohorte 1991-1992	0,0373	0,00972	3,84	1,30e- 4
Edad:Cohorte 1992-1993	0,0762	0,00907	8,4	1,18E-16
Edad:Cohorte 2001-2002	0,0811	0,0171	4,75	2,27e- 6
Edad:Cohorte 2009-2010	0,0355	0,00761	4,67	3,36e- 6
Edad:Cohorte 2014-2015	0,0498	0,0081	6,15	1,05e- 9
Edad:Cohorte 2019-2020	0,0363	0,00778	4,66	3,43e- 6
Edad:Cohorte 2020-2021	0,0574	0,00769	7,46	1,60E-13
Edad:Cohorte 2021-2022	0,0775	0,00786	9,87	3,60E-22
Edad:Cohorte 2022-2023	0,0562	0,00799	7,03	3,39E-12
Edad:Estación Primavera	0,00569	0,00212	2,68	7,54e- 3
Edad:Estación Verano	-0,012	0,0045	-2,66	7,82e- 3
Edad:Estación Otoño	-0,0176	0,00498	-3,53	4,23e- 4
Devianza nula: 7493    Devianza residual: 778    grados de libertad: 1256				

Termino	gl	devianza	Porcentaje explicado	gl residual	Devianza residual	Pvalor
Edad	1	4489	66,8	1255	3004	<0,001
Cohorte	10	1918	28,6	1245	1086	<0,001
Estación	3	78,6	1,17	1242	1008	9,62E-27
Edad:Cohorte	10	207	3,08	1232	801	4,40E-64
Edad:Estación	3	23,1	0,344	1229	778	6,05e- 8

# Resultados

## Modelo GLM relación Edad-Talla

Gráfico muestra los diferenciales de los interceptos respecto a la estimación global de las variables explicativas cohorte y estación.

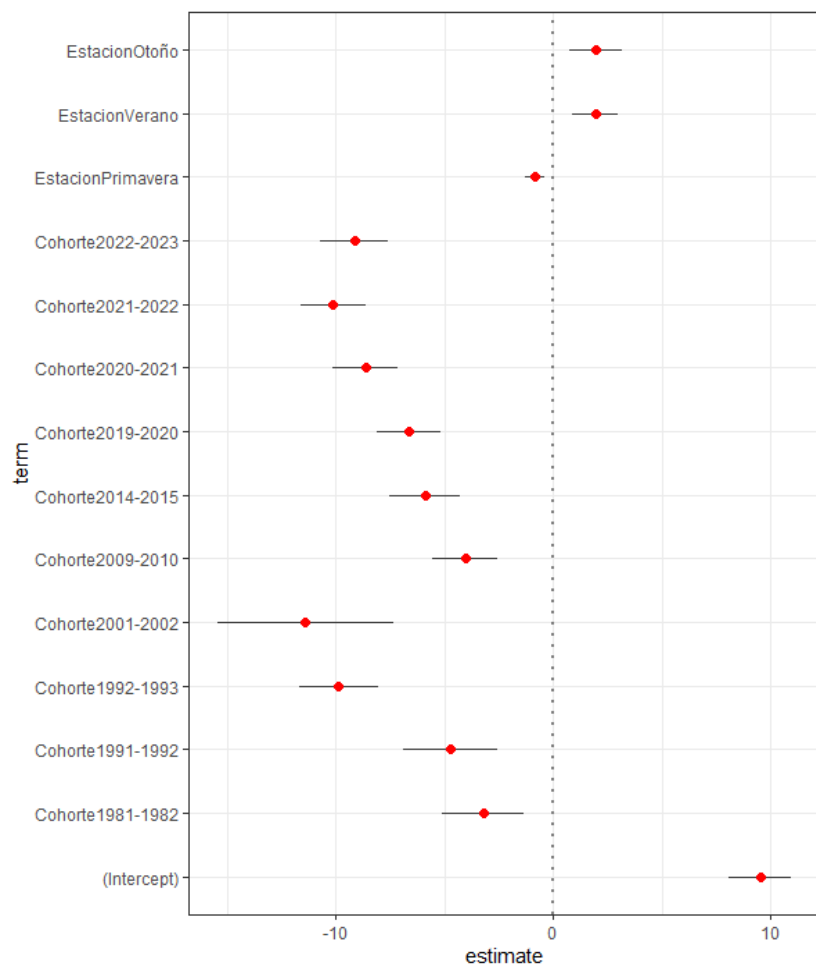
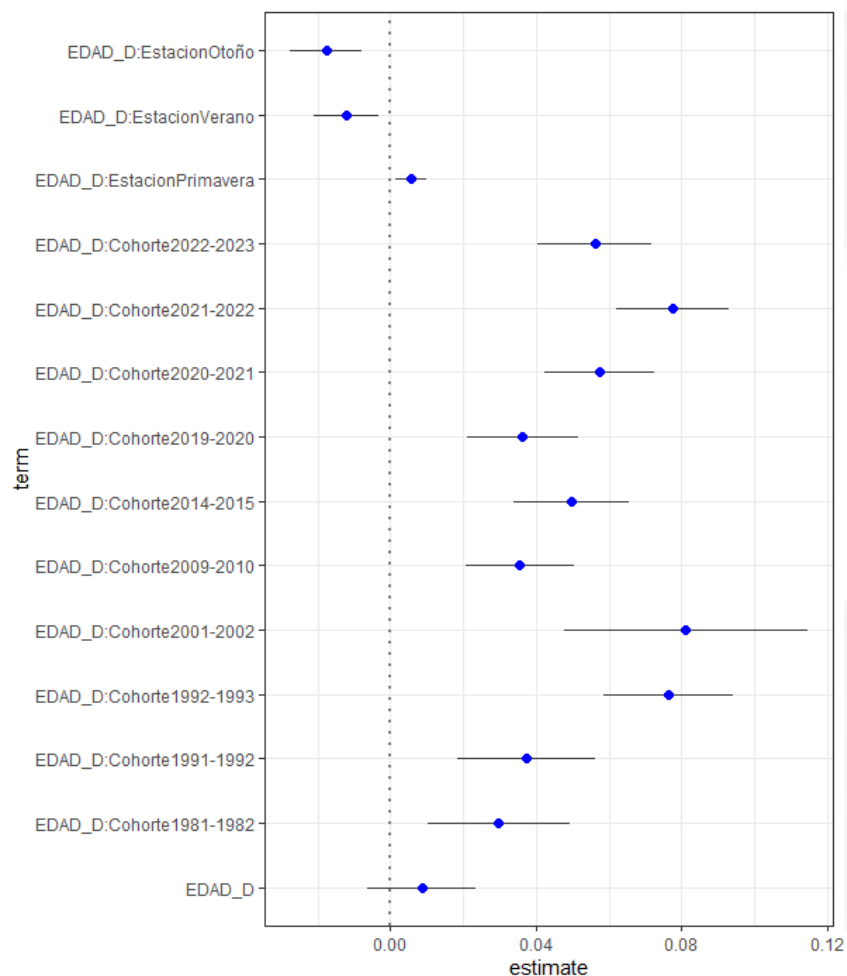


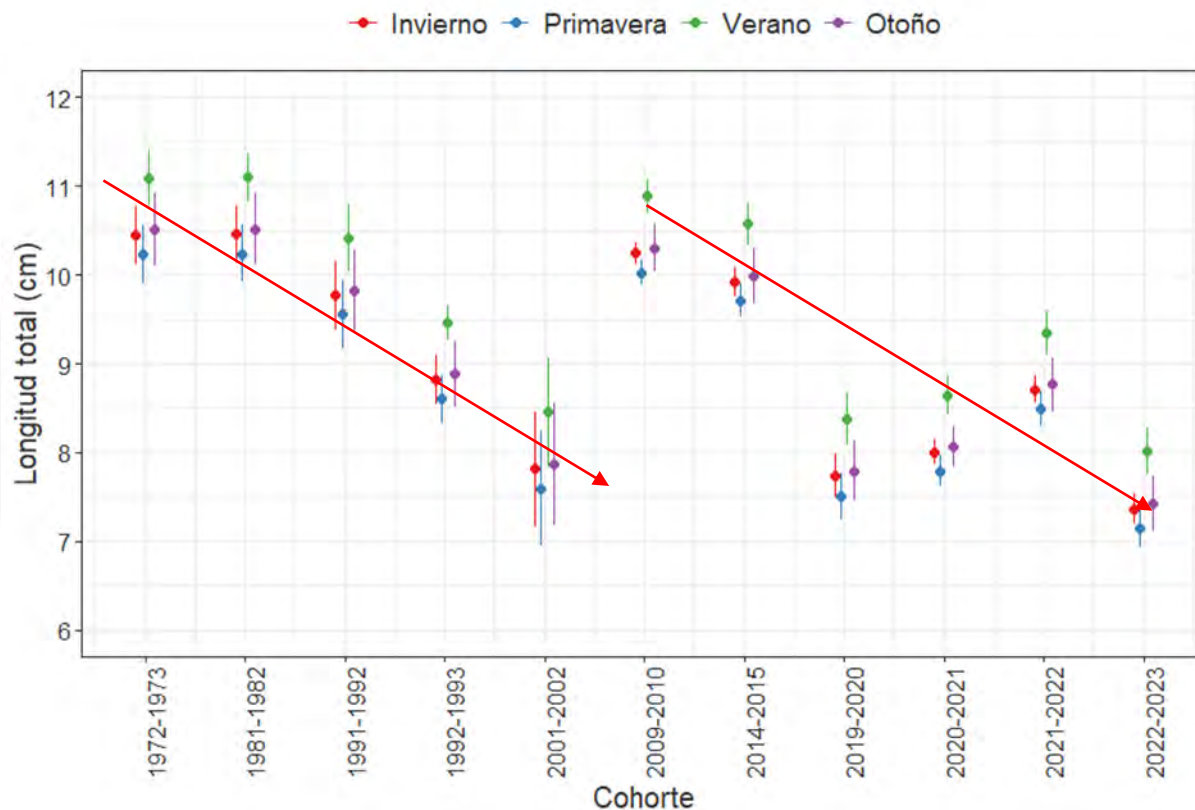
Gráfico muestra los diferenciales de las pendientes respecto a la estimación global de las variables explicativas cohorte y estación.



# Resultados

## Modelo GLM relación Edad-Talla

Longitud total media a la edad de 108 días estimadas a partir del modelo lineal generalizado para cada cohorte y estaciones. Las líneas verticales corresponden al intervalo al 95% de confianza.

