

# Más de 20 años de monitoreo del sistema de surgencia costera de Chile central



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA



Lancha Oceanográfica Kay Kay II

Laura Farías<sup>1, 2, 3, 4</sup>  
Valentina Manríquez<sup>3</sup>  
y Lucas De la Maza<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Oceanografía Universidad de Concepción  
<sup>2</sup> Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2)  
<sup>3</sup> Instituto Milenio de Socio Ecología Costera (SECOS)  
<sup>4</sup> Núcleo Milenio Upwell

Reconocimiento a todos los que han participado en esta actividad desde sus inicios, primeramente a los doce investigadores principales y asociados del Centro FONDAP COPAS durante 2002-2012 (i.e., Wolfgang Schneider, Oscar Pizarro Osvaldo Ulloa, Laura Farías, Rubén Escribano, Carmen Morales, Humberto González, Giovanni Daneri, Ariel Gallardo, Renato Quiñones, Carina Lange y Silvio Pantoja) y a sus respectivos equipos de trabajo, que involucraron estudiantes, técnicos y asistentes de laboratorio. Todos participaron entusiastamente en esta iniciativa; son muchos/as y, por ello, las disculpas de no listarlos/las por temor a omitir nombres.

Agradecer también a colegas del DOCE que se fueron sumando a la serie de tiempo, Leonardo Castro, Fabián Tapia, y en especial a Renato Quiñones quien siempre creyó en el valor de esta serie de tiempo y sigue apoyando hasta el día de hoy. En los últimos años, debemos agradecer la presencia de Juan Faúndez, Luis Montesinos, Gerardo García, Karen Sanzana, Oliver Alarcón, Sandy Tenorio, Dixon Villena y muchos otros, que han trabajado en épocas adversas y de pandemia. También especial agradecimiento al apoyo en los últimos años, de los centros e institutos CR2 y SECOS, INCAR y UPWELL y a Laura Ramajo y Eugenia Gayo, siempre motivadas por las surgencias costeras.

Citar como: Farías, L., Manriquez, V., De la Maza, L. (2021). Más de 20 años de monitoreo de la surgencia costera de Chile Central. Working paper, Universidad de Concepción, , 26 pp.

pp. <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/8081>

Data disponible en <https://doi.org/10.48665/udec/CMHMEQ>

# Índice



Resumen	4
Abstract	5
Las series de tiempo oceanográficas	6
Las Series de Tiempo Marinas Ecológicas (STM) alrededor del Océano Global	7
El decálogo de una serie de tiempo marina	9
La surgencia costera de bordes orientales (EBUS) y el caso del sistema de Humboldt	10
Los servicios ecosistémicos de las surgencias costeras	13
El sistema de Humboldt; plataforma continental de Chile central: STM estación 18	14
El impacto de la estación 18	16
Acciones y recomendaciones	21
Referencias	22
Anexos	25



## Resumen

El océano actúa como el regulador del estado medio climático en el planeta Tierra, absorbiendo calor, controlando la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y manteniendo el ciclo hidrológico que suministra agua dulce al planeta. El monitoreo del océano es necesario para comprender su dinámica a diferentes escalas temporales y espaciales, así como para cuantificar el impacto de los procesos globales como el cambio climático (CC) en su funcionamiento. El monitoreo permite finalmente dimensionar impactos y evaluar la vulnerabilidad de sus ecosistemas y comunidades costeras. Los humanos dependen del océano, debido a los múltiples servicios ecosistémicos que este entrega, i.e., pesca, acuicultura, provisión de productos naturales, purificación/desalinización de agua, protección de la costa, transporte y recreación/turismo, entre algunos. Este es el caso de Chile, un país con vocación oceánica altamente vulnerable al CC, pero con escaso monitoreo de océano y, por lo tanto, con limitada capacidad para estimar la intensidad de las amenazas, y para predecir impactos, herramienta esencial para adaptarse al CC y otros fenómenos.

La Universidad de Concepción a través de los académicos del Departamento de Oceanografía, mantiene una de las series de tiempo marina (STM) más largas y completas del océano Pacífico sur oriental, específicamente en la plataforma continental de Chile central (estación 18:  $36^{\circ} 30,80'S$  y  $73^{\circ} 7,75'W$ ). Con más de 250 visitas mensuales desde el año 1997, la STM estación 18 ha reportado información respecto a distintas escalas de variabilidad y procesos costeros, lo cual ha quedado plasmado en más de 50 publicaciones científicas de alto impacto para el periodo comprendido entre 1997 y 2019. Además de la bien estudiada variabilidad estacional gatillada por la surgencia costera, proceso fundamental que mantiene la productividad biológica de las aguas costeras chilenas, la STM reporta variabilidad asociada al ciclo ENSO (El Niño y La Niña) con eventos de distinta magnitud (e.g., El Niño Godzilla o El Niño Costero). Con sus más de dos décadas de observación, la STM tiene la potencialidad de convertirse en un icono mundial, siendo capaz de capturar tendencias decadales, en parte asociadas al CC como la intensificación de vientos favorables a la surgencia, la mega-sequía y su influencia sobre el océano costero y los cambios en productividad biológica y oxigenación.

Este informe presenta antecedentes que permitirán declarar a la STM estación 18 como un patrimonio científico de la Universidad de Concepción y una herencia para las generaciones jóvenes y futuras. Los datos y productos obtenidos por STM estación 18 no sólo son un recurso académico, sino que son importantes para la sociedad chilena y la comunidad internacional, por cuanto guían las acciones humanas en respuesta a impactos de procesos naturales y antropogénicos en el océano. En la década de los océanos, la valorización de la información de libre acceso desde las comunidades y sus territorios es fundamental para la toma de decisiones en el ámbito nacional y local. Por ello, la observación de los océanos y sus costas son acciones que van en la dirección de la sustentabilidad marina.



## Abstract

The ocean acts as the regulator of the climatic state on planet Earth, absorbing heat, controlling the concentration of greenhouse gases in the atmosphere and maintaining the hydrological cycle that supplies fresh water to the planet. Ocean monitoring is necessary to understand its dynamics at different temporal and spatial scales, as well as to quantify the impact of global processes such as climate change (CC). The marine monitoring makes possible to assess vulnerabilities of coastal communities and ecosystems. Humans depend on the ocean, due to the multiple ecosystem services that it provides, i.e., fishing, aquaculture, provision of natural products, water purification / desalination, coastal protection, transportation and recreation / tourism, among others. This is the case of Chile, a country with an oceanic vocation and highly vulnerable to CC, but with poor ocean monitoring and, therefore, with limited capacity to estimate the type and intensity of threats. Therefore, to predict impacts of CC on the ocean is essential to adapt to CC and other phenomena.

The University of Concepción, through its academics from the Department of Oceanography, maintains one of the longest and most complete marine time series (MTS) the southern eastern Pacific Ocean, specifically on the continental shelf of central Chile (station 18:  $36^{\circ} 30' 80'' S$  and  $73^{\circ} 7.75' W$ ). With more than 250 monthly visits since 1997, the STM station 18 has reported information regarding different scales of variability in coastal processes, which has been reflected in more than 50 high-impact scientific publications in the period between 1997 and 2019. In addition to the well-studied seasonal variability triggered by the coastal upwelling, a fundamental process that maintains the biological productivity of Chilean coastal waters, the MTS also reports variability associated with the ENSO cycle (El Niño and La Niña) with events of different magnitude (El Niño Godzilla or The Coastal Child). With its more than two decades of observation, the MTS has the potential to become a world icon, being already capable of capturing decadal trends of variables and processes, in part affected by the Climate Change such as the intensification of winds favorable to upwelling, mega-drought and their influence on the coastal ocean and changes in biological productivity and oxygenation.

This report presents background information that will allow MTS station 18 to be declared a scientific heritage of the University of Concepción for young and future generations. The data and products obtained by STM station 18 are not only an academic resource, but are also important for Chilean society and the international community, as they guide human actions in response to impacts of natural and anthropogenic processes in the ocean. In the decade of the oceans, the valorisation of freely accessible information from the communities and their territories is fundamental for decision-making at the national and local level, being highly valued by the communities. For this reason, the observation of the oceans and their coasts are actions that go in the direction of marine sustainability and the sustainable development objectives of the 2030 agenda (UN).



