



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS -ESCUELA DE PREGRADO

“ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUAS COSTERAS PARA CHILE”

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de

Química Ambiental

NATALIA CECILIA CALDERÓN ARMIJO

Director Seminario de Título: Harry Lizama Farías
Profesora Patrocinante: Dra. Isel Cortés Nodarse

Enero 2019
Santiago-Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la candidata:

NATALIA CECILIA CALDERÓN ARMIJO

“ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUAS COSTERAS PARA CHILE”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de Químico Ambiental.

Harry Lizama Farías
Director Seminario de Título

Isel Cortés Nodarse
Profesora Patrocinante

Mercedes Becerra
Presidenta

Richard Toro
Evaluador

Noviembre 2017
Santiago-Chile



Natalia nació un 7 de enero del 1993, en Santiago, hija de Leonardo Calderón y Cecilia Armijo, fue la primera nieta de la familia y la hermana menor de Leo, esto de ser la más pequeña de la familia sólo duró un año, ya que, llegó Dany y terminó siendo la hermana del medio.

Creció rodeada de su familia, sus padres, hermanos, primos, tíos y abuelitos; en su infancia fue de todo, desde ser una power ranger hasta maestra pokemón.

Como en la mayoría de las vidas, se llega a un momento en que la libertad se pierde un poco, esto es cuando empiezan las tareas, los trabajos, los domingos en los que se olvida pedir la cartulina a tus papás o estudiar para alguna prueba, esto sucede cuando entró al Colegio Excelsior, durante esta etapa no sintió nada por la química, incluso si le hubieran preguntado en esta época si hubiera estudiado algo relacionado con ciencias se reiría en su cara, pero como todo cambia, esto también lo hizo.

Luego de salir del colegio, no sabía que estudiar y qué hacer con su vida, así que decide tomarse un año y hacer un preuniversitario, este fue el lugar en que comienza a inclinarse por la química. Un año más tarde, entra a la carrera de Química Ambiental en la Universidad de Chile, un lugar donde sufrió pero también la pasó muy bien y conoció a amigos que siempre la han apoyado.

Esta historia se sigue escribiendo, y espero que consiga algún hobby o encuentre un talento para que esta historia tenga un poco más de acción...

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia quienes me soportaron en los años de universidad, a mi papá: quien me llevaba en auto al metro todas las mañanas cuando entraba a las 8:30 o cuando había problemas con el metro y me llevaba directo a la U salvándome de llegar tarde a alguna prueba, aunque no faltaron las veces en que me llevaba y llegaba más tarde de lo previsto; me rayaba los cuadernos dejando mensajes del porte de la hoja; me mandaba a acostar cuando estudiando en la noche/madrugada y por ser un papá que siempre está en todas. A mi mamá, por su constante preocupación de mis horas de sueño y de cómo me había ido en las pruebas; quien me hacía compañía mientras ella planchaba y yo estudiaba; me dejaba mensajes en los cuadernos en los que tenía que estudiar, por ser simplemente mi mamá. A mis hermanos, a la Dany quien siempre me acompañó en todo lo que se nos ocurría, por sus mensajes hechos de servilleta o en el envoltorio del té que me dejaba en algún lugar y al Leo por financiarnos los caprichos que teníamos con la Dany, por molestarme aun sabiendo que estaba estresada, o al mandarme a acostar cuando estudiaba, a ellos que sé que me acompañarán siempre. A mi abuelita Nena, quien me pregunto innumerables veces cuando terminaba la carrera, y bueno, con esto hay buenas noticias, ya se acabó esta etapa, además por ser siempre muy preocupada y por ayudarnos en todos. Al Ian y al Logan por ser los mejores hermanos menores, por su compañía cuando estudiaba o sólo veía tele, porque querían jugar cuando tenía cosas que hacer y me rompían los cuadernos, por ser simplemente los más regalones de la casa.

A ellos por ser incondicionales en esta etapa que llega a su fin, por soportarme aun cuando estaba muy estresada y aun así creo que me seguían queriendo, perdón por las buenas noches que les deje de dar antes de ir a acostarme por estar estudiando y haber ido menos veces a Malloa por lo mismo. Estoy muy agradecida por todo lo que me dieron.

AGRADECIMIENTOS

En primer me gustaría agradecer a mi familia por siempre estar conmigo, sin importar mi estado de ánimo, a mis padres por su esfuerzo en querer darnos lo mejor a mí y mis hermanos, incluyendo al Ian y al Logan.

Agradezco también a todos los que me ayudaron en el Ministerio del Medio Ambiente, desde que empezó mi práctica con Viviana Riveros quien me hizo sentir muy cómoda y acogida, a Harry Lizama quien me ofreció la oportunidad de realizar el seminario de título, por su buena onda y su total disponibilidad en ayudarme en todo lo que pudiera necesitar. A Eduardo por ayudarme con los mapas y a María José Herrera por resolver mis dudas.

Agradezco a la profesora Isel, por ser una guía y enseñarme el proceso de la creación de un índice, por su buena disposición para resolver mis dudas y complicaciones, y por hacerme sentir más segura de lo que estaba haciendo.

Agradezco a Eugenia del POAL quien me ayudo a entender con mayor claridad los datos entregados por el programa y su disponibilidad a resolver mis preguntas.

Agradezco a mis amigos de la U, Cami, Pauli, Cindy, Bruno, Camilo y Pancho, por las tardes de estudio o de risas en la biblioteca y los viernes en los pastos o en Calama, que a pesar de que ya no teníamos ramos juntos seguimos juntos apoyándonos. Mención honrosa a PACANAs, a la Pauli y Cami, las que siempre estuvieron conmigo sin importar las circunstancias, por los buenos momentos que vivimos juntas en la U, desde los viajes en la micro hasta los laboratorios, por ser unas muy buenas amigas y hacerme sentir que la U no es tan horrible como parecía y también a Bruno por ayudarme en este proceso y contestar todas mis dudas, además de ser un muy buen amigo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.1.1. Desarrollo Sostenible.....	1
1.1.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible	1
1.1.3. El océano	3
1.1.4. Problemas en el océano	4
1.1.5. Calidad del agua.....	5
1.1.6. Índices.....	6
1.2. Antecedentes Específicos.....	7
1.2.1. El océano chileno	7
1.2.2. Chile y los Objetivos del Desarrollo Sostenible	7
1.2.3. Red de Información del Pacífico Sur en apoyo a la Gestión Integrada de Áreas Costeras.....	10
1.2.4. Indicador de calidad de aguas costeras para los países del proyecto SPINCAM.	12
1.2.5. Limitaciones del índice del proyecto SPINCAM.	13
1.2.6. Clasificación de ecosistemas marinos chilenos de la zona económica exclusiva.....	14
1.3. Objetivos	27
1.3.1. Objetivo general	27

1.3.2.	Objetivos Específicos	27
II.	MÉTODOS	29
2.1.	Elaboración del índice de calidad de aguas costeras (ICAC) para Chile	29
2.2.	Base de datos.....	32
III.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
3.1.	Revisión Bibliográfica	33
3.2.	Elaboración del Índice de calidad de aguas costeras para Chile (ICAC)	38
3.2.1.	Análisis dpe la base de datos entregados por el P.O.A.L	45
3.2.2.	Selección de Parámetros.....	48
3.2.3.	Definición de los parámetros seleccionados para el ICAC	49
3.2.4.	Definición de sub-índices: Curvas de función	52
3.2.4.1.	Oxígeno Disuelto	52
3.2.4.2.	Nitrato.....	54
3.2.4.3.	Fosfato	55
3.2.4.4.	Coliformes Fecales.....	57
3.2.4.5.	Sólidos Suspendidos Totales.....	58
3.2.5.	Asignación de pesos o valor de importancia	60
3.2.6.	Agregación de parámetros.....	61
3.2.7.	Rangos de clasificación según los índices seleccionados.....	62
3.2.8.	ICAC aplicado por Ecorregión	67
IV.	CONCLUSIONES.....	81
V.	BIBLIOGRAFÍA.....	84
VI.	ANEXO.....	92
6.1.	Límites de detección de los métodos usados por el POAL.	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de variables (Samboni y col., 2007).....	35
Tabla 2: Fórmulas de agregación de los subíndices utilizadas en un ICA (Samboni y col., 2007)	37
Tabla 3: Revisión bibliográfica de los índices de calidad de agua (Elaboración Propia).39	
Tabla 4: Parámetros monitoreados por el POAL (Elaboración Propia).	47
Tabla 5: Parámetros seleccionados para el ICAC propuesto (Elaboración Propia).	48
Tabla 6: Categorías y escala de valoración para Oxígeno disuelto.	53
Tabla 7: Categorías y escala de valoración para el Nitrato.....	54
Tabla 8: Categorías y escala de valoración para Fosfato.	56
Tabla 9: Categorías y escala de valoración para Coliformes Fecales.....	57
Tabla 10: Categorías y escala de valoración para Sólidos Suspendidos Totales.	59
Tabla 11: Ecuaciones de función de las curvas para determinar el subíndice del ICAC	60
Tabla 12: Índices elegidos para el estudio del ICAC.....	61
Tabla 13: Clasificación de categorías de los índices por calidad.	62
Tabla 14: Resultados obtenidos aplicando las fórmulas seleccionadas.....	63
Tabla 15: Rango de Clasificación o evaluación de la calidad del agua costera, según Cooper.....	66
Tabla 16: Resultados obtenidos del ICAC por ecorregión.	67
Tabla 17: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión del Norte Grande	68
Tabla 18: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Paposo Taltal.....	69
Tabla 20: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Los Molles.....	72
Tabla 21: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Chile Central.	73
Tabla 22: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Chiloé Taitao.....	75
Tabla 23: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Kawesqar.....	76
Tabla 24: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Magallanes	77
Tabla 25: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Isla de Pascua	78
Tabla 26: Límites de detección de cada parámetro en matriz de agua de mar.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ecorregión del Norte Grande y Pacífico Sudeste con estaciones de monitoreo.	18
Figura 2: Ecorregión de Atacama, Norte grande, Pacífico Sudeste y Paposo Taltal con estaciones de monitoreo.	19
Figura 3: Ecorregión de Atacama, Chile Central, Pacífico Sudeste y Los Molles con estaciones de monitoreo.	20
Figura 4: Ecorregión de Chile Central, Los Molles y Pacífico Sudeste con estaciones de monitoreo.	21
Figura 5: Ecorregión de Centro Sur, Chile Central, Chiloé Taitao, Pacífico Sudeste y Pacífico Austral Oceánico con estaciones de monitoreo.	22
Figura 6: Ecorregión de Chiloé Taitao, Kawesqar y Pacífico Austral Oceánico con estaciones de monitoreo.	23
Figura 7: Ecorregión de Chiloé Taitao, Kawesqar, Magallanes y Pacífico Austral Oceánico con estaciones de monitoreo.	24
Figura 8: Ecorregión de Kawesqar, Magallanes y Pacífico Austral Oceánico con estaciones de monitoreo.	25
Figura 9: Ecorregión de Isla de Pascua con estaciones de monitoreo.	26
Figura 10: Selección de parámetros	29
Figura 11: Definición de subíndices o curvas de calidad.	30
Figura 12: Asignación de valor de importancia a cada parámetro.	31
Figura 13: Unificación de índices mediante fórmula matemática.	31
Figura 14: Rangos de clasificación según Cooper.	32
Figura 15: Mapa de cuerpos de aguas monitoreados por el POAL	46
Figura 16: Curva o Subíndice de Oxígeno Disuelto.	53
Figura 17: Curva o Subíndice de Nitrato	55
Figura 18: Curva o Subíndice de Fosfato.	56
Figura 19: Curva o Subíndice de Coliformes Fecales	58
Figura 20: Curva o subíndice de Sólidos Suspendidos Totales.	59

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo construir un índice de calidad de aguas marino-costeras para evaluar el estado del recurso hídrico marino de las ecorregiones de Chile, permitiendo un análisis fisicoquímico del agua considerando las áreas con una composición de especies relativamente homogénea y características oceanográficas o topográficas. Para la realización del índice se considera la base de datos del 2017 entregada por el Programa de observación del ambiente litoral (POAL) de la Armada de Chile, el cual tiene estaciones de monitoreo en todo el país.

Para construir el índice se inicia con una búsqueda bibliográfica, en la cual se revisan diez índices utilizados a nivel mundial, esto se realiza con el fin de poder analizar metodologías usadas en estos índices. Luego se seleccionan los parámetros fisicoquímicos, considerando la bibliografía revisada además de los parámetros que son medidos por el POAL, siendo seleccionados los siguientes parámetros: oxígeno disuelto, nitrato, fosfato, coliformes fecales, sólidos suspendidos totales. A continuación, se definen las curvas de calidad o subíndices de cada parámetro, lo anterior se realizó revisando la bibliografía y normativas nacionales e internacionales. Seguidamente, se asigna el peso o valor de importancia que tiene cada parámetro dentro del índice. El peso asignado para cada parámetro fue de 0,2, ya que la suma de estos debe sumar 1. Después de esto, se unifican los subíndices de cada parámetro a través de una fórmula matemática propuesta por Cooper. Luego, se define la escala de valoración del índice en 5 categorías: excelente (calidad entre 91-100), bueno (calidad entre 71-90), razonable (calidad entre 51-70), contaminada (calidad entre 26-50) y muy contaminada (calidad entre 10-25); esta fue basado en el índice de Cooper. La aplicación del índice de calidad de aguas costeras (ICAC) por ecorregiones muestra que en la del Norte fue de 67; en la

ecorregión de Atacama se obtuvo 58; en Paposo Taltal se tiene una calidad de 45; en Los Molles se tiene 66; en Chile Central se obtuvo 60; en Chiloé Taitao, Kawesqar, Magallanes e Isla de Pascua se obtuvieron valores de 78, 94, 87, y 72, respectivamente. Esto indica que a nivel general Chile presenta una calidad catalogada como razonable por Cooper, indicando que la calidad puede ser mejorada a bajo costo.

La razón de que las ecorregiones con peor calidad sean Norte Grande, Atacama, Los molles y Chile Central, es por la actividad minera de la zona, ya que se encuentra la producción nacional de las rocas fosfóricas, esto tiene como consecuencia que en estos lugares se presente una alta cantidad de fosfatos, produciendo eutrofización en el océano, lo que lleva a una afectación a la calidad de los otros parámetros como lo es: el oxígeno disuelto, ya que cuando se degradan las algas se consume oxígeno disuelto, y los sólidos suspendidos, ya que con la producción minera se trasladan por el viento a los océanos.

ABSTRACT

The aim of the present work is to develop a marine-coastal water quality index to evaluate the state of the marine water resource of the Chilean ecoregions, allowing a physicochemical analysis of the water considering the diverse ecosystems of the country. For the realization of the index, the dataset of 2017 was provided by the Programa de Observación del Ambiente Litoral (POAL) of the Chilean Navy, which has monitoring stations throughout the country.

To begin to develop the index is necessary a bibliographic review of different indexes used worldwide, this is performed to see the methodologies used. Then the physicochemical parameters are selected considering the bibliography checked in addition to the parameters that were measured by the POAL. The parameters considered are: dissolved oxygen, nitrate, phosphate, fecal coliforms, and total suspended solids. Then, the quality curves or sub-indices of each parameter are defined, this was done by the bibliographic review, national and international normatives. In addition, the weight or importance value of each parameter has within the index is assigned. The weight assigned for each parameter was 0.2, being the sum of all parameters: 1. After this, we proceed to unify the sub-indices of each parameter in a mathematical formula proposed by Cooper. Then, the rating scale of the index is defined in 5 categories: excellent (quality between: 91-100), good (quality between: 71-90), reasonable (quality between: 51-70), contaminated (quality between: 26- 50) and highly contaminated (quality between: 10-25), this was based on the Cooper index. Finally, the marine-coastal waters quality index was tested by ecoregions.

According to this proposal, the qualities obtained in the ecoregion were in the range between 45 to 87 in the ecorregión of Pajón Taltal and Magallanes. This indicates that

in general Chile presents a quality listed as reasonable by Cooper, indicating that quality can be improved at low cost.

The ecoregions with the worst quality are Norte Grande, Atacama, Los molles and Chile Central, is due to the mining activity in the area, this is where the national production of the phosphate rock is located, this causes that in these places a high amount of phosphates is occurs, producing eutrophication in the ocean, which leads to an affectation to the quality of the other parameters such as: dissolved oxygen, this is because when the algae are degraded dissolved oxygen is consumed, and solids suspended, since with the mining production they move by the wind to the oceans.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes Generales

1.1.1. Desarrollo Sostenible

En el informe de Brundtland redactado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 1987, se definió por primera vez el concepto de “Desarrollo Sostenible” o Desarrollo Sustentable, como aquel que “satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones” (ONU, 1987). Esta definición pretendía establecer relaciones entre los aspectos económicos, sociales y ambientales. En 1992, en la Cumbre de la Tierra de Naciones Unidas realizada en Río de Janeiro se elaboró la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo sostenible, que asume por primera vez, y a nivel mundial, el desarrollo sostenible como guía para la formulación de políticas de desarrollo regional (Larrouyet, 2015).

1.1.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) surgieron en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (Río + 20), celebrada en Río de Janeiro en 2012, donde los 193 Estados Miembros de las Naciones Unidas llegaron a un consenso sobre una nueva agenda de desarrollo sostenible titulado “Transformar nuestro mundo: la Agenda de 2030 para el desarrollo sostenible”, la que contiene 17 objetivos y 169 metas. Luego de un proceso transparente y participativo, entre los Estados Miembros de las Naciones Unidas, se aprobó oficialmente en septiembre del 2015 la agenda universal, para iniciar medidas que pongan fin a la pobreza y lograr un equilibrio sostenible en los próximos 15 años.

Los ODS coincidieron con otros acuerdos históricos celebrados en 2015, el Acuerdo de París aprobado en la Conferencia sobre el Cambio Climático (COP21), junto con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, firmado en Japón en marzo de 2015, estos acuerdos proveen un conjunto de normas comunes y metas viables para reducir las emisiones de carbono, gestionar los riesgos del cambio climático y los desastres naturales, y la reconstrucción después de una crisis (Ministerio del Medio Ambiente).

Los ODS se basan en los logros de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), aprobados en 2000, los que estaban orientadas en crear medidas para reducir la pobreza extrema, dar acceso al agua, disminuir la mortalidad infantil, mejorar la salud materna, lograr una educación primaria universal, avanzar en la lucha contra el VIH/SIDA y otras enfermedades como la malaria y a tuberculosis. Los ODM han demostrado que son efectivos, ya que, los objetivos mundiales establecidos pudieron sacar a millones de personas de la pobreza y han logrado avances en el control de enfermedades (ONU).

El propósito de la Agenda de 2030 es crear un conjunto de objetivos mundiales centrados en tres elementos del desarrollo sostenible: crecimiento económico, inclusión social y la protección ambiental. Los 17 objetivos están interrelacionados, ya que, el éxito de uno afecta a otro, involucrando el cambio climático, fomentar la paz, erradicación de la pobreza y la prosperidad de la economía, entre otros. Estos objetivos tienen carácter mundial, son universalmente aplicables y no son independientes entre sí; es necesario que se apliquen de forma integrada, tomando en cuenta las realidades y niveles de desarrollo nacionales, respetando las políticas y prioridades nacionales. Para alcanzar estos objetivos es necesario que se involucren los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil.

Los objetivos son: fin de la pobreza; hambre cero; salud y bienestar; educación de calidad; igualdad de género; agua limpia y saneamiento; energía asequible y no contaminante; trabajo decente y crecimiento económico; industria, innovación e infraestructura; reducción de las desigualdades; ciudades y comunidades sostenibles; producción y consumo responsables; acción por el clima; vida submarina; vida de ecosistemas terrestres; paz, justicia e instituciones y alianzas para lograr los objetivos (ONU).

1.1.3. El océano

Históricamente, el desarrollo de civilizaciones humanas a menudo se ha concentrado en áreas costeras, donde el acceso al agua promovía el comercio y la eliminación de desechos (van Andel, 1981). El océano cubre un 71% de la superficie de la Tierra siendo clave para el ser humano, ya que, proporciona alimentos, regula la temperatura en las zonas circundantes además de proporcionar una oportunidad recreacional. Las regiones costeras son áreas claves para la actividad biológica y generan una producción que mantiene el 90% de las capturas de peces (Pauly y col., 2002) considerando que, los ambientes marinos costeros contienen una mayor biodiversidad que las regiones de océano abierto (Gray, 1997).

En un mundo con más de siete billones de personas, casi la mitad vive cerca de la costa, donde las personas se benefician directa o indirectamente del océano, ya sea, extrayendo alimentos, visitando áreas costeras o continuando con sus tradiciones centenarias (Socioeconomic Data and Applications Center). Como consecuencia, la alteración humana de los ecosistemas naturales es profunda en las áreas costeras, y un concepto central de la gestión ambiental es maximizar el desarrollo sostenible benéfico y minimizar los impactos a la integridad ecológica (Müller, 2005).