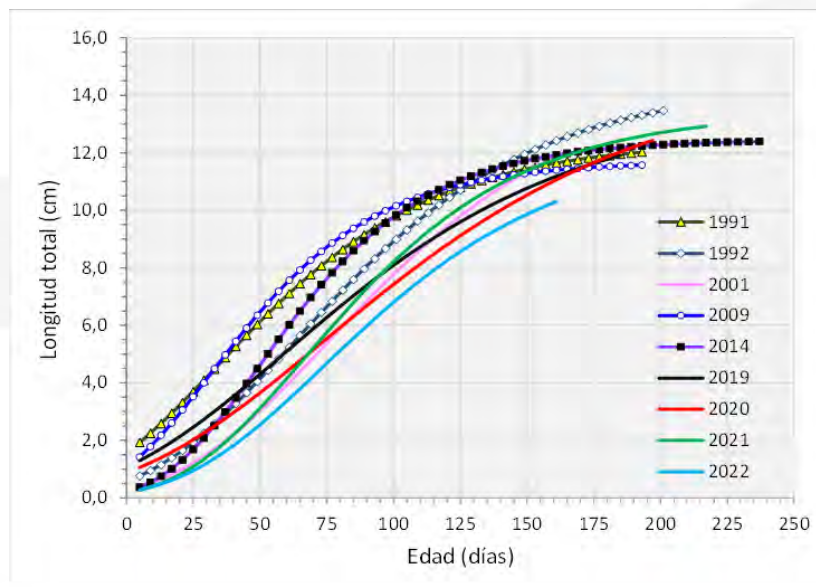




Parámetros de crecimiento del modelo Laird-Gompertz que ajusta la relación edad-talla de anchoveta por cohorte. Se muestra el valor de cada parámetro con su error estándar (EE), el nivel de significancia ( $P_{valor}$ ), el coeficiente de determinación de cada ajuste ( $R^2$ ) y el número de pares de datos utilizados ( $n$ )

Cohorte	parámetro	Valor	EE	$P_{valor}$	Cohorte	parámetro	Valor	EE	$P_{valor}$
1991-1992	$L_{\infty}$	12,420	0,477	< 2e-16	1992-1993	$L_{\infty}$	14,455	0,7243	<2e-16
	$\alpha$	0,022	0,007	0,00291		$\alpha$	0,019	0,0033	1,58e-07
	$X_0$	33,880	1,726	0,05243		$X_0$	61,740	2,6989	<2e-16
	$R^2$	0,47				$R^2$	0,88		
	$n$	143				$n$	78		
2001-20102	$L_{\infty}$	14,647	2,994	5,5e-10	2009-2010	$L_{\infty}$	11,70	0,21	< 2e-16
	$\alpha$	0,018	0,011	0,00194		$\alpha$	0,028	0,00	8,86e-12
	$X_0$	75,129	4,254	< 2e-16		$X_0$	31,47	4,40	8,43e-12
	$R^2$	0,78				$R^2$	0,67		
	$n$	85				$n$	264		
2014-2015	$L_{\infty}$	12,46	0,20	< 2e-16	2019-2020	$L_{\infty}$	13,65	0,76	< 2e-16
	$\alpha$	0,028	0,00	6,75e-13		$\alpha$	0,016	0,00	6,33e-12
	$X_0$	49,72	4,24	< 2e-16		$X_0$	59,12	3,37	< 2e-16
	$R^2$	0,73				$R^2$	0,86		
	$n$	190				$n$	143		
2020-2021	$L_{\infty}$	14,83	0,853	<2e-16	2021-2022	$L_{\infty}$	13,43	0,502	<2e-16
	$\alpha$	0,014	0,001	<2e-16		$\alpha$	0,022	0,002	<2e-16
	$X_0$	73,94	4,035	<2e-16		$X_0$	67,44	1,985	<2e-16
	$R^2$	0,99				$R^2$	0,92		
	$n$	263				$n$	143		
2022-2023	$L_{\infty}$	12,361	1,757	5,5e-10					
	$\alpha$	0,019	0,006	0,00194					
	$X_0$	73,546	6,085	< 2e-16					
	$R^2$	0,78							
	$n$	85							

Curvas medias de la relación edad-longitud total de anchoveta estimadas a partir del modelo Laird-Gompertz para cada una de las cohortes analizadas



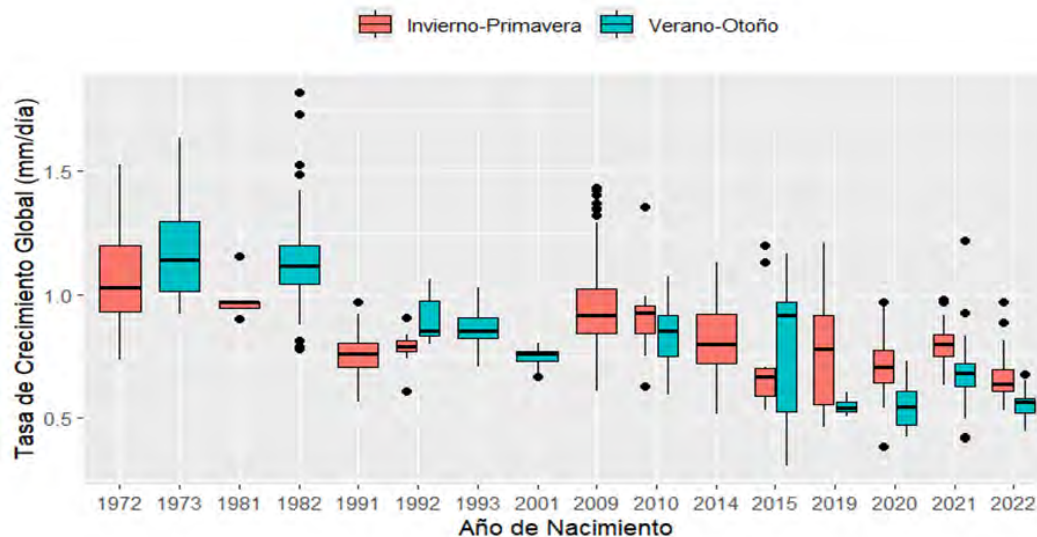
Estadísticas generales de la tasa de crecimiento global, obtenidas mediante análisis microestructural de otolitos, de reclutas, pre-reclutas y adultos de anchoveta (*Engraulis riengens*) de forma combinada, en el norte de Chile.

Cohorte	Media $\pm$ DE	Rango	CV	N
1972	1.08 $\pm$ 0.21	0.73 - 1.53	19.26	23
1973	1.20 $\pm$ 0.24	0.92 - 1.63	20.01	21
1981	0.99 $\pm$ 0.10	0.90 - 1.15	9.77	5
1982	1.14 $\pm$ 0.20	0.78 - 1.82	17.88	51
1990	0.78 $\pm$ 0.04	0.70 - 0.88	5.07	29
1991	0.76 $\pm$ 0.08	0.57 - 0.97	9.94	113
1992	0.82 $\pm$ 0.10	0.61 - 1.06	12.17	29
1993	0.85 $\pm$ 0.07	0.70 - 1.03	7.94	56
2001	0.75 $\pm$ 0.03	0.67 - 0.80	4.31	31
2009	0.95 $\pm$ 0.17	0.61 - 1.44	17.74	182
2010	0.84 $\pm$ 0.13	0.59 - 1.36	15.32	92
2014	0.81 $\pm$ 0.13	0.52 - 1.13	15.65	178
2015	0.90 $\pm$ 0.20	0.31 - 1.64	22.62	122
2018	0.40 $\pm$ 0.09	0.27 - 0.57	22.77	17
2019	0.73 $\pm$ 0.18	0.30 - 1.21	24.20	173
2020	0.65 $\pm$ 0.11	0.39 - 0.97	17.29	226
2021	0.71 $\pm$ 0.11	0.42 - 1.22	14.94	281
2022	0.66 $\pm$ 0.12	0.45 - 0.99	17.49	115
Total	0.788 $\pm$ 0.1905	0.2661 - 1.82	24.18	1744

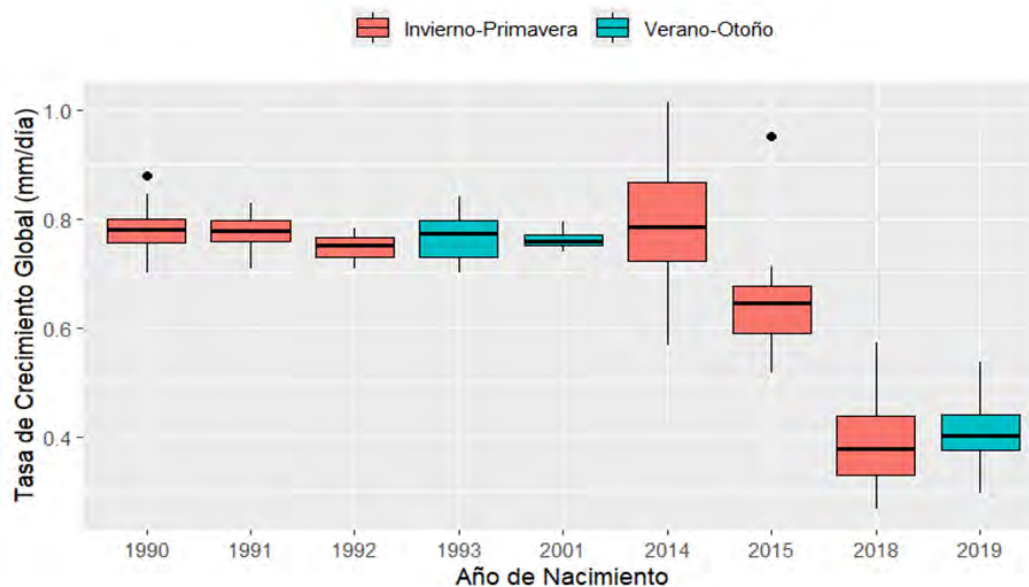


# Resultados

## Tasa de Crecimiento Global (TCG)



cambios en las tendencias centrales, magnitudes y rangos la tasa de crecimiento global de ejemplares **reclutas de anchoveta** (*Engraulis ringens*), nacidos en las estaciones de invierno y primavera y verano-otoño, en el norte de Chile.



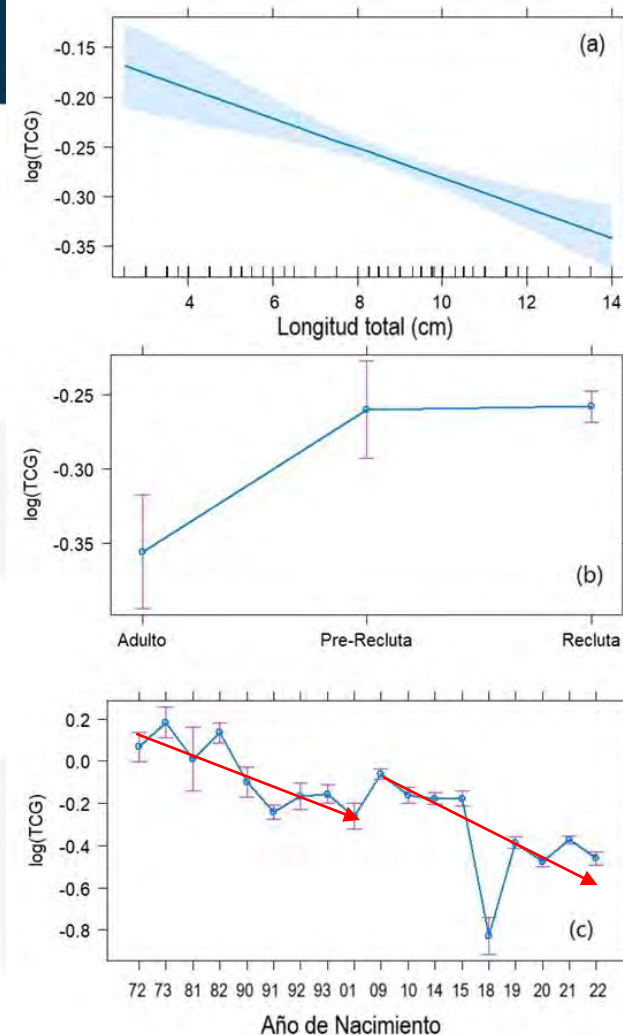
cambios en las tendencias centrales, magnitudes y rangos la tasa de crecimiento global de ejemplares **adultos de anchoveta** (*Engraulis ringens*), nacidos en las estaciones de invierno y primavera y verano-otoño, en el norte de Chile.