## Las Series de Tiempo Oceanográficas

La existencia de las estaciones de monitoreo oceánicas permanentes está íntimamente relacionada con el problema de la variabilidad del océano, y más recientemente con el entendimiento de la influencia del cambio climático (CC) sobre este. En la Década de los Océanos declarada por las Naciones Unidas (UN), se ha enfatizado la importancia del océano como una solución al CC, ya sea a través de la captura de calor y la absorción de dióxido de carbono. El CC, impulsado por la actividad humana, ha generado cambios a tasas sin precedentes en la temperatura, la química del océano y muchos otros procesos oceanográficos y ecológicos, como la biodiversidad (SROCC, 2019). A esto se le suma otros fenómenos antropogénicos como la contaminación y la sobrepesca. Estas amenazas y sus impactos causan daño a la vida marina, aumentando la exposición y la vulnerabilidad al cambio climático de aquellas personas que dependen del océano. Esto es particularmente cierto para Chile, país que ha sido declarado como altamente vulnerable al CC (NDC-UN Global Outlook Report, 2019).

El esfuerzo por distinguir entre cambios naturales y antropogénicos requiere estadísticamente de varias décadas de mediciones marinas sostenidas e ininterrumpidas (Reid y Valdés, 2011, Henson et al., 2014). De hecho, las observaciones oceánicas de largo plazo o “long-term” ya han proporcionado información sin precedentes sobre el funcionamiento de los ecosistemas marinos, y cómo estos están cambiando a diferentes escalas temporales y espaciales (Karl, 2010; Benway et al., 2019), y su repercusión sobre el clima del planeta y los recursos biológicos (Poloczanska et al., 2016).

Existen múltiples y diversas formas de observar el océano y obtener series de tiempo de variables y procesos de diferentes frecuencia (i.e., horaria, diaria, semanales, mensuales, estacionales). Muchas de la observación provienen de plataformas de observación autónomas fijas (i.e., radares, boyas, anclajes), y móviles (embarcaciones voluntarias, satélites, planeadores marinos, boyas a la deriva, vehículos no tripulados, entre algunos) (Trowbridge et al., 2019). Estas plataformas pueden estar equipadas con diversos tipos de sensores y tecnologías que proveen datos de las variables más relevantes para el sistema oceánico y climático. De hecho, los países desarrollados y las organizaciones y agencias regionales como la Unión Europea (e.g., Copernicus marine services, desde 1998) o los Estados Unidos (e.g., National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, desde 1970) poseen sistemas integrados de observación de gran desarrollo y sofisticación (e.g., Snowden et al., 2019). Chile posee un sistema de observación precario, al menos para lo que es país requiere (6.435 km de longitud lineal), dada la gran extensión latitudinal de mar territorial y la gran diversidad de ecosistemas que aloja (Farías et al., 2019).

Específicamente, las STM que se basan en la toma de agua de mar en una determinada coordenada geográfica y a distintas profundidades (muestra discreta) para diferentes propósitos son llamadas series de tiempo ecológicas; y como dependen de una embarcación, en inglés se denominan “ship based time series”. Las mediciones/análisis que se pueden hacer con muestras de agua son variadas, por ejemplo: la composición de las comunidades biológicas.



(bacterioplancton, fitoplancton y zooplancton) y medición de los procesos oceanográficos (e.g., capa de mezcla, intercambio de calor y gases con la atmósfera), ecológicos y biogeoquímicos (e.g., tasas de reacciones bioquímicas como fotosíntesis, respiración) in situ y on deck. Estas mediciones son altamente valoradas, pues proporcionan información que no es posible obtener con mediciones autónomas (sensores); además de ser cruciales para levantar información ecológica y biogeoquímica. Estas últimas redundan en mejorar la toma de decisiones en el océano y la ordenación costera (Edwards et al., 2010) y confluyen hacia una gestión de desarrollo sustentable para las zonas costeras y oceánicas en directa relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS (Naciones Unidas, 2018). Además, las series de tiempo ecológicas y biogeoquímicas proveen a la comunidad oceanográfica un conjunto de datos de alta calidad necesarios para caracterizar la física y la biogeoquímica del océano, el clima, la variabilidad del ecosistema y detectar cambios en distintos estratos de la columna de agua.

Además de su valor científico, estas series de tiempo son útiles para validar los datos obtenidos por satélites, boyas o vehículos no tripulados. Por otra parte, los datos de variables y procesos adquiridos en regiones específicas (e.g., surgencias, estuarios, giros subtropicales) permiten también la calibración de modelos acoplados de física, química y biología. Estos modelos constituyen herramientas que mejorarán nuestra comprensión sobre los procesos que se producen en la columna de agua y, por lo tanto, contribuirán al desarrollo de modelos acoplados para la predicción del funcionamiento del océano ante escenarios de cambios antropogénicos. Dependiendo de la zona donde las series de tiempo se localizan, estas capturan dinámicas y tendencias propias de cada ecosistema, con características y funcionalidades ambientales y ecológicas propias, que se traducen en distintos servicios ecosistémicos. Finalmente, los datos alimentan modelos predictivos que resuelve transporte e interacciones biogeoquímicas a distintas escalas, incluso incluyendo aspectos ecológicos y servicios ecosistémicos costeros (e.g., Croccos, ATLANTIS).

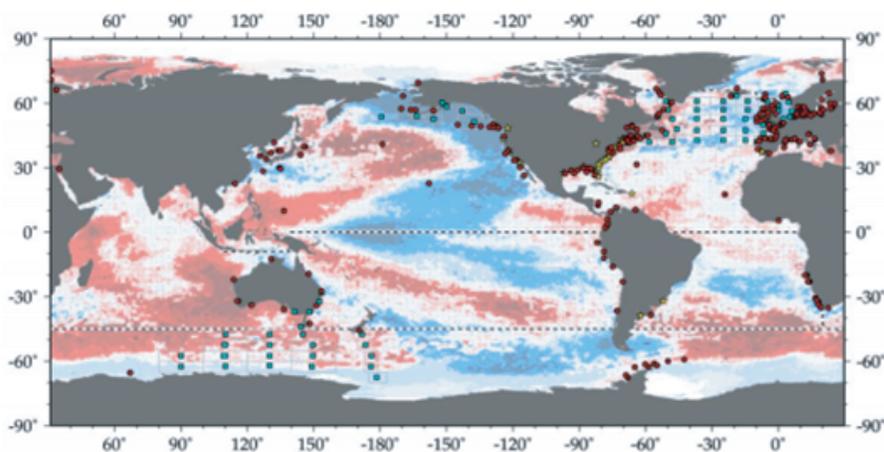
## Las Series de Tiempo Marinas Ecológicas (STM) alrededor del Océano Global

La historia de las STM de largo plazo (long term) se remonta 100 años atrás, con la primera estación de observación en el Canal de la Mancha occidental alrededor de las Islas Británicas. Sin embargo, no es hasta mediados del siglo XX cuando nacieron los primeros esfuerzos en el hemisferio norte, i.e., Estación M, (1948, Mar del Norte), Estación P (1947, NOAA Pacífico norte), Hidro-estación S (1954, Mar de los Sargazos) y la estación Boknis Eck (1957, Mar Báltico).



A estas se le suman acciones locales como CALCOFI (costa de California creada para estudiar el colapso de la sardina), y LTER-MC (1984, Golfo de Nápoles para estudiar la estructura del plancton). No obstante, la mayor parte de las STM nacen en el marco de programas de investigación internacionales durante la década de 1980; entre estos WOCE (World Ocean Circulation Experiment), JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study, 1990), y GLOBEC (Global Ocean Ecosystem Dynamics, 1997). Entre estas STM se encuentran HOT (1988), BATS (1994), ESTOC (1994), KERFIX (1990), RADIALES (1990), CARIACO (1995), DYFAMED (1991), KNOT (1998) y SEAT (1998), algunas de ellas discontinuadas.

EL IGMETS (International Group for Marine Ecological Time Series) ha identificado y compilado los metadatos de un gran parte de series de tiempo levantadas alrededor del océano global. Gran parte de ellas incluyen información sobre mediciones biogeoquímicas y ecológicas tomadas en barcos que actualmente están realizando mediciones regulares (O'Brien et al., 2017). La ubicación de estas STM se muestran en la Figura 1, y los metadatos para cada una se encuentran disponibles en el sitio web de la Comisión Oceanográfica Internacional (COI). Esta figura muestra 344 STM existentes, de las cuales sólo 71 son del tipo ecológicas con registros de plancton (puntos azules). En el Pacífico sur oriental, la mayor parte de las STM se localizan en Perú. En Chile existen reportadas dos STM (Antofagasta y Concepción) asociadas al sistema de surgencias de borde oriental o EBUS (en sus siglas en inglés "Eastern Boundary Upwelling Systems"). Además, IFOP mantiene varias estaciones de monitoreo de floraciones algales nocivas en Patagonia Chilena y la Universidad de los Lagos mantiene una serie de tiempo de 3 años de duración llamada OMARE.