Una correcta gestión de los océanos es un factor clave para lograr un futuro sostenible, ya que involucra el factor económico: permitiendo la extracción de alimentos, siendo la ubicación de puertos marítimos y un foco de turismo; el factor social: un lugar para la recreación y medio ambiental: siendo el ecosistema de diversos seres vivos. Sin embargo, en la actualidad hay diferentes factores antropogénicos y relacionados con el cambio climático, que generan un continuo deterioro de las aguas costeras, provocando un efecto adverso sobre el funcionamiento de los ecosistemas y la biodiversidad.

1.1.4. Problemas en el océano

A nivel mundial, las aguas costeras, estuarinas y de transición se han visto afectadas por las actividades del hombre, como lo son:

- La Contaminación causada por los plásticos y la basura, ya que, ya que, al funcionar como un centro recreacional está en contacto directo con las personas y en conjunto con la falta de educación ambiental. Esto provoca que en las playas se acumulen colillas de cigarro, botellas de plástico, bolsas, etc., lo que causa problemas a escala mundial, afectando de forma negativa a la biodiversidad marina (Haward, 2018).
- La Eutrofización causa la llamada “polución de nutrientes”, una de las razones de esto, es el uso excesivo de fertilizantes en las zonas aledañas a la costa, provocando un exceso de nutrientes que llegan al mar por escorrentía, lo que lleva a un aumento en la población de algas, teniendo como consecuencia la reducción de luz y oxígeno, pérdida de la biodiversidad, como también conduce a la hipoxia y anoxia, degradación del hábitat y alteración de la red trófica (Chislock y col., 2013; Howarth, 2008).

- Acidificación de los océanos, la cual está relacionada directamente con la química de los carbonatos, debido a que el dióxido de carbono, liberado por actividades antropogénicas hacia la atmósfera es absorbido por el océano, lo que podría causar un impacto negativo sobre la biota marina, ya que, cuando se disuelve el dióxido de carbono en el océano provoca una baja de pH afectando a especies que contienen el carbonato de calcio en sus conchas o esqueletos. Para analizar estos impactos se necesita una mayor cooperación científica para comprender las consecuencias que puede tener esta baja en el océano (Caldeira & Wickett, 2003).
- Sobrepesca intensificada por la pesca ilegal, no declarada y no reglamentada que provoca una reducción de biodiversidad poniendo en peligro la capacidad de restablecerse, además induce una pérdida de ingresos potenciales en la industria pesquera (Food and Agriculture of United States, 2016).

1.1.5. Calidad del agua

El término calidad del agua es relativo, está referido a la composición del agua en la medida en que ésta es afectada por la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y actividades humanas (OMS, 2006). Como tal, es un término neutral que no pueda ser clasificado como bueno o malo, sin hacer referencia al uso para el cual el agua es destinada. La calidad del agua en este caso depende de las características químicas, físicas y biológicas que son adquiridas a través de diferentes procesos naturales y antropogénicos, y para evaluarla se deben tener en cuenta diferentes variables según el uso al cual este destinado el cuerpo de agua (Beamonte y col., 2004).

1.1.6. Índices

Uno de los grandes problemas que se encuentra al analizar la calidad de aguas, es poder sintetizar toda la información disponible del monitoreo del agua, ya que, esta suele ser compleja y de difícil entendimiento para todos los interesados en el tema, además de poder incluir diferentes variables que puedan determinar la calidad del agua en una sola herramienta. Una de las soluciones que se dan a los problemas mencionados anteriormente, es construir un índice de calidad de agua (ICA). Los ICA son básicamente una expresión de un número de parámetros o variables que permiten valorar el recurso hídrico para un determinado uso o criterio y son representados en forma de: número, rango, descripción verbal, símbolo o color; su ventaja radica, en que la información puede ser más fácilmente interpretada que una lista de valores numéricos. Consecuentemente, un índice de calidad de agua es una herramienta comunicativa para transmitir información (Fernández y col., 2004).

El estudio, manejo y control de la calidad de las aguas marinas, es uno de los principales problemas asociados a la contaminación ambiental, requiere de la utilización de métodos y técnicas tanto tradicionales como avanzadas, que puedan ofrecer una respuesta rápida y convincente acerca del estado del agua marina, las posibilidades de su uso, la evolución temporal de sus características físico-químicas, de esta forma permitir la toma de decisiones y medidas para preservar su calidad y evitar su deterioro. No son pocos los esfuerzos en la actualidad, dirigidos a encontrar un método coherente, confiable y universal, para valorar la calidad de las aguas, utilizando fundamentalmente, los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos que determinan la calidad natural de las mismas. Los índices físico-químicos de la calidad permiten comunicar la información de

forma eficaz, resumida y sencilla, y están ampliamente difundidos en todo el mundo (de Armas y col., 2010).

1.2. Antecedentes Específicos

1.2.1. El océano chileno

Chile tiene una posición geográfica privilegiada, donde el océano Pacífico baña sus costas una extensión de 8.000 km (incluyendo el territorio Antártico), con una superficie marítima de 3,15 millones de km² en su zona económica exclusiva de 200 millas marinas (CONICYT, 2007), en las cuales se encuentran ecosistemas de gran productividad, que otorgan ventajas como productor de recursos pesqueros y acuicultura altamente demandados, ocupando el octavo lugar a nivel mundial de los principales productores acuícolas (Food and Agriculture of United States, 2015). Este sector genera una gran cantidad de empleos en el sector primario, incluyendo operarios de centros de cultivo, pescadores artesanales y tripulantes de la flota industrial, además de generar empleos en el sector secundario, o sea, operarios de plantas de proceso. Por estas razones, es que en Chile debería haber una mayor preocupación para poder asegurar una buena calidad en las aguas marinas, donde se pueda unir en una sola herramienta toda la información disponible, la cual suele ser compleja, en algo que sea entendible para todo el público que esté interesado en el bienestar del océano, teniendo en cuenta la utilización de la información disponible de las variables o parámetros fisicoquímicos que pueden afectar directa o indirectamente a la vida acuática

1.2.2. Chile y los Objetivos del Desarrollo Sostenible

En el ámbito nacional se creó el Decreto 49 del Ministerio de Relaciones Exteriores el cual "Crea consejo nacional para la implementación de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible", con el fin de asesorar al presidente/a de la República y servir de instancia

de coordinación para la implementación y seguimiento de los ODS y de la Agenda 2030. El Consejo estará integrado por representantes de las Secretarías de Estado del: Ministerio de Relaciones Exteriores, Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, como también, el Ministerio de Desarrollo Social (DS 49 del Ministerio de Relaciones Exteriores, 2016).

Según el DS N° 49, se crearán tres comisiones de: Economía, Social y Medio Ambiente, además de grupos de trabajo en temas específicos o transversales. Las comisiones serán coordinadas por los ministerios de Economía, Fomento y Turismo, Ministerio de Desarrollo Social y Ministerio de Medio Ambiente. En cada comisión, se debe respetar el carácter integral e indivisible de los ODS y cada una de ellas contará con representantes de los Ministerios miembros del Consejo, además hasta el año 2030 tendrán como función contribuir a la revisión y análisis del avance en la Agenda 2030, con esto la elaboración de recomendaciones al Consejo para mantener o acelerar el progreso hacia el cumplimiento de las metas propuestas (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2016).

El Ministerio de Medio Ambiente, tiene la responsabilidad de velar por la dimensión ambiental en todos los ODS, por esto se conforma la comisión de medio ambiente y una mesa de coordinación, esta última tiene el objetivo de facilitar el trabajo de la comisión y velar por asegurar la participación ciudadana en la implementación de la Agenda.

Los ODS con dimensión ambiental tienen los siguientes objetivos:

2. Hambre Cero
3. Salud y Bienestar
6. Agua Limpia y Saneamiento

- 7. Energía Asequible y no Contaminante
- 8. Trabajo Decente y Crecimiento Económico
- 11. Ciudades y Comunidades Sostenibles
- 12. Producción y Consumo responsable
- 13. Acción por el Clima
- 14. Vida Submarina**
- 15. Vida de Ecosistemas Terrestres
- 17. Alianzas para lograr los Objetivos

El objetivo número 14 “Vida Submarina: Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible”, está directamente relacionado con la calidad de agua que se encuentra en la actualidad en el océano (Ministerio de Medio Ambiente).

En la actualidad, el Ministerio de Medio Ambiente tiene una iniciativa de una Política Pública en relación al ODS 14, la cual tiene como fin asegurar la protección y uso sostenible de nuestro borde costero y recursos marinos, a través de esto se han generado los siguientes instrumentos:

1. Estrategia Nacional de Biodiversidad 2016-2030, Plan de acción “Conservación de la Biodiversidad Marina y de las Islas Oceánicas”.
2. Plan de Adaptación al Cambio Climático para Pesca y Acuicultura y el Plan de Adaptación al Cambio Climático en Biodiversidad
3. La creación de extensos Parques Marinos en el mar de Chile

4. Clasificación de Ecosistemas Marinos, la cual fue realizada entre los años 2015-2016.

La creación de un índice de calidad de aguas marinas y costeras, fortalece el desarrollo de los objetivos de desarrollo sustentable, siendo un instrumento útil, debido a que la calidad de las aguas marinas y costeras se puede evaluar a través de parámetros fisicoquímicos, ya que, los problemas ambientales como: la acidez y la eutrofización, se puede medir mediante el pH y la concentración de nitratos y fosfatos, respectivamente (Fernández y col., 2004; Howarth y col., 2002). Además, permite unir en una sola herramienta toda la información disponible sobre los parámetros fisicoquímicos medidos en las estaciones de monitoreo, la cual suele ser compleja, en algo que sea entendible para todo el público que esté interesado en el bienestar del océano.

1.2.3. Red de Información del Pacífico Sur en apoyo a la Gestión Integrada de Áreas Costeras

Chile forma parte del proyecto SPINCAM “Red de Información del Pacífico Sur en apoyo a la Gestión Integrada de Áreas Costeras”. La Gestión Integrada de Áreas Costeras (ICAM), es un proceso continuo y dinámico, el cual tiene un enfoque multidisciplinario e interinstitucional, ya que permite la coordinación y participación de los países que forman la región del Pacífico Sudeste (Chile, Colombia, Ecuador, Panamá y Perú), mediante el desarrollo de políticas y la toma de decisiones, fomentando la protección de las áreas y recursos costeros, con un enfoque en las condiciones ambientales y socioeconómicas dentro del contexto de desarrollo sostenible. El objetivo de este proyecto es apoyar el desarrollo de herramientas de tomas de decisiones y establecer un marco indicador de gestión integrada del área costera. Permite fomentar el diálogo entre el gobierno, comunidad y ciencia, con el fin de promover la protección, el uso sustentable de los

ecosistemas y recursos costeros, así pudiendo evaluar la efectividad de las acciones de manejo, tomando en cuenta las necesidades de sustentabilidad a corto plazo y la divulgación de datos e información sobre el estado y gestión de los recursos naturales hacia los interesados.

El Proyecto SPINCAM cuenta con el auspicio del Gobierno Flamenco del Reino de Bélgica a través de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (COI-UNESCO) y se implementa en la región a través de la Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS).

La primera fase del proyecto se realizó entre el 2008 y principios del 2012, en esta etapa se desarrolló un conjunto de indicadores de gestión costera a nivel regional y nacional, entre estos se encuentra el “Indicador de calidad de aguas costeras para los países del proyecto SPINCAM”.

La segunda fase del proyecto se realizó entre el 2009 y 2016, en esta etapa se formularon nuevos indicadores regionales y la consolidación de los indicadores previamente identificados, y se identificaron las líneas bases y tendencias ecológicas y socio-económicas en el uso de los recursos de las zonas costeras.

En la actualidad el proyecto SPINCAM se encuentra en su tercera fase, la cual se articula alrededor de seis objetivos específicos:

- 1) Desarrollar un marco de colaboración para la gestión y planificación costera y marina en favor del desarrollo sostenible a nivel nacional y reforzando el consenso regional, la participación pública y la red existente de SPINCAM.
- 2) Desarrollar capacidades técnicas e institucionales para reducir las disparidades entre los países.

- 3) Desarrollar herramientas metodológicas de apoyo a la toma de decisiones con el fin de aumentar las sinergias para la aplicación de los conceptos metodológicos, tanto para la gestión integrada de zonas costeras como para la planificación espacial marina.
- 4) Desarrollar casos pilotos de ámbito local a través de la identificación de los actores y agentes socio-económicos más representativos que definan el potencial ecosistémico local como base de desarrollo y crecimiento azul sostenible (crecimiento sostenible de los sectores marinos y marítimos).
- 5) Desarrollar estrategias a nivel regional y nacional sobre gestión y planificación costera y marina en el contexto del Convenio de Lima.
- 6) Diseñar e implementar iniciativas y productos de comunicación que permitan incrementar la transparencia en la promoción e involucramiento de los actores principales y ciudadanos en las actividades del proyecto.

1.2.4. Indicador de calidad de aguas costeras para los países del proyecto

SPINCAM.

Este indicador fue desarrollado por Colombia, siendo el resultado de la validación de los países participantes del proyecto, sobre las propuestas realizadas por Colombia.

Chile formó parte de la realización del índice mediante encuestas que se realizaron a los cinco países que forman parte del proyecto. En estas encuestas se les consultó sobre cuáles eran las variables que comúnmente utilizaban para evaluar la calidad del agua marina en su país, pero además consideraron los resultados de una revisión bibliográfica y realizaron dos talleres de expertos en calidad de aguas de Colombia para seleccionar las variables más adecuadas que integrarán el índice. También se les consultó para la determinación de los pesos de las variables, de acuerdo a los parámetros medidos en

cada país, se calificaron los parámetros de mayor importancia para evaluar la calidad del agua marino-costera según la encuesta, no obstante, para soportar mejor los resultados para el diseño del índice, también se tuvieron en cuenta los pesos relativos teóricos que otros autores han definido para las variables de la ecuación final. Finalmente se realizó un taller, en el cual se asignó una ponderación con los expertos en calidad de aguas de Colombia para evaluar la importancia o pesos de las variables dentro de la ecuación de agregación (INVEMAR, 2011). Los siguientes pasos que se realizaron para la construcción del índice de calidad de aguas para los países del proyecto SPINCAM, se hicieron en base a los datos del monitoreo de la Red de Vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia (REDCAM), talleres de discusión con expertos en monitoreo de calidad de aguas colombianas, valores teóricos y normas colombianas e internacionales. Finalmente, se probó el índice desarrollado con datos del monitoreo REDCAM de Colombia.

1.2.5. Limitaciones del índice del proyecto SPINCAM.

A pesar que el alcance de este indicador se haya desarrollado considerando a los países que forman parte de la región del Pacífico Sudeste, el índice propuesto contiene limitaciones debido a que “Los valores de referencia utilizados del índice de calidad de aguas marinas obedecen a las condiciones de aguas colombianas. Para usarlo en otros ámbitos requiere realizar los ajustes de los valores de referencia para otro país, con un robusto trabajo de revisión, consenso y análisis estadístico. De lo contrario su uso arbitrario puede suponer un alto grado de subjetividad que va en detrimento de resultados adecuados” (INVEMAR, 2011). Debido a esto se considera que la propuesta del indicador permite realizar una comparación entre los países participantes del

proyecto, pero no debe constituir una base consultiva ni vinculante con la calidad de aguas marinas de Chile.

Hay que tener consideración que se tiene que lograr una retroalimentación activa, entre las diferentes entidades y potenciales usuarios del índice que favorezca la evaluación constante, actualización y mejoramiento del mismo. Además, que el índice permite establecer las variables que presentan variación, pero no permite, en la mayoría de los casos definir relación causa-efecto, eso requiere mayor investigación.

En base a lo mencionado anteriormente y que la definición de la calidad del agua marina de Chile corresponde al Ministerio de Medio Ambiente, es necesario que se trabaje y se norme según las características locales, teniendo en cuenta que estas varían conforme a la extensión de Chile, y no trabajar con un indicador general, sino con uno basado en la características y necesidades chilenas.

1.2.6. Clasificación de ecosistemas marinos chilenos de la zona económica exclusiva.

La construcción de la clasificación de los ecosistemas marinos fue realizada durante los años 2015-2016 por el departamento de Planificación y Políticas de Biodiversidad, de la División de Recursos Naturales y Biodiversidad del Ministerio del Medio Ambiente. Es sabido que el territorio marítimo chileno es muy heterogéneo, por lo que es aconsejable dividir el mar en unidades ecosistémicas, con el fin de reconocer los cambios que allí ocurren y establecer las estrategias más idóneas para detener su deterioro y conservar la biodiversidad.

Es importante mencionar que esta clasificación no incluye los ecosistemas marinos antárticos, sobre los cuales Chile reclama soberanía. La razón principal de no incluir esta

zona marina, es que las decisiones respecto a la planificación y gestión de la protección de su biodiversidad se realizan en foros de cooperación internacional. Por lo tanto, una clasificación de sus ecosistemas debiera hacerse en ese marco: Tratado Antártico; tratado de la Convención para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCRVMA) y de otros convenios internacionales, como la Convención sobre Conservación de Focas Antárticas, Convención Internacional para la Regulación de la Caza de Ballenas, entre otras (Ministerio de Medio Ambiente, 2016).

Para este documento se realizó una revisión bibliográfica, de la cual se concluye en que el territorio marino se dividirá en ecorregiones. Las cuales se definen como: “las unidades más pequeñas de la clasificación; áreas con una composición de especies relativamente homogénea, claramente diferente a la de sistemas adyacentes; la composición de especies está probablemente determinada por el predominio de un pequeño número de ecosistemas y/o un conjunto distintivo de características oceanográficas o topográficas. Los agentes biogeográficos de forzamiento dominantes, que definen las ecorregiones, varían de un lugar a otro, pero pueden incluir aislamiento, surgencias, aporte de nutrientes, afluencia de agua dulce, regímenes de temperatura, la dinámica del hielo, exposición, sedimentos, corrientes, y la complejidad batimétrica o costera. En términos ecológicos son unidades fuertemente cohesionadas, suficientemente grandes para abarcar la historia ecológica o de vida de especies mayoritariamente sedentarias.” (Spalding y col., 2007).

Se definieron catorce ecorregiones por especialistas, oceanógrafos y ecólogos marinos a través de siete talleres a lo largo del país, la subdivisión de las ecorregiones, desde el paralelo 41° de latitud sur hasta el extremo austral de Chile, se realizó según la distribución de especies bentónicas observada en sus expediciones. Mientras, que la

subdivisión del resto de las ecorregiones marinas se considera: batimetría, sustrato del fondo y reconociendo áreas de surgencia; y en el resto de las ecorregiones (oceánicas y en torno a las islas oceánicas) la subdivisión en ecosistemas se hizo sólo con consideraciones batimétricas y reconociendo los montes submarinos.

Esta división del mar permite orientar las exigencias a los proyectos en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental; la planificación de acciones de restauración o protección de áreas de ecosistemas amenazados; la orientación a la regulación de usos del territorio marítimo, en función de su estado de conservación; focalizar la gestión para conservar la diversidad biológica marina en todos sus niveles jerárquicos. Además, permite cumplir compromisos internacionales, ya que, somos parte del convenio de diversidad biológica que tiene metas específicas de conservación de ecosistemas marinos. Ese y otros convenios internacionales miden la gestión ambiental con indicadores que usan las clasificaciones de ecosistemas como un parámetro de referencia. También servirá para aplicar el índice de calidad de aguas costeras (ICAC) por ecorregiones, de esta manera se tiene una referencia de calidad más acertada sobre los diferentes ecosistemas que existen a lo largo de Chile, permitiendo que en caso de que exista una mala calidad en el agua se tomen medidas específicas tomando en cuenta las ecorregiones, considerando que no se tienen iguales condiciones ambientales en el país, esto con el fin de poder mantener una calidad óptima tanto para la vida marina como para los humanos que ocupan los sectores costeros de forma recreacional.

Las ecorregiones son: Norte Grande, Pacífico Sudeste, Atacama, Pajón Taltal, Los Molles, Chile Central, Centro Sur, Chiloé Taitao, Pacífico Austral Oceánico, Kawesqar, Magallanes, Isla de Pascua, Islas Desventuradas y Archipiélago Juan Fernández. En las figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se muestran las ecorregiones incluyendo las estaciones

de monitoreo que se encuentran en estas, es importante mencionar que en las imágenes no se muestran todas las estaciones de monitoreo, ya que por espacio el programa con los que se construyeron los mapas no lo permite y tampoco se incluye Islas Desventuradas y Archipiélago Juan Fernández. Cabe mencionar que las estaciones de Islas Desventuradas, Archipiélago Juan Fernández, Pacífico Austral Oceánico, Pacífico Sudeste y Chile Central, no son incluidas en el índice porque no tienen estaciones de monitoreo en sus sectores. Los mapas se realizaron ocupando el programa ArcGis.