# Resultados

## GLM Tasa de Crecimiento Global

Resumen de los coeficientes estimados y sus niveles de variación de un Modelo Lineal General aditivo, ajustado a la TCG, con la longitud de los ejemplares de anchoveta usada como covariable y la cohorte de nacimiento y estado ontogenético usados como efectos fijos. EE: 1 error estándar; NG: Códigos de significancia (0 '\*\*\*\*' 0,00; 1 '\*\*\*' 0,01; \*' 0,05 ' ' 0,1). AIC: -1179

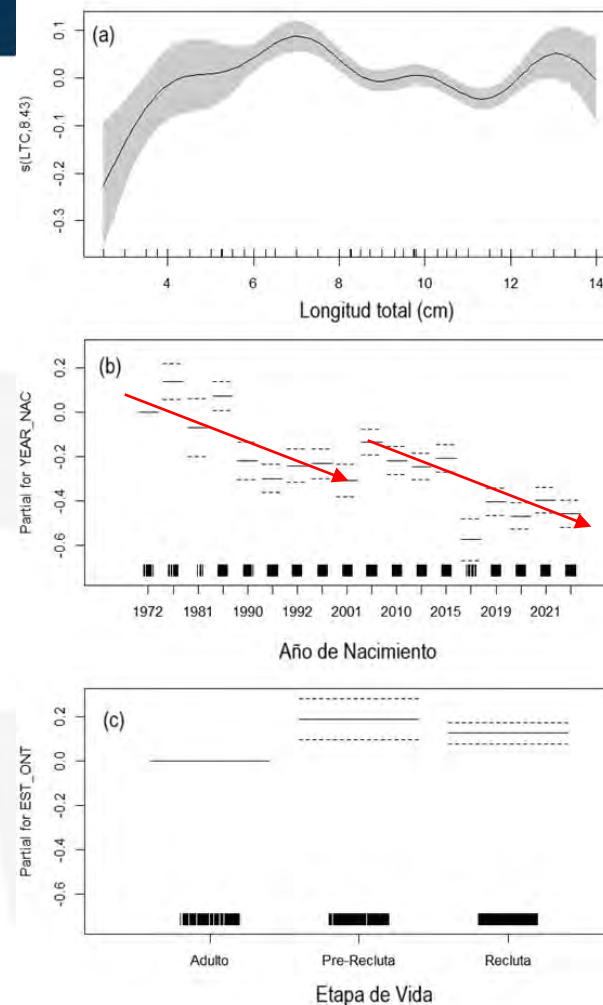
Coefficientes	Estimado	EE	Valor-t	Pr(> t )	NG
Interceptto	0.114	0.057	2.005	0.0452	*
LT	-0.015	0.003	-4.617	0.0000	***
Pre-reclutas	0.096	0.030	3.16	0.0016	**
Reclutas	0.098	0.020	4.906	0.0000	***
1973	0.116	0.052	2.246	0.0248	*
1981	-0.055	0.085	-0.653	0.5136	
1982	0.068	0.043	1.585	0.1131	
1990	-0.165	0.051	-3.207	0.0014	**
1991	-0.306	0.040	-7.747	0.0000	***
1992	-0.234	0.048	-4.873	0.0000	***
1993	-0.223	0.043	-5.24	<0.001	***
2001	-0.328	0.047	-6.948	0.0000	***
2009	-0.128	0.038	-3.37	0.000769	***
2010	-0.229	0.040	-5.715	1.29E-08	***
2014	-0.245	0.038	-6.39	2.13E-10	***
2015	-0.243	0.040	-6.033	1.97E-09	***
2018	-0.894	0.058	-15.373	< 2e-16	***
2019	-0.454	0.039	-11.648	< 2e-16	***
2020	-0.543	0.038	-14.347	< 2e-16	***
2021	-0.440	0.037	-11.769	< 2e-16	***
2022	-0.527	0.040	-13.278	< 2e-16	***



Gráficas de los efectos derivados de un modelo lineal general (GLM). Los paneles representan los residuos parciales de la TCG respecto a: (a) la longitud como variable predictora, (área gris= intervalo de confianza al 95%); (b) los tres estados ontogenéticos considerados y (c) los 13 años con disponibilidad de registro disponibles hasta la fecha.

Resumen de los coeficientes estimados y sus niveles de variación de un Modelo Aditivo Generalizado (GAM), ajustado a la TCG, con la longitud de los ejemplares de anchoveta usada como covariable y la cohorte de nacimiento y estado ontogenético usados como efectos fijos. EE: 1 error estándar; NG: Códigos de significancia (0 '\*\*\*' 0,00; 1 '\*\*' 0,01; \*' 0,05 '/' 0,1). AIC: -2071.24.

Coefficientes	Estimado	EE	Valor-t	Pr(> t )	NG
Interceptto	0.9612	0.03628	26.491	< 2e-16	***
Pre-reclutas	0.1885	0.04655	4.05	5.36E-05	***
Reclutas	0.1268	0.02364	5.362	9.32E-08	***
1973	0.1402	0.04054	3.457	0.000559	***
1981	-0.0682	0.0658	-1.036	0.300345	*
1982	0.0743	0.03347	2.22	0.026531	*
1990	-0.2162	0.04221	-5.123	3.35E-07	***
1991	-0.2970	0.03102	-9.574	< 2e-16	***
1992	-0.2405	0.03748	-6.418	1.78E-10	***
1993	-0.2312	0.03339	-6.924	6.20E-12	***
2001	-0.3056	0.03668	-8.331	< 2e-16	***
2009	-0.1330	0.02956	-4.499	7.29E-06	***
2010	-0.2160	0.03143	-6.874	8.72E-12	***
2014	-0.2431	0.03012	-8.07	1.31E-15	***
2015	-0.20607	0.03156	-6.53	8.65E-11	***
2018	-0.5731	0.04643	-12.344	< 2e-16	***
2019	-0.40233	0.03047	-13.203	< 2e-16	***
2020	-0.4668	0.02965	-15.741	< 2e-16	***
2021	-0.39394	0.02911	-13.533	< 2e-16	***
2022	-0.45592	0.03096	-14.727	< 2e-16	***



Gráficas de los efectos derivados de un Modelo Aditivo Generalizado (GAM). Los paneles representan los residuos parciales de la TCG respecto a: (a) la longitud como covariable predictora (b), los 13 años con disponibilidad de registro disponibles hasta la fecha (b) y los tres estados ontogenéticos considerados (c).

- Se confirma la hipótesis donde planteamos que la disminución de la longitud media para la anchoveta de la zona norte, podría estar asociada con una disminución en el crecimiento somático.
- Los perfiles de grosores medios globales estandarizados, a través de un modelo aditivo generalizado, siguieron un patrón parabólico independiente de la cohorte estacional de nacimiento (i.e., verano, otoño, invierno o primavera), evidenciándose, un crecimiento sostenido para los primeros dos meses de vida, seguido de un decaimiento hacia el quinto mes de vida.
- Los índices de crecimiento derivados de modelos GLM de la relación talla edad a la fecha de captura, para peces entre 50 y 150 días de vida, mostró diferencias significativas entre las cohortes, con coeficientes que evidenciaron dos ciclos de disminución en productividad somática, uno desde 1972 hasta 2002 y otro entre 2009 hasta 2022.
- El primer periodo de caída de la longitud media se registró entre 1972-1973 a 2001-2002, donde la longitud media disminuye en 2,6 cm, en tanto que, en el segundo periodo, desde el 2009-2010 a 2022-2023, la longitud disminuye en 2,9 cm. Este hallazgo es coherente con la disminución en la tasa de crecimiento de anchoveta que se registró a través del ajuste Laird-Gompertz, para nueve cohortes analizadas entre 1991-1992 y 2022-2023
- Las tasas de crecimiento globales promedios evidenciaron una tendencia decreciente en las últimas dos décadas a nivel general, representado un 30% de disminución, siguiendo el mismo patrón, independiente de la etapa ontogenética (pre-reclutas, reclutas y adultos) y la estación de nacimiento.





*Gracias*

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO

## Taller de difusión de resultados del proyecto FIPA 2023-20

Resultados de modelación de la longitud  
de anchoveta y las condiciones del ambiente

Carola Hernandez<sup>1</sup>, Jessica Bonicelli<sup>2</sup>, Fabián Tapia<sup>3</sup>, Juan Carlos Saavedra-Nievas<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dpto. Evaluación de Pesquerías, División de Investigación Pesquera, IFOP.

<sup>2</sup>Dpto. de Oceanografía y Medio Ambiente, División de Investigación Pesquera, IFOP.

<sup>3</sup>Dpto. de Oceanografía & COPAS-Coastal, Universidad de Concepción.

<sup>4</sup>División de Investigación Pesquera, Instituto de Fomento Pesquero.

Mayo, 2025

## ➤ Objetivo Específico

## ➤ Metodología

- Modelo
- Covariables y Estrategia modelado

## ➤ Resultados

- Cohortes: 1972–2023
- Cohortes: 1981–2023
- Cohortes: 2001–2023
- Cohortes: 2009–2023

## ➤ Conclusiones



**Evaluar cómo factores  
ambientales y tróficos  
afectan el crecimiento  
de la anchoveta**



### **Modelado**

Aplicar modelos GAM  
integrando variables  
ambientales y de oferta  
alimentaria

# Metodología

## Modelo de la longitud total en función de:

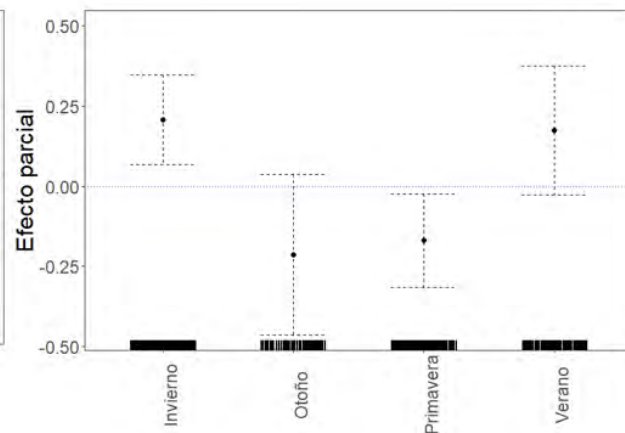
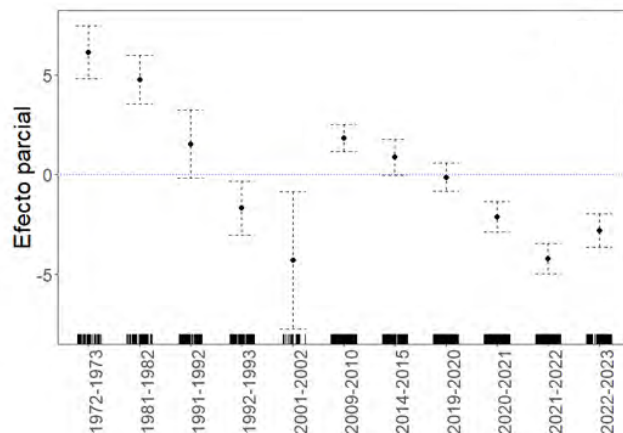
- ✓ Efectos paramétricos: edad (días), cohorte (11), estación del año (4) con la interacción edad-cohorte.
- ✓ Efectos no paramétricos: covariables (18) asociadas al ambiente (10) y alimento (8), incorporadas como efectos no lineales (suavizados).