**Figura 1.** Mapa de las series de tiempo que participan en IGMETS sobre un fondo de tendencias de la temperatura de la superficie del mar de 10 años (2003-2012); fondo azul indica enfriamiento, mientras que rozado es calentamiento de la superficie del océano.

## El decálogo de una serie de tiempo marina (modificado de ICMETS)

- 1) Las observaciones que no se hacen hoy, se pierden para siempre.
- 2) Las observaciones existentes se pierden, si no se hacen accesibles.
- 3) El valor colectivo de los conjuntos de datos es mucho mayor que su valor disperso.
- 4) No existe ningún sustituto para las observaciones de series de tiempo ecológicas y/o biogeoquímicas.
- 5) El valor de las observaciones de series de tiempo marinas aumenta mientras más largos son los registros. Las mediciones que abarcan un lapso de tiempo de varias décadas, permiten la identificación de patrones interanuales y decadales.
- 6) El análisis de conjuntos de datos de diferentes estaciones de series de tiempo permite la separación de factores y forzantes naturales y antropogénicos y además la evaluación de las distintas respuestas de cada región o ecosistemas.
- 7) La información procesada de datos (tendencias, alertas, índices ambientales) debe ser valorada y utilizada para el desarrollo local, siendo insumos para planificación costera (estratégica territorial) y políticas públicas.
- 8) Las proyecciones y los pronósticos de estado del océano (modelación regional) requieren una diversificación considerable de los datos in situ, para la calibración y validación.
- 9) Los modelos de circulación, tróficos y biogeoquímicos regionales, los cuales se alimentan con datos in situ, locales serán útiles para modelos globales de Clima.
- 10) Las variables medidas en forma discreta son fundamentales para apoyar el desarrollo tecnológico creciente que se traduce en nuevos sensores y nuevas tecnologías de medición, así como permite la aplicación de la ciencia de datos para analizar las tendencias de los datos, efecto estacional, periodicidad, etc.



## La surgencia costera de bordes orientales (EBUS) y el caso del sistema de Humboldt

Las surgencias o afloramientos costeros representan solo el 1% de la superficie del océano global pero mantienen entre el 15-20% de la extracción pesquera mundial (Chávez and Messié, 2009), constituyendo un soporte para las economías regionales. En todo el mundo, hay cinco corrientes costeras asociadas con áreas de afloramiento: la corriente de Canarias (en el noroeste de África), la corriente de Benguela (en el sur de África), la corriente de California (en California y Oregón), la corriente Somalí (frente a Somalia y Omán), y la corriente de Humboldt frente a Perú y Chile.

La surgencia costera se genera principalmente por la interacción de los vientos, las corrientes marinas y la rotación de la Tierra. En el caso del hemisferio sur, las aguas superficiales de las corrientes de Humboldt, Canarias y Benguela (que se mueven de sur a norte), se desvían hacia la izquierda (costa afuera) debido a la rotación de la Tierra y el efecto Coriolis, generando un proceso conocido como transporte Ekman (Ekman, 1905). Para balancear el movimiento costa afuera de agua, este es compensado por ascenso de aguas más profundas (infografía en progreso). Por lo tanto, la surgencia costera consiste en el ascenso a la superficie de aguas más profundas -que son frías y ricas en nutrientes-pero pobres en oxígeno. Este proceso físico fertiliza las aguas superficiales, generando así una alta productividad primaria que se transfiere a la trama trófica. Parte de esta materia orgánica (MO) se transporta lateralmente, pero otra se exporta hacia los sedimentos, constituyéndose como una de los mayores procesos de secuestro de carbono del Planeta.

En su camino hacia el fondo, una fracción de la MO experimenta descomposición aeróbica (consumo de oxígeno), que en aguas poco ventiladas y con bajos niveles pre-existentes de oxígeno, genera zonas de mínima de oxígeno (OMZ en sus iniciales en inglés), las cuales representan uno de los rasgos más característicos de las surgencias costeras. En las OMZ ocurren una gran diversidad de procesos microbianos anaeróbicos de relevancia climática y biológica (Ulloa y Pantoja, 2009), siendo además de ser una barrera fisiológica para una gran cantidad de especies y recursos marinos. Cuando estas OMZ se expanden o se desplazan en la columna de agua, pueden tener efectos severos sobre el zooplancton, los peces y la macrofauna bentónica, dada su limitada o nula capacidad de desplazamiento (Roman et al., 2019). Esto implica que la pérdida de oxígeno del océano por calentamiento sea una de las principales y grandes amenazas que impone el CC (Breitburg et al., 2018). La importancia de estos procesos y otros en los EBUS son reconocidos en Todd et al. (2019), no obstante el levantamiento de información científica y recomendaciones para el borde oriental de Chile no está adecuadamente considerado.



## Los servicios ecosistémicos de las surgencias costeras

El concepto de servicios ecosistémicos (SSEE) integra las funciones ecológicas y los valores económicos para explicar cómo la salud del ecosistema afecta al sistema socioeconómico; este ha sido ampliamente usado en la última década y de hecho ratificado por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Los SSEE se definen como “la contribución directa e indirecta de los ecosistemas al bienestar humano”, definición propuesta por primera vez por Costanza et al. (1997) y Daily (1997). La Figura 2 ilustra distintos procesos asociados al ecosistema marino (círculo central) del cual se desprenden los servicios de los ecosistemas (SSEE) mirados como los beneficios que los ecosistemas naturales brindan a las personas. Esta conceptualización cubre una amplia gama de SSEE, desde el pescado tangible vendido en un mercado hasta la influencia invisible de una pradera de pastos marinos que elimina parte del exceso de dióxido de carbono del mundo, cambiando sutilmente el equilibrio químico tanto del agua como de los sedimentos.



Figura 2: Servicios ecosistémicos del océano. Tomado de [www.oceanwealth.org/ecosystem-services/](http://www.oceanwealth.org/ecosystem-services/)



En el año 2000, las Naciones Unidas encargó a más de 1.360 expertas(os) llevar a cabo la “Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA)” con la finalidad de evaluar las consecuencias del cambio en los ecosistemas para el bienestar humano. Los resultados de esta evaluación proporcionaron una valoración científica sobre el estado y las tendencias de los ecosistemas del mundo y los servicios que prestan, así como la base científica para actuar en su conservación y uso sostenible, y se definieron categorías explícitas de SSEE.

Entre estas categorías se encuentran los servicios de aprovisionamiento, los cuales proporcionan bienes tangibles, como comida, combustible, materiales. Asimismo, se distinguen servicios de regulación del ambiente (regulación climática, secuestro de carbono, purificación del agua) y los servicios culturales. Estos últimos representados por aquellos beneficios no materiales que la sociedad obtiene de la naturaleza (recreación, beneficios espirituales o intelectuales). Finalmente, se reconocen los servicios de soporte, los cuales son la base para que todos los demás SSEE ocurran, como la productividad primaria y ciclos de nutrientes (MEA, 2005).

La surgencia costera es considerada en sí misma como un SSEE de soporte, que a su vez da lugar a otros numerosos SSEE se describen en la Tabla I, utilizando la categorización propuesta por MEA (2005) y la identificación de SSEE marinos y costeros de Fundación Chile (2016).