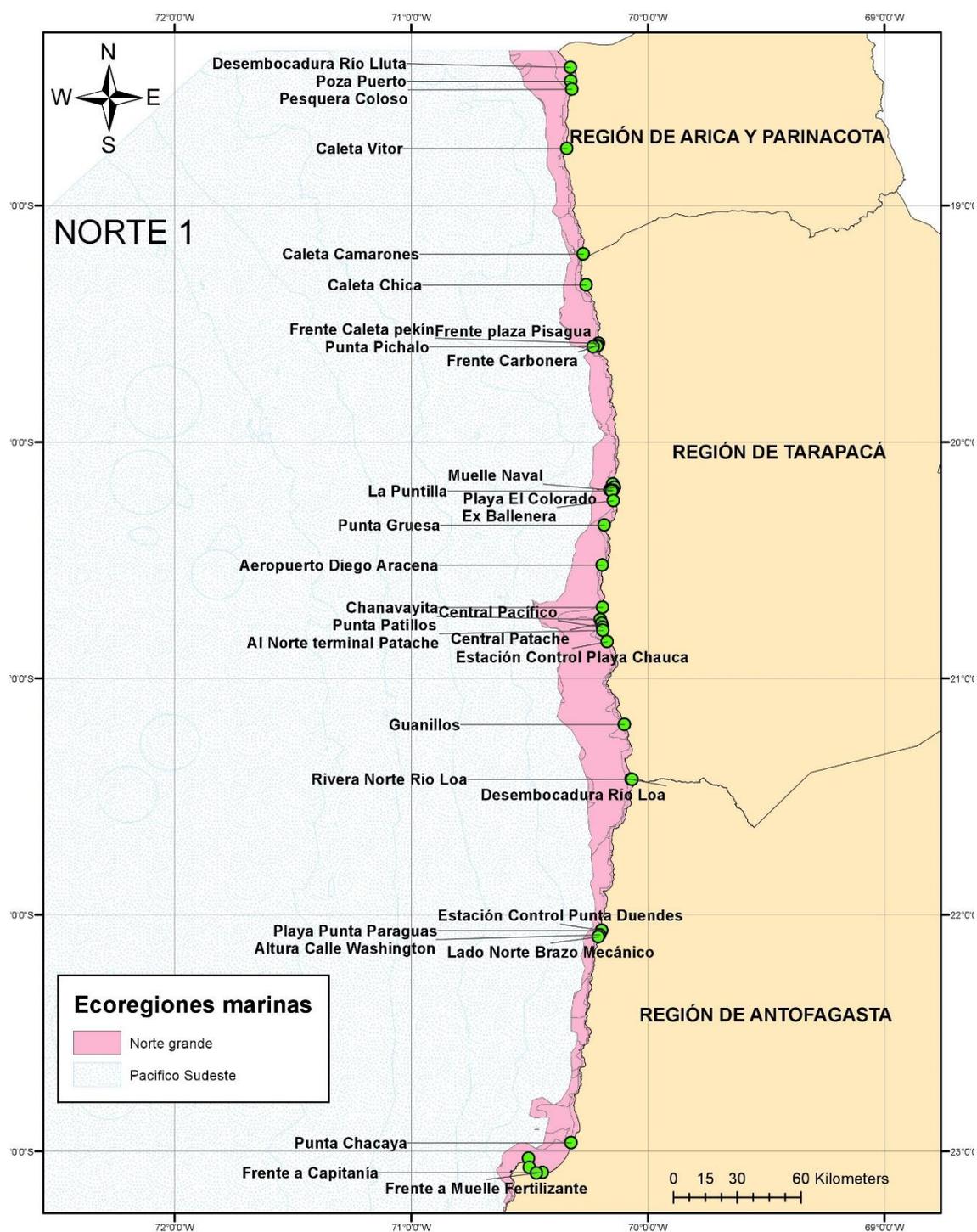


Figura 1: Ecorregión del Norte Grande y Pacífico Sudeste con estaciones de monitoreo.

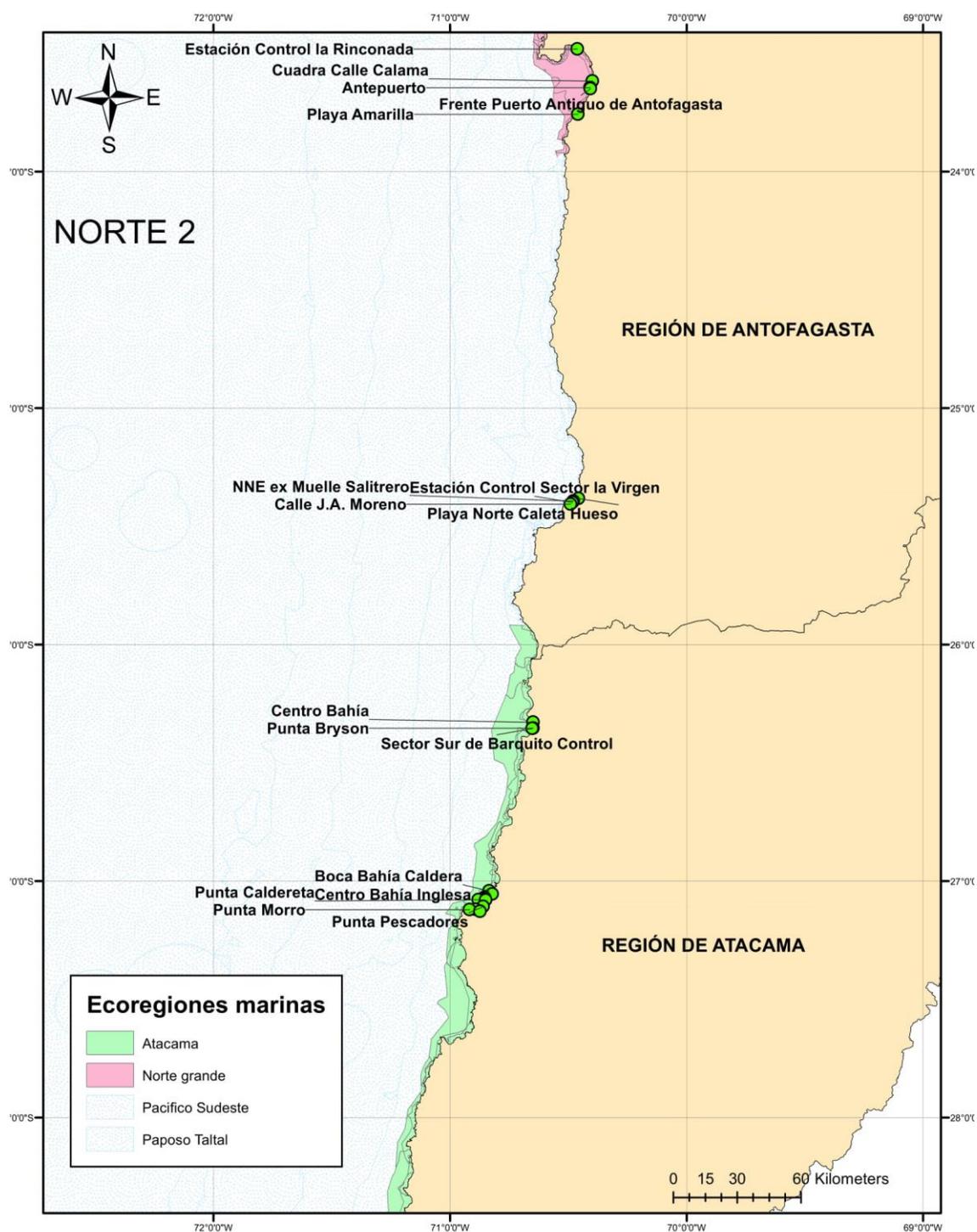


Figura 2: Ecorregión de Atacama, Norte grande, Pacifico Sudeste y Papos Taltal con estaciones de monitoreo.

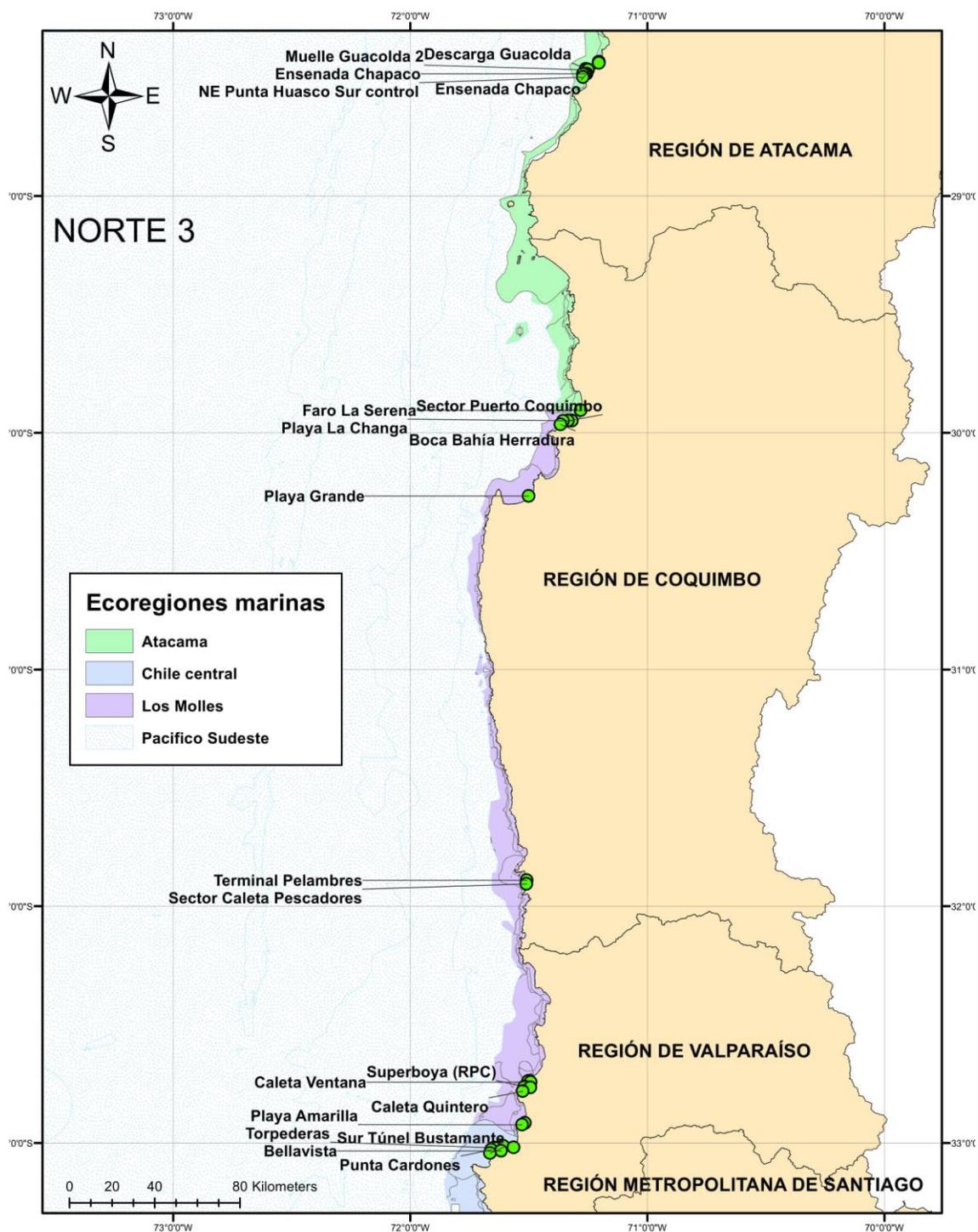


Figura 3: Ecorregión de Atacama, Chile Central, Pacífico Sudeste y Los Molles con estaciones de monitoreo.

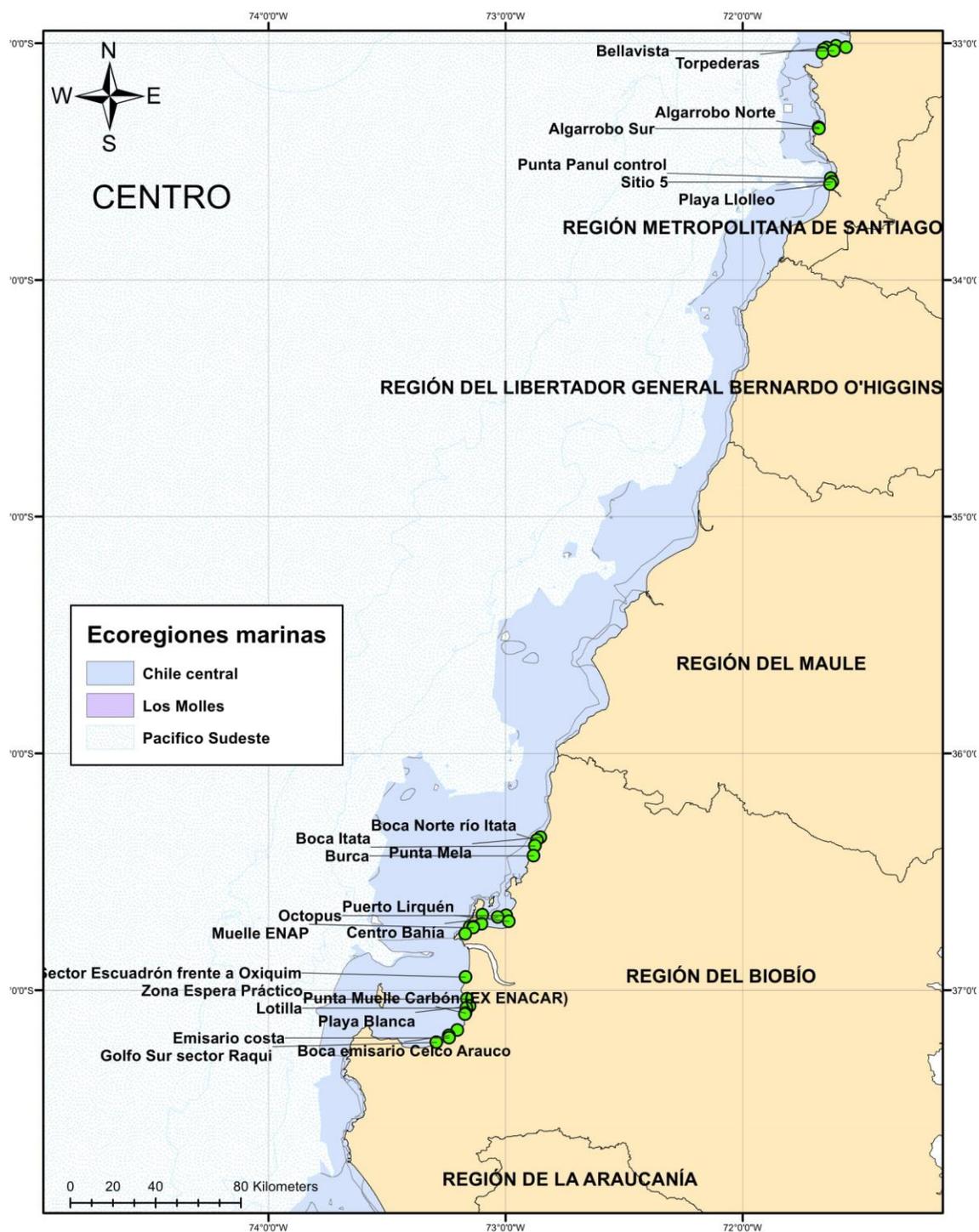


Figura 4: Ecorregión de Chile Central, Los Molles y Pacífico Sudeste con estaciones de monitoreo.

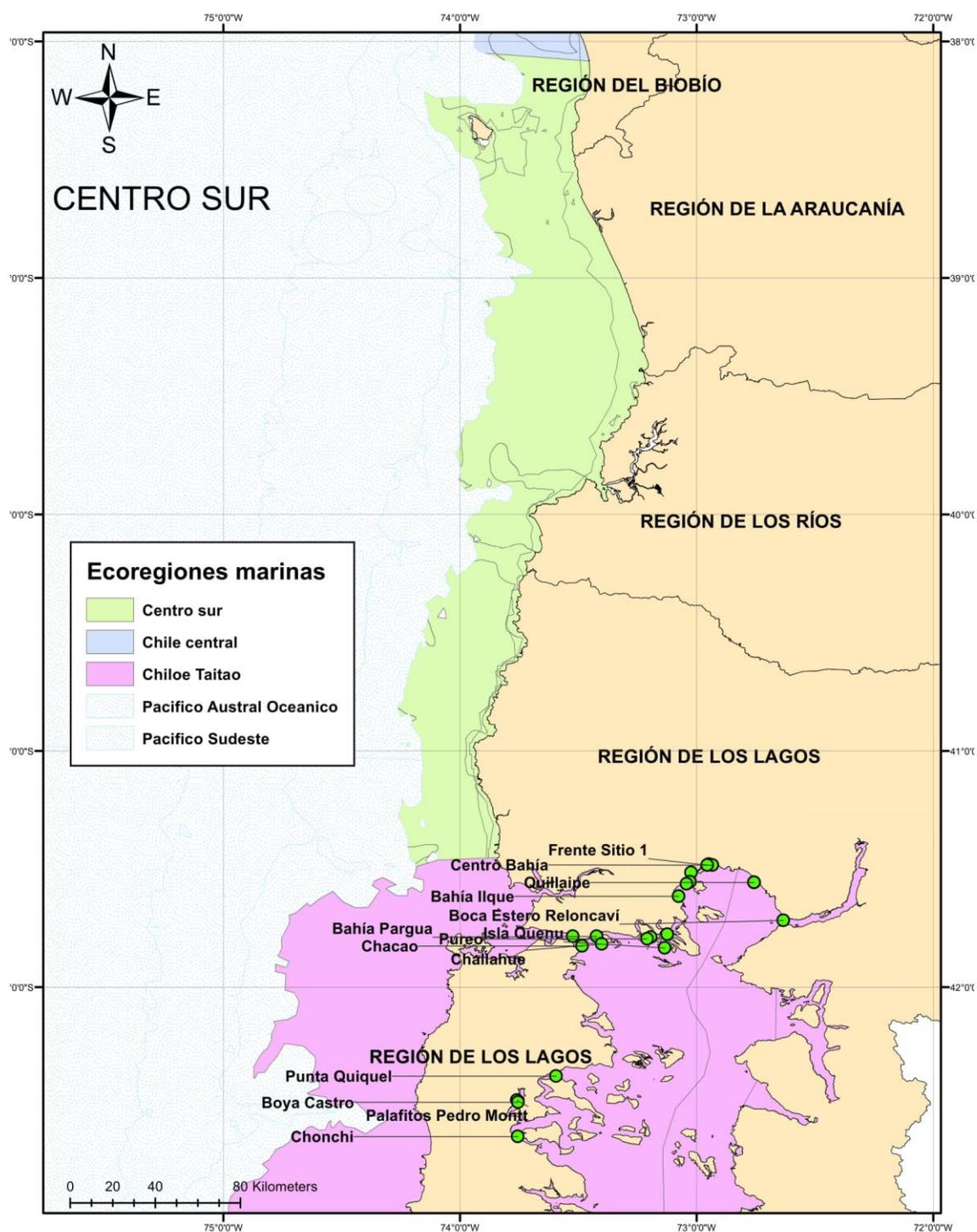


Figura 5: Ecorregión de Centro Sur, Chile Central, Chiloé Taitao, Pacífico Sudeste y Pacífico Austral Oceánico con estaciones de monitoreo.

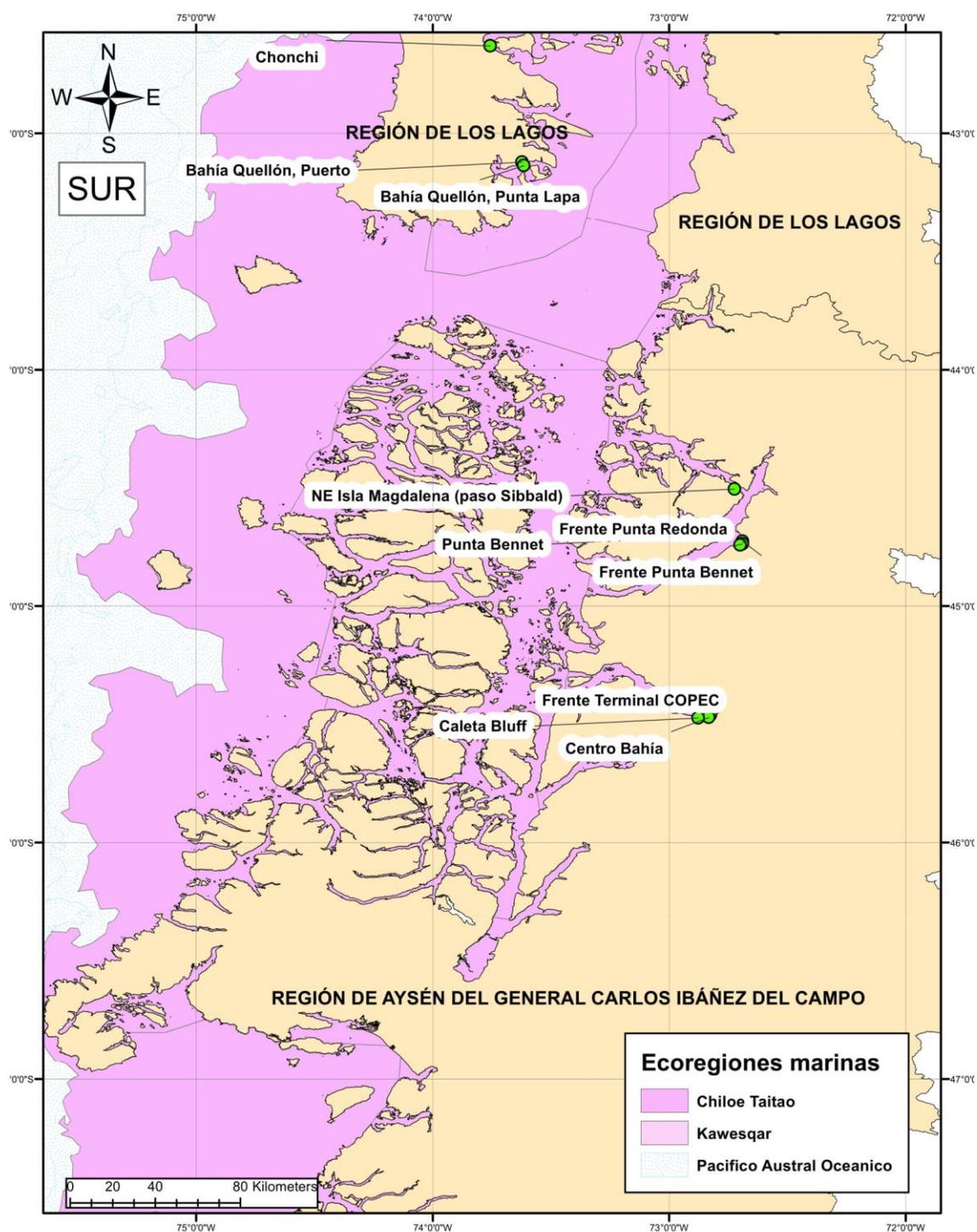


Figura 6: Ecorregión de Chiloé Taitao, Kawesqar y Pacífico Austral Oceánico con estaciones de monitoreo.