## Covariables y criterios de modelado:

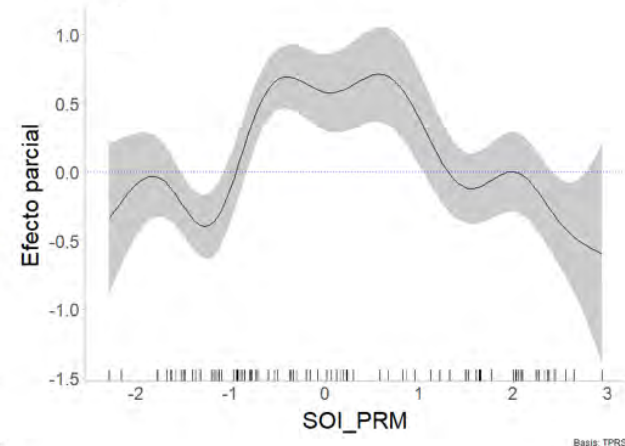
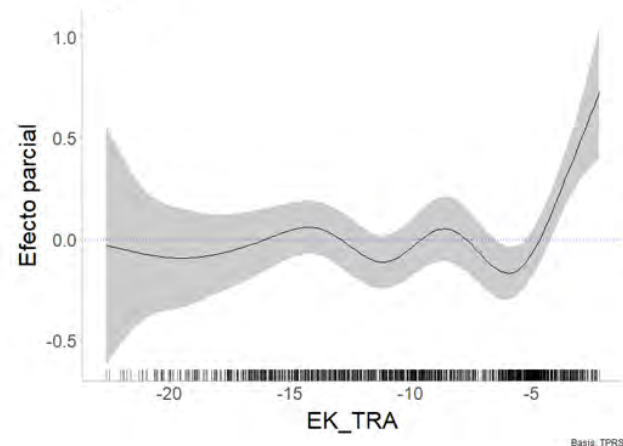
- ✓ **Ambiente:** Transporte y bombeo de Ekman, SOI, SAM, TSM (6); todos datos satelitales.
- ✓ **Alimentación:** Basados en indicadores del zooplancton (4) desde cruceros y la clorofila (4) datos satelitales.
- ✓ **Análisis de concurvidad** → selección de predictores significativos.
- ✓ Se usaron **4 periodos de cohortes** según disponibilidad de datos ambientales y de alimentación.

# Resultados

- Reducción sistemática de la longitud media desde 1972.
- Longitudes medias mayores en invierno y verano.
- Condiciones neutras del SOI y baja surgencia favorecen crecimiento.
- Devianza explicada 90% (Edad, cohorte, Ekman, SOI)

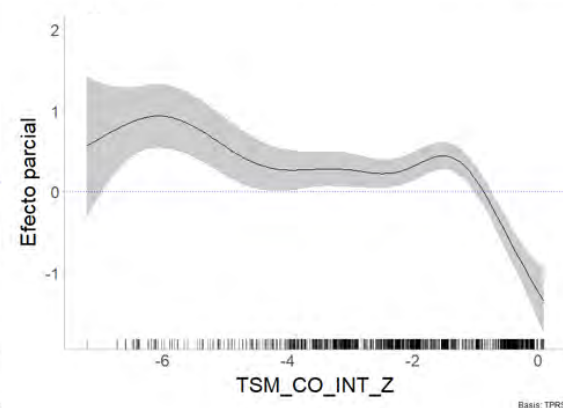
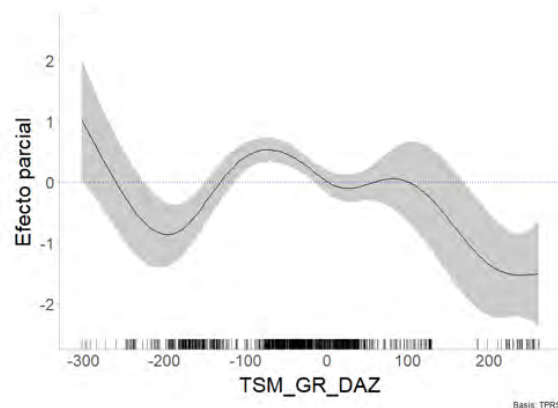
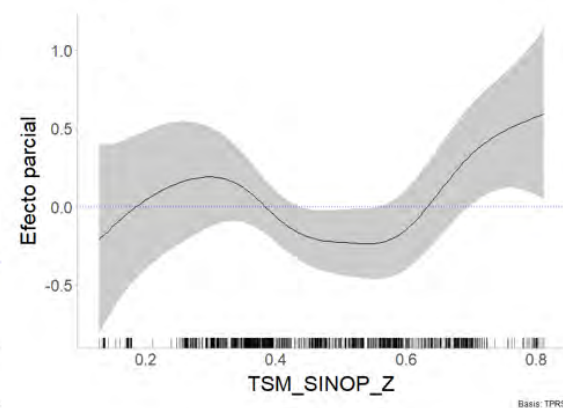
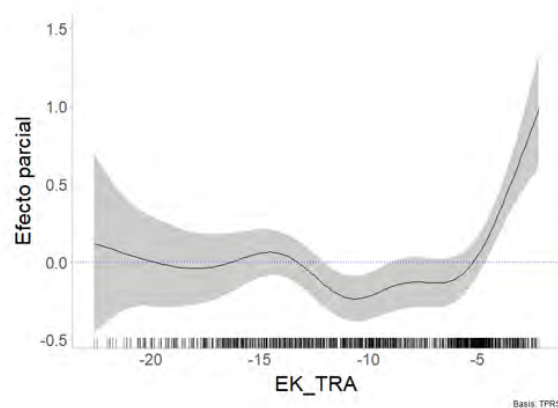


Término	Pseudo-R2	% Explic.
EDAD_D:CH_	0,282	31,4 %
EDAD_D	0,188	20,9 %
CH_	0,181	20,1 %
s(SOI_PRM)	0,106	11,7 %
s(EK_TRA)	0,095	10,6 %
ESTACION	0,048	5,3 %
Total	0,900	100,0 %



- Mayor crecimiento con mayor amplitud de oscilaciones de TSM y condiciones de surgencia más intensas.
- Devianza explicada por el modelo: 91%

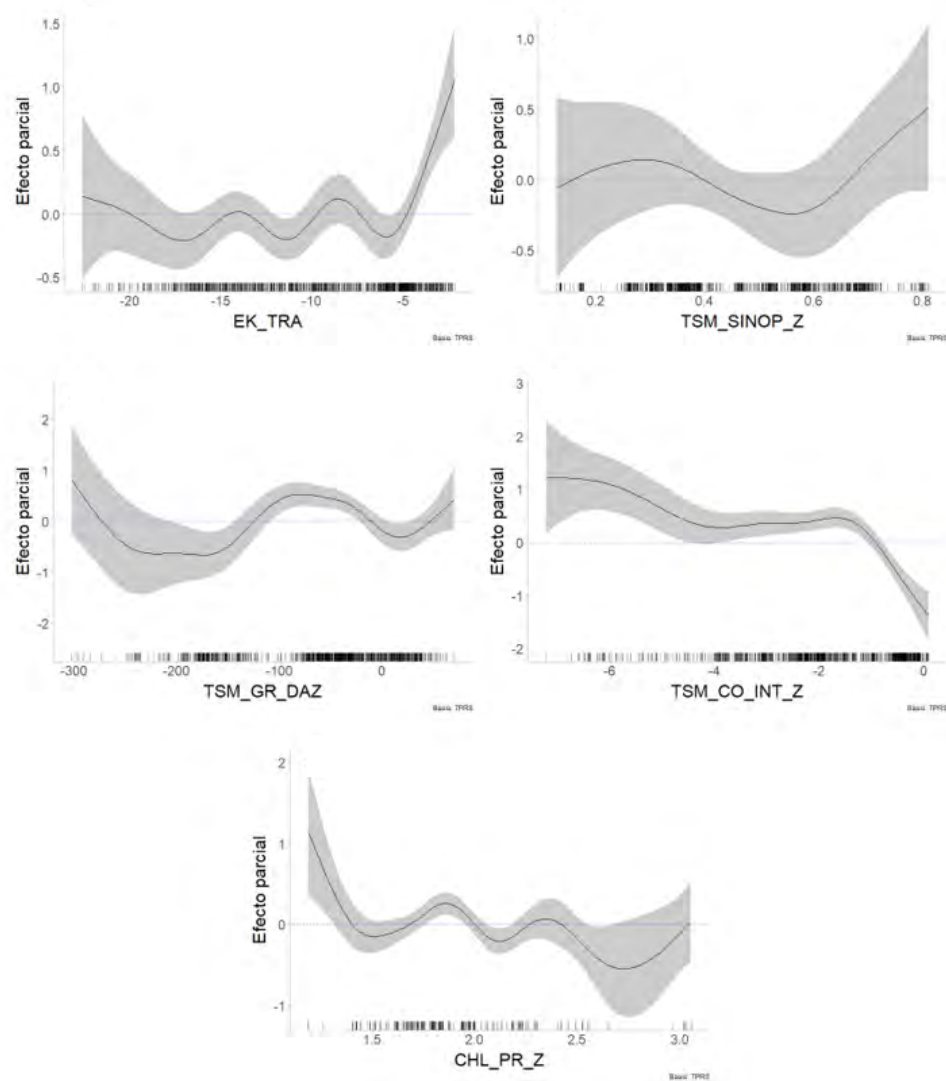
Término	Pseudo-R2	% Explic.
EDAD_D:CH_	0,246	27,0 %
EDAD_D	0,172	18,9 %
CH_	0,153	16,8 %
s(EK_TRA)	0,100	11,0 %
s(TSM_SINOP_Z)	0,066	7,3 %
s(TSM_GR_DAZ)	0,065	7,2 %
s(TSM_CO_INT_Z)	0,061	6,6 %
ESTACION	0,048	5,3 %
Total	0,911	100,0 %