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS (SSEE) DE LA SURGENCIA COSTERA		SS.EE. DE REGULACIÓN Y SOPORTE	SS.EE. DE PROVISIÓN	SS.EE. CULTURALES Y ESPIRITUALES
CICLOS BIOGEOQUÍMICOS		Transporte de nutrientes desde aguas sub-superficiales hacia aguas superficiales del océano; sedimentación de materia orgánica producida en la superficie hacia capas profundas y al fondo marino; remineralización de materia orgánica en la columna de agua; zona mínima de oxígeno (ZMO) (Thiel et al., 2007). Además, en los centros de surgencia se generan estructuras de mesoescala que transportan nutrientes y biomasa hacia el océano adyacente (Capet et al., 2008).	<p>PESCA ARTESANAL E INDUSTRIAL</p> <p>El 25,1% de la producción primaria de los sistemas de surgencia se destina a sostener las pesquerías (Pauly &amp; Christensen, 1995). La alta biomasa de fito y zoo-plancton en el sistema de surgencia de la Corriente de Humboldt provee de alimento a las principales pesquerías de Chile, que está entre los 10 países pequeños más importantes del mundo (según FAO 2014), reportando para el año 2017 un desembarque total de 3.6 millones de toneladas de pescado, de los cuales un 66% corresponden a la pesca artesanal e industrial (fuente SERNAPESCA).</p>	<p>EDUCACIÓN</p> <p>Los centros de surgencia son de interés para la investigación pesquera, oceanográfica y ecológica, entre otras, muchos profesionales de estas áreas se han formado en el estudio de estos procesos y sus dinámicas asociadas.</p>
PRODUCTIVIDAD PRIMARIA		La PP es un eslabón clave para el sustento de las tramas tróficas marinas, ha sido identificada por la Evaluación de los ecosistemas del milenio (MEA, 2005) como uno de los servicios ecosistémicos de soporte más importantes a nivel mundial. En los sistemas de surgencia, la fertilización de la capa fótica con nutrientes provenientes de capas profundas del océano genera grandes cantidades de biomasa de fitoplancton, los principales productores primarios en el mar. En los centros de surgencia de Chile centro-sur se han obtenido valores de PP bruta de hasta 19,9 g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> , de los más altos registrados a nivel mundial para el océano abierto (Dameri et al., 2000).	<p>RECOLECCIÓN DE RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS</p> <p>La recolección de orilla (sector intermareal) y el buceo a pnea (sector submareal) son actividades extractivas que sustentan principalmente economías familiares en la costa de Chile, con 78.771 inscritas en estos rubros para el año 2017 (fuente: SERNAPESCA). Para el norte de Chile se ha documentado que la surgencia costera tiene efectos sobre la dinámica de comunidades intermareales, donde se encuentran gran parte de los recursos objetivo de la recolección de orilla, influyendo en la estructura y composición de los ensamblajes de macroalgas y consumidores en zonas aledañas a los centros de afloramiento de aguas subsuperficiales (Reddin et al., 2015).</p>	<p>CIENCIA E INVESTIGACIÓN</p> <p>El monitoreo y estudio de estos sistemas resulta fundamental ante el escenario de cambio climático global, en que se reconoce cómo responderán los EBUS a las presiones asociadas y las consecuencias socio-ambientales que esto pueda traer (DíLorenzo, 2015; García-Reyes et al., 2015). Tweedle et al (2018) propone que se deben proteger las zonas de alta productividad natural del fitoplancton y los procesos físicos que las impulsan (como la surgencia), lo cual implica comenzar a considerar estos factores en las decisiones de planificación y gestión marina, cuyos efectos sobre los EBUS son aún desconocidos y plantean interrogantes sobre</p>
CAPTURA DE CARBONO		La gran biomasa de fitoplancton que prolifera en los centros de surgencia actúa como sumidero de CO2 en el océano, ya que captura CO2 atmosférico para realizar su fotosíntesis, el que luego es exportado hacia las capas profundas y finalmente sedimenta en el fondo marino.	<p>RESERVAS POTENCIALES DE MATERIAL GENÉTICO</p> <p>Existen numerosas especies endémicas, representantes de diversos grupos taxonómicos, asociadas a la Corriente de Humboldt, como: el copépodo <i>Acartia tonsa</i>, el eufáusido <i>Euphausia mucronata</i>, las aves: Pingüino de Humboldt (<i>Spheniscus humboldti</i>), Yunca de Humboldt (<i>Pelecanolés garmotii</i>), Piquero común (<i>Sula variegata</i>), Cormorán Guanay (<i>Phalacrocorax bougainvillii</i>), y mamíferos como el Chungungo (<i>Lontra felina</i>) y el Lobo Fino de Juan Fernández (<i>Arctophoca philippi</i>), entre otros (Cisterna-Concha, 2020). La zona de mínimo oxígeno (ZMO) alberga una diversidad única de arqueas y bacterias, conformando comunidades microbianas propias de este sistema (Ulloa et al., 2006).</p>	<p>CALETAS DE PESCADORES</p> <p>Las caletas costeras albergan modos de vida y modos de producción, basados en la relación de sus habitantes con el mar y sus recursos (pesca artesanal, recolección de algas y mariscos), una relación que sustenta tanto la actividad económica como la cultura e identidad de los habitantes de estas localidades (Quezada &amp; Álvarez, 2021).</p>
REGULACIÓN CLIMÁTICA		El proceso de surgencia trae a la superficie aguas de baja temperatura, las que entran en contacto con la atmósfera. Mediante el proceso de fotosíntesis de la biomasa fitoplanctónica, los sistemas de surgencia actúan como fuente de O2 y sumidero de CO2.	<p>RESERVAS POTENCIALES DE MATERIAL GENÉTICO</p> <p>Existen numerosas especies endémicas, representantes de diversos grupos taxonómicos, asociadas a la Corriente de Humboldt, como: el copépodo <i>Acartia tonsa</i>, el eufáusido <i>Euphausia mucronata</i>, las aves: Pingüino de Humboldt (<i>Spheniscus humboldti</i>), Yunca de Humboldt (<i>Pelecanolés garmotii</i>), Piquero común (<i>Sula variegata</i>), Cormorán Guanay (<i>Phalacrocorax bougainvillii</i>), y mamíferos como el Chungungo (<i>Lontra felina</i>) y el Lobo Fino de Juan Fernández (<i>Arctophoca philippi</i>), entre otros (Cisterna-Concha, 2020). La zona de mínimo oxígeno (ZMO) alberga una diversidad única de arqueas y bacterias, conformando comunidades microbianas propias de este sistema (Ulloa et al., 2006).</p>	<p>CALETAS DE PESCADORES</p> <p>Las caletas costeras albergan modos de vida y modos de producción, basados en la relación de sus habitantes con el mar y sus recursos (pesca artesanal, recolección de algas y mariscos), una relación que sustenta tanto la actividad económica como la cultura e identidad de los habitantes de estas localidades (Quezada &amp; Álvarez, 2021).</p>
BIODIVERSIDAD		La surgencia es un factor clave en la diversidad de hábitats costeros, modificando las condiciones físicas, químicas y biológicas de los ambientes que influyen; en la diversidad de especies, ya que al elevar la productividad costera y dinamizar las tramas tróficas mantiene la abundancia y diversidad de especies que habitan en el HCS y otras que lo hacen parte de sus rutas migratorias; y la diversidad genética (ver "Reservas potenciales de material genético").	<p>RESERVAS POTENCIALES DE MATERIAL GENÉTICO</p> <p>Existen numerosas especies endémicas, representantes de diversos grupos taxonómicos, asociadas a la Corriente de Humboldt, como: el copépodo <i>Acartia tonsa</i>, el eufáusido <i>Euphausia mucronata</i>, las aves: Pingüino de Humboldt (<i>Spheniscus humboldti</i>), Yunca de Humboldt (<i>Pelecanolés garmotii</i>), Piquero común (<i>Sula variegata</i>), Cormorán Guanay (<i>Phalacrocorax bougainvillii</i>), y mamíferos como el Chungungo (<i>Lontra felina</i>) y el Lobo Fino de Juan Fernández (<i>Arctophoca philippi</i>), entre otros (Cisterna-Concha, 2020). La zona de mínimo oxígeno (ZMO) alberga una diversidad única de arqueas y bacterias, conformando comunidades microbianas propias de este sistema (Ulloa et al., 2006).</p>	<p>CALETAS DE PESCADORES</p> <p>Las caletas costeras albergan modos de vida y modos de producción, basados en la relación de sus habitantes con el mar y sus recursos (pesca artesanal, recolección de algas y mariscos), una relación que sustenta tanto la actividad económica como la cultura e identidad de los habitantes de estas localidades (Quezada &amp; Álvarez, 2021).</p>

**Tabla 1.** Listado de SSEE de la surgencias costeras, categorizados como de regulación, soporte, provisión y culturales, espirituales.



## El sistema de Humboldt; plataforma continental de Chile central: STM estación 18

El sistema de Humboldt aloja numerosos centros de surgencia costera a lo largo de la costa Pacífica entre los 5° y 40°S (desde el sur de Ecuador a Valdivia) (Strub et al., 1998), y representan los sistemas más productivos del océano global (Thiel et al., 2007). En la sección norte de la corriente (5°–25 °S), la surgencia costera presenta un carácter casi permanente (Blanco et al., 2002), donde la descarga de agua dulce desde ríos hacia el mar es escasa o nula debido a las condiciones climáticas áridas que predominan en la costa peruana y el norte de Chile. En contraste, la surgencia costera que ocurre en Chile centro-sur (30-40°S) se caracteriza por vientos altamente estacionales que favorecen afloramientos de aguas profundas durante la primavera-verano (Sobarzo et al., 2007). Sin embargo, esta área además se caracteriza por importantes escorrentías de ríos y un amplia plataforma continental (40 km) (Sobarzo et al., 2007).