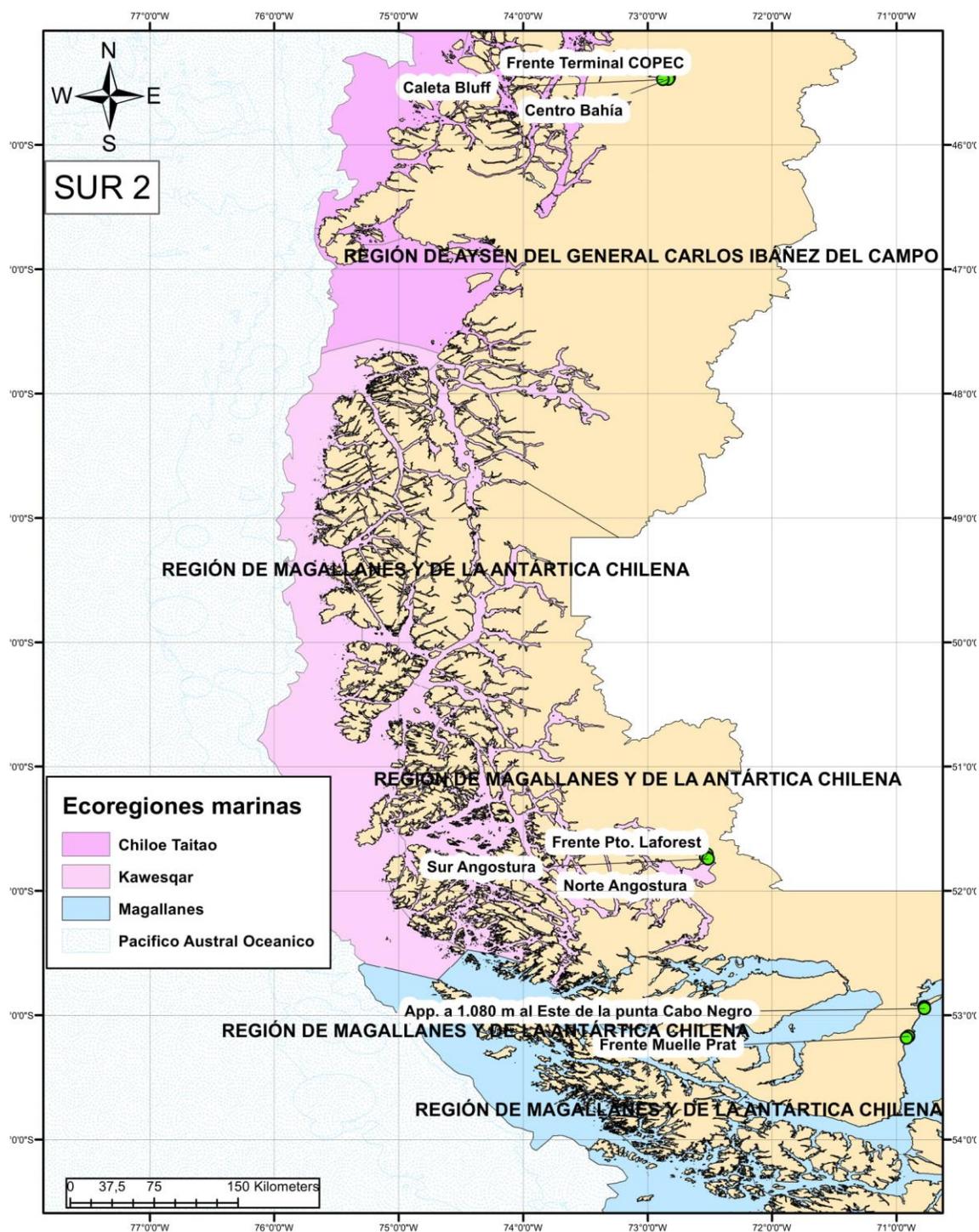


Figura 7: Ecorregión de Chiloé Taitao, Kawesqar, Magallanes y Pacífico Austral Oceánico con estaciones de monitoreo.

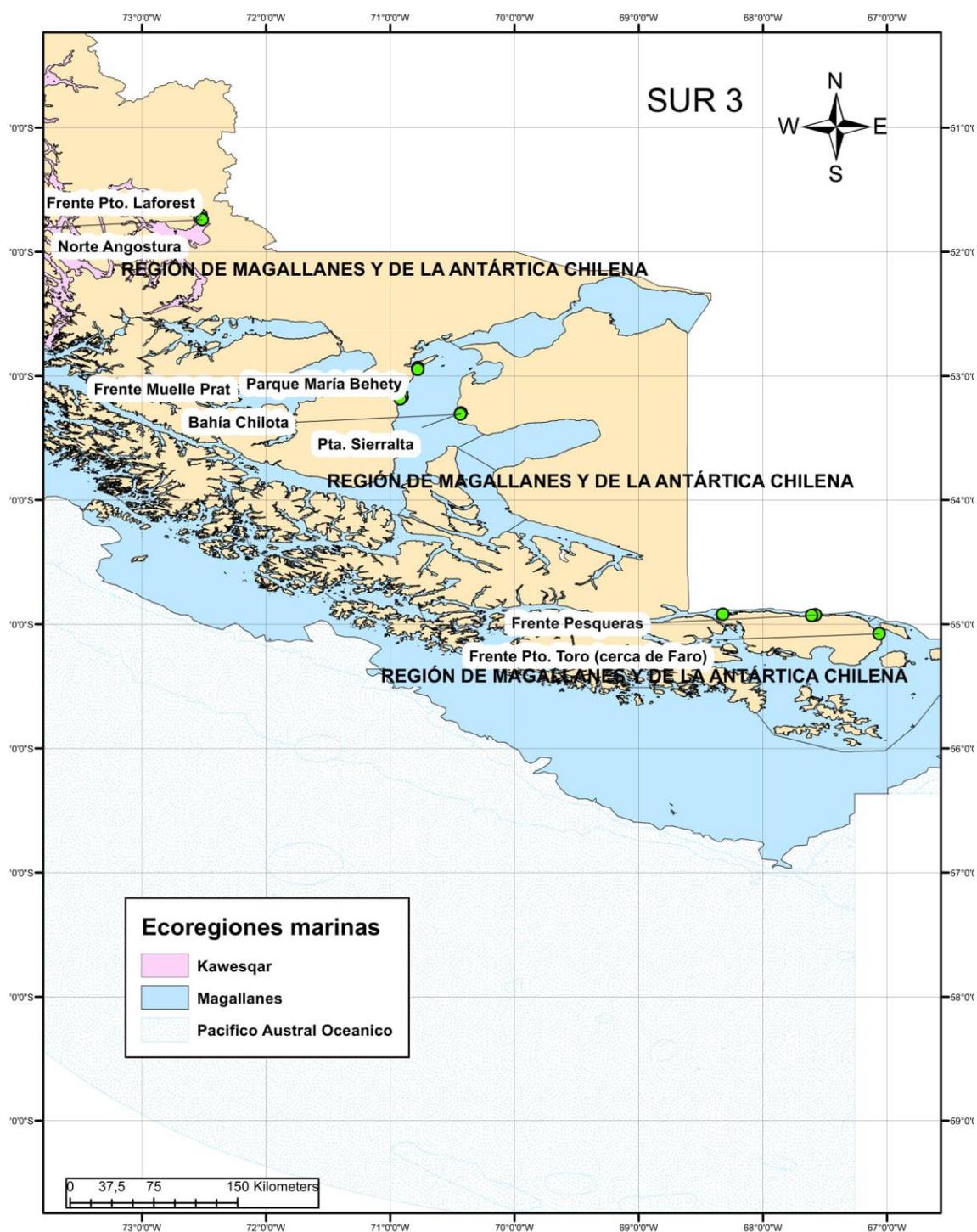


Figura 8: Ecorregión de Kawesqar, Magallanes y Pacífico Austral Oceánico con estaciones de monitoreo.



Figura 9: Ecorregión de Isla de Pascua con estaciones de monitoreo.

Por esto, se propone realizar un índice de calidad de aguas costeras (ICAC) considerando las ecorregiones en Chile establecidas por el Ministerio de Medio Ambiente, lo que permite estudiar nuestro mar y sus ecosistemas.

El índice se trabajará en conjunto con el Ministerio de Medio Ambiente y con la base de datos entregados por el Programa de Observación de Ambiente Litoral (POAL), el cual fue elaborado para monitorear las fluctuaciones anuales de los niveles de concentración de los principales componentes de desechos domésticos, industriales, de hidrocarburos de petróleo y compuestos orgánicos persistentes (COPs) en las bahías, lagos y ríos que están bajo la jurisdicción de la Dirección general del Territorio Marítimo y de Marina Mercantes (DIRECTEMAR) de la Armada de Chile. En el POAL, se determinan y evalúan los niveles y concentraciones de los principales contaminantes tanto de las aguas costeras como dulces, focalizándose en los cuerpos de agua más intervenidos en Chile, las descargas de las actividades que se desarrollan en el entorno terrestre del cuerpo de agua (industrias, establecimientos de servicios sanitarios, etc.) y en los impactos producidos por las principales actividades que se llevan a cabo en el cuerpo de agua mismo (DIRECTEMAR).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Construir un índice de calidad de aguas marino-costeras para evaluar el estado del recurso hídrico marino de las ecorregiones de Chile

1.3.2. Objetivos Específicos

- Revisar índices de calidad de agua marinas y costeras de diferentes países, para luego sintetizar la información y adecuarlo a la realidad país.

- Identificar los principales parámetros fisicoquímicos que caractericen la calidad de aguas chilenas.
- Definir los rangos de los parámetros fisicoquímicos que indiquen la calidad de las aguas costeras.
- Elaborar una propuesta de aplicación de índice de calidad de aguas costeras.

II. MÉTODOS

2.1. Elaboración del índice de calidad de aguas costeras (ICAC) para Chile

1. Realizar una revisión bibliográfica de los diferentes tipos de índices de calidad de aguas que han sido utilizados en varios países, teniendo en cuenta las variables fisicoquímicas, objetivos, criterios y análisis matemáticos usados.
2. Selección de Parámetros: Se recomienda seleccionar parámetros de diferentes categorías de clasificación ambiental, con el fin de cubrir todas las áreas que reflejen cambios en la calidad del agua.



Figura 10: Selección de parámetros

3. Definición de escalas de valoración de cada variable e identificación de los subíndices o curvas de calidad para Chile de cada parámetro: Con el fin de que los subíndices transformen los valores de los parámetros fisicoquímicos con sus diferentes unidades de medida (ppm, g/L, etc.) en valores no dimensionales, las

cuales se traducen en escalas comparables de 0 a 100% de calidad (0% de calidad corresponde a una mala condición del agua y el 100% en la mejor calidad posible).

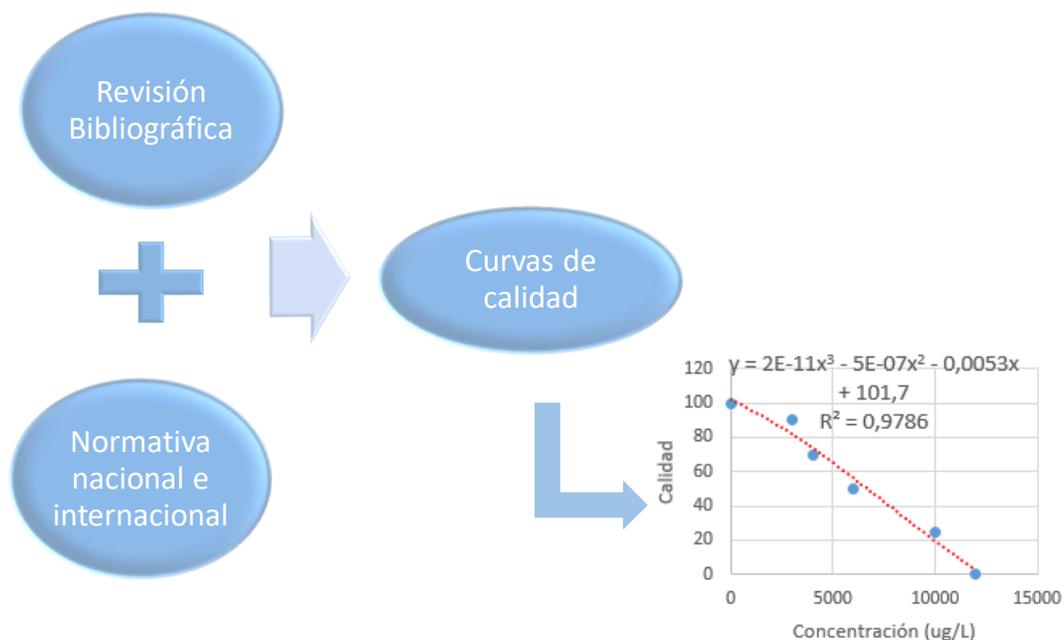


Figura 11: Definición de subíndices o curvas de calidad.

4. Asignación del valor de importancia o el peso de cada variable dentro del índice:
depende de cuánto puede afectar la variación de dicho parámetro a la calidad del agua. Según esto, tendrá mayor importancia o peso cuando la variación afecta de una manera significativa la calidad y se tendrá un menor peso cuando la variación del parámetro resulte en una poca modificación del estado del agua. La suma de todos los pesos debe ser igual a 1.

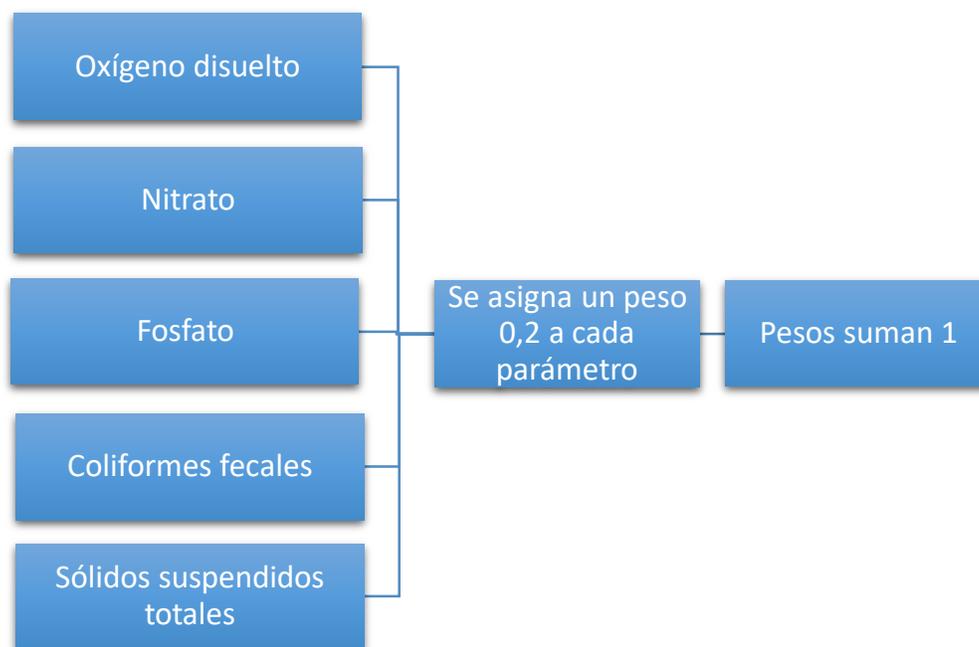


Figura 12: Asignación de valor de importancia a cada parámetro.

5. Unificar los subíndices de cada parámetro con sus respectivos pesos, mediante una fórmula de agregación matemática.

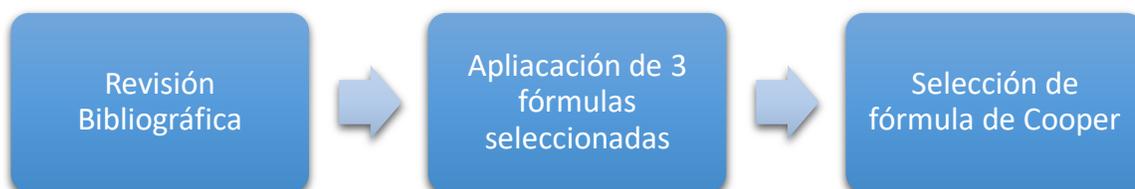


Figura 13: Unificación de índices mediante fórmula matemática.

6. Establecer rangos de clasificación en valores numéricos que corresponden a las distintas calidades.

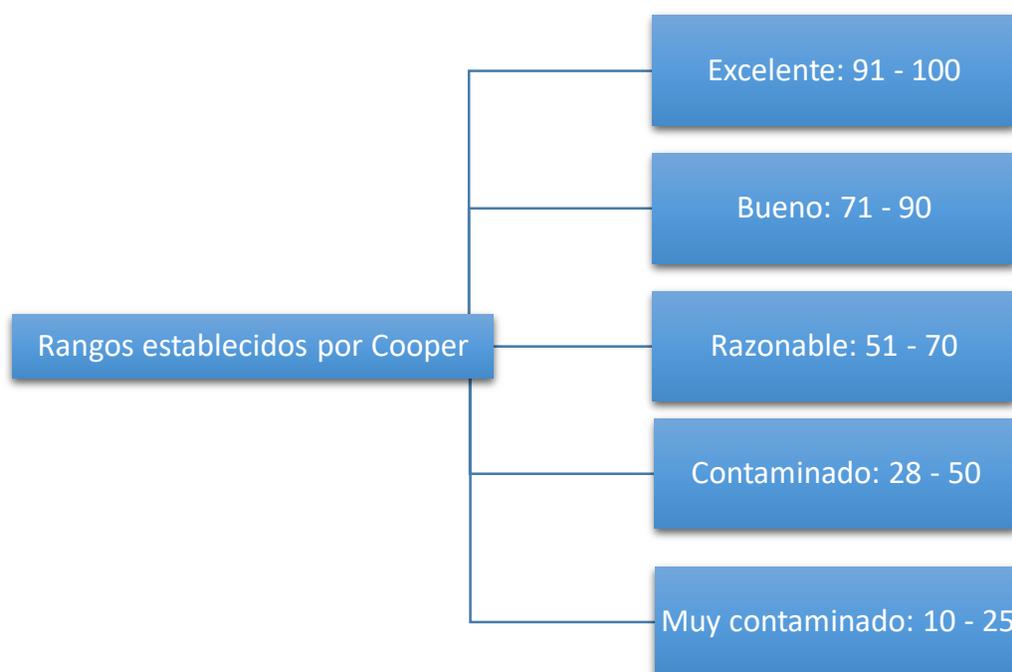


Figura 14: Rangos de clasificación según Cooper.

7. Para finalizar, se prueba el ICAC que incluye datos y normativa chilena de las ecorregiones, además de considerar la revisión bibliográfica.

2.2. Base de datos.

Los datos utilizados para la validación de este índice, corresponde a la base de datos del Programa de Observación de Ambiente Litoral (POAL), el cual monitorea las fluctuaciones anuales de los niveles de concentración de contaminantes en las bahías, lagos y ríos que están bajo la jurisdicción de la Dirección general del Territorio Marítimo y de Marina Mercantes (DIRECTEMAR) de la Armada de Chile.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Revisión Bibliográfica

Se realizó una revisión de 16 diferentes índices que se ocupan alrededor del mundo, de los cuales se seleccionaron 10 para realizar el ICAC. Esta revisión, se realizó porque en Chile no hay antecedentes sobre la calidad de aguas marinas y costeras, además para tener más comprensión sobre la realización del índice y como se desarrolla, lo que se muestra a continuación.