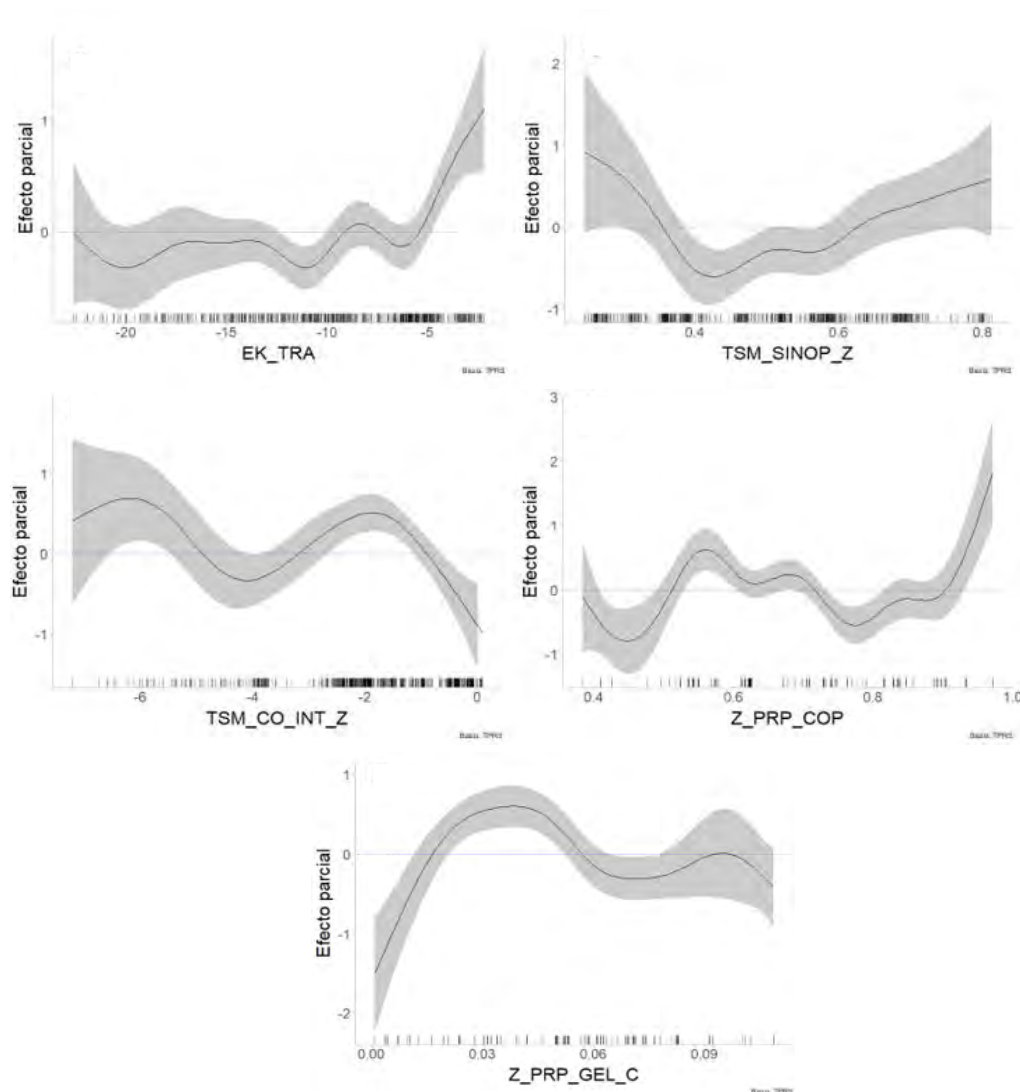
- Algunas métricas de clorofila no son significativas.
- Efectos positivos en ciertos rangos de clorofila.
- Devianza explicada por el modelo: 92%

Término	Pseudo-R2	% Explic.
EDAD_D:CH_	0,216	23,6 %
EDAD_D	0,166	18,0 %
CH_	0,117	12,8 %
s(EK_TRA)	0,111	12,1 %
s(TSM_SINOP_Z)	0,076	8,2 %
s(TSM_GR_DAZ)	0,069	7,5 %
s(TSM_CO_INT_Z)	0,060	6,5 %
ESTACION	0,056	6,1 %
s(CHL_PR_Z)	0,047	5,1 %
Total	0,917	100,0 %



- Proporción de copépodos y gelatinosos carnívoros favorecen el crecimiento.
- Clorofila y la estación dejaron de ser significativa en este modelo.
- Devianza explicada por el modelo: 92%

Término	Pseudo-R2	% Explic.
EDAD_D:CH_	0,213	22,7 %
EDAD_D	0,180	19,2 %
CH_	0,126	13,4 %
s(EK_TRA)	0,113	12,0 %
s(Z_PRP_GEL_C)	0,096	10,2 %
s(TSM_SINOP_Z)	0,079	8,4 %
s(Z_PRP_COP)	0,072	7,6 %
s(TSM_CO_INT_Z)	0,063	6,7 %
Total	0,941	100,0 %



- ✓ Modelos con alto grado de explicación (90% - 94%)
- ✓ Condiciones ambientales y tróficas explican entre 30% y un 45% de la variabilidad total.
- ✓ Los cambios en la longitud media de la anchoveta en la zona fueron explicados principalmente por:
  - Los efectos paramétricos de la edad y la corte de nacimiento.
  - Los indicadores de procesos de surgencia como el índice de transporte Ekman, indicadores de temperatura y oferta alimentaria.



**Gracias por su atención**

**División de Investigación Pesquera**



$$LT_{ijk} = EfP_{ijk} + \sum_{m=1}^p EfS_m + \varepsilon_{ijk}$$

Efectos paramétricos →  $EfP_{ijk} = \beta_0 + \beta_1(edad_{ijk}) + \beta_j(edad_{ijk} * Coh_j) + Coh_j + E_k$

Cohorte      Estación del año  
↓                    ↓

Variables ambientales o de alimento  
↓

Efectos no paramétricos →  $EfS_m = S_m(V_m)$

Error Aleatorio → Normal (identidad)

F	V base	Código	Definición
Cruceros	Zooplankton (4)	Z_PEND	<b>Pendiente de distribución de tamaños del zooplancton</b> durante el periodo de vida del pez y la zona respectiva.
		Z_A_PRM	<b>Abundancia promedio de la abundancia total</b> durante el periodo de vida y la zona respectiva.
		Z_PRP_COP	<b>Proporción de copépodos</b> durante el periodo de vida del pez y la zona respectiva.
		Z_PRP_GEL_C	<b>Proporción de gelatinosos carnívoros</b> (medusas, quetognatos y ctenóforos) durante el periodo de vida del pez y la zona respectiva.
Satelital	Clorofila (4)	CHL_PR_Z	<b>Clorofila promedio</b> para cada periodo y <b>zona</b> respectiva.
		CHL_PR_T	<b>Clorofila promedio</b> para cada periodo y <b>área total</b> evaluada.
		CHL_AC_Z	<b>Clorofila acumulada</b> para cada periodo y <b>zona</b> respectiva.
		CHL_AC_T	<b>Clorofila acumulada</b> para cada periodo y <b>área total</b> evaluada.

F	V base	Código	Definición
Satelital	Bom. Ekman	EK_PUM	<b>Valor acumulado de bombeo de Ekman</b> , para el periodo y zona respectiva. Valores positivos indican afloramiento de agua por bombeo de Ekman.
	Trans. Ekman	EK_TRA	<b>Suma de valores diarios para el transporte de Ekman</b> (en Sverdrups) durante el periodo y la zona respectiva. Valores negativos indican upwelling.
	Índ. Osc. del sur	SOI_PRM	<b>Promedio de valores mensuales del índice de oscilación del sur</b> , para el periodo correspondiente. Valores negativos indican El Niño. En serie mensual se usa -7 como umbral (límite superior) para definir condición Niño.
	Vientos h. s. Índ. Mov.	SAM_PRM	<b>Promedios de valores mensuales del índice de movimiento de los vientos del oeste en el hemisferio sur</b> para el periodo correspondiente. Valores positivos/negativos del SAM indican vientos zonales más débiles/fuertes en la franja de 40-65 grados sur.



F	V base	Código	Definición
Satelital	Temperatura superficial (6)	TSM_SINOP_Z	Medida de la <b>amplitud de las oscilaciones de escala sinóptica en la temperatura superficial del mar</b> para el periodo y la zona respectiva. Mientras mayor el valor, mayores las oscilaciones.
		TSM_SINOP_T	Medida de la <b>amplitud de las oscilaciones de escala sinóptica en la temperatura superficial del mar</b> para el periodo y el <b>área total</b> evaluada. Mientras mayor el valor, mayores las oscilaciones.
		TSM_GR_DA_Z	<b>Suma de las anomalías de la temperatura superficial del mar</b> durante cada periodo y zona.
		TSM_GR_DA_T	<b>Suma de las anomalías de la temperatura superficial del mar</b> durante cada periodo y <b>área total</b> evaluada.
		TSM_CO_INT_Z	<b>Suma del índice de enfriamiento superficial</b> para cada periodo y <b>zona</b> respectiva. Mientras menor será el valor, más intensa la surgencia en ese periodo y zona.
		TSM_CO_INT_T	<b>Suma del índice de enfriamiento superficial</b> para cada periodo y <b>área total</b> . Mientras menor será el valor, más intensa la surgencia en ese periodo y área total evaluada.