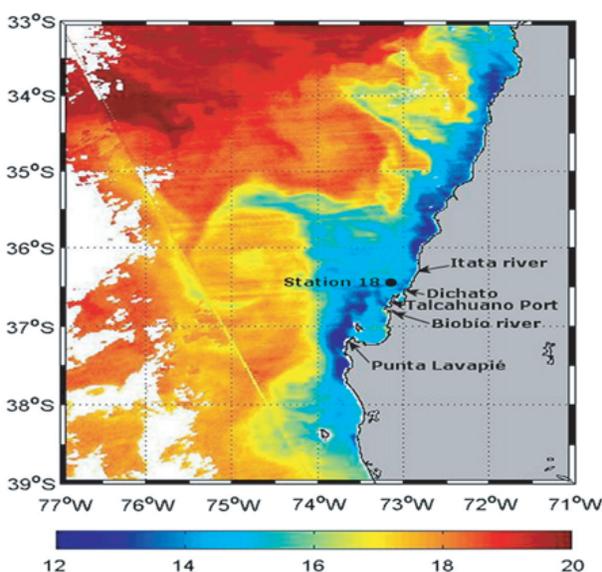
La plataforma continental frente a Dichato se constituye como la sección más amplia de Chile (excluyendo Chile insular o Patagonia). Precisamente, es en esta plataforma donde se ubica la STM estación 18 (36° 30,80'S y 73° 7,75'W), la cual corresponde a la única estación en el Pacífico sur oriental en que se ha obtenido información oceanográfica/biogeoquímica de manera ininterrumpida desde los años 1997; siendo unas de las más completas en cuanto a la multiplicidad de parámetros y variables medidas (que incluyen gases de efecto invernadero). La estación 18, así denominada debido a que se encuentra a 18 millas náuticas de la costa (punto de referencia Dichato), fue parte de una de las estaciones de monitoreo de la expedición Thioploca-Chile, 1994, liderado por el Dr. Ariel Gallardo. Posterior a ello y con la adjudicación del centro FONDAP Copas (2002-2012) por parte del Departamento de Oceanografía de la Universidad de Concepción y la Universidad Austral de Chile (entre las principales); se creó la estación de serie de tiempo: **estación 18**.

Como parte de este Centro, existieron seis líneas de investigación, cada uno de las cuales aportaron a la gestión y mediciones específicas de ciertas variables y procesos (Anexo I), bajo la coordinación del Dr. Rubén Escribano (siendo los directores, Ariel Gallardo y posteriormente Carina Lange). Desde el año 2012, la STM estación 18 fue gestionada por un grupo de investigadores del DOCE, en parte pertenecientes al centro COPAS Sur Austral (marzo 2012, marzo 2016), CR2, INCAR y; posteriormente quedó bajo esfuerzos individuales de algunos académicos del DOCE, mayormente Laura Farías (2016-2021) con apoyos de Fabián Tapia (2016-2019) y Renato Quiñones (2016-2021), quienes financiaron la serie a través de proyectos FONDECYT, centro FONDAP CR2, INCAR, instituto Milenio SECOS y otras fuentes.

La estación 18 ha realizando salidas trimestrales desde mayo 1997 a abril 1999 (cruceros Thioploca) y luego mensuales desde mayo del 1999 a diciembre 2001 (Cruceros OEA). El Centro COPAS retomó las salidas mensuales en agosto del 2002.



A la fecha se llevan realizados 236 cruceros, con un rango de 9 a 12 salidas mensuales al año los cuales se han realizado en 95% en la lancha oceanográfica Kay Kay II perteneciente a la Universidad de Concepción. Dicha estación está localizada a los  $36^{\circ} 30,80'S$  y  $73^{\circ} 7,75'W$ , en el medio de la plataforma continental de Chile central, una de la más extensa de Chile continental, delimitada por dos grandes cañones submarinos de los ríos Itata y Biobío (Figura 3). Su localización fue elegida para capturar fundamentalmente la dinámica estacional de la surgencia costera, además de aquella asociada al océano austral y ecuatorial que otorgan señales de teleconexión climáticas remotas como el ENSO (EL Niño oscilación del Sur), Modo anular del Sur y Oscilación del Pacífico sur.



**Figura 3.** Localización geográfica de la estación de serie de tiempo: estación 18, donde se demarca la el afloramiento de aguas frías debido a la surgencia costera a través de la SST satelital. Se indican la presencia de los dos grandes ríos presentes en la región y ubicación del Pto. de Talcahuano (tomado de Sobarzo et al., 2007).

En la estación 18 se realizan mediciones continuas de temperatura, salinidad, radiación fotosintéticamente activa PAR y oxígeno, y discretas como clorofila y nutrientes (entre 6 a 9 profundidades). Se han realizados muestreos de abundancia y composición de bacterio-, fito-, ictio- y zooplancton; además se ha levantado información sobre procesos biofísicos tales como tasas de producción primaria, tasas de exportación de carbono, parámetros y biomarcadores en sedimentos. La estación 18 es una de las pocas estaciones del planeta que cuenta con registros continuos hasta la fecha de concentración de gases de efecto invernadero como óxido nítrico (desde 1998) y metano (2007) (Farías et al., 2015; Wilson et al., 2020). Así, la estación 18 se posiciona como una de las TSM más completa disponible para un sistema de surgencia costera del océano global (Anexo 1).



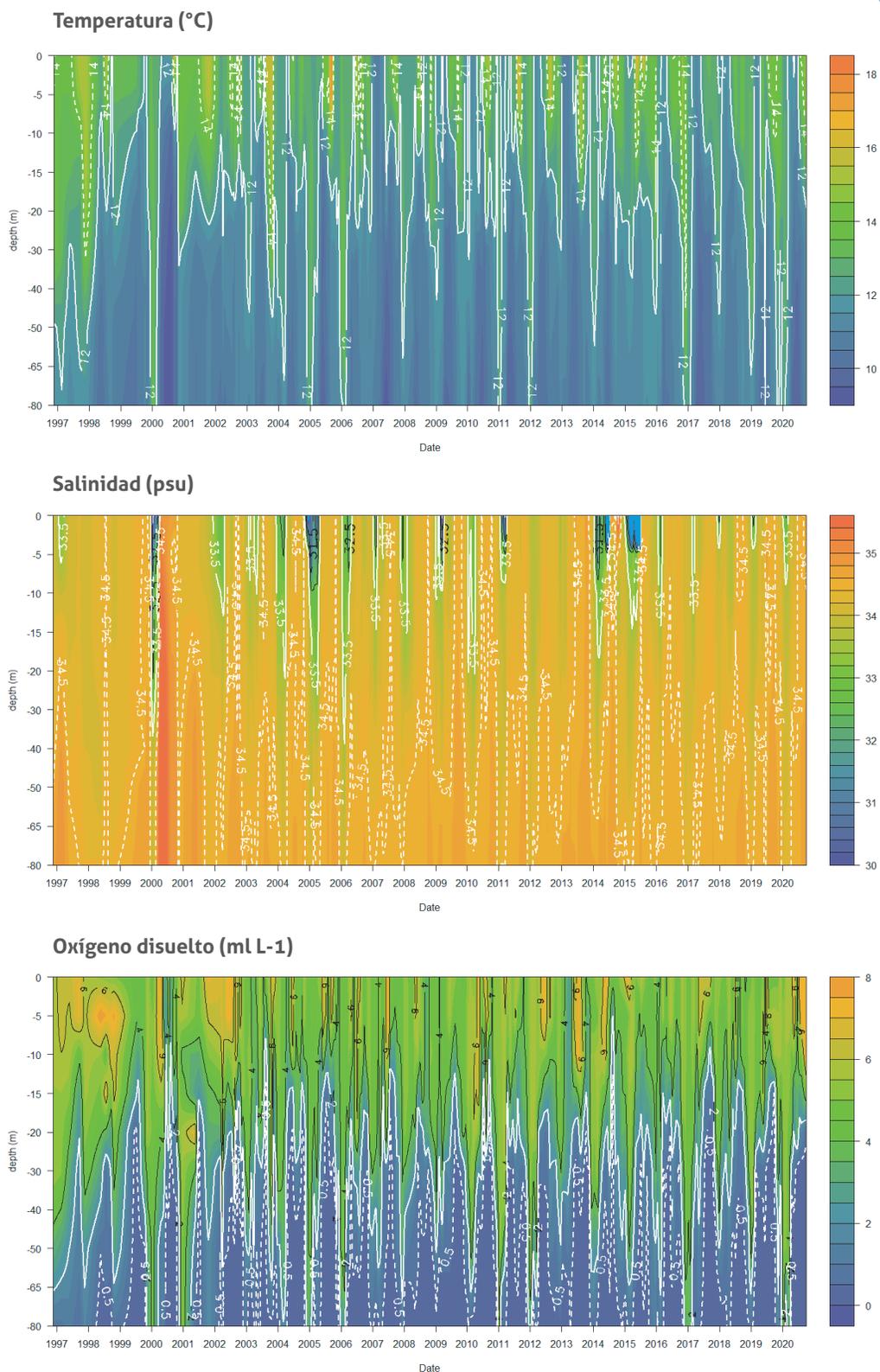
## El impacto de la estación 18

La serie de tiempo, como modelo de observación ha sido exitosa por cuanto ha generado numerosas publicaciones científicas siendo un insumo para el desarrollo de tesis de pre y postgrado, y motivo de hipótesis científicas en numerosos proyectos científicos. El Anexo II sintetiza los productos académicos generados a partir de esta serie de tiempo. Para contabilizar la producción científica asociada a la serie de tiempo de la Estación 18, se consideraron: tesis de pregrado y postgrado y artículos indexados de corriente principal, publicados entre los años 2002 y 2020.