Los índices revisados evaluaban diferentes tipos de aguas: estuarinas, saladas, ríos, potable, superficiales, etc.

Los índices de calidad de aguas se diferencian en el tipo de agua y las variables que se desean considerar para la evaluación de la calidad, ya sea, físicas, químicas y/o biológicas. Los parámetros fisicoquímicos dan una información extensa de la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas, sin aportar información de su influencia en la vida acuática; los métodos biológicos aportan esta información pero no señalan nada acerca del contaminante o los contaminantes responsables, por lo que muchos investigadores recomiendan la utilización de ambos en la evaluación del recurso hídrico (Orozco y col., 2005).

La ventaja que tiene el uso de variables fisicoquímicas sobre las biológicas, es que pueden ser monitoreados con mayor frecuencia y los análisis suelen ser más rápidos, en comparación con los métodos biológicos, que generalmente son basados en la observación y medición de ciertas comunidades de seres vivos en el agua. De todas formas, independiente del tipo de variables que se puedan ocupar para construir el índice, siempre se obtendrá una gran cantidad de datos, los cuales tienen que pasar por

un correcto tratamiento estadístico e interpretación, considerando la posible pérdida de información, ya que una de las limitaciones de los índices es que se puede llegar a generalizar la información obtenida, además se tiene que tener presente que las mediciones de las estaciones de monitoreo pueden ser erradas en algún lugar y tiempo en específico.

Los pioneros de los índices de calidad de aguas se remontan al año 1965, y desde esa época hasta la actualidad se han ido modificando, conforme se han proporcionado nuevas herramientas para el desarrollo de investigaciones, como también los aspectos socioeconómicos. El principal motivo para el desarrollo de un índice de calidad de aguas (ICA), surgió luego de la pregunta de: ¿cómo es posible transformar los datos disponibles de las estaciones de monitoreo en información que sea entendida por el público en general?, por esto surge la propuesta, que a través, de un ICA se puede simplificar todos los datos en un número que integra toda la información disponible.

El diseño de un ICA se basa en cuatro pasos frecuentes, que son clave al momento de construirlo, no es necesario que se realicen de forma secuencial y dependiendo del objetivo se pueden agregar pasos adicionales (INVEMAR, 2011).

1. Selección de parámetros

La forma más común de seleccionar los parámetros, es según la metodología de Delphi, la cual propone la conformación de un panel de expertos que tengan relación con la calidad del agua, quienes seleccionan las variables según su criterio y finalmente escogen las de mayor recurrencia (Dinius, 1987). Lo recomendable es seleccionar parámetros que puedan reflejar todos los cambios en la calidad del agua. En la tabla 1 se muestra una clasificación de variables según categoría.

Tabla 1: Clasificación de variables (Samboni y col., 2007).

Categoría	Variables o parámetros fisicoquímicos
Nivel de oxígeno	Oxígeno disuelto, Demanda biológica de oxígeno, Demanda química de oxígeno
Eutrofización	NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , Ortofosfatos
Aspectos de salud	Coliformes totales y fecales
Características físicas	Temperatura, Transparencia, Sólidos Totales
Sustancias disueltas	Cloruros, Sulfatos, pH, Conductividad

2. Determinación del subíndice, funciones o curvas de calidad para cada parámetro:

Tiene como propósito la transformación de las variables de una escala dimensional (mg/L, porcentajes, ug/L, etc.) a una escala adimensional para permitir su agregación. Se pueden utilizar diversas metodologías (Samboni y col., 2007):

- ❖ Valor nominal o numérico: compara el valor del parámetro con un estándar o criterio teórico.
- ❖ Parámetro en número decimal, diagramas o tablas de calibración: desarrolla diagramas que indiquen la correlación del valor en una escala de calidad definida. Comúnmente se utiliza una escala entre 0 y 100, aunque también puede ser entre 0 y 1. Estos diagramas se pueden construir según varios métodos:

- Método basado en la experiencia propia: resulta ser muy subjetiva, ya que se basa en el criterio del autor.
- El método Delphi: se basa en la opinión de expertos.
- Curvas basadas en ecuaciones matemáticas: construida a base de una fórmula matemática con series de datos.
- Curvas basadas en la normatividad: construida a partir de los valores de los parámetros en diversas normativas.
- ❖ Parámetro bajo formulación matemática: convertir los valores del parámetro de acuerdo a varias escalas con las que los valores del parámetro conservan sus unidades originales.

Es importante mencionar que en la actualidad se prefiere trabajar sobre ecuaciones para curvas ajustadas, producto de regresiones, para cada una de los parámetros que se incluyan en el índice.

3. Determinación de los pesos relativos de cada parámetro:

La asignación de pesos o ponderación, de cada parámetro tiene mucho que ver con la importancia de los usos pretendidos y la incidencia de cada variable en el índice (Torres y col., 2009). La suma de los pesos de todas las variables debe sumar uno o cien, dependiendo de la escala utilizada. Es importante mencionar, que se pueden crear índices sin realizar este paso.

4. Agregación de parámetros a través de una expresión matemática:

Luego de que se tiene toda la información homogeneizada de los parámetros seleccionados, se determina el índice de calidad de aguas a través de la integración de

los subíndices, esto se puede realizar por medio de funciones matemáticas, éstas comúnmente tienen dos enfoques: aritméticas y multiplicativas. Además, pueden o no incluir los pesos de cada parámetro. En la tabla 2 se muestran las fórmulas más utilizadas por los índices de calidad.

Tabla 2: Fórmulas de agregación de los subíndices utilizadas en un ICA (Samboni y col., 2007)

Método	Fórmula*
Promedio ponderado	$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$
Promedio aritmético ponderado	$ICA = \sum_{i=1}^n q_i w_i$
Promedio geométrico no ponderado	$ICA = \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)^{1/n}$
Promedio geométrico ponderado	$ICA = \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)^{w_i}$
Promedio no ponderado modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \right)^2$
Promedio ponderado modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i w_i \right)^2$

*Donde, q_i es el subíndice para el parámetro i , w_i es el peso asociado a cada parámetro, n es el número de parámetros.

En la tabla 2 se ven los dos enfoques que tiene la integración de los subíndices, varios autores han descrito que las técnicas multiplicativas son superiores a las aritméticas, ya que, son más sensibles a la variación de los parámetros, reflejando con mayor precisión

un cambio de calidad (Fernández y col., 2004). El promedio geométrico ponderado ha sido ampliamente utilizado, sobre todo cuando existe una gran variabilidad entre las muestras.

Finalmente, el valor obtenido de la fórmula de agregación varía entre cero y cien, siendo cero un agua de mala calidad, y un valor cercano a cien representa una calidad muy buena o excelente. En algunos casos, el valor obtenido es asociado a un grupo de colores, de acuerdo a la calidad que refleje. Los colores azules o celestes se asocian a sistemas con buena calidad y los colores rojos o anaranjados representan una mala calidad.

3.2. Elaboración del Índice de calidad de aguas costeras para Chile (ICAC)

Se revisaron y analizaron diferentes índices de calidad de aguas que han sido desarrollados según las condiciones propias de una región o país. A partir de estos mismos índices, varios autores han realizado modificaciones para adaptarlos a las condiciones específicas de un lugar. Para elaborar el índice de calidad de aguas costeras para Chile se prestó especial atención en las variables utilizadas y la disponibilidad de información que es entregada por el POAL.

En la tabla 3 se muestran diferentes índices de calidad de aguas que se han revisado, además muestra los parámetros utilizados y la fórmula de agregación que utilizaron.

Tabla 3: Revisión bibliográfica de los índices de calidad de agua (Elaboración Propia).

Año	Índice	Parámetros	Fórmula	Tipo de Agua
1970	National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI). (Brown y col., 1970).	T°, pH, Turbidez, CF, OD, DBO ₅ , Fósforos totales, Nitratos y Sólidos Totales (ST)	$\sum_{i=1}^n q_i w_i$	Compara la calidad de diferentes cuerpos de agua
1995	The Estuarine Index: A New Approach to Scientific Information Transfer (Cooper y col., 1995).	Oxígeno disuelto (OD), Oxígeno absorbido, Nitrógeno amoniacal, <i>Escherichia coli</i> , nitrato, Ortofosfatos, Clorofila-a (Chl-a).	$\frac{1}{100} \left(\sum_{i=1}^n q_i w_i \right)^2$	Estuario

Tabla 3 (Continuación): Revisión bibliográfica de los índices de calidad de agua (Elaboración Propia).

Año	Índice	Parámetros	Fórmula	Tipo de Agua
2001	Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (Neary y col., 2001).	Se tiene que ocupar los parámetros más relevantes para cada tipo de agua. Por ejemplo, en Auckland ocuparon: OD, pH, turbidez, N-NH ₃ , SST, fósforo total, nitrato y nitrito	$100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732}$ <p>Donde, F1 (alcance): representa el grado de incumplimiento de la directriz de la calidad del agua durante el período de tiempo de interés, F2 (frecuencia): test fallidos y F3: amplitud. El 1,732 es porque cada uno de los 3 factores puede alcanzar hasta el 100 (corresponde a la suma de 100 elevado a dos 3 veces, y luego la raíz de ese número)</p>	Aguas superficiales para la protección de la vida acuática.
2004	A Generalized Water Quality Index for Taiwan (Liou y col., 2004).	OD, DBO ₅ , N-NH ₃ , CF, Turbidez, Sólidos suspendidos (SS), pH, Temperatura (T°), Cadmio, plomo, cromo, cobre y zinc.	$C_{temp} C_{pH} C_{tox} \left[\left(\sum_{i=1}^3 I_i w_i \right) \times \left(\sum_{j=1}^2 I_j w_j \right) \times \left(\sum_{k=1}^1 I_k \right) \right]^{1/3}$ <p>Donde I_i es el subíndice de los valores orgánicos (3 variables: DO, DBO5 Y N-NH3); I_j representa a partículas que corresponde a los SS y turbidez; I_k es la medida de las CF, el que representa a los microorganismos. Se fijan 3 coeficientes de escala, que aborda la T°, pH y sustancias de toxicidad.</p>	Índice generalizado para Taiwán y su aplicación en río Keya

Tabla 3 (Continuación): Revisión bibliográfica de los índices de calidad de agua (Elaboración Propia).

Año	Índice	Parámetros	Fórmula	Tipo de Agua
2007	Oregon Water Quality Index: A tool por evaluating water quality management effectiveness (Cude y col., 2007).	T°, OD, DBO ₅ , pH, Amoníaco, nitrato, fósforo total, ST y CF	$\sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{SI_i^2}}}$ <p>Donde, n es el número de subíndices y SI es el subíndice del parámetro i.</p>	Aguas en Oregon y la aplicación de ese método en regiones geográficos
2009	Numerical and qualitative index to measure water quality in recreational Cuban coastal waters (Miravet y col., 2009).	CF, OD, DBO ₅ , Amonio, Nitrógeno Orgánico, Fosfatos, Fósforo total, Salinidad y Transparencia	$\sum_{i=1}^n q_i w_i$	Aguas costeras cubanas de uso recreativo

Tabla 3 (Continuación): Revisión bibliográfica de los índices de calidad de agua (Elaboración Propia).

Año	Índice	Parámetros	Fórmula	Tipo de Agua
2009	Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation (Herrera y col., 2009).	T°, Salinidad, OD, Chl-a, nitrato, nitrito, amoniac, SRP (fósforo soluble reactivo), SRSi (silicio soluble reactivo), Cloro. Hicieron un análisis cualitativo de phytoplankton y vegetación acuática sumergida.	$TRIX = \frac{[\log(Chl - a \times \%OD) \times DIN \times P + k]}{m}$ <p>Donde, P es el fósforo inorgánico, DIN el nitrógeno inorgánico, %OD es 100-%OD , parámetros k= 1,5 y m= 1,2 son coeficientes escalares que fueron incluidos para arreglar el valor límite más bajo del índice</p>	Aguas costeras al sudeste de México
2011	Formulación del índice de calidad de aguas costeras para los países del proyecto SPINCAM (INVEMAR, 2011).	pH, OD, CF, Sólidos suspendidos totales (SST), Fosfato, Nitrato, DBO5, Hidrocarburos disueltos	$\left(\prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \right)^{1/\sum w_i}$	Aguas costeras para: Panamá, Colombia, Ecuador, Perú y Chile

Tabla 3 (Continuación): Revisión bibliográfica de los índices de calidad de agua (Elaboración Propia).

Año	Índice	Parámetros	Fórmula	Tipo de Agua
2015	Detection and Mapping of Water Quality Variation in the Godavari River Using Water Quality Index, Clustering and GIS Techniques (Gupta y col., 2015).	pH, OD, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅), nitrógeno amoniacal (N-NH ₃), Nitrito, Coliformes fecales (CF) y Coliformes totales (CT)	$\sum_{i=1}^n q_i w_i$	Río Godavari en India
2015	Water quality assessment using water quality index and geographical information system methods in the coastal waters of Andaman Sea, India (Jha y col., 2015).	pH, OD, DBO ₅ , SST, Amoníaco, Nitrito, CF, Chl-a y Fósforo total	$\sum_{i=1}^n q_i w_i$	Aguas costeras del mar de Andaman

Con la Tabla 3 se puede observar como los índices de calidad de aguas han sido un tema importante a través del tiempo, se aprecia los diferentes enfoques que se le puede dar a la calidad del agua, ya sea, de ríos, zonas costeras o índices generalizados para los diferentes cuerpos de agua, y también, como toma relevancia en las diferentes zonas geográficas. En estos trabajos se notan diferencias según el cuerpo de agua en que está enfocado el índice, los parámetros seleccionados, el peso asignado a cada variable y el objetivo que se quiere lograr con el índice, ya sea, medir contaminación por eutrofización, contaminación por metales o la protección de la vida acuática, etc.

Existen diferentes estudios en los que se comparan diferentes índices para la misma matriz de agua, como es el estudio de Gupta (Gupta y col., 2003) quien comparó diferentes metodologías para aguas costeras en India, y el de Fernández (Fernández y col., 2004) quien realizó comparaciones en el agua potable en Colombia. Esto expone, como obtuvieron diferentes resultados según la metodología que empleaban, mostrando la importancia del estudio de las características fisicoquímicas de la matriz de agua, el objetivo que se quiere estudiar y las normativas ambientales que existen. Hay que tener precaución antes de aplicar el índice en otro cuerpo de agua que se encuentre en otra región o país para el cual fue formulado, ya que podrían mostrar resultados erróneos, no representando la calidad real de la matriz estudiada.

Al revisar los parámetros más utilizados por los índices vistos en la revisión bibliográfica, se puede distinguir que los más recurrentes son: oxígeno disuelto, coliformes fecales, fosfatos, nitratos, demanda biológica de oxígeno, pH y sólidos suspendidos totales, y en una menor proporción se tiene la temperatura, el nitrógeno del amoníaco, fósforo total, algunos metales, clorofila, entre otros.

3.2.1. Análisis dpe la base de datos entregados por el P.O.A.L

Para la realización del índice es necesario realizar un análisis exhaustivo de los datos que fueron entregados por el Programa de Observación del Ambiente Litoral, de esta forma es posible estudiar el comportamiento fisicoquímico del lugar, revisando cuales son los parámetros que son medidos en cada estación de monitoreo y agrupar los lugares que presenten características similares para desarrollar un índice de calidad para cada grupo.

La Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR), es el organismo de alto nivel de la Armada de Chile que tiene por misión, cautelar el cumplimiento de las leyes y acuerdos internacionales vigentes, para dar seguridad a la navegación, proteger la vida humana en el mar, preservar el medio ambiente acuático, los recursos naturales marinos y fiscalizar las actividades que se desarrollan en el ámbito marítimo de su jurisdicción, con el propósito de contribuir al desarrollo marítimo de la Nación.

Dentro de los intereses marítimos de DIRECTEMAR se encuentra el Programa de Observación del Ambiente Litoral, el que fue elaborado para monitorear las fluctuaciones anuales de los niveles de concentración de los principales contaminantes, tanto en las aguas costeras como dulces, focalizándose en los cuerpos de aguas que son más intervenidos que están sometidos a la jurisdicción de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante.

El POAL posee estaciones de monitoreo a lo largo de todo Chile, en la figura 1 se puede apreciar los cuerpos de agua que son monitoreados por el POAL.

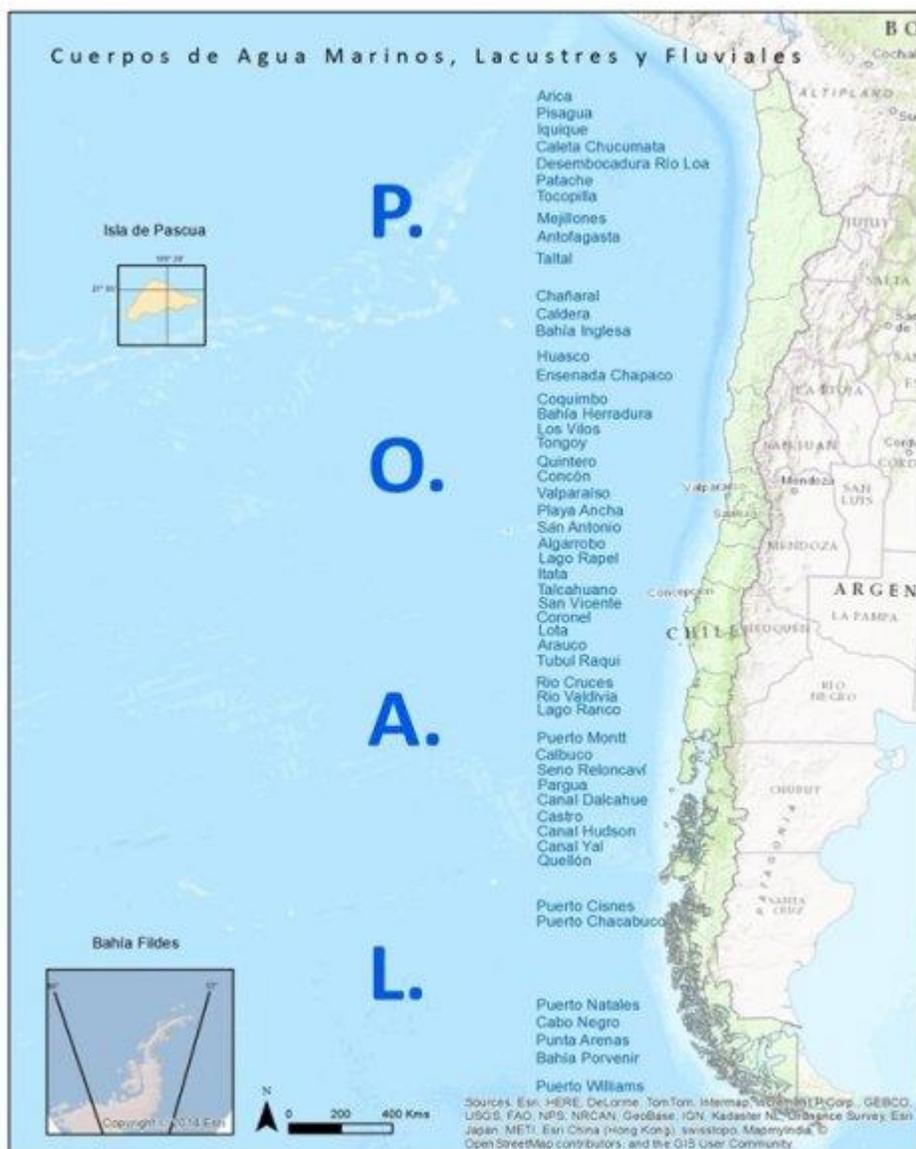


Figura 15: Mapa de cuerpos de aguas monitoreados por el POAL

El POAL presenta 356 estaciones de monitoreo en todo Chile, en las que se miden alrededor de 50 parámetros en diferentes matrices, ya sea, agua de mar, sedimento marino, biota, agua continental y sedimento continental. En las estaciones de monitoreo se registran los valores medidos de los parámetros de forma semestral.

El índice es sobre aguas costeras, por lo tanto, se desarrollará en base a 180 estaciones de monitoreo que realizan mediciones en la matriz de agua de mar, en estas se miden 29 parámetros, los que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros monitoreados por el POAL (Elaboración Propia).

Clasificación	Parámetros	Unidad de medida
Compuestos Aromáticos	Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Pireno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(ghi)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Naftaleno, Criseno, Díbenzo(a,h)antraceno, Fluoreno, Fenantreno, Fluoranteno, Indeno(1 2 3-cd)pireno	µg/L
Eutrofización	Fosfato, Amonio Nitrato, Nitrito	mg/L ppm
Metales	Arsénico Disuelto, Cadmio Disuelto, Cobre Disuelto, Mercurio Disuelto, Plomo Disuelto	µg/L
Microbiológicos	Coliformes Fecales	NMP/100 mL*
Nivel de Oxígeno	Oxígeno Disuelto	mg/L
Parámetros Físicos	Solidos Suspendidos	mg/L
Otros parámetros	Hidrocarburos Fijos	mg/L

*NMP/100 mL: Determinación del número más probable en 100 mL de coliformes fecales

Existen otros parámetros que son medidos por el POAL, pero en otras matrices, como lo es la Clorofila-a, Materia orgánica, fango, arena, y otros compuestos aromáticos, pero como el índice se realiza sobre el agua de mar, no se consideran estos parámetros al momento de elaborar el ICAC. Es importante destacar que el índice se realizó con la base de datos del año 2017.