# Balance de la información ambiental y de oferta alimenticia

1. Entre 1972 y 2023

EK\_TRA; EK\_PUM;  
SOI\_PRM y SAM\_PRM

2. Entre 1981 y 2023

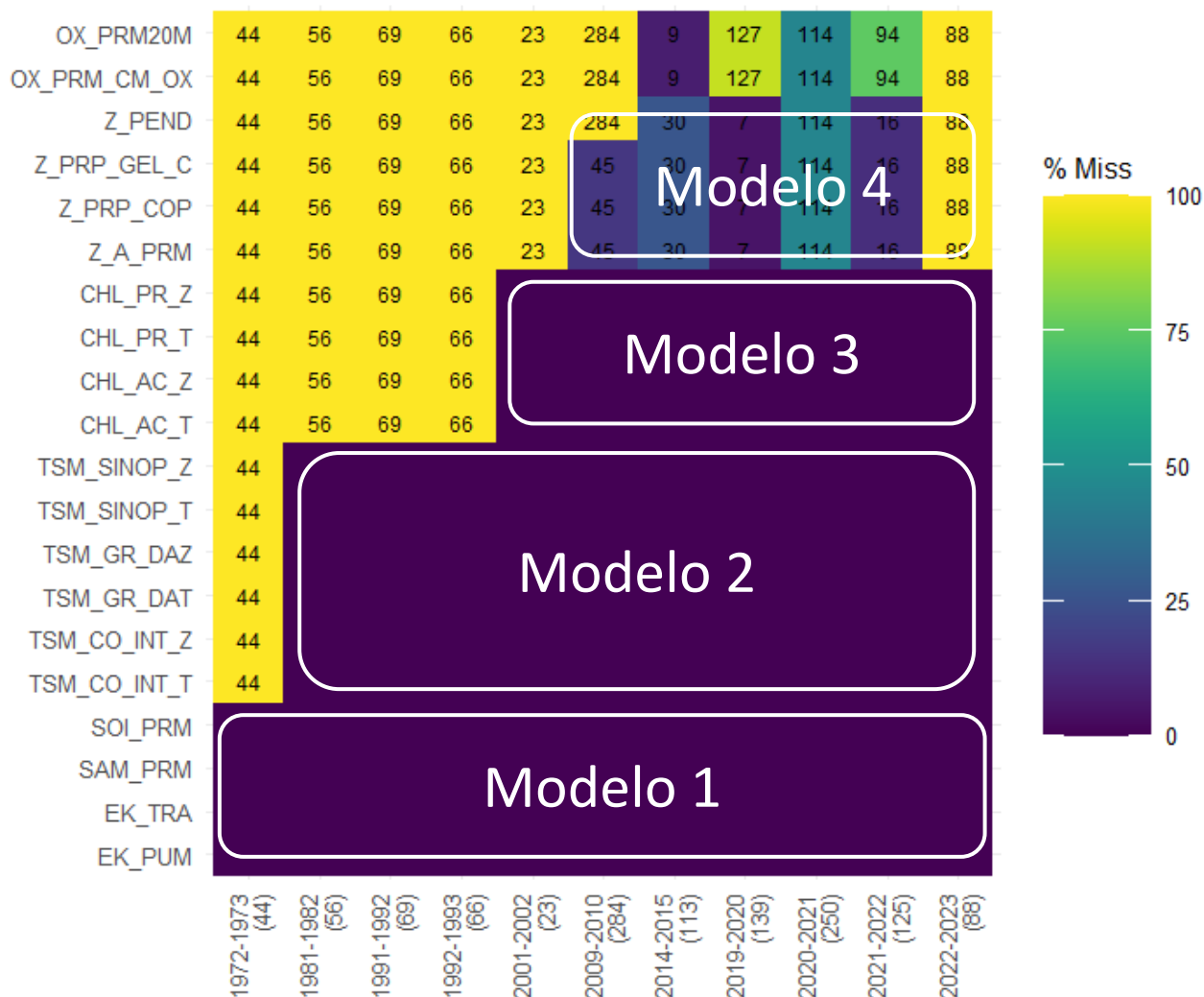
EK\_TRA; SOI\_PRM y TSM(6)

3. Entre 2001 y 2023

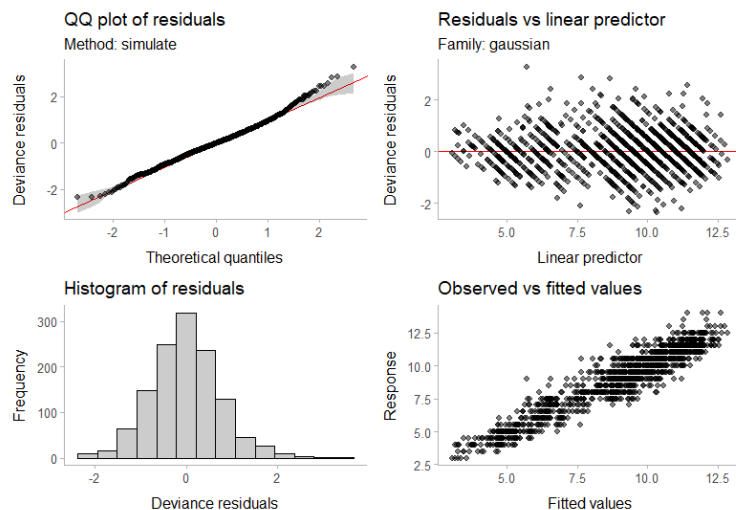
EK\_TRA; TSM\_SINOP\_Z;  
TSM\_GR\_DAZ;  
TSM\_CO\_INT\_Z y CHL(4)

4. Entre 2009 y 2023

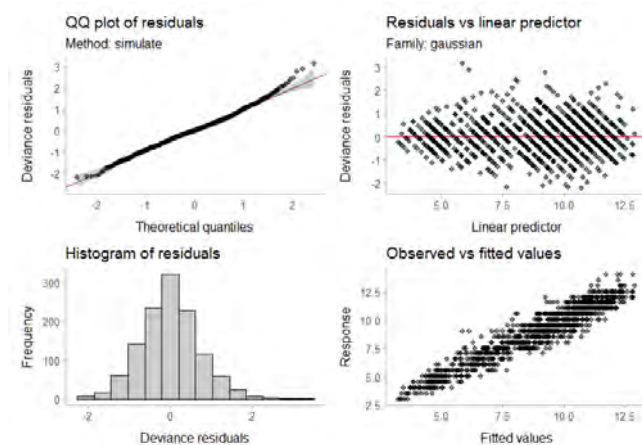
EK\_TRA; TSM\_SINOP\_Z;  
TSM\_CO\_INT\_Z; CHL\_PR\_Z  
y Zoo(4)



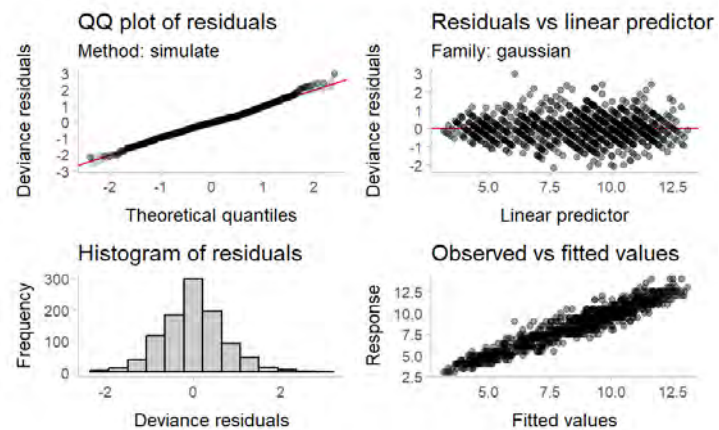
## Cohortes entre 1972 y 2023



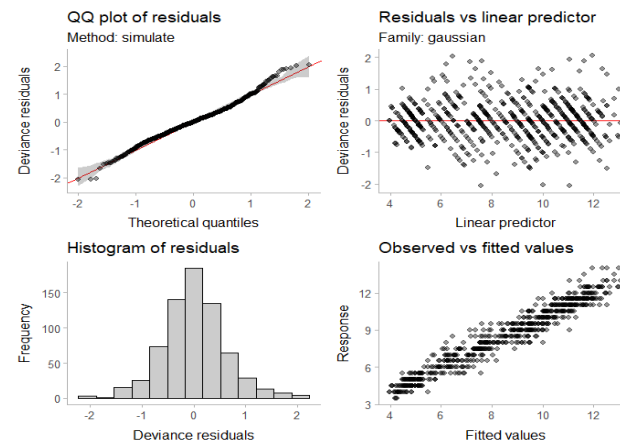
## Cohortes entre 1981 y 2023



## Cohortes entre 2001 y 2023



## Cohortes entre 2009 y 2023





INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO

---

## **PROYECTO FIPA 2023-020**

**“DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES  
CAUSANTES DE LOS CAMBIOS  
ESTRUCTURALES DE LA POBLACIÓN DE  
ANCHOVETA DE LA ZONA NORTE EN EL  
PERIODO RECIENTE Y SUS IMPLICANCIAS”**

Autor: Carola Hernández Santoro

Marzo, 2025

# Resultados PROYECTO FIPA 2023-020

“DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES CAUSANTES DE LOS CAMBIOS ESTRUCTURALES DE LA POBLACIÓN DE ANCHOVETA DE LA ZONA NORTE EN EL PERIODO RECIENTE Y SUS IMPLICANCIAS”



Equipo de Trabajo

Jessica Bonicelli Proaño  
(IFOP)



Naití Morales Serrano  
(IFOP)



Carola Hernández Santoro  
(IFOP)



Francisco Cerna Troncoso  
(IFOP)



Guido Plaza Pastén  
(PUCV)



Juan Carlos Saavedra  
Nievas (IFOP)



Fabián Tapia Jorquera  
(UDEC)



Jorge Castillo Pizarro  
(IFOP)





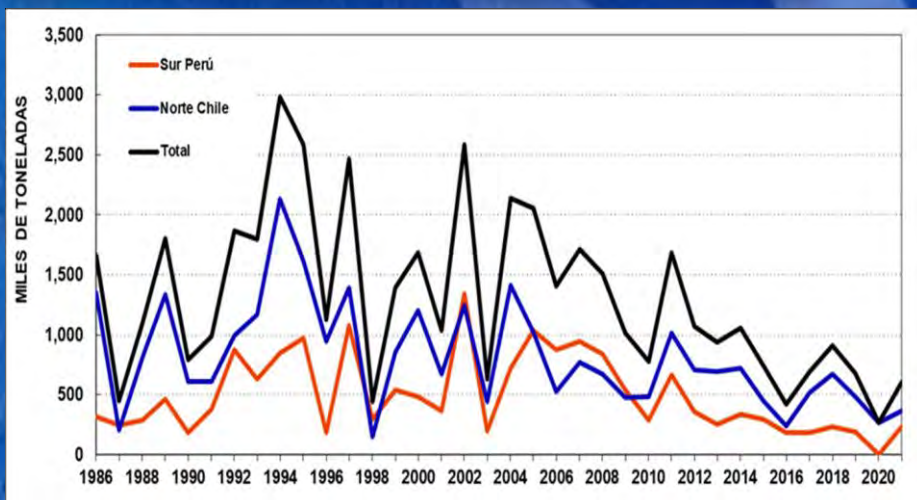
# TABLA DE CONTENIDO

1. Antecedentes
2. Hipótesis
3. Objetivos
4. Resultados del proyecto FIPA 2023-20
5. Recomendaciones
6. Conclusiones



- La anchoveta (*Engraulis ringens*) es una especie pelágico-costera.
- Se distribuye desde el norte de Perú (4°30' S) hasta el sur de Chile (42°30' S)
- De gran importancia ecológica y económica en el sistema de la corriente de Humboldt.
- Altamente susceptible a cambios ambientales.

### Capturas del stock entre Chile – Perú 1986 – 2021



### Área de estudio

Norte de Chile (18°21' a 24°S) parte del stock compartido (Chile -Perú)

Stock	1986-2005	2007-2015
Sur de Perú (*)	570 mil t	369 mil t
Norte de Chile (**)	1 millón t	568 mil t
Total	1,6 millón t	967 mil t

Fuente: IMARPE (\*) e IFOP (\*\*)

El área norte de Chile representa las mayores capturas.