La búsqueda se centró en los repositorios de: ANID, BIBLIOTECAS UDEC, DOCE UDEC, proyecto COPAS, proyecto COPAS SUR-AUSTRAL, WOS y SCOPUS. Se revisaron todas las publicaciones cuyo título, resumen y/o área de estudio, incluyera las siguientes palabras clave: "Chile central", "costa de Concepción", "serie de tiempo", "estación 18", "serie de tiempo COPAS", "estación de monitoreo", "estación fija", "estación fija a 18mn", "estación fija a 90 m de profundidad", "estación 36°30,8´ S-72°54,0´ W", "sistema de surgencia Chile central", "sistema de Corriente de Humboldt (HCS)", "plataforma frente a Concepción", "Bahía de Concepción", "costa de Concepción". Fueron seleccionadas e incluidas en los indicadores, las publicaciones que usaron datos provenientes de la estación 18 en su investigación.

Relativo a la evidencia científica, la STM estación 18 presenta evidencia sobre la variabilidad estacional modulada por el desplazamiento del Anticiclón del Pacífico Sur, que a su vez controla en parte la variabilidad de las variables hidrológicas (temperatura y salinidad, oxígeno).

La Figura 4 muestra la serie de tiempo a frecuencia mensual de variables como la temperatura, salinidad y oxígeno desde el año 1997 al presente, donde es posible observar periodos de calentamiento/enfriamiento, oxigenación/ desoxigenación, pérdida de salinidad, entre algunos. Existe la información de muchas otras variables y procesos biológicos y biogeoquímicos, no mostrados en este informe.

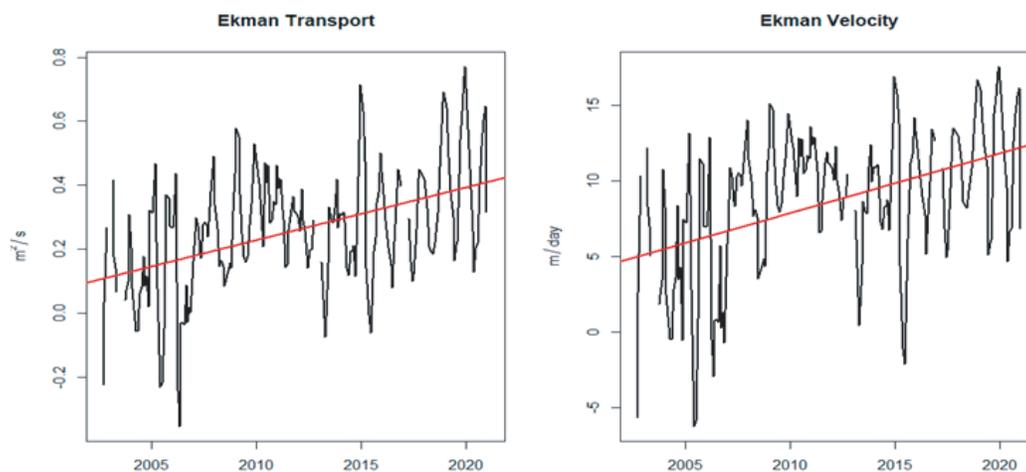


**Figura 4.** Serie de tiempo de a) temperatura, b) salinidad y c) oxígeno con mediciones en la columna de agua además de la clara estacionalidad se registran anomalías de oxigenación, temperatura y salinidad, en parte explicadas por el ciclo El Niño Oscilación Sur (ENSO).



Parte de la variabilidad a escala interanual está asociada al ciclo El Niño Oscilación del Sur (ENSO), pero además la región está afectada a variabilidad decadal relativa a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la cual modifica las características del anticiclón, repercutiendo en la dinámica estacional oceanográfica de la cuenca del océano Pacífico sur oriental. Además, la STM estación 18 ya muestra cambios de mayor aliento asociados al CC. Al respecto, se han registrado tendencias en las últimas décadas asociadas a la expansión e intensificación del anticiclón del Pacífico Sur (Ancapichun et al., 2015; Aguirre et al., 2018) proceso en parte asociado en una parte a la PDO y también al CC (simulación ante escenarios crecientes de emisiones de  $\text{CO}_2$ ).

Esto conlleva a la intensificación y expansión hacia el sur de los vientos favorables a surgencia (Figura 5) y por ende al mayor bombeo vertical y transporte lateral de agua fuera de la costa. Otro proceso que pudiera estar impactando sobre la variabilidad de los vientos, esto sobre todo al norte de los  $30^\circ\text{S}$ , es el fenómeno Bakun, que se origina por gradientes de presión que surgen de un calentamiento diferencial de tierra y mar debido al CC, mecanismo que también ha sido introducido por Weidberg et al. (2020).

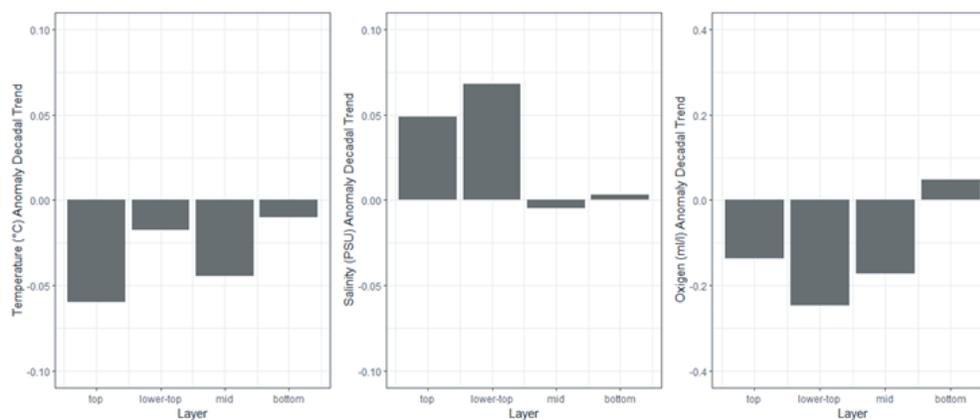


**Figura 5.** Tendencia decadal positiva de transporte y velocidad Ekman obtenido datos de vientos locales (estación meteorológica de Carrier Sur) desde el año 2000 y que dan cuenta de la intensificación del viento favorable a la surgencia costera

Los efectos de esta intensificación se han evidenciado a través de un enfriamiento y aumento de la salinidad de las aguas superficiales (Schneider et al., 2017; Aguirre et al., 2018, Winkler et al., 2020) y una disminución de la concentración del oxígeno superficial (Figura 6). Esto, podría ser debido al aumento de mayor bombeo de aguas subsuperficiales ricas en nutrientes, pero pobres en oxígeno, a la superficie.



Al fenómeno de intensificación de vientos se le suma una disminución drástica de caudales de los ríos que desembocan en la en región central de Chile, lo que se traduce en una menor exportación de nutrientes a la zona costera; la que podría ser relevante en periodos invernales (Masotti et al. 2018). Los cambios observados en reducción de plumas y disminución en la biomasa fitoplactónica en dichas plumas podrían tener consecuencias en asentamientos larvales de especies sujetas a manejo de recurso (Masotti et al., 2018), así como también a cambios en la composición de especies fitoplanctónicas (Jacob et al., 2018).



**Figura 6.** Tendencias decadales de a) Temperatura, b) Salinidad y c) Oxígeno por capas top (0 a 10 m); lower-top (15 a 20 m); mid (30 a 50 m); bottom (65 a 80 m). Data de frecuencia mensual desde mayo 1997 a mayo 2021

Aravena et al. (2014) registraron un enfriamiento superficial decadal, hipotetizando que los impactos de la variabilidad climática en los eventos de surgencia parecen ser espacialmente heterogéneos a lo largo de la región, debido a la configuración topográfica de la costa chilena. Dicha condición de enfriamiento a lo largo de la costa chilena ha sido ratificada por Winckler et al. (2020) entre los 18° y 55°S, aunque a diferentes tasas.