3.2.2. Selección de Parámetros

Para la selección de parámetros, la literatura, recomienda incluir parámetros que incluyan diferentes categorías ambientales, como se muestra en la tabla 1. Sin embargo, el POAL no monitorea la totalidad de los parámetros mostrados en dicha tabla de esta forma, la selección de los parámetros que serán incluidos en el índice es influenciado directamente por las variables que sí son monitoreadas en la matriz de agua de mar por el POAL, además de considerar la revisión bibliográfica (Tabla 3) que se realizó y así seleccionar los parámetros más recurrentes entre estos.

Tabla 5: Parámetros seleccionados para el ICAC propuesto (Elaboración Propia).

Categoría	Parámetros
Nivel de oxígeno	Oxígeno disuelto
Eutrofización	Nitrato, Fosfato.
Aspectos de salud	Coliformes fecales
Características físicas	Sólidos Suspendidos Totales

Es importante mencionar que al momento de seleccionar los parámetros se consideró incluir los metales que son monitoreados por el POAL, como por ejemplo: cadmio

disuelto, plomo disuelto y mercurio disuelto, sin embargo esto no es posible, ya que los valores no son representativos de la calidad del agua, esto es porque en todas las estaciones de monitoreo del país se registra el mismo valor. Por ejemplo, se tiene que el valor de plomo disuelto en Mejillones y Castro es el mismo, 1,25 µg/L, se deduce que el límite de detección instrumental es muy alto, esto significa que la concentración más baja del analito que se puede distinguir claramente a partir del cero (Quino y col., 2007), resulta ser muy alta, entonces se registra el mismo valor para todas las mediciones realizadas. Además de esto, la medición en metales es muy compleja, entonces el POAL reporta sus datos como el valor medio del límite de detección establecido por el método. El mismo problema ocurrió al considerar los hidrocarburos fijos.

3.2.3. Definición de los parámetros seleccionados para el ICAC

1. Oxígeno Disuelto: Su fuente principal es la atmósfera, se puede difundir por la superficie del agua o mezclarse a través de la aireación, también puede tener como fuente la fotosíntesis, a través de las algas y otras plantas acuáticas (Pickard & Emery, 1990). Es un parámetro importante en la evaluación de la calidad debido a que sostiene la vida acuática, define gran parte de la biodiversidad, supervivencia de la comunidad y es importante en los procesos biológicos de producción (Pérez & Rodríguez, 2008). La concentración de oxígeno disuelto en el mar depende de la salinidad, temperatura, profundidad, la presión parcial del oxígeno, la turbulencia, población de plantas acuáticas, la hora del día y la época del año (Chiappone, 2001).
2. Nitratos: Su importancia se relaciona con la demanda de oxígeno, para visibilizar el lavado de fertilizantes y por la capacidad que tiene para favorecer los procesos de eutrofización antropogénica (Pérez & Rodríguez, 2008). Generalmente, el

nitrógeno, es un nutriente limitante secundario para el crecimiento de algas (después del fósforo) en los ambientes carbonatados. Concentraciones elevadas de amoníaco, nitrito y nitrato pueden promover el desarrollo, mantenimiento y proliferación de los productores primarios (fitoplancton, algas bentónicas, macrófitos), contribuyendo al fenómeno de eutrofización de los ecosistemas acuáticos (Smith, 2003), esto puede causar directa o indirectamente diversos efectos ecológicos y toxicológicos.

El nitrato puede regenerarse a partir de la oxidación del amonio y el nitrito que se libera de los sedimentos. Esto tiene importantes implicaciones para la calidad del agua ya que este proceso de conversión consume oxígeno disuelto en la columna de agua y en el bentos (McCutcheon y col., 1993). La presencia de niveles altos de nitrato en algunos cuerpos de agua indica aportes antropogénicos como la contaminación del agua subterránea, ya que el nitrato es el producto final de la estabilización de los desechos (Furnas, 1992).

3. Fosfato: El fósforo sirve como un parámetro de eutrofización, ya que, es un nutriente limitante para el crecimiento de las algas. En las áreas agrícolas, el arrastre de fósforo ligado a las partículas erosionadas de los suelos (introducido por la aplicación de fertilizantes que contienen ortofosfatos) es la principal fuente de contaminación (Pérez & Rodríguez, 2008). El fósforo se origina a partir de la mineralización de los fosfatos del suelo y las rocas, la hidrólisis de polímeros especies de fosfatos o drenajes que contengan fertilizantes o productos industriales como detergentes (Chiappone, 2001). Los aportes naturales de fosforo a ecosistemas como los arrecifes coralinos ocurren por medio del flujo del agua (Atkinson & Bilger, 1992) o por regeneración de materias orgánicas e inorgánicas en los sedimentos, ya que los aportes antropogénicos de fósforo de

las aguas negras, de desechos industriales y de fuentes no puntuales (agrícolas, arrastre urbano, emisarios submarinos) pueden causar cambios en la producción y la composición por especies.

4. Coliformes fecales: Las coliformes fecales son un subgrupo dentro de los coliformes totales (microorganismos en forma de bacilos Gram negativos, habitantes del tracto gastrointestinal de animales de sangre caliente) que se distinguen por su capacidad de fermentar la lactosa y producir ácido y gas a 44,5°C en 24 horas, siendo la especie predominante de este grupo la *Escherichia coli* (Castillo, 2008). Se consideró las bacterias del grupo coliformes como microorganismo indicador de contaminación fecal, ya que es el único parámetro establecido en la normativa chilena (Decreto 144, del Ministerio Secretaría general de la presidencia) que mide el P.O.A.L, además de que permite evaluar la presencia en determinadas concentraciones asociadas a la ocurrencia de agentes patógenos y a un riesgo de afectación en la salud de los usuarios, ya que las aguas costeras, en su mayoría se usan para actividades recreativas.
5. Sólidos Suspendidos Totales: En cuerpos de agua naturales se relaciona con los procesos erosivos ocasionadas por las prácticas agrícolas y el transporte de material durante la escorrentía de aguas de lluvia o de regadío. Estos sólidos producen problemas como la colmatación y la sedimentación, pudiéndose formar deltas, cambiar las características del agua y hasta destruir hábitats para los organismos acuáticos al disminuir la columna de agua (Pérez & Rodríguez, 2008). Además, existe una estrecha relación entre la concentración de los sólidos suspendidos y la calidad del agua, debido a su capacidad de adsorción de contaminantes como plaguicidas, metales pesados y nutrientes, al control que

ejercen sobre la turbiedad del agua y a su absorción de calor, que aumenta la temperatura del agua (Dagne y col., 2005).

3.2.4. Definición de sub-índices: Curvas de función

Para las variables del ICAC se elaboraron curvas de función de calidad para cada parámetro basadas en ecuaciones matemáticas. En esta etapa se ocupó lo visto en la revisión bibliográfica, normativa nacional e internacional, con el fin de que cada variable refleje la calidad del agua. Las curvas se construyeron en el programa Microsoft Excel, con el fin de poder facilitar la reproducción del índice a futuro. Es importante mencionar que la selección del ajuste de las curvas se realizó luego de probar diferentes ajustes, ya sea, polinómica, logarítmica, de línea recta, con el fin de elegir el ajuste que presentaba un R^2 más cercano a 1.

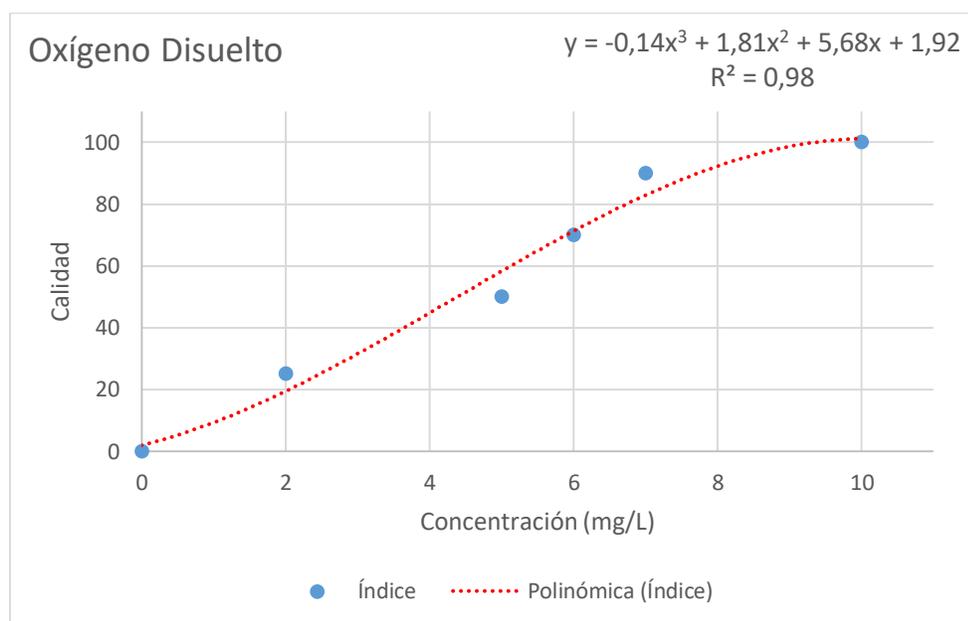
3.2.4.1. Oxígeno Disuelto

La curva del oxígeno disuelto se construyó a partir de la revisión bibliográfica, en este parámetro se consideraron los siguientes documentos: Formulación del índice de calidad de aguas costeras para los países del proyecto SPINCAM (INVEMAR, 2011), A Comparison of Water Quality Indices for Coastal Water (Gupta y col., 2003), Oregon Water Quality Index: A tool for evaluating water quality management effectiveness (Cude, 2001), A Generalized Water Quality Index for Taiwan. Environmental monitoring and assessment (Liou y col., 2004) y los datos entregados por el POAL

En base a estos documentos se establecieron los rangos de calidad que se muestran en la Tabla 6 y la curva de oxígeno disuelto en la Figura 11.

Tabla 6: Categorías y escala de valoración para Oxígeno disuelto.

Categoría	Índice	OD (mg/L)
Pésima	0-25	0 – 2
Inadecuada	25-50	2 – 5
Aceptable	50-70	5 – 6
Adecuada	70-90	6 – 7
Óptimo	90-100	7 – 10

**Figura 16:** Curva o Subíndice de Oxígeno Disuelto.

3.2.4.2. Nitrato

La curva del nitrato se construyó a partir de la revisión bibliográfica, en este parámetro se consideraron los siguientes documentos: Parameters of water quality. Interpretation and standars (EPA, 2001), Water Quality Guidelines for Nitrogen (Nitrate, Nitrite, and Ammonia) Overview Report Update (Nordin y col., 2009) y los datos entregados por el POAL.

En base a estos documentos se establecieron los rangos de calidad que se muestran en la tabla 7 y la curva de nitrato en la figura 12.

Tabla 7: Categorías y escala de valoración para el Nitrato.

Categoría	Índice	Nitrato ($\mu\text{g/L}$)
Pésima	0-25	12000 – 10000
Inadecuada	25-50	10000 – 6000
Aceptable	50-70	6000 – 4000
Adecuada	70-90	4000 – 3000
Óptimo	90-100	3000 – 0

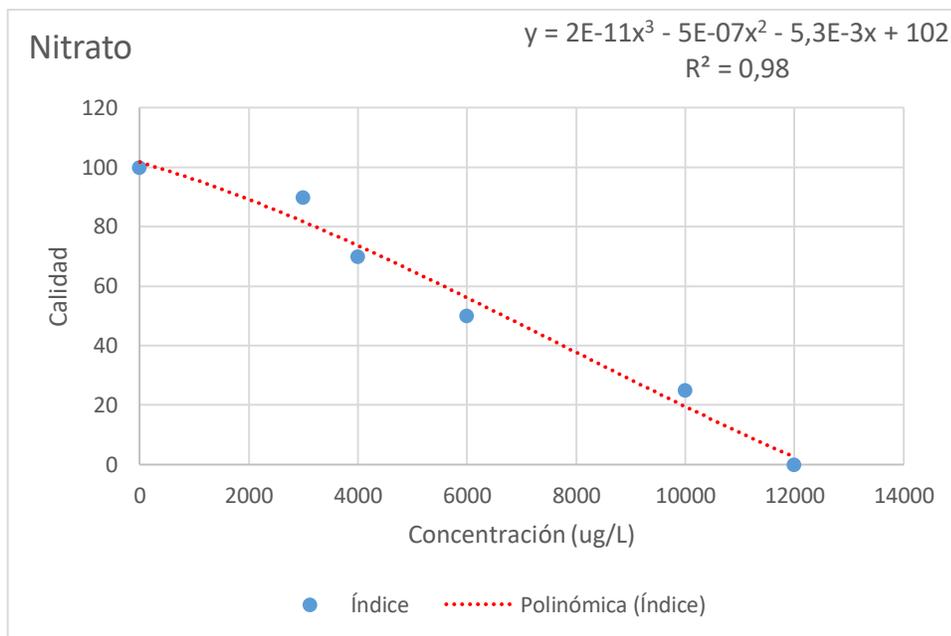


Figura 17: Curva o Subíndice de Nitrato

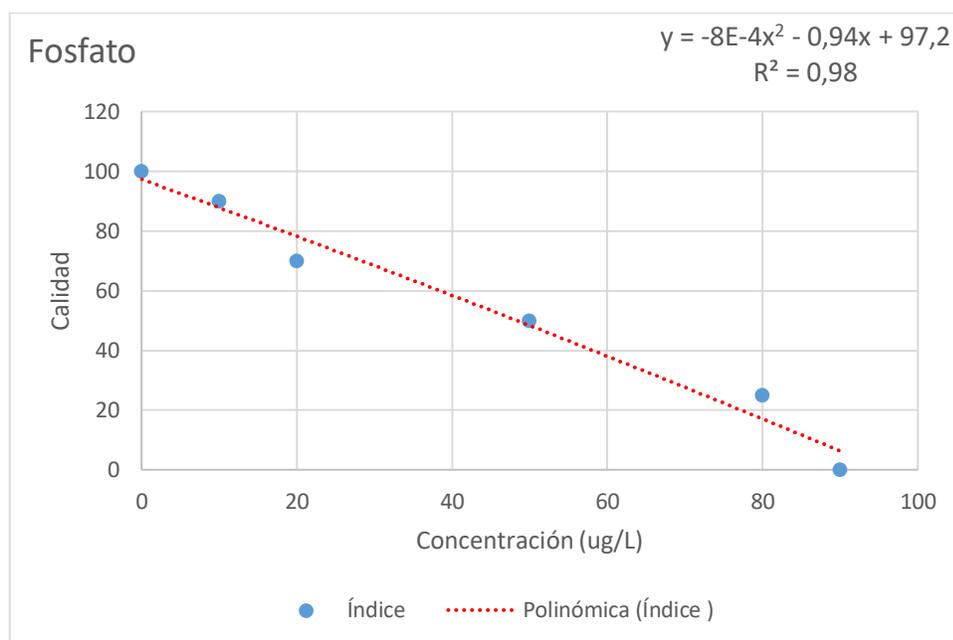
3.2.4.3. Fosfato

La curva de fosfato se construyó a partir de la revisión bibliográfica, en este parámetro se consideraron los siguientes documentos: Formulación del índice de calidad de aguas costeras para los países del proyecto SPINCAM (INVEMAR, 2011), National Recommended Water Quality Criteria (EPA, 1999), The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology (Sverdrup y col., 1942) y los datos entregados por el POAL.

En base a estos documentos se establecieron los rangos de calidad que se muestran en la tabla 8 y la curva de fosfato en la Figura 13.

Tabla 8: Categorías y escala de valoración para Fosfato.

Categoría	Índice	Fosfato ($\mu\text{g/L}$)
Pésima	0-25	90 – 80
Inadecuada	25-50	80 – 50
Aceptable	50-70	50 – 20
Adecuada	70-90	20 – 10
Óptimo	90-100	10 – 0

**Figura 18:** Curva o Subíndice de Fosfato.

3.2.4.4. Coliformes Fecales

La curva de coliformes fecales se construyó a partir de la revisión bibliográfica, en este parámetro se consideraron los siguientes documentos: Formulación del índice de calidad de aguas costeras para los países del proyecto SPINCAM (INVEMAR, 2011), Oregon Water Quality Index: A tool for evaluating water quality management effectiveness (Cude, 2001), la Tabla 1 del Decreto 144 “Establece normas de calidad primaria para la protección de las aguas marinas y estuarinas aptas para actividades de recreación con contacto directo” (Ministerio Secretaría general de la presidencia. 2009) y los datos entregados por el POAL.

En base a estos documentos se establecieron los rangos de calidad que se muestran en la tabla 9 y la curva de coliformes fecales en la figura 14.

Tabla 9: Categorías y escala de valoración para Coliformes Fecales.

Categoría	Índice	CF (NMP/100mL)
Pésima	0-25	3000 – 2000
Inadecuada	25-50	2000 – 1000
Aceptable	50-70	1000 – 500
Adecuada	70-90	500 – 70
Optimo	90-100	70 – 0

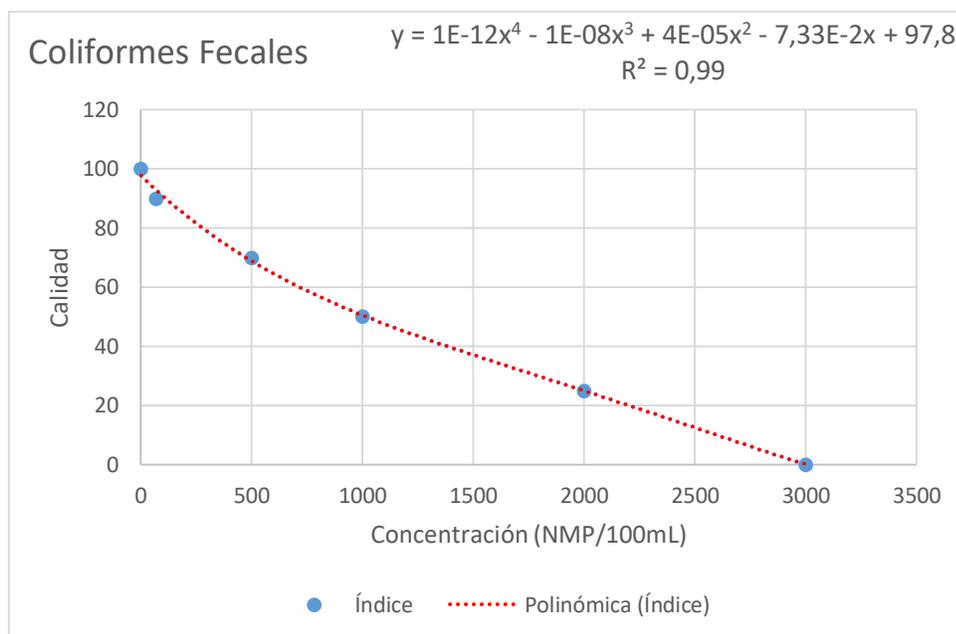


Figura 19: Curva o Subíndice de Coliformes Fecales

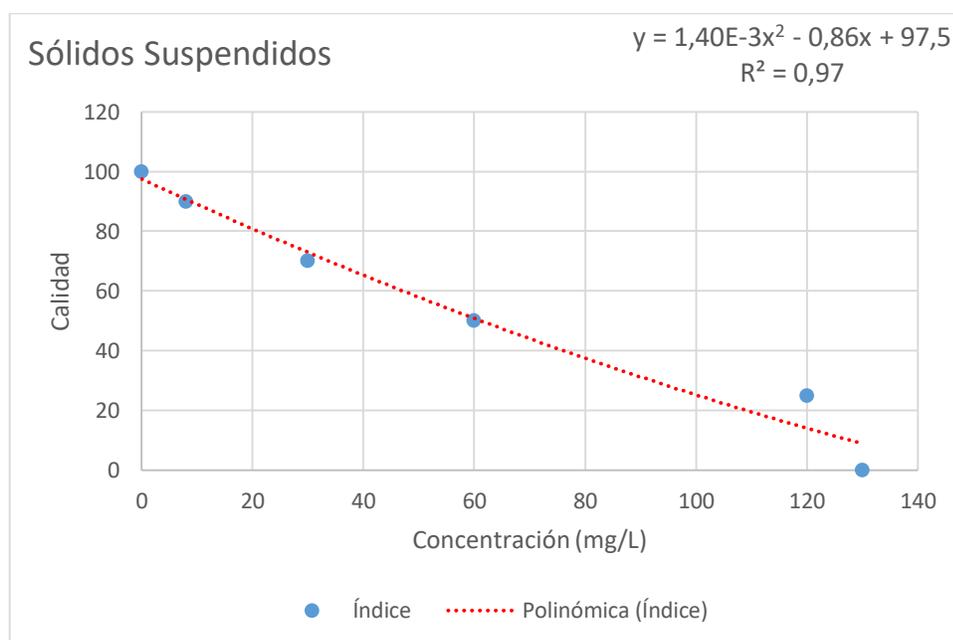
3.2.4.5. Sólidos Suspendedos Totales

La curva de sólidos suspendidos totales se construyó a partir de la revisión bibliográfica, en este parámetro se consideraron los siguientes documentos: Formulación del índice de calidad de aguas costeras para los países del proyecto SPINCAM (INVEMAR, 2011), A Comparison of Water Quality Indices for Coastal Water (Gupta y col., 2003), Oregon Water Quality Index: A tool for evaluating water quality management effectiveness (Cude, 2001), A Generalized Water Quality Index for Taiwan. Environmental monitoring and assessment (Liou y col., 2004) y los datos entregados por el POAL.