# PRINCIPALES CAMBIOS DE LA PESQUERÍA DE ANCHOVETA

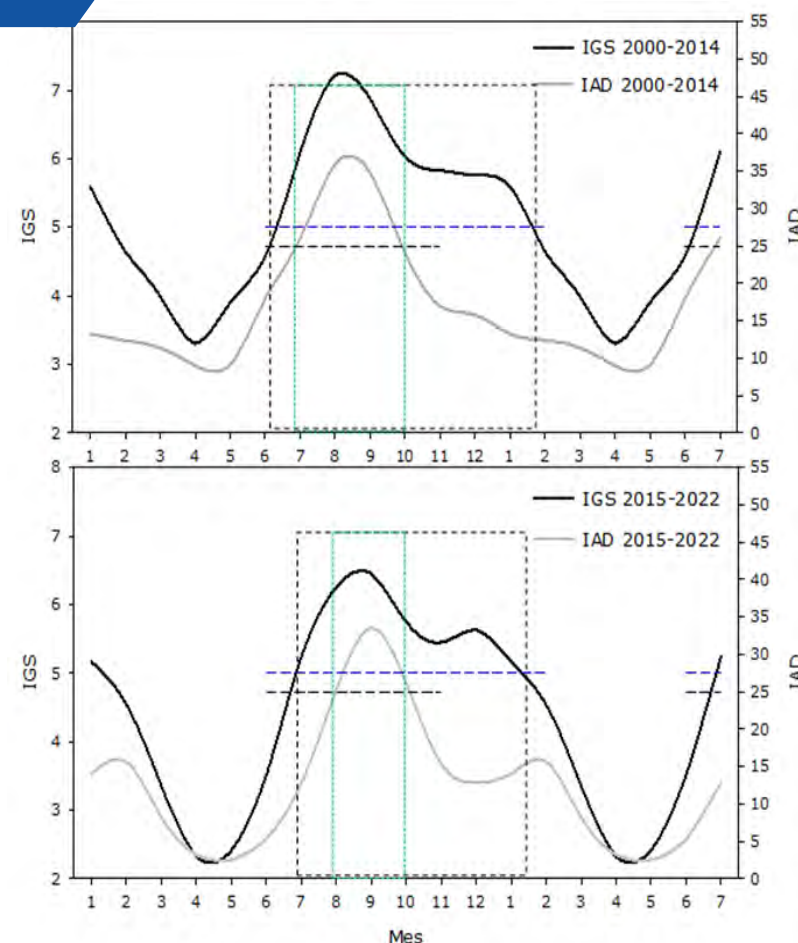
## ZONA NORTE (Monitoreo de la flota)



1. Tendencia decreciente del stock de anchoveta durante la últimas décadas, medida a través de los desembarques.
2. Distribución de las capturas, reducción en la ocupación del espacio y una mayor concentración en áreas costeras.
3. Disminución de la talla media de anchoveta, asociado con la reducción en la proporción de ejemplares mayores a 16,0 cm LT y un aumento de los individuos juveniles ( $\leq 11,5$  cm LT) en las capturas (Hernández-Santoro *et al.*, 2019a).
4. En la actividad reproductiva, aumento en la participación de individuos entre 12,5 y 13,5 cm LT que habitualmente no participan del proceso reproductivo (Hernández-Santoro *et al.*, 2019a).
5. En el patrón de reclutamiento de la anchoveta.
6. Tendencias negativas en el peso medio y factor de condición.



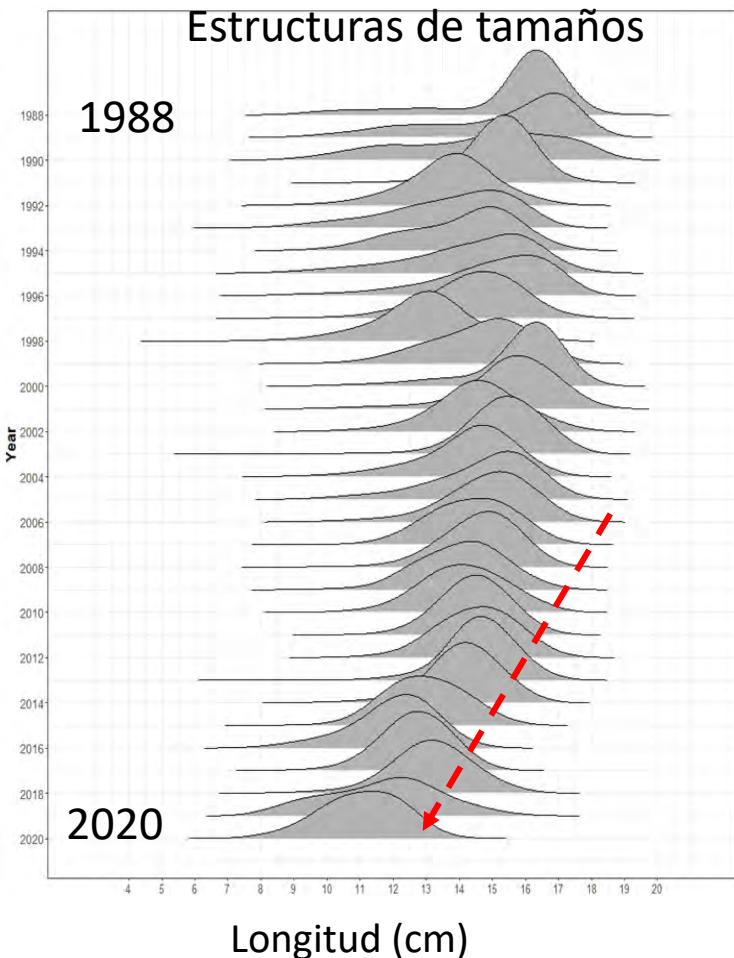
- Desfase del pico de desove de agosto a septiembre/octubre, explicado en un 40% por un desfase en la estacionalidad de la temperatura en la zona (Hernandez-Santoro et al., 2019b).
- Disminución en la duración del proceso de desove, asociado con hembras mas pequeñas que inician después y terminan antes.
- En la actividad reproductiva predomina el grupo de ejemplares entre 12,0 y 13,5 cm LT (Hernandez-Santoro et al., 2019).



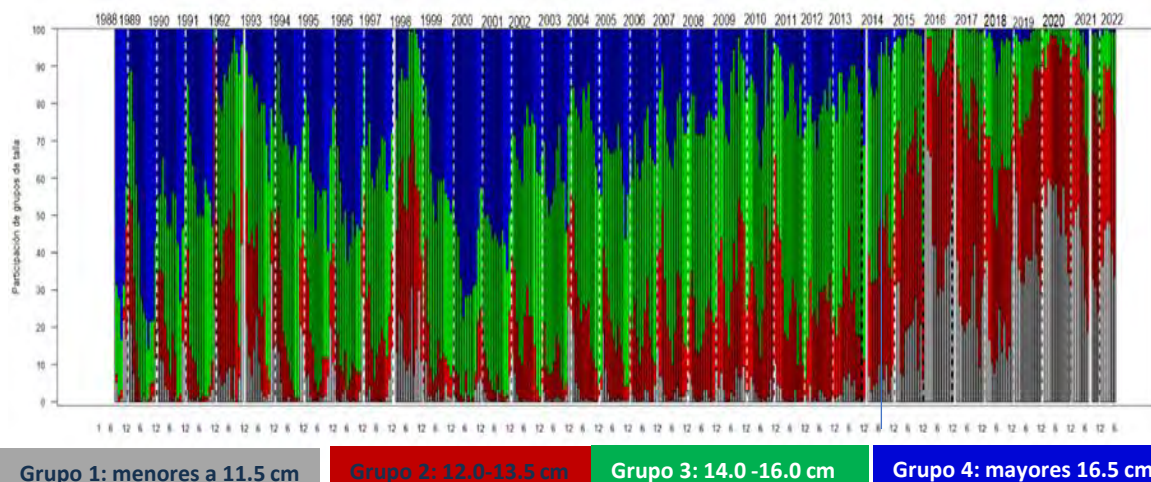
- La talla media de madurez disminuyó de 11,5 a 9 y 10 cm en 2020 y 2021 respectivamente.
- La edad media de madurez en 2020 y 2021 de 4,3 meses.
- Desovadores que proceden del desove estival.



### Estructuras de tamaños



### Proporción mensual de individuos por grupos de tamaño



#### Antes del año 2015

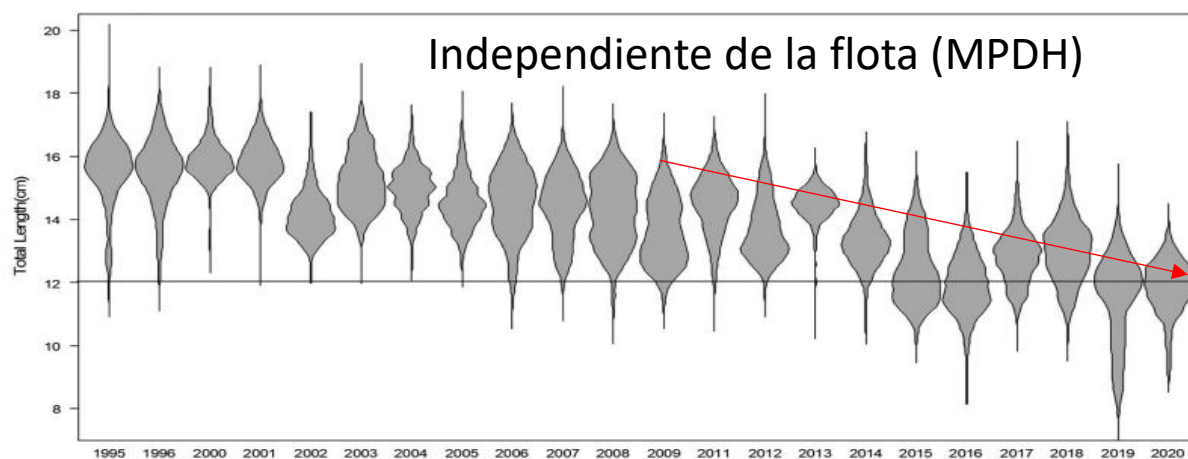
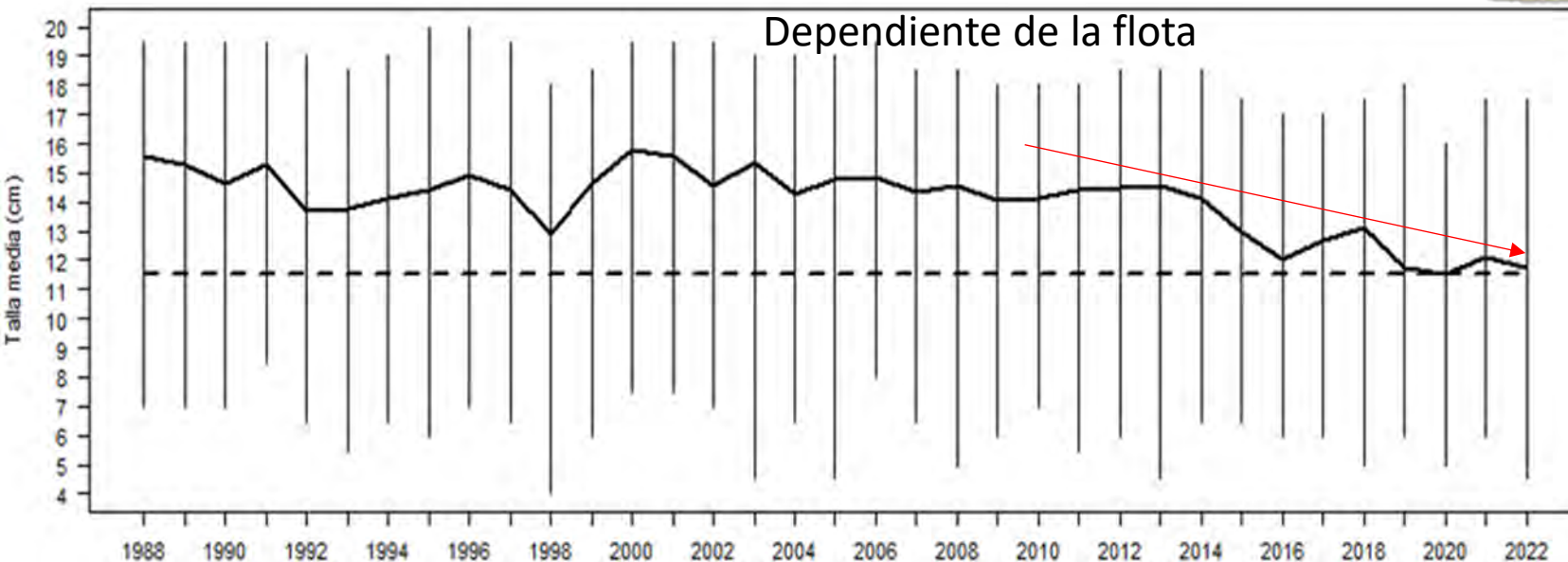
En las capturas predominan los individuos de los grupos 3 y 4 (de mayor tamaño). Mostrando desde el año 2000 una tendencia a la disminución del grupo 4 y al aumento del grupo 2.