Relativo a la productividad biológica, evidenciada a través de su proxy de clorofila satelital, se ha observado un aumento de esta variable a lo largo de la costa chilena (Winckler et al., 2020), parte de incremento de productividad parece estar relacionado con un aumento en el flujo de nutrientes a superficie que estimula el crecimiento de fitoplacton en conjunción con el aumento de radiación fotosintética activa durante la primavera verano (Aguirre et al., 2018; Testa et al., 2018; Jacob et al., 2018).

Por otro lado, Weidberg et al. (2020), solo observan un incremento de la clorofila al norte de los 30°S; el aumento de la productividad probablemente se debe al aumento de los gradientes de presión tierra-mar (efecto de Bakun) que se han producido durante las últimas dos décadas en el norte. Además, Aguirre et al. (2021) registraron entre 1979 al 2019 (re-análisis de ERA5) el aumento de la duración y velocidad de vientos de chorro o jet costeros entre los 25°-43° S (vientos intensos pero de corta duración originados por anticiclones migratorios extra-tropicales que llegan a la costa de América).



Los resultados presentan evidencia de que el número de días con viento intenso ( $\geq 10 \text{ m s}^{-1}$ ) han aumentado significativamente en las últimas décadas. Los autores observaron un aumento en el número de eventos en toda el área de estudio durante el invierno, mientras que durante el verano se observó una disminución en latitudes más bajas ( $29\text{-}34^\circ\text{S}$ ), pero un aumento en el límite sur del sistema de Humboldt; sugiriendo un impacto directo al medio ambiente costero.

El mensaje más inmediato es que si bien ya existen algunas correlaciones que dan cuenta de los mecanismos de respuesta e impactos del CC en el océano costero, la influencia de la variabilidad climática a escala decadal (e.g., PDO, SAM) puede estar afectando las tendencias detectadas debido a la poca extensión de los datos disponibles; lo que insta a seguir observando al océano chileno.

Por lo tanto, los forzantes climáticos están controlando las tendencias decadales en las condiciones oceanográficas y la productividad primaria, pudiendo tener consecuencias de gran alcance para los ecosistemas costeros pelágicos y bentónicos y dar lugar a desplazamientos geográficos de las principales pesquerías. Existen reportes sobre cambios en las principales pesquerías chilenas asociadas al CC (principalmente calentamiento global), no obstante, el tema fundamental son la falta de mediciones propias, calibraciones, validación in situ y de modelos regionales, sean estos de circulación, tróficos y biogeoquímicos. En el Anexo III se muestra una recopilación de variables y procesos que están sujetas a cambios inminentes en los sistemas de surgencia de la costa chilena. Con los datos actualizados de la STM estación 18, se confirman y acentúan todas las anomalías ya reportadas en la literatura científica que van en la misma dirección de lo observado globalmente en otros centros EBUS (SROCC, 2018). De hecho, los cambios registrados en las últimas décadas se alinean con aquellos reportados por otros sistemas alrededor del mundo donde también se sintetizan las principales evidencias científicas en la materia (Todd et al., 2019)

Se hace un llamado de atención sobre el impacto que tienen estos cambios sobre las comunidades costeras, la infraestructura y los ecosistemas; donde es fundamental levantar todas las vulnerabilidades costeras y trabajar en la gestión de riesgos que deben basarse en el monitoreo de variables oceanográficas.

## Acciones y recomendaciones

Por lo expuesto, se recomienda declarar a la STM estación 18 como un patrimonio científico de la Universidad de Concepción y que se convierta en una estación de monitoreo y alerta ambiental y oceanográfica con presencia regional e identidad territorial, reconocida por las comunidades costeras de la región del Biobío. Para tal fin se deben tomar acciones consensuadas que favorezcan la continuidad y potencien la identidad de patrimonio científico de la UdeC:



- 1) Gestionar un financiamiento permanente que asegure continuidad, calidad de datos y servicios a la comunidad.
- 2) Generar un modelo de gobernanza institucional que involucre a todos los actores académicos, sociedad civil y comunidades interesadas.
- 3) Definir un nuevo plan estratégico de continuidad y valoración de la estación 18 para la década de los océanos.
- 4) Planificar una estrategia comunicacional respecto a visibilizar y dar a conocer sus resultados .
- 5) Difundir y divulgar resultados de rol de océano en el planeta Tierra y en particular la importancia de las surgencias costeras .
- 6) Incorporar nuevas mediciones a la STM como los del parámetro carbonatos, pCO<sub>2</sub>, y retomar mediciones de los distintos componentes de la comunidad planctónica, producción primaria y sedimentación, entre algunos.
- 7) Hacer un estudio de valoración económica de servicios ecosistémicos, en ambientes costeros y marinos, en particular las surgencias costeras.
- 8) Dimensionar la importancia de la surgencia costera en un escenario de cambio climático, relevar preguntas como: ¿Qué pasaría si no hubiera surgencias costeras? ¿Cómo sería la temperatura del planeta? ¿Cómo disminuirían los recursos pesqueros? Analizar ganancias/ pérdidas de SSEE en un escenario de cambio climático y otras alteraciones ambientales (intensificación de la surgencia y CC).
- 9) Dar acceso libre a datos analizados y procesados de la STM estación 18 en repositorios de datos nacionales e internacionales
- 10) Potenciar la observación de la estación 18 con acción de instalar la boya oceanográfica POSAR, sistemas acústicos y otros en la misma de medición automática coordinadas geográficas donde se sitúa la estación 18
- 11) Convertir a la STM en un observatorio socio-ecológico y una plataforma de aprendizaje para las escuelas de Municipios costeros de la región del Biobío
- 12) Generar productos de predicción y calibración de modelos biogeoquímicos y de circulación para hacer mejores predicciones sobre el oxígeno, pH, temperatura, nutrientes, fitoplancton, etc.



## Referencias

- Ancapichun, S., Garcés- Vargas, J. (2015). Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off northcentral Chile. *Ciencias Marinas*, 411, 1–20
- Aguirre, C, Garcia-Loyola, S., Testa, G., Silva, D. and Farías, L.. (2018). Insight into anthropogenic forcing on coastal upwelling off south-central Chile. *Elem Sci. Anth.*, 6: 59; doi.org/10.1525/elementa.314
- Aguirre, C. Flores-Aqueveque, V., Vilches, P., Vasquez, A. Rutland J., and Garreaud, R. (2021). Recent Changes in the Low-Level Jet along the Subtropical West Coast of South America. *Atmosphere* 12(4):465
- Aravena G., Broitman B., Stenseth N.C. (2014). Twelve Years of Change in Coastal Upwelling along the Central-Northern Coast of Chile: Spatially Heterogeneous Responses to Climatic Variability. *PLoS ONE* 9(2): e90276. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090276>
- Benway et al. (2019). Ocean Time Series Observations of Changing Marine Ecosystems: An Era of Integration, Synthesis, and Societal Applications. *Front. Mar. Sci.*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00393>
- Blanco, J. L., Thomas, A.C., Carr, M.E. and Strub P.T. (2001). Seasonal climatology of hydrographic conditions in the upwelling region off north-ern Chile, *J. Geophys. Res.*, 106, 11,451–11,467
- Breitburg et al. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science* 359, DOI: 10.1126/science.aam7240
- Capet, X., Colas, F., McWilliams, J.C., Penven, P. and Marchesiello, P. (2008). Eddies in Eastern Boundary Subtropical Upwelling Systems. In *Ocean Modeling in an Eddy Regime* (eds M.W. Hecht and H. Hasumi). <https://doi.org/10.1029/177GM10>
- Chavez, F.P., Messié, M. (2009). A comparison of eastern boundary upwelling ecosystems. *Progr. Oceanogr.* 83, 80–96
- Cisterna-Concha, A. (2020). Sistema de Corriente de Humboldt: un recurso vital para la biodiversidad marina. *Revista La Chiricoca*, 25: 5-12. <http://www.lachiricoca.cl/portfolio/volumen-25/>
- Daneri, G., Dellarossa, V., Quiñones, R., Jacob, B., Montero, P. & Ulloa, O. (2000). Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. *Mar Ecol Prog Ser*, 197: 41-49.
- Edwards M., Beaugrand G., Hays G.C., Koslow J.A., Richardson, A.J. (2010). Multi-decadal oceanic ecological datasets and their application in marine policy and management. *Trends in Ecology & Evolution* 25(10): 602–610. [/doi.org/10.1016/j.tree.2010.07.007](https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.07.007)
- Edwards, M., Beaugrand, G., Hays, G.C., Koslow, J.A. and Richardson, A. J. (2010). Multidecadal oceanic ecological datasets and their application in marine policy and management. *Trends in Ecology & Evolution*, 25: 602–610, doi:10.1016/j.tree.2010.07.007.
- Ekman, V. W. (1905). On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Arch. Math. Astron. Phys.*, 2, 1-52
- Farías, L., Besoain, V., and García-Loyola, S. (2015). Presence of nitrous oxide hotspots in the coastal upwelling area off central Chile: an analysis of temporal variability based on ten years of a biogeochemical time series, *Environ. Res. Lett.*, 10, 044017, doi.org/10.1088/1748-9326/10/4/044017



Farías, L., C. Fernández, R. Garreaud, L. Guzmán, S. Hormazábal, C. Morales, D. Narváez, S. Pantoja, I. Pérez, D. Soto y P. Winckler (2019). Propuesta de un Sistema Integrado de Observación del Océano Chileno (SIOOC). Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Fossing H., Gallardo V.A., Jørgensen B.B et al. (1995) Concentration and transport of nitrate by the mat-forming sulphurbacterium *Thioploca*. *Nature* 374: 713–715.