En base a estos documentos se establecieron los rangos de calidad que se muestran en la tabla 10 y la curva de Sólidos Suspendedos Totales en la Figura 15.

Tabla 10: Categorías y escala de valoración para Sólidos Suspendidos Totales.

Categoría	Índice	SST (mg/L)
Pésima	0-25	130 – 120
Inadecuada	25-50	120 – 60
Aceptable	50-70	60 – 30
Adecuada	70-90	30 – 8
Optimo	90-100	8 – 0

**Figura 20:** Curva o subíndice de Sólidos Suspendidos Totales.

A continuación se muestra la Tabla 11 que resume las ecuaciones de función de las curvas, con las que luego se procederá a interpolar los datos de las estaciones de monitoreo de cada ecorregión, con el fin de proceder al siguiente paso.

Tabla 11: Ecuaciones de función de las curvas para determinar el subíndice del ICAC

Parámetro	Ecuación de función	R ²
Oxígeno Disuelto	$y = -0,14x^3 + 1,81x^2 + 5,68x + 1,92$	0,98
Nitrato	$y = 2E-11x^3 - 5E-07x^2 - 5,3E-3x + 102$	0,98
Fosfato	$y = -8E-4x^2 - 0,94x + 97,2$	0,98
Coliformes Fecales	$y = 1E-12x^4 - 1E-08x^3 + 4E-05x^2 - 7,33E-2x + 97,8$	0,99
Sólidos Suspendidos Totales	$y = 1,40E-3x^2 - 0,86x + 97,5$	0,97

Se puede notar en la Tabla 11 que los valores de R² en todos los parámetros son cercanos a 1, lo que indica una buena correlación entre los puntos.

3.2.5. Asignación de pesos o valor de importancia

El peso de las variables se asigna según el cambio que puede implicar la disminución o el aumento de su concentración en el cuerpo de agua. Dado que todos los parámetros fisicoquímicos incluidos en el índice son de importancia para la vida acuática y para las personas que ocupan las zonas costeras de forma recreativa, se decide que todos los parámetros tendrán el mismo peso de 0,2 así de esta forma al realizar la sumatoria de los pesos se tendrá un valor de 1.

3.2.6. Agregación de parámetros

En esta etapa se unifican los subíndices de cada parámetro en una fórmula de agregación matemática. Para definir la fórmula que se ocupará para el desarrollo del índice, se revisa la Tabla 3 y se seleccionan fórmulas para realizar pruebas con las estaciones de monitoreo, esto se realiza con el fin de poder analizar cual se ajusta de mejor forma para revisar la calidad del agua costera de Chile. Las fórmulas se eligieron considerando los parámetros monitoreados y el objetivo del índice, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12: Índices elegidos para el estudio del ICAC

Índice	Fórmula
Formulación del índice de calidad de aguas costeras para los países del proyecto SPINCAM (INVEMAR, 2011)	$\left(\prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \right)^{1/\sum w_i}$
The Estuarine Index: A New Approach to Scientific Information Transfer (Cooper, J.,1995)	$\frac{1}{100} \left(\sum_{i=1}^n q_i w_i \right)^2$
Oregon Water Quality Index: A tool por evaluating water quality management effectiveness (Cude, C.G., 2007)	$\sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{SI_i^2}}}$

*Donde, q_i y SI es el subíndice para el parámetro i , w_i es el peso asociado a cada parámetro, n es el número de parámetros.

Es importante mencionar que índice de Cude es el único que no considera los pesos de los parámetros. Las formulas vistas son recurrentes por diversos autores, pero la diferencia se muestra al momento de realizar los rangos de calidad.

3.2.7. Rangos de clasificación según los índices seleccionados

Según la calidad obtenida se clasifica de acuerdo a las categorías de calidad que tiene cada índice, las que se simbolizan con un color. En la literatura los rangos de calificación de los índices de calidad de agua varía con cada índice y criterio del autor, sin embargo la mayoría presenta rangos similares y escalas de 4 a 5 categorías, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13: Clasificación de categorías de los índices por calidad.

Categoría	INVEMAR	Cooper	Cude
Pésima	0 – 25	10 – 25	10 – 59
Inadecuada	25 – 50	26 – 50	60 – 79
Aceptable	50 – 70	51 – 70	80 – 84
Adecuada	70 – 90	71 – 90	85 – 89
Óptimo	90 – 100	91 – 100	90 – 100

Es importante mencionar que los conceptos puestos en la columna de Categoría se generalizaron en “pésima, inadecuada, aceptable, adecuada y óptimo”, ya que los autores ocupaban diferentes conceptos para las mismas categorías; por ejemplo: INVEMAR cataloga de “adecuado” al mismo rango, que Cooper lo cataloga como “bueno”.

Explicado esto, se tiene la Tabla 14 donde se agrupan las 180 estaciones de monitoreo según el cuerpo de agua (cada cuerpo de agua implica más de 1 sitio) y la ecorregión a la que pertenece, en los cuales se procede a calcular la fórmula propuesta por cada autor mediante Excel.

Tabla 14: Resultados obtenidos aplicando las fórmulas seleccionadas.

Cuerpo de Agua	Ecorregión	INVEVAR	Cooper	Cude
Antofagasta	Norte Grande	86	75	85
Arica	Norte Grande	84	73	82
Caleta Chucumata	Norte Grande	90	82	90
Iquique	Norte Grande	86	76	84
Mejillones	Norte Grande	22	49	0
Patache	Norte Grande	87	76	85
Pisagua	Norte Grande	78	63	76
Río Loa	Norte Grande	87	78	86
Tocopilla	Norte Grande	21	42	0
Bahía Inglesa	Atacama	70	61	46
Caldera	Atacama	81	69	75
Chañaral	Atacama	77	62	73
Coquimbo	Atacama	94	88	93
Ensenada Chapaco	Atacama	19	38	0
Huasco	Atacama	19	37	0
Taltal	Paposo Taltal	22	45	0
Bahía la Herradura	Los Molles	93	87	93
Concón	Los Molles	66	49	57
Los Vilos	Los Molles	88	78	88
Quintero	Los Molles	44	49	6
Tongoy	Los Molles	84	71	83

Tabla 14 (Continuación): Resultados obtenidos aplicando las fórmulas seleccionadas.

Algarrobo	Chile Central	92	85	92
Arauco	Chile Central	87	77	86
Coronel	Chile Central	52	42	25
Itata	Chile Central	48	43	14
Lota	Chile Central	88	78	87
Playa ancha	Chile Central	73	55	70
San Antonio	Chile Central	81	67	78
San Vicente	Chile Central	21	41	0
Talcahuano	Chile Central	84	72	81
Valparaíso	Chile Central	68	51	59
Calbuco	Chiloé Taitao	87	75	86
Canal Dalcahue	Chiloé Taitao	93	87	93
Canal yal	Chiloé Taitao	90	81	90
Castro	Chiloé Taitao	85	74	85
Pargua	Chiloé Taitao	87	76	87
Puerto Chacabuco	Chiloé Taitao	85	72	84
Puerto Cisnes	Chiloé Taitao	90	80	89
Puerto Montt	Chiloé Taitao	79	66	74
Quellón	Chiloé Taitao	90	81	90
Seno Reloncaví	Chiloé Taitao	94	89	94
Puerto Natales	Kawesqar	97	94	97
Bahía Porvenir	Magallanes	94	89	94

Tabla 14 (Continuación): Resultados obtenidos aplicando las fórmulas seleccionadas.

Cabo Negro	Magallanes	94	89	94
Puerto Williams	Magallanes	93	87	93
Punta Arenas	Magallanes	92	85	92
Isla de Pascua	Isla de Pascua	83	72	78

Con estos resultados se puede apreciar la diferencia de calidad de aguas que puede ser entregada por cada índice propuesto. Sobre estas tres fórmulas se selecciona la de Cooper para la aplicación del ICAC, ya que:

- Se rechaza INVEMAR, ya que no es lo suficientemente sensible a los cambios de cada variable de calidad de agua, además muestra resultados llevados a los extremos de buena calidad o de mala calidad, ya que teniendo un parámetro clasificado de mala calidad, el índice presenta una categoría de pésima.
- Se descarta a Cude ya que, no incluye la ponderación de los parámetros, lo que serviría a futuro si se puede lograr incluir nuevas variables al índice de calidad de aguas costeras, que tengan mayor importancia en la ponderación final.

Considerando lo anterior y el estudio de House (House, 1989) en el cual realiza una revisión de diferentes índices de calidad de aguas concluye que la fórmula seleccionada es una de las que da mejores resultados al momento de indexar calidad de aguas en general.

Es necesario mencionar que en la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos por cuerpo de agua, antes de ser agrupados por ecorregión, esto se hace con el fin de poder presentar la calidad de agua por sector de una forma más particular.

La descripción del rango de calidad definido por Cooper se muestra en la tabla 15.

Tabla 15: Rango de Clasificación o evaluación de la calidad del agua costera, según Cooper.

Escala	Categoría	Descripción
Excelente	91 – 100	Indica una calidad excelente del agua, permite todo tipo de uso del agua, adecuado para toda la fauna marina y actividades de recreación con contacto directo.
Bueno	71 – 90	Indica una buena calidad de agua, necesita un tratamiento menor para mejorar su calidad. Adecuado para toda la fauna marina y para actividades recreativas.
Razonable	51 – 70	Indica una calidad de agua razonable, se puede mejorar el agua con un tratamiento de costo moderado. Se permiten los deportes de contacto indirecto con el agua, y es dudoso para el contacto directo.
Contaminado	26 – 50	Indica agua contaminada con un moderado valor económico, luego de un tratamiento avanzado puede mejorar la calidad del agua. Se permiten los deportes de contacto indirecto con el agua y la pesca de forma esporádica.
Muy Contaminado	10 – 25	Indica agua muy contaminada de bajo valor económico, requiere de una inversión sustancial para mejorar su calidad de agua. Inaceptable para la fauna marina y para actividades recreativas.

3.2.8. ICAC aplicado por Ecorregión

Se aplica el ICAC por las 9 ecorregiones en las que existen estaciones de monitoreo del POAL, para esto se calculó el promedio de cada parámetro de las estaciones de monitoreo de los cuerpos de agua que pertenecen a cada ecorregión y finalmente se aplica la fórmula seleccionada.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 16, también se incluye la clasificación de la calidad obtenida representada con el color correspondiente.

Tabla 16: Resultados obtenidos del ICAC por ecorregión.

Ecorregión	Calidad
Norte Grande	67
Paposo Taltal	45
Atacama	58
Los Molles	66
Chile Central	60
Chiloé Taitao	78
Kawesqar	94
Magallanes	87
Isla de Pascua	72

Cada ecorregión se revisará en mayor detalle, para analizar las potenciales causas del resultado de calidad obtenida.

Tabla 17: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión del Norte Grande

Cuerpo de Agua	CF	OD	Nitrato	Fosfato	Sólidos Suspendidos
Antofagasta	95	85	89	72	91
Arica	97	92	83	64	91
Caleta Chucumata	98	79	90	93	94
Iquique	98	64	88	94	92
Mejillones	97	71	91	0	90
Patache	98	67	87	95	90
Pisagua	98	66	80	62	91
Río lo	98	68	89	94	92
Tocopilla	97	48	86	0	91
Promedio	97	71	87	64	91
Aplicación de la Fórmula de Cooper			67		

Los niveles de fosfatos son muy altos en estos sectores, según lo definido en las escalas de calidad y además, los valores de oxígeno disuelto son bajos, especialmente en los sectores de Tocopilla y Mejillones. Una de las razones por las que se puede deber esta situación es por la actividad minera, específicamente en la producción nacional de rocas y minerales industriales, como lo son las rocas fosfóricas. Estas, son las que presentan un alto contenido de óxido de fósforo (P_2O_5), constituyendo la principal materia prima para la elaboración de fertilizantes fosfatados y productos químicos relacionados. Las rocas fosfóricas chilenas, fosforita, apatita y guano son producidas en las regiones de

Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2017), lo que puede implicar las altas concentraciones de fósforo en el océano en estos sectores, estos pueden llegar al mar través del viento o a través de un estuario. En la región de Antofagasta, donde están los cuerpos de agua de Mejillones y Tocopilla, se produce apatita.

La consecuencia más común de la alta concentración de fosfato en los cuerpos de agua, es la eutrofización, esto es un alto contenido de nutrientes en el agua, como el fosfato, que provoca una proliferación de algas, las que cuando se degradan por acción bacteriana, consumen el oxígeno del agua, teniendo como consecuencia que las concentraciones del oxígeno descendan.

Tabla 18: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Paposo Taltal

Cuerpo de Agua	CF	OD	Nitrato	Fosfato	Sólidos Suspendidos
Taltal	98	62	88	0	88
Promedio	98	62	88	0	88
Aplicación de la Fórmula de Cooper				45	

Este sector presenta una clasificación de Contaminado, es importante mencionar que esta ecorregión está representada por solo un cuerpo de agua, la cual posee cuatro estaciones de monitoreo, esto podría indicar una calidad no representativa a la totalidad de la ecorregión. Dicho esto, en Taltal existe el mismo problema que en las ecorregiones del Norte Grande y Atacama, ya que también es una fuente de rocas fosfóricas, en la cual se produce apatita, generando un impacto en la calidad de los parámetros medidos

como el oxígeno disuelto, nutrientes y materiales suspendidos, los que pueden ser trasladados por el viento hacia el océano.

Tabla 19: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión del Atacama

Cuerpo de Agua	CF	OD	Nitrato	Fosfato	Sólidos Suspendidos
Bahía inglesa	98	23	90	91	89
Caldera	98	50	90	90	86
Chañaral	98	69	91	52	85
Coquimbo	98	99	90	92	90
Ensenada Chapaco	98	30	89	0	92
Huasco	97	38	90	0	80
Promedio	98	51	90	54	87
Aplicación de la Fórmula de Cooper			58		

En esta ecorregión sucede el mismo problema que en la ecorregión del Norte Grande, baja calidad en el fosfato y en el oxígeno disuelto, específicamente en el cuerpo de agua de Huasco y Ensenada Chapaco.

Huasco se encuentra en la región de Atacama, y como se dijo anteriormente, es una de las regiones que son fuentes de las rocas fosfóricas, produciendo fosforita, lo que genera el mismo efecto en las aguas que se mencionó.

Además se encuentra la Compañía Minera del Pacífico, la que controla minas de extracción de hierro, donde su proceso productivo, se inicia con la extracción de hierro, para luego pasar por los tratamientos de molienda (proceso por el cual se reduce el

tamaño del material mineralizado) y concentración (operación en la cual se eleva la concentración de un mineral, mediante el uso de equipos de separación sólido-sólido produciendo así la segregación de dos o más especies mineralógicas). Si el mineral contiene un alto contenido de impurezas (fósforo y azufre), necesita estos dos tratamientos además de un proceso químico de peletización, donde se reducen dichas impurezas, esto se realiza en la Planta de Pellet de Valle del Huasco (CAP Minería).

En relación a lo mencionado anteriormente, la Superintendencia del Medio Ambiente sancionó y formuló cargos en contra la Compañía Minera del Pacífico, ya que cometió diversas infracciones, entre estas, el vertimiento de relaves al mar proveniente de la Planta de Pellets, sin contar con la autorización ambiental respectiva, específicamente en la bahía de la Ensenada Chapaco, además también supera los niveles máximos de concentración de material particulado (Superintendencia del Medio Ambiente, 2017), los cuales a través de la circulación del aire puede llegar al océano, afectando en la calidad representada en los parámetros. Esto puede explicar los altos valores que se obtienen de fósforo en Ensenada Chapaco.

Tabla 19: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Los Molles

Cuerpo de Agua	CF	OD	Nitrato	Fosfato	Sólidos Suspendidos
Bahía La Herradura	98	99	92	86	92
Concón	91	48	85	38	89
Los Vilos	98	80	79	95	91
Quintero	98	75	85	3	90
Tongoy	98	77	77	89	80
Promedio	96	76	84	62	88
Aplicación de la Fórmula de Cooper			66		

En esta ecorregión se repite el mismo fenómeno descrito en las anteriores, donde los parámetros de fosfato y oxígeno disuelto presentan baja calidad, esto sucede porque en la región de Coquimbo hay producción de apatita, una roca fosfórica. En Concón se produce el mismo efecto, pero en una menor escala, esto se puede deber a la cercanía que hay entre las estaciones de monitoreo de Quintero y Concón, ya que en el proceso de extracción y transporte de la apatita, puede haber material que sea transportado por el aire, a través del viento, afectando no sólo el lugar donde se encuentra la minera, sino que también los alrededores, además también produce material suspendido en el océano, resultando en una baja en la calidad de este parámetro.

Tabla 20: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Chile Central.

Cuerpo de Agua	CF	OD	Nitrato	Fosfato	Sólidos Suspendidos
Algarrobo	96	95	89	91	89
Arauco	98	69	91	90	91
Coronel	93	44	87	12	89
Itata	97	61	85	6	79
Lota	98	71	91	91	91
Playa ancha	77	65	85	54	89
San Antonio	97	82	85	59	85
San Vicente	86	56	85	0	91
Talcahuano	96	62	85	92	89
Valparaíso	81	64	85	35	90
Promedio	92	67	87	53	88
Aplicación de la Fórmula de Cooper			60		

Para Chile Central también se presenta una calidad de agua razonable, y de nuevo se encuentra que los parámetros de fosfatos y oxígeno disuelto presentan una baja calidad en los sectores mineros.

En esta zona se presentan los balnearios más concurridos del país, lo que provoca un aumento en la contaminación de las playas, debido a que las personas arrojan diversos tipos de desechos en las playas, incluso, el parámetro de las coliformes fecales presenta la calidad más baja en todo Chile. Además, se han realizado denuncias en que se acusa

de vertimientos de aguas servidas sobre el océano, donde se menciona que un ducto eliminaría residuos orgánicos al mar.

El Interational Transport Forum, indica que los puertos con mayor contaminación por emisiones de material particulado, óxidos de azufre y de nitrógeno en Chile son los de San Antonio, Quintero y Valparaíso, esto se debe a la intensidad de las actividades portuarias y de los barcos portacontenedores (OCDE, 2016), el material particulado puede llegar al océano mediante la circulación del aire, afectando a la variable de sólidos suspendidos de forma negativa.

Además, en esta zona ha habido problemas medioambientales como derrames de petróleo en la Bahía de San Vicente, afectando el ecosistema marino, el parámetro de hidrocarburos es medido por el POAL pero el reporte de datos del año 2017 muestra que en todas las estaciones de monitoreo de Chile, registra el mismo valor, lo que puede indicar un problema con el límite de detección en la medición, ya que es sabido que las costas chilenas son heterogéneas.

Tabla 21: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Chiloé Taitao

Cuerpo de Agua	CF	OD	Nitrato	Fosfato	Sólidos Suspendidos
Calbuco	97	76	85	81	95
Canal Dalcahue	98	96	89	95	88
Canal yal	97	83	88	88	95
Castro	72	83	87	93	93
Pargua	98	83	86	81	89
Puerto Chacabuco	83	69	90	90	94
Puerto Cisnes	89	84	90	95	91
Puerto Montt	92	90	86	49	90
Quellón	97	88	87	87	92
Seno Reloncaví	98	100	92	94	89
Promedio	92	85	88	85	92
Aplicación de la Fórmula de Cooper			78		

Para Chiloé Taitao se presenta una calidad catalogada como buena, según Cooper, apta para la fauna marina y las actividades recreativas. Es sabido que al sur del país se tienen temperaturas más bajas, esta condición puede afectar a las variables medidas, como el oxígeno disuelto, ya que este parámetro aumenta conforme la temperatura disminuye, esto es debido a la mayor solubilidad del oxígeno a menores temperaturas (Riley & Doods, 2013). Además, una de las fuentes del oxígeno disuelto es la atmósfera mediante la aireación, por el cual el oxígeno se disuelve en la superficie por acción del viento y

olas, características ambientales que aumentan en el sur de Chile. Los nutrientes, fosfato y nitrato, poseen una mejor calidad que en las ecorregiones anteriores, ya que en este sector no hay minas de rocas fosfóricas. Sobre sólidos suspendidos se observa una mejor calidad, en comparación con las ecorregiones anteriores, esto es porque una fuente indirecta de estos, son los nutrientes (fosfato y nitrato), ya que promueven la floración de algas en exceso, pero como los niveles de esos parámetros están en los rangos normales, también lo están los sólidos suspendidos. Estos también pueden provenir de una fuente directa como erosión del suelo, como también puede provenir de las minas, ya que las partículas provenientes de estas pueden llegar al mar. Sobre las coliformes fecales se presenta una buena calidad, como lo presenta todo el país.