#### Después de 2015

En los cateterismos predominan los individuos de los grupos 1 y 2. La presencia de los grupos 4 y 3 fue baja.



# Longitud promedio de la anchoveta



(Moreno, P & Claramunt, G, 2022)

- El menor crecimiento en alguna de las etapas de desarrollo ontogenético provoca una disminución en la talla media de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en la zona norte de Chile.
- La tasa de crecimiento de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en la zona norte de Chile depende de los cambios en la abundancia, tamaño y composición de sus presas.
- El aumento de la temperatura del mar provoca una disminución del crecimiento en alguna de las etapas de desarrollo ontogenético de la anchoveta (*Engraulis ringens*) en la zona norte de Chile.

## Objetivo General

Determinar los factores causantes de los cambios estructurales de la población de anchoveta de la zona norte de Chile, en el periodo reciente, y evaluar sus implicancias.

## Objetivos Específicos

- i. Caracterizar los patrones de edad y crecimiento de juveniles y adultos de baja talla de anchoveta registrados en el periodo reciente, para clarificar sus impactos en los cambios que ha experimentado la especie.
- ii. Desarrollar y comprobar hipótesis respecto a los factores causantes de los cambios estructurales de la anchoveta, mediante el análisis y la comparación de series históricas oceanográficas, biológicas y pesqueras, juntamente con investigación y literatura asociada y discusiones de talleres de trabajo y comités.
- iii. Establecer recomendaciones para el manejo pesquero, bajo distintos escenarios basados en las hipótesis planteadas en el estudio





## TALLER DE DIFUSIÓN DE RESULTADOS

Proyecto FIPA 2023-20 "Determinación de los factores causantes de los cambios estructurales de la población de anchoveta de la zona norte en el período reciente y sus implicancias"

LUNES 19 DE MAYO DEL 2025 · VALPARAÍSO

[ modalidad online ]

- 09:30 a 9:35** Palabras de bienvenida y presentación del proyecto · *Carola Hernández.*
- 9:35 a 10:05** Condición ambiental y oceanográfica del área de estudio · *Fabian Tapia.*
- 10:05 a 10:35** Variaciones en el zooplancton en el área de estudio · *Jessica Bonicelli.*
- 10:35 a 11:05** Cambios en el crecimiento en la anchoveta de la zona norte · *Francisco Cerna y Guido Plaza.*
- 11:05 a 11:20** Break
- 11:20 a 12:00** Resultados de la modelación de la longitud de anchoveta y las condiciones de ambientales · *Juan Carlos Saavedra.*
- 12:00 a 12:25** Recomendaciones de manejo y conclusiones generales · *Carola Hernández.*
- 12:25 a 13:00** Discusión.



Este estudio reporta los resultados parciales de las tasas de crecimiento y su relación con la disminución de la longitud de anchoveta en la zona norte de Chile (límite norte y los 24° 00' S) correspondiente al área de estudio y entre los años 1973 y 2022, reportando desde años con altas biomásas asociado a la década de los noventa a la actualidad cuando las biomásas son las menores de la serie. Adicionalmente, los resultados fueron correlacionados con factores ambientales y oceanográficos con el fin de encontrar patrones.



Se realizó el taller de expertos, con la participación de expertos de España, Perú e investigadores de la academia chilena vinculados a la investigación y gestión pesquera.

Este se llevó a cabo el 16 de enero de 2025 de manera telemática.

El taller contempló en una primera parte, una serie de presentaciones.

En la segunda parte, se realizó la discusión en base a una serie de preguntas generadas por el equipo del proyecto.



*Establecer recomendaciones para el manejo pesquero, bajo distintos escenarios basados en las hipótesis planteadas en el estudio.*

**1. Considerar el manejo pesquero en base a campañas de evaluación directa y de alta frecuencia. Revisar los procesos aplicados en Chile y tender adoptar procedimientos similares a los utilizados en Perú**

2. Avanzar hacia una compatibilidad entre las recomendaciones y medidas de manejo que se realiza por parte de ambos países.

CONOCIMIENTO Y

3. Revisar el periodo y duración de la veda, es decir, mantener la veda de reclutamiento, pero no el periodo fijo.

**4. Revisar los procedimientos de manejo de manera que sean flexibles. Principalmente en la decisión de la CBA**

**5. Revisar y/o redefinir los puntos biológicos de referencia y la biomasa de referencia frente a un escenario de cambio en la biología de estos recursos**

6. Revisar la talla utilizada como indicador en los diferentes monitoreos realizados en la zona norte



*Establecer recomendaciones para el manejo pesquero, bajo distintos escenarios basados en las hipótesis planteadas en el estudio.*

7. Revisar la talla utilizada como indicador en los diferentes monitoreos realizados en la zona norte.

8. Revisar el periodo y duración de la veda, es decir, mantener la veda de reclutamiento, pero no el periodo fijo.

#### GENERANDO

9. Implementar métodos de pesca selectivos que eviten la captura de individuos inmaduros. Fomentar el uso de redes de mayor tamaño de malla y modificar las tallas mínimas de captura.

**10. Implementar análisis de espectros de tamaños de las muestras de zooplancton colectadas en los cruceros del IFOP con equipos de laboratorio específicos para ello, tales como ZooScan y FlowCam. Esto permitirá adquirir conocimiento acerca del cambio temporal y espacial de la estructura de tamaño del zooplancton.**

**11. Implementar monitoreos específicos para la cuantificación de gelatinosos en las muestras de zooplancton y en los lances pesqueros, que se realizan en los cruceros acústicos del IFOP.**

12. Ajustar las zonas de veda según los cambios en los patrones de migración y reproducción, asegurando que las áreas clave estén protegidas.

13. Implementar sistemas de monitoreo adaptativo que permitan ajustar las regulaciones pesqueras a medida que se obtiene nueva información sobre el crecimiento y la salud de las poblaciones.

SUSTENTABILIDAD



14. Prohibición de capturar anchoveta dentro de las 5 millas de la costa.

## **BRECHAS**

### **1. Determinar áreas de reclutamiento y de desove para realizar un monitoreo efectivo.**

Debido a la disminución de la talla promedio de la anchoveta, es necesario revisar los criterios de veda, de manera de evitar que la pesquería de mantenga cerrada utilizando como talla de referencia los 11, 5 cm. Además, se debe tener presente que mientras más pequeño sea el pez la tasa de explotación tendría que ser más baja. En la medida que disminuye la mortalidad por pesca y los niveles de captura, se garantizan los escapes necesarios y la adaptación de la industria, a los menores niveles de captura.

**2. Realizar un cierre moratorio o desembarque bajo estas condiciones.** La situación actual de la anchoveta puede tener un origen no pesquero, sin embargo, es claro que la pesca ejerce un efecto importante. Por lo tanto, disminuir las cuotas de capturas o eventualmente hacer cierre o moratoria permitiría mejorar probablemente las condiciones del stock. Esto es una recomendación del punto biológico. Pero otra cosa es recomendar del punto de vista económico.

## **BRECHAS**

**Determinar se si los cambios se deben a un cambio micro evolutivo.** En este punto surge una pregunta de segundo nivel, ¿el fenotipo de talla pequeña se traspasa a la progenie posterior? Existe una auto correlación en el rasgo. Estos antecedentes nos ayudarían a conocer si la situación actual de la anchoveta podría mantenerse por varios años y buscar una posible conexión con cambios micro evolutivos. En este sentido, la veda temporal ayuda bastante, pero para lo espacial, se debe conocer el modelo de conectividad entre juveniles y adultos.

- El área de estudio reportó una **intensificación del proceso de surgencia** a partir de 2006-2007.
- La abundancia total y de **copépodos** presentó una **disminución** con un **aumento en el grupo de gelatinosos**.
- En otoño la abundancia de **copépodos disminuye** a partir del 2016 y entre 2014 y 2016 en **verano**.
- La disminución de la longitud media de la anchoveta en la zona, fue explicada principalmente por **la edad, la corte de nacimiento, estación** y por indicadores de **procesos de surgencia** como el índice de transporte Ekman e indicadores de temperatura explicando entre un 90 a 91% de la variabilidad total.
- Los resultados del presente estudio, a través diferentes índices estandarizados, demostraron que **el crecimiento somático de la anchoveta en los 4 últimos años**, correspondió a los registros más bajos de la serie interanual analizada, reflejando que esta especie se encuentra en una **condición somática crítica**, que amerita la aplicación de medidas urgentes de manejo y evaluación que garanticen su sustentabilidad en el corto y mediano plazo.



- Los perfiles de grosores medios globales estandarizados por el efecto de la variabilidad interanual, a través de un modelo aditivo generalizado, siguieron un **patrón parabólico independiente de la cohorte estacional de nacimiento** (i.e., verano, otoño, invierno o primavera), evidenciándose, además, un **crecimiento sostenido para los primeros dos meses de vida**, seguido de un decaimiento hacia el quinto mes de vida.
- Los índices de crecimiento derivados de modelos GLM y GAM, a la relación talla edad a la fecha de captura, estandarizados por el efecto de la cohorte estacional de nacimiento y zona de captura, para ejemplares de entre 50 y 150 días de vida, bajo un enfoque de una serie de tiempo discreta, evidenciaron **dos ciclos de disminución en productividad somática**, uno desde 1972 hasta 2002 y otro entre 2009 hasta 2022.
- Las tasas de crecimiento globales promedios evidenciaron una **tendencia decreciente en las últimas dos décadas** a nivel general, representado un 30% de disminución, siguiendo el mismo patrón, independiente de la etapa ontogenética (pre-reclutas, reclutas y adultos) y la estación bimensual de nacimiento.



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO

Contribuimos a la  
sostenibilidad de los recursos  
marinos de todos los chilenos.



 [www.ifop.cl](http://www.ifop.cl)

 [info@ifop.cl](mailto:info@ifop.cl)

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO - CHILE