Fundación Chile (2016). Servicios ecosistémicos para la gestión del agua. Proyecto Water Clima LAC. Santiago, Chile.

GLOBEC (1997). Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC) Science Plan. Final editing by R. Harris and the members of the GLOBEC Scientific Steering Committee (SSC). IGBP Report 40. 83 pp

Henson, S.A. (2014). Slow science: the value of long ocean biogeochemistry records. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 372: doi: 10.1098/rsta.2013.0334.

Jacob, B.J., Tapia, F.J., Quiñones, R.A., Montes, R., Sobarzo, M., Schneider, W., Gonzalez, 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.

JGOFs (1990). Joint Global Ocean Flux Study (JGOFs) Science Plan. JGOFs Report No 5. 67 pp.

Karl, D.M. (2010). Oceanic ecosystem time-series programs: Ten lessons learned. *Oceanography*, 23(3): 104–125.

O'Brien, T.D., Lorenzoni, L., Isensee, K., and Valdés, L. (Eds). (2017). What are Marine Ecological Time Series telling us about the ocean? A status report. IOC-UNESCO, IOC Technical Series, No. 129: 297 pp.

Pauly, D. and Christensen, V. (1995). Primary production required to sustain global fisheries. *Nature* 374, 255–257

Poloczanska, E.S, Burrows, M.T., Brown, C.J., García Molinos, J., Halpern, B.S., Hoegh-Guldberg, O., Kappel C.V., Moore P.J, Richardson A.J., Schoeman DS and Sydeman, W.J. (2016) .Responses of Marine Organisms to Climate Change across Oceans. *Front. Mar. Sci.* 3:62

Quezada, M., P. and Álvarez, B. (2021). Modo de producción y modo de vida de la pesca artesanal en una caleta pesquera rural: el proceso de transformación productiva y sus implicancias sobre la formación cultural de la isla Chaullín, Región de Los Lagos. *Revista LIDER*, 8(8), 93-112. Recuperado de: <https://revistaliderchile.com/index.php/liderchile/article/view/262> 27 Jun. 2021

Reddin, C.J., Docmac F., O'Connor, N.E., Bothwell, J.H., Harrod, C. (2015). Coastal Upwelling Drives Intertidal Assemblage Structure and Trophic Ecology. *PLoS ONE* 10(7): e0130789. doi:10.1371/journal.pone.0130789

Reid, P. C. and Valdés, L. (2011). ICES status report on climate change in the North Atlantic. ICES Cooperative Research Report No. 310. 262 pp

Roman, M.R., Brandt, S.B., Houde, E.D. and Pierson, J.J. (2019). Interactive Effects of Hypoxia and Temperature on Coastal Pelagic Zooplankton and Fish. *Front. Mar. Sci.* 6:139. doi: 10.3389/fmars.2019.00139

Sherman, K. and Hempel, G. (2008). The UNEP large marine ecosystem report: a perspective on changing conditions in LMEs of the world's Regional Seas. UNEP Regional Seas report and studies No. 182. United Nations Environment Programme, Nairobi; sitio LTER <https://natureconservation.pensoft.net/article/30789/element/4/440/>



Snowden, J., Hernandez, D., Quintrell, J., Harper, A., Morrison, R., Morell, J. and Leonard, L. (2019). The U.S. Integrated Ocean Observing System: Governance Milestones and Lessons From Two Decades of Growth. *Front. Mar. Sci.* 6:242. doi: 10.3389/fmars.2019.00242

Sobarzo, M., Bravo, L., Donoso, D. Garcés-Vargas, J. and Schneider, W. (2007). Coastal upwelling and seasonal cycles that influence the water column over the continental shelf off central Chile, *Prog. Oceanogr.*, 75, 363–382, doi:10.1016/j.pocean.2007.08.022

SROCC (2019) Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing, <https://www.ipcc.ch/srocc/>  
Todd, R.E. et al. (2019). Global Perspectives on Observing Ocean Boundary Current Systems. *Front. Mar. Sci.*, doi.org/10.3389/fmars.2019.00423

Strub, P., J. Mesias, V. Montecino, J. Rutland, and S. Salinas (1998). Coastal-ocean circulation off western south America, in *The Sea: The Global Coastal Ocean, Regional Studies and Synthesis*, edited by A. R. Robinson and K. H. Brink, chap. 10, pp. 273–313, John Wiley, New York

Thiel, M., Macaya, E.C., Acuña, E., Arntz, W.E., Bastías, K., Brokordt, P.A. et al. (2007). The Humboldt Current System of Northern and Central Chile: Oceanographic processes, ecological interactions and socioeconomic feedback. *Oceanography and Marine Biology*. 45: 150 pp.

Trowbridge, J., R. Weller, D. Kelley, E. Dever, A. Plueddemann, J. A. Barth, and O. Kawka (2019). The Ocean Observatories Initiative. *Front. Mar. Sci.* 6:74. doi: 10.3389/fmars.2019.00074

Tweddle, J. F., Gubbins, M., and Scott, B.E. (2018). Should phytoplankton be a key consideration for marine management? *Marine Policy*, 97, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.08.026>

Ulloa, O., and S. Pantoja (2009). The oxygen minimum zone of the eastern South Pacific. *Deep-Sea Research II*, 56, 987-991.

Ulloa, O, Belmar, L., Farías, L., Castro-González, M., Galán, A., Lavín, P., Molina, V., Ramírez, S., Santibáñez, F., and Stevens, H. (2006). Microbial communities and their biogeochemical role in the water column of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific. *Gayana (Concepción)*, 70(Supl. 1), 87-89. doi.org/10.4067/S0717-65382006000300018

Weller, R.A., D. J. Baker, M.M. Glackin, S.J. Roberts, R.W. Schmitt, E.S. Twigg, & D.J. Vimont (2019). The Challenge of Sustaining Ocean Observations. *Front. Mar. Sci.* 6:105. doi: 10.3389/fmars.2019.00105.

Wilson, S. T., Al-Haj, A. N., Bourbonnais, A., Frey, C., Fulweiler, R. W., Kessler, J. D., Marchant, H. K., Milucka, J., Ray, N. E., Suntharalingam, P., Thornton, B. F., Upstill-Goddard, R. C., Weber, T. S., Arévalo-Martínez, D. L., Bange, H. W., Benway, H. M., Bianchi, D., Borges, A. V., Chang, B. X., Crill, P. M., del Valle, D. A., Farías, L., Joye, S. B., Kock, A., Labidi, J., Manning, C. C., Pohlman, J. W., Rehder, G., Sparrow, K. J., Tortell, P. D., Treude, T., Valentine, D. L., Ward, B. B., Yang, S., and Yurganov, L. N. (2020). Ideas and perspectives: A strategic assessment of methane and nitrous oxide measurements in the marine environment, *Biogeosciences*, 17, 5809–5828, <https://doi.org/10.5194/bg-17-5809-2020>.



## Anexos (no incluidos en este borrador)

Anexos (no incluidos en este borrador)

ANEXO I. Tabla que indica variables y procesos medidas, profundidades, metodología usada y interrupción de la estas (gap)

ANEXO II Indicadores de productividad de la STM estación 18. Se consideran las tesis de pregrado y postgrado, entre los años 2002 y 2020, y las publicaciones indexadas entre los años 2002 y 2019.

ANEXO III. Cambios long term registrados en variables y procesos en EBUS de otras regiones del mundo y aquellos registrados en Chile



Diseño, diagramación e ilustraciones  
Esporascicomm  
[www.esporascicomm.com](http://www.esporascicomm.com)