Tabla 22: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Kawesqar

Cuerpo de Agua	CF	OD	Nitrato	Fosfato	Sólidos Suspendidos
Puerto Natales	98	100	100	95	93
Promedio	98	100	100	95	93
Aplicación de la Fórmula de Cooper				94	

Esta ecorregión es representada por solo un cuerpo de agua, Puerto Natales, el cual posee tres estaciones de monitoreo, lo que indica que puede ser no representativa para toda la ecorregión. Mencionado esto, se procede a analizar los resultados obtenidos, los que indican una calidad Óptima, siendo la única ecorregión en esta clasificación. Es importante mencionar que la Municipalidad de Puerto Natales obtuvo en el año 2017 la certificación ambiental de excelencia, la máxima distinción entregada por el Ministerio del Medio Ambiente, ya que, desde el 2012 comenzaron con un diagnóstico

medioambiental de la comuna, donde la primera acción fue establecer una estrategia de minimización y eficiencia en las oficinas municipales, la que incluyó eficiencia energética e hídrica y manejo de residuos (Ministerio del Medio ambiente, 2017).

El oxígeno disuelto presenta una calidad de 100, esto se puede deber a la temperatura, vientos y oleaje del sector, promoviendo la alta calidad de esta variable. Las coliformes fecales presentan una calidad buena calidad, como se presenta en todo el país. Además, nuevamente se ve la relación entre la buena calidad de los nutrientes y de los sólidos suspendidos.

Tabla 23: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Magallanes

Cuerpo de Agua	CF	OD	Nitrato	Fosfato	Sólidos Suspendidos
Bahía Porvenir	98	99	92	91	91
Cabo Negro	98	100	92	92	89
Puerto Williams	97	99	89	91	89
Punta Arenas	95	97	92	87	90
Promedio	97	99	91	90	90
Aplicación de la Fórmula de Cooper			87		

La ecorregión de Magallanes presenta una Buena calidad en sus aguas costeras, donde las variables de coliformes fecales siguen el comportamiento a nivel país, las concentraciones del oxígeno disuelto y nutrientes siguen el comportamiento que corresponde por las condiciones ambientales y geográficas, además, también se presenta la relación entre una buena calidad de nutrientes y sólidos disueltos.

Es importante mencionar que las costas de las ecorregiones Chiloé Taitao, Kawesqar y Magallanes tienen playas que no son tan concurridas, en comparación con los balnearios de las ecorregiones del norte, produciendo que haya una menor intervención del humano en estas playas, lo que contribuye a la calidad de estas aguas.

Tabla 24: Calidad obtenida por cada variable en la ecorregión de Isla de Pascua

Cuerpo de Agua	CF	OD	Nitrato	Fosfato	Sólidos Suspendidos
Isla de Pascua	94	52	93	94	92
Promedio	94	52	93	94	92
Aplicación de la Fórmula de Cooper				72	

Esta ecorregión presenta una Buena calidad, donde el parámetro más bajo es el oxígeno disuelto, lo cual se puede deber a la temperatura del océano en el sector, ya que a mayor temperatura menor disolución del oxígeno, lo que provoca una menor concentración de éste. Sobre los nutrientes se tiene una buena calidad, esto se debe porque generalmente estas tienen fuentes antropogénicas, ya sea a través de la minería o a través del uso excesivo de fertilizantes en zonas de agricultura, factores que no se dan en la Isla de Pascua. También se puede notar la relación entre los sólidos suspendidos y los nutrientes, en las cuales presentan una buena calidad.

En general, las aguas costeras chilenas presenta una calidad catalogada según Cooper como Razonable, es importante tener una gestión ambiental para logara mejorar esta clasificación, y así poder lograr un equilibrio sustentable.

Se crea este índice ya que existe la necesidad de valorar y medir el daño que se hace al medio ambiente, el estado de los recursos y de las condiciones ambientales, con una visión desde el pasado, presente y además que permita proyectarse al futuro, además es necesario para definir en qué punto o medida se puede decir que hay un impacto ambiental o por el contrario, si no es un daño importante para una comunidad.

Esto se puede lograr mediante herramientas de gestión como lo son las redes de monitoreo, éstas son las más usadas en el país, tanto en agua como en aire. Si se tiene la tecnología adecuada puede caracterizar e indicar las concentraciones de contaminantes en puntos geográficos. Esto permite aplicar políticas medioambientales específicas para las zonas que posean algún nivel de contaminación puntual.

El índice propuesto para aguas costeras se realizó gracias a las mediciones de las redes de monitoreo que estaban a lo largo de Chile logrando entregar información sobre el año 2017 y definir la calidad que había en cada ecorregión, entregando una visión a través del tiempo, permite comparar situaciones o condiciones ambientales

Mediante el índice se puede llegar al desarrollo de los estándares de calidad, los que indican límites que no pueden ser sobrepasadas para estar en un ambiente libre de contaminación y se aplica a nivel nacional, con ella se mide concentraciones de elementos presentes en agua, suelo o aire. Su análisis permite la determinación de niveles permisibles, regulaciones y leyes por parte de entidades autorizadas.

El índice es una herramienta de gestión, que designa la calidad, permitiendo la toma de decisiones o acciones a partir de mediciones experimentales con bases científicas y técnicas. Puede tener un rol preventivo o como información disponible para conocer y mejorar la condición actual, por ejemplo: prohibir un tipo de vertimiento de alguna

sustancia al mar o se puede involucrar en la autorización o la negación de explotación comercial de una zona costera. Además logra facilitar el poder establecer metas para mejorar en la escala de calidad y lo más importante es que es capaz de entregar la calidad de una manera fácil y sencilla, accesible a todo público.

IV. CONCLUSIONES

- Se construyó el índice de calidad de aguas marino-costeras para evaluar el estado del recurso hídrico marino de las ecorregiones de Chile.
- Se realizó una búsqueda bibliográfica de los índices ocupados en diferentes partes del mundo de los cuales se sintetizó la información encontrada y se adecuó a la realidad país, considerando normativas nacionales y la disponibilidad de la información entregado por el P.O.A.L
- Se identificaron los principales parámetros fisicoquímicos que se encontraban en la revisión bibliográfica y los que se encontraban disponibles en la base de datos del POAL, estos fueron: coliformes fecales, oxígeno disuelto, nitrato, fosfato y sólidos suspendidos, con estos parámetros se elaboró el ICAC propuesto.
- Se definió los rangos de cada parámetro fisicoquímico según la bibliografía revisada y normas usadas tanto en Chile como en otros países, con el fin de poder determinar la calidad presente en las ecorregiones. Para el oxígeno disuelto se definió un rango de 0 a 10 (mg/L), donde 0 corresponde a una mala calidad para este parámetro y 10 una buena calidad; para las coliformes fecales se tiene un rango entre 0 a 3000 (NMP/100 mL), el rango del fosfato es entre 0 y 90 $\mu\text{g/L}$, para el nitrato se definió un rango entre 0 y 12000 $\mu\text{g/L}$ y el rango de los sólidos suspendidos es entre 0 y 130 mg/L. En estos últimos cuatro parámetros se tiene que el valor más cercano a una concentración cero muestra una mejor calidad y los valores de concentración más altos indican una mala calidad de los parámetros seleccionados.
- Se seleccionó la fórmula propuesta por Cooper para la agregación de los parámetros, ya que, es sensible a los cambios en las variables de calidad de

agua en todo el rango, incluye la ponderación de los parámetros, lo que serviría a futuro si se puede lograr incluir nuevas variables al índice, que tengan mayor importancia en la ponderación final, y es una fórmula relativamente fácil para volver a ser calculada.

- Se aplicó el índice para evaluar la calidad de aguas costeras. Este se aplicó en nueve ecorregiones de Chile propuestas por el Ministerio del Medio Ambiente que tienen estaciones de monitoreo del P.O.A.L, en estos lugares se calculó la fórmula propuesta por Cooper y los rangos de calidad final establecidos por éste. Según esta propuesta se obtiene que en la ecorregión: del Norte grande se obtuvo una calidad de 67, en la ecorregión de Atacama se obtuvo 58, en Pajonales Taltal se tiene una calidad de 45, en Los Molles se tiene 66, en Chile Central: 60, Chiloé Taitao: 78, Kawesqar: 94, en Magallanes 87 e Isla de Pascua se tiene una calidad de 72. A nivel nacional, Chile, según los rangos de categoría de Cooper, tiene un estado “razonable”. La razón de que las ecorregiones con peor calidad sean Norte Grande, Atacama, Los molles y Chile Central, es por la actividad minera de la zona, ya que se encuentra la producción nacional de las rocas fosfóricas, esto tiene como consecuencia que en estos lugares se presente una alta cantidad de fosfatos, produciendo eutrofización en el océano, lo que lleva a una afectación a la calidad de los otros parámetros como lo es: el oxígeno disuelto, ya que cuando se degradan las algas se consume oxígeno disuelto, y los sólidos suspendidos, ya que con la producción minera se trasladan por el viento a los océanos.

- Se encontró limitaciones al momento de construir el índice, como poder incluir diferentes categorías ambientales a través de la incorporación de una mayor cantidad de parámetros que consideran otros autores, como por ejemplo: el pH, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, temperatura, transparencia, hidrocarburos y metales disueltos. Los cinco primeros parámetros no son monitoreados por el POAL, pero sí lo son los hidrocarburos y metales disueltos, sin embargo, se encontró con que los hidrocarburos, y los metales como el: cadmio disuelto, plomo disuelto y mercurio disuelto, no son representativos a la calidad del lugar, ya que, los valores reportados por el POAL sobre los metales en la matriz de agua de mar, es el valor medio del límite de detección del método, lo que genera que en los valores entregados por el POAL para cada parámetro, de forma independiente, sea el mismo a lo largo de todo Chile. El POAL realiza esto, porque se considera que es complicado la medición de los metales en el agua y el límite de detección es muy alto, habiendo el mismo problema con los hidrocarburos.
- Se recomienda la medición de parámetros de bajo costo como el pH, conductividad y temperatura que debería tener el POAL, para lograr un análisis más detallado de la calidad de las aguas costeras en Chile. Además también se recomienda en realizar una mayor cantidad de mediciones en el año, ya que, dos mediciones al año no son suficientes para la dinámica del agua.

V. BIBLIOGRAFÍA

- Atkinson, M.J. y Bilger, R.W. 1992. Effects of water velocity on phosphate uptake in coral reef-flat communities. *Limnology and Oceanography*. **37**: 273-279
- Beamonte, E., A. Casino, E. Veres y J. Bermúdez. 2004. Un indicador global para la calidad del agua. Aplicación a las aguas superficiales de la Comunidad Valenciana. *Estadística Española*. **46** (156): 357 – 384
- Brown R. M., McClelland N. I., Deiningen R. A. and Tozer R., (1970) “A Water Quality Index”. Do we dare? *Water and Sewage Works*.
- Caldeira K y Wickett M.E., 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*. **425**: 365.
- Castillo, G. 2008. Microbiología de Aguas, Tema I: Agua y Salud. Programa de Diplomado en Contaminación Ambiental. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- CAP Minería, Compañía Minera del Pacífico S.A. Consulta: Diciembre, 2018. <http://www.capmineria.cl/operacione/valle-del-huasco/>
- Chiappone, M. 2001. Conservación de la calidad del agua en áreas marinas protegidas. The Nature Conservancy. República Dominicana. pp: 149
- Chislock, M.F.; Doster, E.; Zitomer, R.A., y Wilson, A.E., 2013. Eutrophication: Causes, Consequences, and Controls in Aquatic Ecosystems. *Nature Education Knowledge*. **4**: 10
- CONICYT, Unión Europea 2007. Los sectores pesca y acuicultura en Chile: capacidades de investigación y áreas de desarrollo científico-tecnológico

- Cooper, J. 1995. The Estuarine Index: A New Approach to Scientific Information Transfer. *Ocean & Coastal Management*. **25**: 103-141
- Cude, C.G. 2007. Oregon Water Quality Index: A tool por evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American water resources association*. **37**: 1-13.
- Dagne, D., Owens W., y Tchounwou P. 2005. Comparative assessment of the physico-chemical and bacteriological qualities of selected streams in Louisiana. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. **2**: 94-100.
- de Armas J., Rodríguez R., Zayas D., Fernández L., y López D. 2010. Parametrización oceanográfica en índices de calidad del agua. GEOCUBA Estudios Marinos. 1-8.
- Dinius, S. 1987. Design of a water quality index. Wainhouse Research. Bulletin. **23**: 5
- Dirección general del Territorio Marítimo y de Marina Mercantes (DIRECTEMAR)
Consultado: Septiembre, 2018
<https://www.directemar.cl/directemar/intereses-maritimos/p-o-a-l-programa-de-observacion-del-ambiente-litoral/programa-de-observacion-del-ambiente-litoral-p-o-a-l>
- Environmental Protection Agency. 1999. National Recommended Water Quality Criteria.
- Environmental Protection Agency. 2001. Parameters of water quality. Interpretation and standars

- Fernández, N., Ramírez, A. y Solano, F. 2004. Physico-chemical Water Quality Indices a comparative review. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*. 19-30.
- Folleto Informativo SPINCAM. 2015. Consultado: Septiembre, 2018.
http://www.spincam3.net/data/publicaciones/FolletoSPINCAM_ES_Web.pdf.
- Food and Agriculture of United States, 2015. "Fisheries and aquaculture statistics". Yearbook.
- Food and Agriculture of United States (FAO). 2016. La Pesca ilegal, no declarada y no reglamentada (INDNR)
- Furnas, M.J. 1992. The behavior of nutrients in tropical aquatic ecosystems. 29-65.
- Gray, J.S., 1997. Marine biodiversity: patterns, threats and conservation needs. *Biodiversity and Conservation*. **6**: 153–175
- Gupta A.K., Gupta S. K, y Rashmi S, 2003. A Comparison of Water Quality Indices for Coastal Water. *Journal of environmental science and health*. **38**:2711-2725.
- Gupta, I., Kumar, A., Singh, C., y Kumar, R. 2015. Detection and Mapping of Water Quality Variation in the Godavari River Using Water Quality Index, Clustering and GIS Techniques. *Journal of Geographic Information System*, **7**: 71-84
- Haward M. 2018. Plastic pollution of the world's seas and oceans as a contemporary challenge in ocean governance. *Nature Communications*. **9**: 1-2.
- Herrera-Silveira J.A. y Morales S.M. 2009. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in sotheast Mexico: Assessment of water quality,

phytoplankton and submerged aquatic vegetatin. *Marine Pollution Bulletin*. **59**: 72-86

- House, M. A. 1989. A water quality index for river management. *J. IWEM*, **3**: 336-344.
- Howarth R.W., Walker, D., y Sharpley, A. 2002. Sources of nitrogen pollution to coastal waters of the United States. *Estuaries*. **25**: 656–676
- Howarth R.W., 2008. Coastal nitrogen pollution: A review of sources and trends globally and regionally. *Harmful Algae*. **8**: 14-20
- INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras), 2011. Formulación del índice de calidad de aguas costeras para los países del proyecto SPINCAM. Documento metodológico.
- Jha, D.K., Devi, M.P., Vidyalakshmi, R., Brindha B., Vinithkumar N.V., y Kirubakaran R. 2015. Water quality assessment using water quality index and geographical information system methods in the coastal waters of Andaman Sea, India. *Marine Pollution Bulletin*. **100**: 551-561.
- Larrouyet, C. 2015. Origen, evolución y su implementación para el cuidado del planeta. (Trabajo final integrador). Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Argentina.
- Liou, Shiow-Mey & Lo, Shang-Lien & Wang, Shan-Hsien. 2004. A Generalized Water Quality Index for Taiwan. *Environmental monitoring and assessment*. **96**: 35-52.
- McCutcheon, S.C., Martin, J.L. y Barnwell, Jr., T.O. 1993. Water quality. *En: Handbook of hydrology*. D.R. Maidment (ed.). pp: 11.1-11.73. McGraw-Hill, New York. 264

- Ministerio del Medio Ambiente. Sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Consultado: Septiembre, 2018

<https://ods.mma.gob.cl/>

- Ministerio del Medio Ambiente. 2016. Clasificación de ecosistemas marinos chilenos de la zona económica exclusiva.
- Ministerio del Medio Ambiente. 2017. Natales obtiene la Certificación Ambiental de Excelencia. Consulta: Diciembre, 2018.

<http://portal.mma.gob.cl/natales-obtiene-la-certificacion-ambiental-de-excelencia/>

- Ministerio de Relaciones Exteriores. 2016. Decreto 49. “Crea consejo nacional para la implementación de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible”
- Ministerio Secretaría general de la presidencia. 2009. Decreto 144. “Establece normas de calidad primaria para la protección de las aguas marinas y estuarinas aptas para actividades de recreación con contacto directo”.
- Miravet, M. E., Ramírez, O., Montalvo, J., Delgado, Y., y Perigó E. 2009. Numerical and qualitative index to measure water quality in recreational Cuban coastal waters. *Serie Oceanológica*, 5.
- Müller, F., 2005. Indicating ecosystem and landscape organisation. *Ecol. Indicat.* 5: 280-294.
- Neary B., Cash S., Hébert S., Khan H., Saffran K., Swain L., Williamson D., y Wright R. 2001. Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI)

- Nordin, R.N, Pommen, L.W., Meays y C.L. 2009. Water Quality Guidelines for Nitrogen (Nitrate, Nitrite, and Ammonia). Overview Report Update. Ministry of Environment, Water Stewardship Division, Province of British Columbia.
- Organizaciones de las Naciones Unidas. 1987. Informe Brundtland Nuestro Futuro Común, elaborado por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo. 1987.
- Organización de las Naciones Unidas. Consulta: Septiembre, 2018
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. 2016. International Transport Forum
- Orozco, C., Pérez, A., Gonzáles, M. N., Rodríguez, F, y Alfayate, J. 2005. Contaminación Ambiental, Una visión desde la Química. Tercera edición, Thomson Editoriales Spain Paraninfo, S.A.
- Pauly, D., Christensen, V., Guenette, S., Pitcher, T.J., Sumaila, U.R., Walters, C.J., Dirk, y R.W., 2002. Towards sustainability in world fisheries. *Nature*. **418**: 689.
- Pérez, A. y Rodríguez, A., 2008. Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Rev. Biol. Trop. Int. J. Trop. Biol.* **56** (4), 1905-1918
- Pickard, G.y Emery, W. 1990. Descriptive Physical Oceanography. Pergamon Press. New York. **5**: 320

- Quino I., Ramos O., y Guisbert E. 2007. Determinación del límite de detección instrumental (Idi) y límite de cuantificación instrumental (Ici) en elementos traza de agua subterránea. *Revista Boliviana de Química*. **24**(1), 53-57.
- Riley, A. J., y Dodds, W. K. 2013. Whole-Stream Metabolism: Strategies for Measuring and Modeling Diel Trends of Dissolved Oxygen. *Freshwater Science*, **32**(1), 5669
- Samboni, N., Carvajal, Y., y Escobar, J. C. 2007. Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista de Ingeniería e Investigación*. **27**: 172-181.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. 2017. Anuario de la minería en Chile
- Smith, V.H. 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem. *Environ. Sci. Pollut. R.* **10**: 126-139
- Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Center for International Earth Science Information Network. Consultado: Septiembre, 2018
<http://sedac.ciesin.columbia.edu/>
- Spalding, M. D., Fox H. E., Allen G. R., Davidson N., Ferdana Z. A, Finlayson M., Halpern B. S., Lombana A. L., y Lourie S. A. 2007. Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience*. **57**:573–583
- Superintendencia del Medio Ambiente. 2017. Informe de Fiscalización Ambiental. Examen de información. CAP Planta Pellets.
- Sverdrup, H.U., M.W. Johnson y R.W. Fleming. 1942. The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology. pp: 1060. Prentice-Hall, Englewood, NJ.

- Torres, P., C. Cruz, y P. Patiño. 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. **8** (15): 79-94.
- van Andel, T.H. 1981. *Science at Sea. Tales of an old ocean*. p.186. W.H. Freeman and Co., San Francisco.

VI. ANEXO

6.1. Límites de detección de los métodos usados por el POAL.

Tabla 25: Límites de detección de cada parámetro en matriz de agua de mar.

Parámetro	Límite de Detección
Arsénico Disuelto	0,5 µg/L
Mercurio Disuelto	0,0005 mg/L
Cadmio Disuelto	1 µg/L
Cobre Disuelto	1 µg/L
Plomo Disuelto	2,5 µg/L
Nitrato	0,002 mg/L
Nitrito	0,002 mg/L
Amonio	0,003 mg/L
P-Fosfato	0,005 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	5 mg/L
Hidrocarburos Fijos	2,5 mg/L
Hidrocarburos Totales	2,5 mg/L
Especiación química PAH's	0,1 µg/L
Hidrocarburos Volátiles	0,1 mg/L
Coliformes fecales	1,8 NMP/100 mL
Oxígeno Disuelto	---